

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 30 (69) № 3 2019

Частина 1

**Київ
2019**

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Кузьменко Борис Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 10 від 20.06.2019 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук відповідно Наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 № 1714 (додаток 7)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2019

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Полищук М.Н. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АНТИГРАВИТАЦИОННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА	1
--	---

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Кологойда А.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ ВАЛИКІВ ТА БАРАБАНІВ.....	10
--	----

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Ieremenko O.I., Zubok T.O. SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF GRANULATION OF ENERGETIC WILLOW TREE.....	16
--	----

Кужельний Я.В. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ.....	23
--	----

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Skyrda I.I. THE BEHAVIOR-BASED APPROACH FOR REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SWARM CONTROL IN DYNAMIC ENVIRONMENT.....	28
--	----

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Кимстач О.Ю. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УТОЧНЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	34
---	----

Курчк V.V. GENETIC METHOD FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF THE POWER DISTRIBUTION NETWORKS.....	40
--	----

ПРИЛАДИ

Єгоров А.Д., Єгоров В.А., Єгоров С.А., Сінельніков І.Є. УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОДИКИ ОБРОБКИ ДАНИХ В ОПТИЧНИХ СПЕКТРОМЕТРАХ.....	46
---	----

Иценко А.И., Шевченко А.И., Богдан Г.А. КОНТРОЛЬ ОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕРИАЛАХ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	51
---	----

Цокота М.В. ФОТОРЕГЕНЕРАЦІЇ ХРОНІЧНИХ РАН ІЗ ВИПРОМІНЮВАННЯМ НИЗЬКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ.....	56
--	----

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бугайов М.В. ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ МАТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ЗІ СТРИБКОПОДІБНОЮ ЗМІНОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ В СКЛАДНІЙ СИГНАЛЬНІЙ ОБСТАНОВЦІ.....	61
---	----

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Булгакова І.В. ТЕХНОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКИ 3D-ТУРІВ СОЦІАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МІСТА БАХМУТА.....	66
Герасін О.С., Козлов О.В., Кондратенко Ю.П., Скакодуб О.С. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ГУСЕНИЧНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ.....	70
Говорущенко Т.О., Медзатий Д.М., Боднар М.А. КОМПЕНСАТОРНА МОДЕЛЬ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ SQUARE.....	80
Grygorchuk G.V., Oliynyk A.P., Grygorchuk L.I. THE RESEARCH OF THE MODEL DEFORMATION PROCESS OF ROTATING OBJECTS.....	86
Добаріна О.В., Беглов К.В. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС.....	91
Дудатьєв А.В., Войтович О.П., Миронюк В.В. МОДЕЛЬ ЗАГРОЗ СОЦІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ: СОЦІАЛЬНИЙ АСПЕКТ.....	97
Злепко С.М., Тимчик С.В., Криворучко І.О., Паламарчук М.І. ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРІВ: АНАЛІЗ СИТУАЦІЇ.....	102
Іродов В.Ф., Шаптала Д.Є. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА, РОЗТАШОВАНОГО У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ КАНАЛІ.....	107
Лазурчак Л.В., Вдовичин Т.Я., Жидик В.Б. МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА RAD STUDIO ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОРИСТУВАЦЬКИХ ПРОЕКТІВ	111
Лошак К.Р., Ложечніков В.Ф. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЗМІШУВАЛЬНОГО БАКА ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН.....	116
Мартынюк Е.А., Беглов К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ПВД.....	122
Нікулін Д.С., Ложечніков В.Ф. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЖН ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000.....	126
Орлов А.И. ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОЗДУХА С РАЗРАБОТКОЙ УЧЕБНОГО СТЕНДА.....	131
Повхан І.Ф. ЗАДАЧА АПРОКСИМАЦІЇ ВИБІРКИ ДИСКРЕТНИХ НАБОРІВ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	136
Полушкін Є.М., Лисюк Г.П. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ДЕАЕРАТОРІ	142
Приходько Н.В., Макарова Л.М., Кудін О.О. НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ РОБІТ У СУДНОБУДІВНИХ ПРОЕКТАХ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНОГО НОРМАЛІЗУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЖОНСОНА.....	148

Романюк О.Н., Абрамчук І.В., Кирилащук С.А., Романюк С.О. МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКУЛЯРНОГО СКЛАДНИКА КОЛЬОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНО-КОРЕКТНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДБИВНИХ ЗДАТНОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ.....	153
Сичило А.А., Беглов К.В., Лисюк Г.П. МОДЕЛЮВАННЯ АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т».....	158
Терешенко Д.О. АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ТРАКТУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА.....	164
Терлецький В.О., Лисюк Г.П. МОДЕЛЮВАННЯ АСР ТЕМПЕРАТУРИ ПАРУ ЗА РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ВВЕР 1000 МВт.....	170
Улицкая Е.О., Лисюк А.П., Костюкова О.Н. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ С РАЗРАБОТКОЙ УЧЕБНОГО СТЕНДА.....	175
Улицкая Е.О., Широкова А.Н. НАСТРОЙКИ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИМЕРЕ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КД.....	180
Furtat I.E., Furtat Yu.O. METHOD OF INCREASING AUTOMATED SYSTEMS' RELIABILITY AND EFFICIENCY USING ADAPTIVE USER INTERFACES AND DOMAIN MODELS BASED ON THE USERS' COGNITIVE CHARACTERISTICS AND WORK PROCESS' SPECIFICS.....	185
Chernetchenko D.V. A NOVEL METHOD OF PREPROCESSING AND SPIKE ENCODING OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL FOR MULTI-STABLE SPIKING NEURONAL NETWORKS APPLICATION.....	191
Чорнофостова К.В., Лисюк Г.П. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В БАЦІ ДЕАЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ІЗ ВВЕР-1000.....	200
Шадуря О.В. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАКЕТУ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ GEANTV ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ.....	206
Яременко В.С., Тарасенко М.В. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ БІБЛІОТЕК ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТОВИХ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	214

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Polishchuk M.N.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF FUNCTIONING
ANTIGRAVITATIONAL MOBILE ROBOT.....1

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Kolohoida A.V.

INVESTIGATION OF PROCESS OF TEXTILE SPIKED ROLLER
AND STRIPPING CYLINDER10

INDUSTRIAL ENGINEERING

Ieremenko O.I., Zubok T.O.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF GRANULATION OF ENERGETIC WILLOW TREE.....16

Kuzhelnyi Ya.V.

ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS RESEARCH METHODS
WITH A SINGLE ABRASIVE GRAIN DURING GRINDING.....23

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Skyrda I.I.

THE BEHAVIOR-BASED APPROACH FOR REMOTELY PILOTED AIRCRAFT
SWARM CONTROL IN DYNAMIC ENVIRONMENT.....28

ELECTRICAL ENGINEERING

Kimstach O.Yu.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF THE IMPROVED
MATHEMATICAL MODEL OF THE INDUCTION MOTOR.....34

Kyryk V.V.

GENETIC METHOD FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF THE POWER
DISTRIBUTION NETWORKS.....40

EQUIPMENT

Yegorov A.D., Yegorov V.A., Yegorov S.A., Synelnikov I.Ye.

IMPROVED METHODS OF DATA PROCESSING IN OPTICAL SPECTROMETERS46

Itsenko A.I., Shevchenko A.I., Bohdan H.A.

CONTROL OF HOMOGENEITY OF DISTRIBUTION OF DURABILITY
DESCRIPTIONS IN MATERIALS FROM NITRIDE OF ALUMINIUM
ON RESULTS OF ACOUSTIC MEASURING51

Tsokota M.V.

PHOTOREGENERATION OF CHRONIC RAS
WITH LOW INTENSITY RADIATION.....56

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Buhaiov M.V.

TIME-FREQUENCY MATRIX METHOD OF FREQUENCY HOPPING
SIGNALS DETECTION IN SOPHISTICATED SIGNAL ENVIRONMENT.....61

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Bulhakova I.V.

TECHNOLOGY AND METHODS OF DEVELOPMENT OF 3D-TOURS
OF SOCIAL OBJECTS OF BAKHMUT66

Gerasin O.S., Kozlov O.V., Kondratenko Yu.P., Skakodub O.S.

MATHEMATICAL MODELING OF MULTIPURPOSE CATERPILLAR MOBILE ROBOT
FOR VERTICAL MOVEMENT70

Hovorushchenko T.O., Medzaty D.M., Bodnar M.A.

COMPENSATORY MODEL OF SOFTWARE QUALITY BASED ON SQUARE MODEL.....80

Grygorchuk G.V., Oliynyk A.P., Grygorchuk L.I.

THE RESEARCH OF THE MODEL DEFORMATION PROCESS OF ROTATING OBJECTS.....86

Dobarina O.V., Beglov K.V.

AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM OF NPP POWER UNIT.....91

Dudatyev A.V., Voitovych O.P., Myronjuk V.V.

THE THREAT MODEL OF SOCIO-TECHNICAL SYSTEM: SOCIAL ASPECT97

Zlepko S.M., Timchik S.V., Kryvoruchko I.O., Palamarchuk M.I.

SELECTION OF INFORMATIONAL PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FOR EVALUATION
OF THE FUNCTIONAL STATE OF OPERATORS: ANALYSIS OF THE SITUATION.....102

Irodov V.F., Shaptala D.Ye.

MATHEMATICAL MODELING OF A TUBULAR GAS HEATER LOCATED
IN A HORIZONTAL CHANNEL.....107

Lazurchak L.V., Vdovychyn T.Ya., Zhydyk V.B.

POSSIBILITIES OF THE INTEGRATED ENVIRONMENTAL RAD STUDIO
FOR USE OF USEFUL PROJECTS111

Loshak K.R., Lozhechnikov V.F.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR
A CHEMICAL MIXING TANK.....116

Martynyuk E.A., Beglov K.V.

RESEARCH OF IMPACT OF NONLINEAR CONTROL VALVE ON THE QUALITY
OF TRANSIENT REGULATION PROCESSES IN HEATER OF HP.122

Nikulin D.S., Lozhechnikov V.F.

AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE PERFORMANCE OF THE TURBINE
DRIVEN PUMPS OF AN NPP POWER UNIT WITH A WWER-1000 REACTOR.....126

Orlov O.I.

STUDIES OF COMPUTER-INTEGRATED AIR FLOW MANAGEMENT SYSTEM
WITH THE DEVELOPMENT OF A TRAINING STAND131

Povkhan I.F.

THE PROBLEM OF APPROXIMATING A SAMPLE OF DISCRETE SETS
BY GEOMETRIC OBJECTS136

Polushkin E.N., Lysyuk H.P.

THE AUTOMATIC SYSTEM OF ADJUSTING OF PRESSURE IN A DEAERATOR.....142

Prykhodko N.V., Makarova L.M., Kudin O.O.

NON-LINEAR REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING THE EFFORT
OF WORKS IN SHIPBUILDING PROJECTS BASED ON THE JONSON
BIVARIATE NORMALIZING TRANSFORMATION148

Romanyuk O.N., Abramchuk I.V., Kirilashchuk S.A., Romanyuk S.O. MODELING OF A SPECULAR COMPOSITE COLOR BY USING ENERGY-CORRECT MODELS OF REFLECTIVE SURFACTIVENESS PROPERTIES	153
Sychylo A.A., Beglov K.V., Lysyuk H.P. THE STUDYING OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE.....	158
Tereshchenko D.O. AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE GAS-AIR TRACT OF DRUM-TYPE BOILER.....	164
Terletsy V.A., Lysyuk H.P. SIMULATION ASR OF THE TEMPERATURE OF THE STEAM AFTER THE REDUCTION COOLING INSTALLATION OF THE POWER UNIT NNP OF THE WWER 1000 MW	170
Ulitskaya E.O., Lysyuk H.P., Kostyukova O.N. THE COMPUTER INTEGRATED CONTROL SYSTEM OF WATER LEVEL WITH DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL STAND.....	175
Ulitskaya E.O., Shyrokov A.M. RELAY REGULATOR SETTINGS ON THE EXAMPLE OF NPP PRESSURE COMPENSATOR: PC SIMULATION MODEL	180
Furtat I.E., Furtat Yu.O. METHOD OF INCREASING AUTOMATED SYSTEMS’ RELIABILITY AND EFFICIENCY USING ADAPTIVE USER INTERFACES AND DOMAIN MODELS BASED ON THE USERS’ COGNITIVE CHARACTERISTICS AND WORK PROCESS’ SPECIFICS.....	185
Chernetchenko D.V. A NOVEL METHOD OF PREPROCESSING AND SPIKE ENCODING OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL FOR MULTI-STABLE SPIKING NEURONAL NETWORKS APPLICATION.....	191
Chornofostova K.V. Lysyuk H.P. INCREASING THE QUALITY OF REGULATION OF THE LEVEL IN THE BATTERY OF THE DEAERATOR OF NUCLEAR POWER PLANT WITH WWER-1000.....	200
Shadura O.V. PERFORMANCE OPTIMIZATION OF THE PHYSICS SIMULATION PACKAGE GEANTV BY THE USE OF THE GENETIC ALGORITHMS	206
Yaremenko V.S., Tarasenko M.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE LIBRARIES FOR THE CLASSIFICATION OF TEXT DATA USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	214

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/01>**Полищук М.Н.**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
АНТИГРАВИТАЦИОННОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

В работе изложено описание принципиально новой конструкции мобильного робота с генератором пневматической реактивной тяги, установленном на Кардановом подвесе. Приведены синтез конструкций исполнительных механизмов робота и математические модели их функционирования. Техническое решение направлено на компенсацию или полное преодоление гравитационной нагрузки мобильного робота произвольной ориентации при выполнении транспортных и технологических операций. В совокупности изложенные решения способствуют повышению надёжности удержания мобильных роботов на поверхности произвольной ориентации в пространстве при их эксплуатации в различных областях промышленности.

Ключевые слова: *мобильные роботы, шагающие механизмы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы.*

Постановка проблемы. Мобильные роботы произвольной ориентации в пространстве или роботы вертикального перемещения, известные в зарубежных публикациях как Climber Robot (альпинистский робот), предназначены для выполнения технологических операций в экстремальных условиях производства, в том числе и техногенных катастроф, опасных и даже неприемлемых для пребывания человека. Главным требованием к данному типу роботов является удержание их на поверхности перемещения. В экспериментальных образцах таких роботов, отмеченных ниже, данная задача решается созданием разнообразных подсистем сцепления робота с поверхностью перемещения. Здесь же предложен иной подход, а именно оснащение робота источником реактивной тяги нехимического происхождения, точнее пневматическим генератором аэродинамической подъемной силы, частично компенсирующей или полностью преодолевающей гравитационную нагрузку, не допуская при этом превращения мобильного робота в летательный аппарат, дабы обеспечить выполнение *контактных* силовых технологических операций при обслуживании различных промышленных объектов.

Анализ последних исследований и публикаций. В зависимости от топологии и физико-механических свойств поверхности перемещения мобильных роботов применяются различные

средства удержания робота под действием гравитационной нагрузки, а именно: вакуумные, механические, электромагнитные и основанные на явлении сухой или электрической адгезии [1, с. 37]. Однако, как и всем рациональным техническим решениям, каждому из них объективно свойственны преимущества и недостатки. Так, например, преимуществом вакуумных захватов мобильных роботов [2, с. 146; 3; 4, с. 347–349; 5, с. 4–8] является их инвариантность к поверхности перемещения. Однако подток воздуха в зону вакуума при существенных перепадах топологии поверхности перемещения снижает надежность удержания робота, поэтому здесь уместна модернизация вакуумных захватов, предложенная в работе [6, с. 60]. Механические подсистемы сцепления [7, с. 11–13; 8, с. 42–44] отличаются высокой надежностью, но их приводы требуют применения редукции, что снижает удельную мощность робота, для компенсации которой целесообразно использование комбинированных приводов [9, с. 288–292] или систем накопления и преобразования энергии движения [10, с. 116–118]. Высокое быстродействие и простота конструкции свойственны электромагнитным устройствам сцепления [11, с. 5; 12, с. 3], но преодоление силы гравитации за счет прилипания магнитов ограничивает применение данного средства только ферромагнитными поверхностями перемещения.

Развитием подсистем сцепления робота с поверхностью перемещения являются технические решения [13, с. 6–8], в которых используется технология сцепления посредством адгезии. Однако современные реализации указанного сцепления с поверхностью перемещения характеризуются крайне низкой скоростью перемещения робота вследствие медлительности эффекта адгезии, что пока препятствует их промышленному использованию. Таким образом, проблема преодоления гравитационной нагрузки или, по крайней мере, частичной ее компенсации для мобильных роботов, способных выполнять технологические операции в пространстве произвольной ориентации, остается актуальной.

Постановка задачи. Для повышения надежности удержания робота на поверхности произвольной ориентации наряду с использованием известных подсистем сцепления робота с указанной поверхностью необходимо оснастить робота источником противодействия гравитационной нагрузке, действие которого не только противоположно по направлению, но и постоянно совпадает с линией силы гравитации независимо от положения робота в пространстве. Кроме того, необходимо, чтобы создаваемая реактивная тяга, т.е. аэродинамическая подъемная сила, не превышала усилие сцепления робота с поверхностью перемещения за счет регулирования указанной тяги в зависимости от угла наклона робота к горизонту технологического пространства.

Изложение основного материала исследования. *Конструкция мобильного робота.* В отличие от вышеизложенного, предложен иной способ

противодействия гравитационной нагрузке робота произвольной ориентации, а именно использование аэродинамической подъемной силы, создаваемой генератором реактивной тяги нехимического происхождения. Именно в этом контексте (от лат. *contextus* – «соединение», «связь») применён термин антигравитация как способ только *противодействия* гравитационной нагрузке (но ни в коем случае не гашения её или экранирования), однако не превышающего усилия сцепления мобильного робота с поверхностью перемещения произвольной ориентации во избежание превращения робота в летательный аппарат.

Первоначально рассмотрим принципиально новую конструкцию мобильного робота с генератором пневматической реактивной тяги, установленном на Кардановом подвесе [14, с. 7–9]. На корпусе 1 (рис. 1) робота установлены шагающие механизмы – гибкие педипуляторы 2, снабжённые зубчатой трансмиссией 3 и ее приводом 4. Наличие гибких педипуляторов позволяет осуществлять произвольную ориентацию робота в пространстве. На окончаниях указанных педипуляторов, принцип работы которых подробно изложен в работе [15, с. 5–8], установлены вакуумные (или любого иного типа) захваты 5 с приводами 6 для сцепления робота с поверхностью перемещения произвольной ориентации. Кроме того, робот оснащён блоком питания 7, комплектом пневматической и гидравлической аппаратуры 8, а также контроллером управления 9. Однако принципиальным отличием мобильного робота является установка на Кардановом подвесе 10 с тремя степенями свободы генератора пневматической тяги 11.

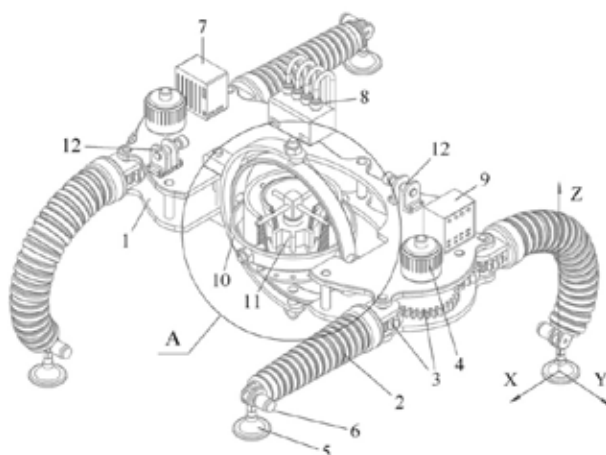


Рис. 1. Мобильный робот с генератором пневматической тяги

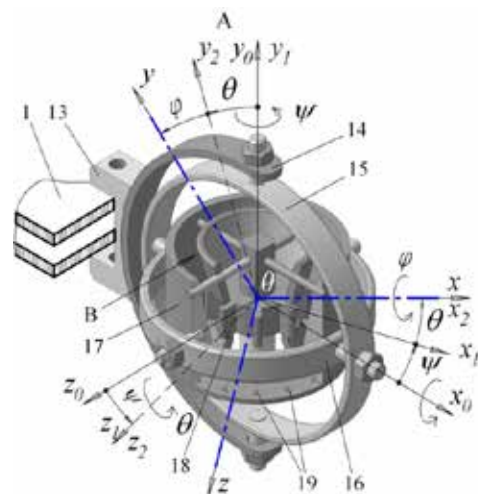


Рис. 2. Карданов подвес с тремя степенями свободы в виде углов поворота ψ , θ и ϕ

Устройства 12 для измерения угла наклона робота к горизонту выполнены в виде энкодеров – датчиков преобразования угла поворота в электрический сигнал, установленных на осях противовесов, всегда направленных под действием силы тяжести по направлению гравитационной силы.

Собственно, Карданов подвес 10, как показано выносным элементом «А» на рис. 2, установлен кронштейном 13 на корпусе 1 робота таким образом, что центры поворота его колец совпадают с центром масс робота. Подвес содержит неподвижное полукольцо 14 и два поворотных кольца – внешнее 15 и внутреннее кольцо 16, установленные на соответствующих им осях. На внутреннем кольце 16 с возможностью поворота закреплён пневматический генератор тяги 17 (компрессор), лопастной ротор 18 которого, будучи снабжён сервоприводом и автономным блоком питания, всасывает воздух через коническую полость «В» и нагнетает сжатый воздух во множество сопел 19. Истекая из сопел, поток сжатого воздуха создаёт аэродинамическую подъёмную силу, направленную противоположно силе гравитации. Совокупность сопел создаёт суммарную подъёмную силу, поток воздуха в сопле является ламинарным при средней скорости воздуха в сопле не более 1/3 скорости звука. Поскольку сам генератор тяги установлен с определённым смещением относительно центра Карданового подвеса, то возникающий при этом крутящий момент направляет ось генератора, а значит и создаваемый им поток сжатого воздуха, всегда по линии действия гравитационной силы тяжести и, естественно, противоположно последней. Силы сцепления мобильного робота с поверхностью перемещения зависят не только от физико-механических свойств поверхности перемещения, а прежде всего от нормальных реакций опор ног робота, которые, в свою очередь, определяются углом наклона робота к горизонту технологического пространства. Поэтому во избежание превышения реактивной тяги сил сцепления робота и недопустимости превращения его в летательный аппарат, а значит и утраты способности выполнять контактные силовые технологические операции, необходимо осуществлять регулирование производительности пневматического генератора тяги в зависимости от угла наклона робота к горизонту (рис. 3).

Такое регулирование осуществляется посредством связи указанного выше устройства измерения угла наклона робота с регулятором скорости сервопривода генератора тяги следующим образом. Сигналы энкодеров, пропорциональные углу



Рис. 3. Структурная схема блока управления

наклона робота, после дешифровки декодером и сравнения их в блоке суммирования поступают на регулятор скорости сервопривода генератора тяги, увеличивая или уменьшая производительность пневматического компрессора, и тем самым регулируют скорость истечения сжатого воздуха через множество сопел 19 (см. выше рис. 2). В итоге изменяется сила реактивной пневматической тяги в зависимости от углов наклона робота к горизонту, предупреждая тем самым возможность превышения сил сцепления робота с поверхностью перемещения. Таким образом повышается надёжность удержания робота на поверхности перемещения произвольной ориентации вне зависимости от типа захватов робота и физико-механических свойств топологии указанной поверхности. Для возможности проектной реализации подвеса генератора тяги выполним его кинематический и динамический анализ, а также расчёт подъёмной силы.

Кинематический анализ подвеса генератора тяги. Выберем в точке «О» (рис. 2) начало неподвижной системы координат $Ox_0y_0z_0$ и начало подвижной системы координат $Oxyz$, которая соединена с компрессором 17 и движется вместе с ним. Компрессор имеет три степени свободы и для описания его движения удобно пользоваться углами Эйлера–Крылова (ψ, θ, φ), которые дают возможность, осуществив три поворота на заданные углы, получить необходимое положение соединённой с компрессором подвижной системы координат $Oxyz$. Первый поворот на угол ψ , кото-

рый называется углом прецессии, осуществляем вокруг оси Oy_0 . При этом получаем систему координат $Ox_1y_1z_1$, соединённую с компрессором и характеризующую его положение после первого поворота. Следующий поворот на угол θ , который называется углом нутации, осуществляем вокруг оси Oz_1 и получаем систему координат $Ox_2y_2z_2$, также соединённую с компрессором. И наконец, третий поворот на угол φ , т.е. угол собственного поворота компрессора, осуществляем вокруг оси Ox_2 . В результате получаем окончательное положение компрессора, которое характеризуется системой координат $Oxyz$.

Записав для каждого из указанных поворотов матрицы B_1, B_2, B_3 направляющих косинусов осей относительно предыдущих систем координат и перемножив эти матрицы, получим матрицу B , столбцы которой являются направляющими косинусами осей Ox, Oy, Oz относительно неподвижной системы $Ox_0y_0z_0$:

$$B = B_1 B_2 B_3 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где обозначено: $a_{11} = \cos \theta \cos \psi$; $a_{13} = \sin \psi \cos \varphi + \sin \varphi \cos \psi \sin \theta$; $a_{21} = \sin \theta$; $a_{22} = \cos \theta \cos \varphi$; $a_{23} = -\sin \varphi \cos \theta$; $a_{31} = -\sin \psi \cos \theta$; $a_{32} = \sin \varphi \cos \psi + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta$; $a_{33} = \cos \psi \cos \varphi - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta$.

Каждому углу поворота ψ, θ, φ соответствует вектор угловой скорости:

$$\vec{\omega}_1 = \vec{j}_0 \frac{d\psi}{dt} = \dot{\psi} \vec{j}_0; \quad \vec{\omega}_2 = \vec{k}_1 \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \vec{k}_1; \quad \vec{\omega}_3 = \vec{i} \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} \vec{i}, \quad (2)$$

где $\vec{j}_0, \vec{k}_1, \vec{i}$ — единичные векторы, направленные соответственно вдоль координатных осей Oy_0, Oz_1, Ox . Записав выражения суммарной угловой скорости и выразив единичные векторы \vec{j}_0, \vec{k}_1 через единичные векторы подвижной системы координат $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, находим проекции

угловой скорости на оси подвижной системы координат:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\varphi} + \dot{\psi} \sin \theta; & \omega_y &= \dot{\theta} \sin \varphi + \dot{\psi} \cos \theta \cos \varphi; \\ \omega_z &= \dot{\theta} \cos \varphi - \dot{\psi} \cos \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Проекции вектора углового ускорения на оси подвижной системы координат вычисляем по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{d\omega_x}{dt} = \ddot{\varphi} + \ddot{\psi} \sin \theta + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta; \\ \varepsilon_y &= \frac{d\omega_y}{dt} = \ddot{\theta} \sin \varphi + \ddot{\psi} \cos \theta \cos \varphi + \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \varphi - \\ &- \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \cos \theta \sin \varphi \\ \varepsilon_z &= \frac{d\omega_z}{dt} = \ddot{\theta} \cos \varphi - \ddot{\psi} \cos \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin \varphi + \\ &+ \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \cos \theta \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты моделирования на рис. 4 а, б процесса поворота колец Карданового подвеса на углы ψ, θ за время $t(s)$ показывают наличие колебаний вследствие малого момента сил трения качения в опорах колец. Этот эффект однозначно указывает на необходимость применения демпферов для гашения колебаний. Гидравлические демпферы, осуществляющие преобразование энергии колебаний в силы жидкостного трения, давно применяются в пневматических приводах промышленных роботов, выпускаются серийно и как комплектующие изделия могут быть применены для уменьшения амплитуды колебаний колец подвеса.

Как видно на рис. 4 в, угол γ между вертикалью и радиус-вектором: центр подвеса \rightarrow центр масс компрессора постепенно смещается, и сопла компрессора занимают *вертикальное положение*, т.е. по линии гравитационной нагрузки, что и требовалось доказать установкой генератора тяги на Кардановом подвесе.

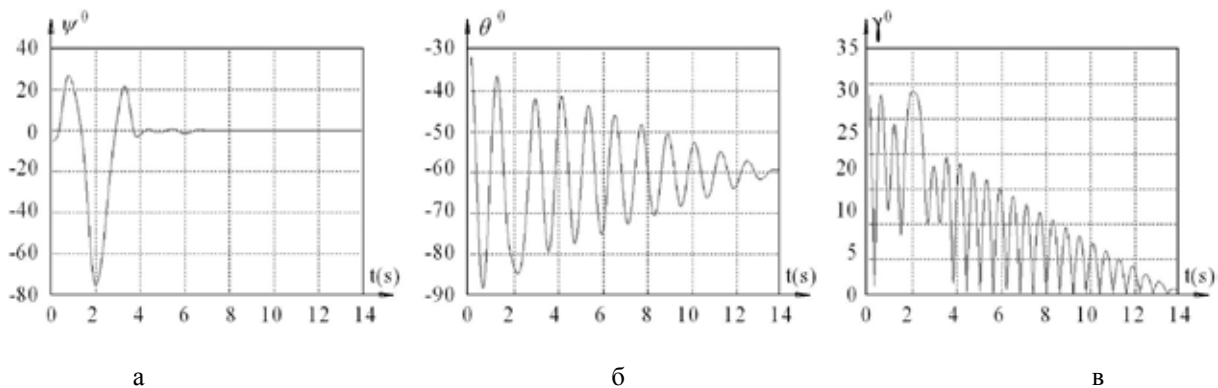


Рис. 4. Изменения углов поворота ψ, θ, γ колец Карданового подвеса

Динамический анализ подвеса генератора тяги. Для исследования движения подвеса генератора тяги используем уравнение Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (5)$$

где q_i – обобщённые координаты; \dot{q}_i – обобщённые скорости; Q_i – обобщённая сила, которая отвечает обобщённой координате q_i ; $T = T(q_i, \dot{q}_i, t)$ – выражение кинетической энергии механической системы. Для данного случая при $q_1 = \psi$; $q_2 = \theta$; $q_3 = \varphi$ система уравнений (5) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} &= Q_\psi \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} &= Q_\theta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= Q_\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

Механическая система подвеса состоит из трёх твёрдых тел, первое из них – это внутреннее кольцо 16 (рис. 2) диаметром d_b и массой m_b . Это тело имеет две степени свободы и его положение полностью определяет углы ψ и θ , а векторы угловой скорости указаны выше в выражениях (2). Поскольку оси системы координат $Ox_2y_2z_2$ являются для кольца 16 главными осями инерции, то выражение кинетической энергии в (5) для данного кольца будет иметь вид:

$$T_1 = \frac{1}{2} ((\omega_{x2})^2 I_{x2} + (\omega_{y2})^2 I_{y2} + (\omega_{z2})^2 I_{z2}). \quad (7)$$

Определив осевые моменты инерции кольца I_{x2}, I_{y2}, I_{z2} (выражения которых для краткости здесь не приводим) при условии $y_2 = 0$, поскольку кольцо вращается вокруг этой оси, получим формулу кинетической энергии:

$$T_1 = \frac{m_b d_b^2}{16} ((\dot{\psi})^2 (1 + \cos^2 \theta) + (\dot{\theta})^2). \quad (8)$$

Второе тело, т.е. генератор тяги (компрессор) имеет три степени свободы и его положение в пространстве целиком определяют углы ψ , θ , φ , а проекции вектора угловой скорости описывают формулы (3). Тогда для компрессора выражение кинетической энергии можно записать как для тела, которое осуществляет сферическое движение:

$$\begin{aligned} T_2 = \frac{1}{2} (\omega_x^2 I_x + \omega_y^2 I_y + \omega_z^2 I_z - 2\omega_x \omega_y I_{xy} - \\ - 2\omega_x \omega_z I_{xz} - 2\omega_y \omega_z I_{yz}), \end{aligned} \quad (9)$$

где I_x, I_y, I_z – осевые моменты инерции компрессора относительно осей системы отсчёта соединённой с компрессором; I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} – центробежные моменты инерции компрессора.

И наконец, третье тело – внешнее кольцо 15 (рис. 2), диаметр которого d_3 и масса m_3 . Это кольцо имеет одну степень свободы, оно осуществляет вращательное движение вокруг неподвижной оси кольца 14 и его положение полностью определяет угол ψ . Кинетическая энергия этого кольца равняется

$$T_3 = \frac{1}{2} (\dot{\psi})^2 I_3 = \frac{m_3 d_3^2}{16} (\dot{\psi})^2. \quad (10)$$

Таким образом, полная кинетическая энергия механической системы – Карданового подвеса с генератором тяги, равняется сумме найденных кинетических энергий отдельных тел:

$$\begin{aligned} T = \frac{m_b d_b^2}{16} ((\dot{\psi})^2 (1 + \cos^2 \theta) + (\dot{\theta})^2) + \frac{m_3 d_3^2}{16} (\dot{\psi})^2 + \\ + \frac{1}{2} (\omega_x^2 I_x + \omega_y^2 I_y + \omega_z^2 I_z - 2\omega_x \omega_y I_{xy} - 2\omega_x \omega_z I_{xz} - 2\omega_y \omega_z I_{yz}) \end{aligned} \quad (11)$$

Определив частные производные в данном выражении, запишем проекции силы тяжести \vec{G}_2 генератора тяги на оси неподвижной системы координат $Ox_0y_0z_0$ с учётом угла α – наклона мобильного робота к горизонту:

$$\vec{G}_2 = m_2 g (\vec{i}_0 \sin \alpha - \vec{j}_0 \cos \alpha + 0 \vec{k}_0), \quad (12)$$

а также проекции силы тяжести \vec{G}_2 на оси системы координат $Oxyz$, постоянно соединённой с компрессором:

$$\begin{aligned} G_{2x} &= m_2 g (a_{11} \sin \alpha - a_{21} \cos \alpha) \\ G_{2y} &= m_2 g (a_{12} \sin \alpha - a_{22} \cos \alpha) \\ G_{2z} &= m_2 g (a_{13} \sin \alpha - a_{23} \cos \alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично определяются проекции сил веса внешнего 15 и внутреннего 16 колец Карданового подвеса. Далее, предварительно определив момент силы \vec{G}_2 относительно центра «O» подвеса и проекции этого момента на оси системы координат $Oxyz$, соединённой с компрессором, для определения обобщённых сил Q_{qi} , которые входят в правые части уравнений Лагранжа 2-го рода (6), будем предоставлять поочерёдно каждой обобщённой координате возможное перемещение δq_i (т.е. малое перемещение, которое разрешается наложенными на механическую систему связями) и вычислять при этом возможную работу δA_{qi} . В итоге, после ряда преобразований, сведём задачу динамики Карданового подвеса с генератором тяги к решению системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = c_{11}D_1 + c_{12}D_2 + c_{13}D_3; \\ \frac{dv_2}{dt} = c_{21}D_1 + c_{22}D_2 + c_{23}D_3; \\ \frac{dv_3}{dt} = c_{31}D_1 + c_{32}D_2 + c_{33}D_3; \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = v_1; \\ \frac{d\theta}{dt} = v_2; \\ \frac{d\varphi}{dt} = v_3. \end{cases} \quad (14)$$

где обозначено $D_1 = Q_\psi - F_1 + \frac{\partial T}{\partial \psi}$; $D_2 = Q_\theta - F_2 + \frac{\partial T}{\partial \theta}$; $D_3 = Q_\varphi - F_3 + \frac{\partial T}{\partial \varphi}$; $\psi = v_1$; $\theta = v_2$; $\varphi = v_3$; $F_{1,2,3}$ – выражения частных производных по углам поворота колец подвеса с учётом моментов сил $Q_\psi, Q_\theta, Q_\varphi$. Эта система дифференциальных уравнений решена числовым методом, в частности, методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности при заданных начальных значениях углов Эйлера–Крылова ψ, θ, φ (см. выше, рис. 2 и рис. 4) и их производных по времени.

Расчёт силы генератора тяги. Объём методики расчёта этого определяющего параметра мобильного робота с генератором тяги превышает рамки данной публикации. Поэтому здесь ограничимся основными положениями её корректности и рабочими формулами для расчёта аэродинамической подъёмной силы, т.е. пневматической реактивной силы тяги, осуществляющей противодействие силе тяжести робота в контексте, указанном выше (см. 1-й абзац подраздела «Конструкция мобильного робота»).

Как известно, процесс адиабатного истечения воздуха можно описать системой уравнений в дифференциальной форме. Уравнение изменения количества движения (импульса) за элементарный промежуток времени при условии пренебрежения силами трения, а для газа это допустимо, имеет вид:

$$\rho u du = -dP, \quad (15)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; u – переменная скорость движения газа вдоль отверстия (сопла, см. рис. 2, поз. 19), м/с; P – давление газа, Н/м². Уравнение баланса энергии с учётом того, что при адиабатном процессе отсутствует обмен тепловым потоком с внешней средой ($dq=0$) [16]:

$$C_p dT + \mu u du = 0, \quad (16)$$

где C_p – теплоёмкость одного моля газа при постоянном давлении, Дж/моль; T – абсолютная температура, °Кельвина; μ – масса одного моля газа, кг/моль.

Уравнение Клапейрона–Менделеева, применяемое с определённой точностью и к реальным газам, имеет вид:

$$d\left(\frac{P}{\rho}\right) = \frac{R}{\mu} dT, \quad (17)$$

где $R=8,32$ Дж/(град.моль) – универсальная газовая постоянная. Причём из физики известно, что $R = C_p - C_v$, (C_v – теплоёмкость одного моля газа при постоянном объёме, Дж/моль). Решив равенство (17) относительно dT : $dT = d\left(\frac{P}{\rho}\right) \frac{\mu}{R} = d\left(\frac{P}{\rho}\right) \frac{\mu}{C_p - C_v}$ и подставив в уравнение (16), получим выражение:

$$\frac{k}{k-1} d\left(\frac{P}{\rho}\right) + u du = 0, \quad (18)$$

где отношение теплоёмкостей $k = C_p / C_v$ (для воздуха $k=1,4$). Интегрируем это дифференциальное уравнение:

$$\int_{u_1}^{u_2} u du = -\frac{k}{k-1} \int_{P_1/\rho_1}^{P_2/\rho_2} d\left(\frac{P}{\rho}\right) \text{ или } \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} = -\frac{k}{k-1} \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1}\right), \quad (19)$$

где u_1, P_1, ρ_1 – скорость, давление и плотность газа на входе в отверстие сопла соответственно; u_2, P_2, ρ_2 – скорость, давление и плотность газа на выходе из сопла. Из равенства (19) находим скорость u_2 (скорость u_1 очень мала и в дальнейшем ею пренебрегаем):

$$u_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}. \quad (20)$$

Исключив из уравнений (15) и (18) элемент $u du$, после преобразования получим дифференциальное уравнение, интегрирование и последующее потенцирование которого даст окончательно выражение:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^k = \frac{P}{P_1} \Rightarrow \frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k}. \quad (21)$$

Подставив выражение (21) в формулу (20), получим значение скорости газа u_2 на выходе из сопла согласно формуле Сен-Венана [17, с. 188–192]:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (22)$$

Массу газа, который вытекает через сопло за единицу времени, можно найти по известной формуле:

$$M = \rho_2 u_2 F_2, \quad (23)$$

где F_2 – площадь поперечного сечения сопла на выходе газа, м². Зная массу истекающего

газа M , можно вычислить подъёмную силу генератора тяги G_a :

$$G_a = Mu_2 + (P_1 - P_2)F_2. \quad (24)$$

Учитывая приведённые выше соотношения, формула (24) будет иметь окончательный вид:

$$G_a = \frac{2k}{k-1} \frac{\rho_a}{\rho_1} P_1 F_2 \left(1 - b^{\frac{k-1}{k}}\right) + (P_1 - P_a)F_2$$

при $b = \frac{P_a}{P_1} \leq b_{кр}$

$$G_a = \frac{2}{k+1} (b_{кр})^{\frac{1}{k}} P_1 F_2 + (P_1 - b_{кр} P_1) F_2 \quad \text{при } b=b_{кр}, \quad (25)$$

где P_a – атмосферное давление; $b_{кр}$ – критическое отношение давлений газа. Известно, что скорость звука в газе исчисляется по формуле $a = \sqrt{kP/\rho}$, тогда можно записать следующее выражение:

$$\frac{dF}{F} = \frac{du}{u} \left(\frac{u^2}{a^2} - 1\right). \quad (26)$$

Из равенства (26) видно, что, пока скорость истечения газа $u < a$, для роста скорости ($du > 0$) необходимо, чтобы сопло суживалось ($df < 0$). Скорость и будет возрастать до тех пор, пока не достигнет критического значения $u_{кр}$, которое равняется скорости звука при данных параметрах газа, то есть

$$u_{кр} = \sqrt{k \frac{P_2}{\rho_2}} = \sqrt{k \frac{P_1}{\rho_1} b^{\frac{k-1}{k}}}; \quad b = \frac{P_2}{P_1}, \quad (27)$$

На рис. 5 показаны результаты моделирования полученных зависимостей в среде MATLAB для сопла с отверстием диаметром $d_o=0,003$ м. Разумеется, эти данные требуют экспериментальной апробации, что является следующим этапом исследований. Однако даже в теоретической реализации полученные зависимости приемлемы для этапа технического проекта опытного образца

мобильного робота с генератором реактивной тяги. График рис. 5 а иллюстрирует зависимость скорости U (m/s) истечения газа от давления P . График рис. 5 б иллюстрирует вполне рентабельный расход сжатого воздуха для создания аэродинамической подъёмной силы, а на графиках рис. 5 в, где кривая G_1 иллюстрирует изменение силы тяги от скорости истечения сжатого воздуха, кривая G_2 – от разницы давлений, G_a – отображает суммарную силу тяги, можно установить необходимое число сопел, а именно:

если задать n отверстий диаметром d , то расход M_c сжатого воздуха и величину силы тяги G можно вычислить по формулам:

$$M_c = Mn \left(\frac{d}{d_o}\right)^2; \quad G = G_a n \left(\frac{d}{d_o}\right)^2, \quad (26)$$

где значение M и G_a выбираем из приведённых графиков в зависимости от давления в камере компрессора.

Так, например, пусть число сопел равно $n=50$ с отверстиями диаметром $d=0,004$ (м) и давлением в камере $P_1 = 6 \cdot 10^5$ (Па). Тогда из графика находим $G_a=5,2$ (N) и суммарная сила реактивной тяги G составит: $G = 5,2 \cdot 50 \cdot (0,004 / 0,003)^2 = 462$ (N). Этот частный пример свидетельствует о возможности промышленной эксплуатации мобильного робота массой не более 50 кг при условии регулирования силы реактивной тяги, как это описано выше. Следует учитывать, что увеличение числа сопел до сотен при одновременном уменьшении их диаметра, вплоть до десятых долей миллиметра, а это возможно применением лазерной технологии, способствует стабилизации положения мобильного робота произвольной ориентации вследствие обеспечения ламинарного потока в соплах и снижения турбулентности потока воздуха на выходе сопел генератора пневматической реактивной тяги.

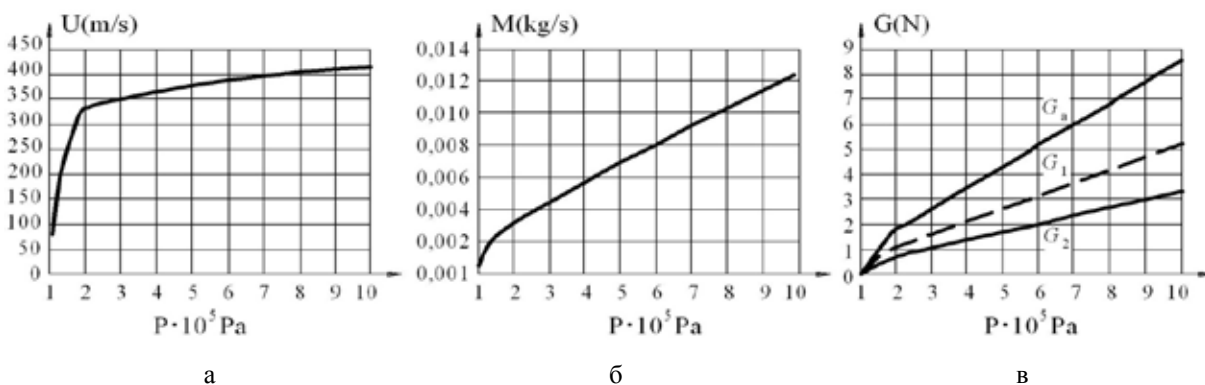


Рис. 5. Зависимости скорости истечения газа (а), расхода сжатого воздуха (б) и величины силы реактивной тяги (в) от давления истекающего воздуха

Выводы. Применение пневматического генератора тяги как средства противодействия гравитационной силе позволяет при регулировании силы тяги в зависимости от угла наклона робота к горизонту повысить надёжность удержания робота на поверхности произвольной ориентации, что, в свою очередь, предоставляет возможность уменьшения мощности приводов для сцепления робота с поверхностью перемещения.

Полученные аналитические зависимости предшествуют их экспериментальной апробации, однако на данном этапе исследований могут быть

использованы для технического проекта опытного образца мобильного робота с генератором пневматической реактивной тяги.

Предлагаемый подход синтеза мобильного робота произвольной ориентации позволяет за счёт уменьшения суммарной мощности приводов сцепления пропорционально уменьшить вес робота, а освободившейся энергетический ресурс направить на повышение эффективности выполнения как транспортных, так и технологических операций, выполняемых роботом в различных областях промышленности.

Список литературы:

1. Raju D. Dethе, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. International journal of engineering research and general science. Volume 2, issue 3. 2014. p. 37, fig. 6.
2. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Москва : Наука, 2001. 360 с.
3. Черноушко Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: исследования, разработки, перспективы. 2018. URL: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=f5c75bcf-2fa5-40e6-b067-4492f0c5ab22&print=1> (дата обращения: 09.02.2019).
4. Чашухин В.Г. Исследование параметров движения робота со скользящим уплотнением. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (2). С. 347–349.
5. Climber robot: Patent 5551525 US: Int. Cl. B62D 57/032. Appl. No 293498; filed. 19.08.1994; publ. 03.09.1996. 17 p.
6. Поліщук М.М. Модернізація вакуумного захвату мобільного крокуючого робота. Mechanics and Advanced Technologies. № 2 (80). 2017. С. 59–64.
7. Saunders A., Goldman D.I., Full R.J. and Buehler M. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII. Proc. of SPIE Vol. 6230. 2005. P. 11–13.
8. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg New York. 2012. P. 37–46.
9. Кузнецов Ю.М., Шибельский В.Ю. Робототехнічні системи і комплекси фармацевтичного та біотехнологічного виробництва: навчальний посібник / під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. Київ : ГНОЗІС, 2012. 335 с.
10. Polishchuk M., Oliinyk V. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. Mechanics and Advanced Technologies. 2018. № 1. С. 116–122.
11. Climbing vehicle with suspension mechanism: pat. 9428231 US: Int.Cl. B62D 55/00. Appl. № 179464; filed. 12.02.2014; publ. 30.08.2016. 26 p.
12. Патент РФ на полезную модель 101683 МКИ В62D 57/04. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям; заяв. 29.09.2010; опублик. 27.01.2011. Бюл. № 3.
13. Yehya M., Hussain S., Wasim A., Jahanzaib M. and Abdalla H. Cost Effective and Light Weight Unipolar Electro-adhesion Pad Technology for Adhesion Mechanism of Wall Climbing Robot. International Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 2, No. 1. 2014. P. 1–10.
14. Заявка № a201805661 на выдачу патенту UA МПК В62D 57/024. Антигравітаційний мобільний робот Поліщука; заявл. 22.05.2018. Київ : Укрпатент, 2018. 16 с.
15. Polishchuk M., Opashnianskyi M., Suyazov N. Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation. International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM). Vol. 8, No. 3. 2018. P. 1–11.
16. Истечение газов и паров через сопловые каналы. 2018. URL: http://ispu.ru/files/u2/book2/TD2_19-06/4.html (дата обращения: 31.07.2018).
17. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд. Ленинград : «Машиностроение», 1976. 505 с.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ АНТИГРАВІТАЦІЙНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

У роботі викладено опис принципово нової конструкції мобільного робота з генератором пневматичної реактивної тяги, встановленому на Кардановому підвісі. Наведено синтез конструкцій виконавчих механізмів робота й математичні моделі їх функціонування. Технічний розв'язок спрямований на компенсацію або повне подолання гравітаційного навантаження мобільного робота довільної орієнтації.

ентації під час виконання транспортних і технологічних операцій. У сукупності запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню надійності втримання мобільних роботів на поверхні довільної орієнтації в просторі за їх експлуатації в різних галузях промисловості.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF FUNCTIONING ANTIGRAVITATIONAL MOBILE ROBOT

The paper describes a fundamentally new design of a mobile robot with a generator of pneumatic jet traction mounted on a Cardan suspension. Synthesis of the robot execution mechanisms and mathematical models of their functioning are given. The technical solution is aimed at compensating or completely overcoming the gravitational load of a mobile robot of arbitrary orientation when performing transport and technological operations. The proposed solutions are aimed at increasing the reliability of retention of mobile robots on the surface of arbitrary orientation in space.

Key words: mobile robots, walking machines, robots of vertical movement, climbing robots.

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/02>

Кологойда А.В.

Чернігівський національний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ ВАЛИКІВ ТА БАРАБАНІВ

Проведено аналіз проблем, що виникають під час шліфування базової циліндричної поверхні та заточування голчастої гарнітури барабанів та валиків текстильних машин. Запропоновані нові способи обробки поверхонь зі схрещеними осями інструмента та деталі, де введення орієнтації інструмента дозволяє більш рівномірно розподілити припуск на обробку вздовж периферії шліфувального круга, що зменшує його знос та зменшує температуру у зоні обробки.

Ключові слова: шліфування, текстильний валик, голчаста фурнітура, шорсткість, моделювання.

Постановка проблеми. Під час виготовлення виробів з вовни на текстильних підприємствах наразі широко розповсюджені чесальні агрегати. Продуктивність прочісування вовни та якість вихідного продукту зумовлені точністю виготовлення циліндричних базових поверхонь барабанів та валиків текстильних машин, а також якістю заточки голчастої гарнітури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] наведено основні конструкції та складові частини чесальних агрегатів. Описано процес прочісування вовни та основні проблеми, що виникають під час цього процесу.

У роботах [3; 4] проаналізовано процес заточування голчастої гарнітури барабанів та валиків текстильних машин. Запропоновані нові способи обробки торцями брусків.

Однак у перелічених вище роботах не розглядаються операції щодо підготовки базової циліндричної поверхні барабанів та валиків текстильних машин до намотування голчастої гарнітури. Запропоновані способи обробки більш доцільно використовувати тільки на стадії чорнового вирівнювання голчастої гарнітури.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є аналіз наявних схем обробки барабанів і валиків текстильних машин та розробка нових способів шліфування гладкої циліндричної поверхні та голчастої гарнітури. А також визначення основних параметрів процесу обробки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Найбільш відомими виробниками текстильних машин є фірми “Vefama” (Польща) та “Ostir” (Італія). Вони випускають чесальні агрегати різних типорозмірів (рис. 1). При цьому діаметр робочого

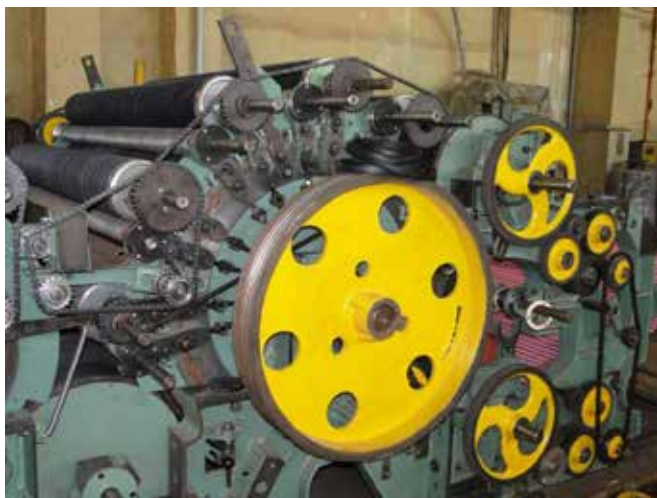


Рис. 1. Чесальна машина та голчаста гарнітура

та подаючого барабанів фірми “Vefama” може становити до 0,1 м, а фірми “Ostir” – до 3,5 м. Робочі валики виготовляють з діаметральним розміром до 240 мм.

Текстильні барабани та валики представляють собою базову циліндричну поверхню заданого діаметра (рис. 2), на яку намотується голчаста гарнітура. Базова циліндрична поверхня виконується у вигляді зварної конструкції, де труба 3 кріпиться на фланцях 2. Передача крутного моменту від приводу здійснюється віссю 1, на якій за допомогою двох шпонок 4 та гайок фіксуються фланці 2.

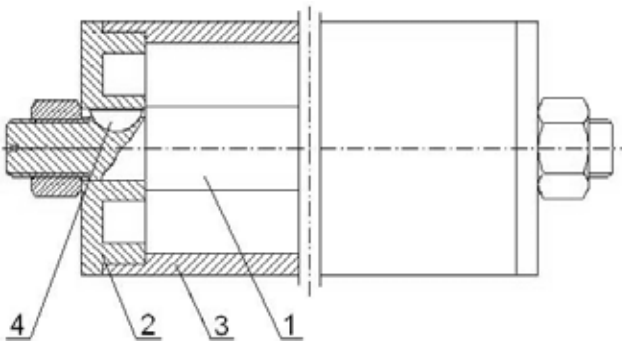


Рис. 2. Конструкція базової циліндричної частини текстильного валика

Тип гарнітури та її розміри визначаються властивостями матеріалу, що оброблюється, та призначенням робочого органу? на який вона кріпиться. Під час прочісування бавовняних та хімічних волокон використовують жорстку, напівжорстку та еластичну голчасту гарнітуру (рис. 3) [2]. Жорстка гарнітура умовно поділяється на пильчасту

(рис. 3, а), яка призначена для робочих органів попереднього прочісування, та цільнометалеву пильчасту стрічку (рис.3, б), яка призначена для робочих органів основної зони прочісування.

Напівжорстка (рис. 3, в) та еластична (рис. 3, г) гарнітури використовуються для обтягування шлямкових колосників чесальної машини. Напівжорстка гарнітура (рис. 3, в) виготовляється з голок з загостреним кінчиком, які розташовуються на еластичній основі, склеєної з 8-ми шарів тканини. Голки виготовляють з плоского дроту перерізом 0,6×0,25 мм. Еластична гарнітура (рис. 3, г) представляє собою голчасту стрічку. В основу встановлюються сталеві скоби – голки круглого перетину. Голки виготовляють зігнутими – з «коліном», за рахунок чого вони не чіпляють сусідні під час прочісування. Еластична гарнітура характеризується номером, який визначає діаметр голки, та густиною розташування голок.

На якість прочісування та кількість браку головним чином впливають геометрична точність твірної базової гладкої циліндричної поверхні та стан голчастої гарнітури.

За відхилення твірної барабану від прямої (опуклість, вгнутість тощо) між парою робочих елементів спостерігається нерівномірний зазор. Залежність кількості пороків після прочісування по довжині барабану від нерівномірності зазору між робочими елементами наведено на рис. 4. Похибки форми виникають за рахунок прогину барабану у центральній його частині за рахунок дії сили власної ваги, а також у результаті неякісного шліфування на кінцевих операціях його виготовлення.

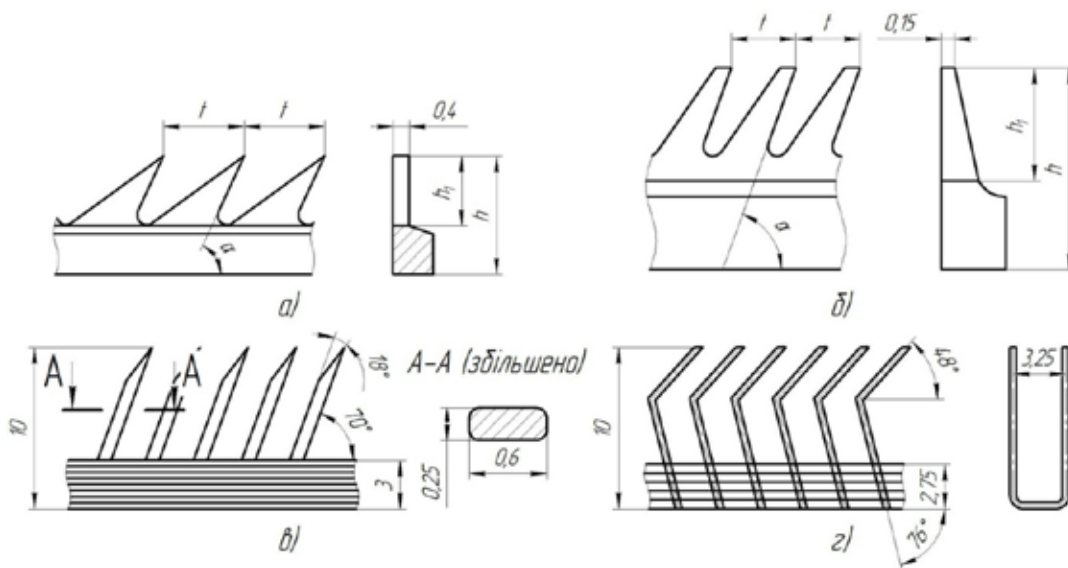


Рис. 3. Типи гарнітури чесальних машин

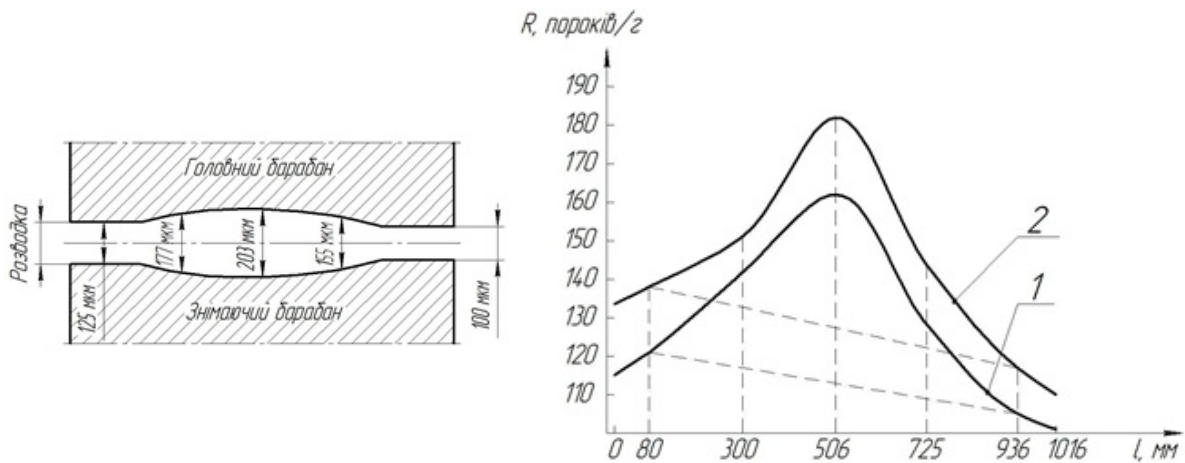


Рис. 4. Криві розподілу числа пороків у 1 г прочосу за довжиною твірної барабанів чесальних машин:
 1 – число пороків за сортування 5-II (середньозважена забрудненість 3%)
 2 – число пороків за сортуванні 5-I (середньозважена забрудненість 2,5%)

Робоча поверхня голчастої гарнітури характеризується відхиленням торця голки від площини та наявністю задирки на її кінчику (рис. 5). Під час роботи барабана та валика, у яких задирки виступають за зовнішній діаметр голки (рис. 5, а), відбувається розрив волокна. Задирка утворюється, якщо не правильно підібрані режими обробки, за рахунок оплавлення поверхневого шару голки і виносу розплавленого матеріалу на кінчик. За занадто малих швидкостях різання в процесі шліфування голка відхиляється від початкового положення, і рухаючись під час обробки за рахунок пружних сил, її торець набуває форми еліпсу (рис. 5, б).

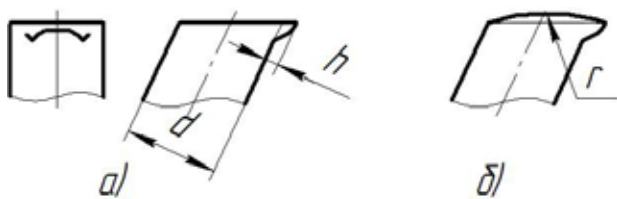


Рис. 5. Форма робочого кінця голки

З метою забезпечення необхідної точності та шорсткості шліфування базової циліндричної поверхні було запропоновано схему обробки зі схрещеними осями круга та деталі [5] (рис. 6). При цьому кут орієнтації інструмента визначається з умови завантаження максимальної ділянки периферії шліфувального круга.

Під час обробки за запропонованим методом деталь обертається навколо власної осі X_d з кутовою швидкістю ω_d . Круг обертається з постійною

кутовою швидкістю ω_i навколо осі X_i та здійснює рух подачі S . Перед обробкою інструмент повертають навколо осі Z_i на кут β , оптимальне значення якого визначають за формулою (рис. 7)

$$\beta = \arcsin \frac{l_x}{B - C} = \arcsin \frac{\sqrt{(R_d + t)^2 - R_d^2}}{B - C}, \quad (1)$$

де B – висота круга; C – довжина калібруючої ділянки круга; R_d – радіус деталі; t – глибина різання.

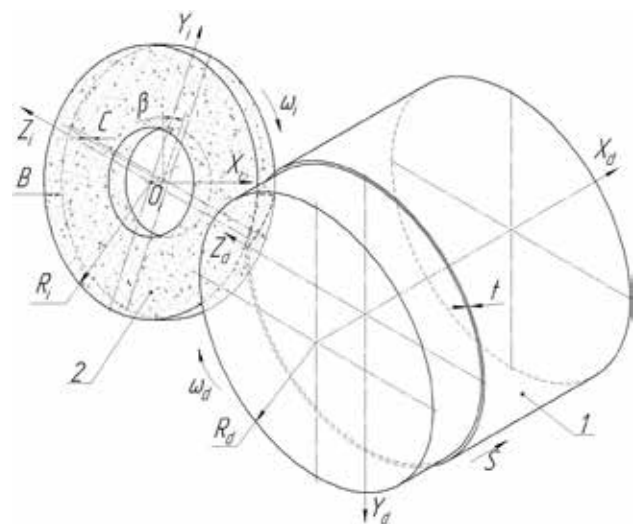


Рис. 6. Схема однопрохідного доводочного шліфування циліндричної поверхні валика текстильної машини

У знятті шару матеріалу з поверхні заготовки бере участь тільки периферія шліфувального

круга, при цьому за рахунок повороту інструмента збільшується довжина його лінії контакту з деталлю та забезпечується рівномірність розподілення товщини шару, що зрізується, вздовж різальної кромки. Для підвищення продуктивності швидкості обертання інструмента та деталі збільшують.

Для визначення параметрів формоутворення циліндричної поверхні валиків та барабанів за даним способом обробки проведено модульне математичне моделювання процесу обробки.

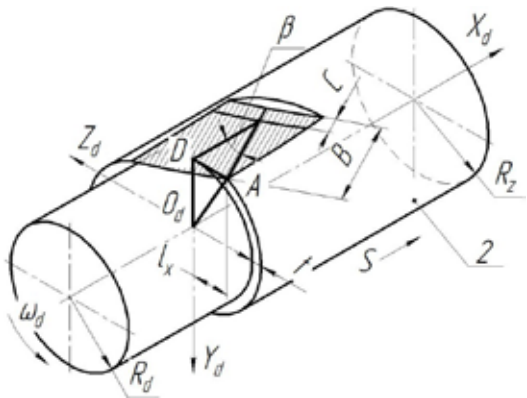


Рис. 7. Схема визначення кута орієнтації інструмента

Поверхня шліфувального круга може бути описана за допомогою циліндричного інструментального модуля [3]

$$Shk(x, \theta_i) = C_{x, \theta_i}^i = M1(x) \cdot M4(\theta_i) \cdot M2(R_i) \cdot e4, (2)$$

де $C_{x, \theta}^i$ – циліндричний модуль, який описує робочу поверхню шліфувального круга; $M1...M6$ – матриці перетворення координат, що забезпечують переміщення та поворот відносно координатних осей X, Y, Z [6]; $e4$ – одиничний радіус-вектор початку координат; $R_i = 100$ мм – радіус інструмента; $x = 0...B$ – лінійна координата точки на периферії шліфувального круга, що приймає значення від 0 до висоти інструмента $B = 25$ мм; $\theta_i = 0...360^\circ$ – кутова координата профілю круга.

Для опису обробленої поверхні необхідно інструментальну поверхню перенести до системи координат деталі. Це забезпечується введенням матриці переносу та модулів орієнтації і формоутворення.

$$Det(x, \theta_i, \theta_d) = C_{\theta_d}^\phi \cdot M^{nep} \cdot C_\beta^\alpha \cdot C_{x, \theta_i}^i \cdot e4 = M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \cdot M5(-\beta) \cdot M1(-B + C) \times M1(x) \cdot M4(\theta_i) \cdot M2(R_i) \cdot e4, (3)$$

де $M^{nep} = M2(-y_c)$ – матриця переносу; $C_{\theta_d}^\phi = M1(\theta_d \cdot p_z) \cdot M4(\theta_d)$ – модуль формоутворення;

ная; $C_\beta^\alpha = M5(-\beta) \cdot M1(-B + C)$ – модуль орієнтації; $y_c = R_i + R_d$ – відстань між осями інструмента та деталі; C – довжина калібрувальної частини круга; θ_d – кутовий параметр деталі (кут повороту навколо власної осі); $p_z = \frac{S}{2 \cdot \pi}$ – крок гвинтової лінії подачі; $S = 10$ мм – осьова подача деталі.

Профіль деталі визначається точками, де виконується умова [7]

$$\vec{V} \times \vec{n} = 0, (4)$$

у нашому випадку

$$\frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial x} \times \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \det(x, \theta, \theta_d)}{\partial \theta_d} = 0. (5)$$

Під час обертання точок лінії контакту навколо осі деталі отримуємо профіль обробленої поверхні (рис. 8). За перетину цього профілю осьовою площиною (рис. 9) можна визначити геометричну шорсткість поверхні, як відстань від точки перетину двох послідовних слідів поверхні шліфувального круга в осьовій площині деталі до номінального розміру обробленої поверхні.

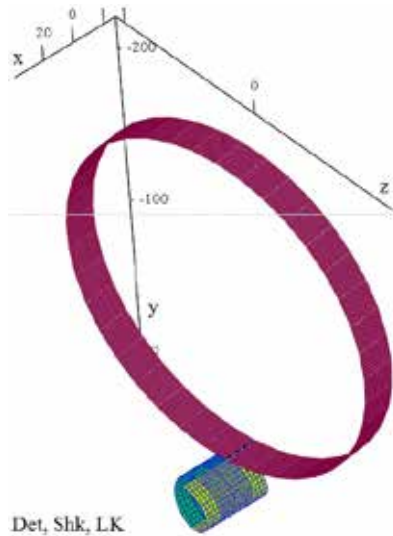


Рис. 8. Модульні 3D моделі деталі, інструмента та лінії їх контакту

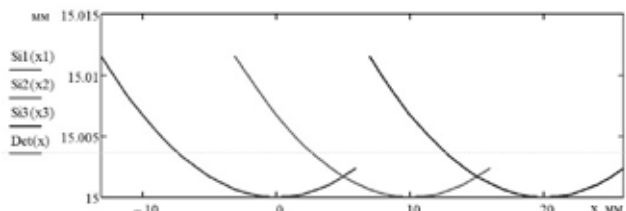


Рис. 9. Геометричний осьовий профіль поверхні деталі

З метою підвищення якості заточування голчастої поверхні барабанів та валиків текстильних

машин запропоновано новий спосіб обробки [8]. За цим методом (рис. 10), з метою повного завантаження профілю круга його повертаємо навколо осі Y_u на кут α . Значення кута орієнтації визначається із залежностей

$$M3(\theta_d \cdot p_z) \cdot M6(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \cdot M4(\alpha) \times \\ \times M3(C) \cdot M3(z) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R_u) \cdot \bar{e}4 - R_d = 0, \\ p_z = \frac{S_z}{2\pi}, y_c = R_u + R_d - t, \\ \frac{\partial \bar{r}(z, \theta, \theta_d)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{r}(z, \theta, \theta_d)}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \bar{r}(z, \theta, \theta_d)}{\partial \theta_d} = 0, \quad (6),$$

де R_u – радіус інструмента, z – поточна координата на профілі інструмента; C – величина калібруючої ділянки інструмента, y_c – міжосьова відстань, R_d – початковий радіус голчастої поверхні деталі, θ_d – кут повороту деталі відносно власної осі, t – припуск на обробку, α – кут орієнтації інструмента.

Подача на оберт визначається з умови максимально допустимої температури у зоні обробки, за якої структура матеріалу голок залишається незмінною.

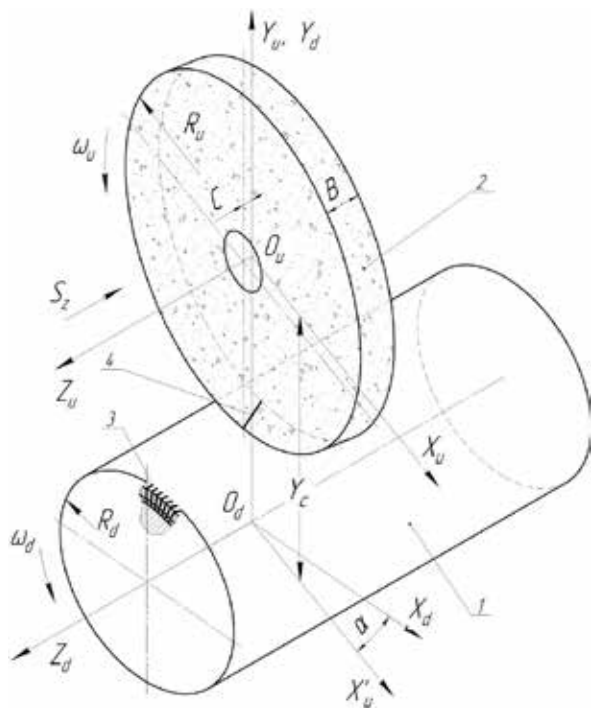


Рис. 11. Схема заточування голчастої поверхні

Радіус вектору поверхні обробленої деталі для запропонованої схеми можна записати у вигляді

$$\bar{r}(z, \theta, \theta_d) = M3(\theta_d \cdot p_z) \cdot M6(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \times \\ \times M4(\alpha) \cdot M3(C) \cdot M3(z) \cdot M6(\theta) \cdot M2(R_u) \cdot \bar{e}4. \quad (7)$$

Знаючи математичні моделі процесу формотворення для схеми обробки гладкої циліндричної та голчастої поверхонь текстильних валиків, можна визначити питому продуктивність процесу [3, 5]

$$Q(x) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} Vn(x, \theta) \cdot Shk(x) d\theta, \quad (8)$$

де θ_1, θ_2 – кути входу та виходу круга в деталь; $Vn(x, \theta)$ – добуток швидкості відносного руху на одиничну нормаль на поверхні круга в поточній точці.

Сили різання під час обробки можна визначити за методикою, запропованою Л.Н. Філімоновим [9]:

$$P^r = P_{co}^r + P_{mp}^r + P_{un}^r = \frac{\tau_s \cdot az \cdot b \cdot \sin(\beta + \phi_s)}{\sin(\beta) \cdot \sin(\phi_s)} + \\ + \frac{\pi \cdot \tau_s \cdot b^2 \cdot \mu}{12 \cdot \mu_s} + az \cdot b \cdot \rho_t \cdot V_w^2 \cdot \left(1 - \frac{\sin(\beta) \cdot \sin(\gamma)}{\cos(\beta - \gamma)} \right), \quad (16)$$

$$P^n = P_{co}^n + P_{mp}^n + P_{un}^n = \frac{\tau_s \cdot az \cdot b \cdot \cos(\beta + \phi_s)}{\sin(\beta) \cdot \sin(\phi_s)} + \frac{\pi \cdot \tau_s \cdot b^2}{12 \cdot \mu_s} + \\ + az \cdot b \cdot \rho_t \cdot V_w^2 \cdot \left(1 - \frac{\sin(\beta) \cdot \cos(\gamma)}{\cos(\beta - \gamma)} \right), \quad (17)$$

де P^r, P^n – тангенціальна і нормальна сили мікрорізання одним абразивним зерном; τ_s – напруження зсуву; b – ширина площини врізання; β – кут зсуву матеріалу деталі; ϕ_s – кут тертя в площині зсуву μ_s, μ – коефіцієнти тертя в площині зсуву і на задній поверхні кромки; ρ_t – густина матеріалу заготовки; V_w – швидкість шліфування; γ – передній кут ріжучої кромки.

Висновки. У роботі досліджено особливості процесу заточування базової циліндричної та голчастої поверхонь барабанів та валиків текстильних машин. Запропоновано схеми обробки для кожного типу поверхонь, при цьому за рахунок перерозподілу припуску вздовж різальної кромки досягається підвищення точності обробки, а зменшення температури у зоні різання у разі обробки голчастої гарнітури попереджає появу задирок на кінчиках голок.

Список літератури:

1. Оренбах С.Б., Кофман Э.Д., Худых М.И. Повышение эффективности работы чесальных машин. Москва, 1980. 176 с.
2. Севостьянов А.Г., Осьмин Н.А., Щербаков В.П. и др. Механическая технология текстильных материалов. Москва, 1989. 512 с.

3. Грабченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография). Чернигов, 2009. 356 с.
4. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Кологойда А.В. Особливості процесу заточки голок валків чесальних машин зі схрещеними осями інструмента та деталі. *Вісник Сумського державного університету. Науковий журнал*. 2010. № 4. С. 55–60.
5. Кальченко В.І., Кологойда А.В., Кужельний Я.В., Морочко В.В. Однопрохідне доводочне шліфування зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2018. №4 (14). С. 9–17.
6. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. Москва, 1986. 336 с.
7. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. Киев 1977. 192 с.
8. Спосіб заточування голчастої циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга : пат. 93394 Україна : МПК В24В 19/00. № 2014 04998 ; заявл. 12.05.14 ; опубл. 25.09.14, Бюл. № 18. 4 с.
9. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград, 1979. 248 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ ВАЛИКОВ И БАРАБАНОВ

Проведен анализ проблем, возникающих при шлифовании базовой цилиндрической поверхности и заточке игольчатой гарнитуры барабанов и валиков текстильных машин. Предложены новые способы обработки поверхностей со скрещенными осями инструмента и детали, при этом введение ориентации инструмента позволяет более равномерно распределить припуск вдоль периферии шлифовального круга, уменьшает его износ и температуру в зоне обработки.

Ключевые слова: шлифование, текстильный валик, игольчатая гарнитура, шероховатость, моделирование.

INVESTIGATION OF PROCESS OF TEXTILE SPIKED ROLLER AND STRIPPING CYLINDER

The problems arising from grinding the base cylindrical surface and sharpening the needle headset drums and rollers of textile machines was analysis. New ways of processing surfaces with crossed axes of the tool and part are proposed. The tool orientation allows to more evenly distribute the allowance along the periphery of the grinding wheel, reduces its wear and temperature in the treatment area.

Key words: grinding, textile roller, needle typeface, roughness, modeling.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

UDC 633.584.3 046.67

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/03>

Ieremenko O.I.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Zubok T.O.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF GRANULATION OF ENERGETIC WILLOW TREE

Areas of production of biofuels from energy willow are considered. The perspective type of granulator with a ring matrix is determined. The processes of granulation of the willow mass are investigated. The analysis of a complex of machines for the production of fuel pellets from energy willow is carried out. The expediency of processing of willow mass in fuel pellets on the equipment of domestic production is proved.

Key words: energetic willow tree, biopowered granules, processes, calculations, granulator, equipment.

Formulation of the problem. Until a certain time, fuels from different types of biomass did not compete with subterranean resources, in particular natural gas, oil, and coal. At present, the spread of biofuels induced by the problems of environmental protection, rising prices of subterranean energy sources [1, p. 68].

In order to achieve the status of energy independence of the country, the National Security and Defense Council of Ukraine dated April 28, 2014 adopted a decision “On the state of ensuring energy security in connection with the situation regarding the supply of natural gas to Ukraine”, where the government will implement the provisions of the Energy Strategy for the period until 2030 in order to develop renewable energy sources, including fuels from secondary biomass and energy crops. The Bioenergy Association of Ukraine has developed a concept [1, p. 69; 2, p. 4], according to which in 2030 energy crops are expected to produce 9.2 million tons of fuel equivalent. In Ukraine, unprocessed areas can grow fast-growing energy crops, for example, in areas up to 1 million hectares of energy willow (*Salix*), poplar (*Populus*), *Miscanthus*, etc. [2, p. 5].

Usually, the willow mass is crushed to a state of 10–70 mm of wood, dried up to 30–35% and sent to a boiler house, where the heat of combustion is about 12 MJ/kg. However, it is proved that for the effective combustion of biomass it is necessary to have dense products of the same shape and size to increase the contact of surfaces with air, increase the heat transfer and process automation in heating systems. Such

energy conversion is realized by using biofuel pellets and briquettes [2, p. 7; 3, p. 18].

At the same time, in the scientific papers and others concerning granulation of biomass, features of obtaining pellets from energy willow are not considered. The introduction of solid fuel production is often complicated by the limitation of their technical equipment. Therefore, there is a need for a more in-depth analysis of these problems.

Analysis of recent research and publications. Energy willow is a chimney-shaped with a short growing period (shore rotation tree). It is characterized by a high growth of the length of the stem (1.2–1.5 m/year), with a humidity of 12–15% gives a heat output of 18 MJ/kg, and also has a low chlorine content of < 0.1%, a relatively low ash content ≈ 1.9%, high melting point of ash > 1500°C, which minimizes the smelting and corrosion of the surfaces of the boiler equipment [3; 4].

Of the known species of willow (basket, white, grey, crack, goat, eared, almond, purpura, etc.), for the needs of energy are more often grown basket willow (*Salix Viminalis*) [4, p. 27].

The willow mass is harvested, as a rule, every 3 years with a forage harvester with a harvester for willow or special machines in the period from November to April at a humidity of about 50% [4, p. 28]. The one-step method of harvesting is to cut the willow with its simultaneous grinding, loading cod into vehicles. For the implementation of such technology, combines with productivity of up to 30 t/h are used by Claas, New Holland and

Krone, as well as machines for harvesting sugar cane with modified cutter machines. The two-stage method consists of two technological phases: during the first phase the plants are cut, while the second one is crushing. In some technologies, willow after cutting is pressed into packs for further processing [5, p. 230].

Typically, pellet granules with circular or flat matrices are used to obtain fuel pellets from biomass. The rotary rollers form the tension contact of the consolidation of the raw material on the surface of the matrix and push it through the ducts of the matrix under a pressure of up to 40 MPa [6, p. 252].

During the formation of granules in the matrix there are phenomena of intense friction and dry extrusion. As a result, the temperature rises to 100°C, and the lignin, contained in the raw material, glues particles in a density of up to 1200 kg/m³ granules and promotes the formation of a protective film on the surface of products [7, p. 95].

The purpose of the research is to increase the efficiency of the production of granular fuel from energetic willow in conditions of agrarian enterprises by studying the process of granulation and selecting a rational complex of technological equipment.

Research results. The comparative analysis of granulation processes shows that for the production of wood biomass pellets, including from willow, the working bodies of the machine operate with increased loads and have constructive differences, namely: reinforced granulation unit, two-stage V-belts or gearbox

transmission, forced loading raw materials for even distribution on rollers, etc.

In Ukraine, the engineering group ICK Group TM GRANTECH takes the leading position in the design and production of technological equipment for the production of biofuel and feed pellets [6, p. 253; 7, p. 98]. According to the results of the analysis, it is established that the most promising granulation tool for the typical production line of biofuel granules on the basis of agrarian enterprises is a press granulator model ГТ-304/55 Д with a ring matrix (Fig. 1).

The task of these researches involves the development of a methodology for calculating the main parameters of the granulation node. The maximum axial compression pressure of biomass P_{max} in the working area of the matrix on the curve aA (Fig. 2) is determined by the formula [7, p. 96]:

$$P_{max} = C(e^{a(\rho_{max} - \rho_0)} - 1), \quad (1)$$

where P_{max} – maximum axial pressure during granulation, MPa; C – parameter of the material, which determines the resistance of the compression mass, MPa; a – the parameter of the material, which depends on its structural and mechanical properties, m³/kg; ρ_{max} – the highest granulation density, kg/m³ ($\rho_{max} = k_{uy} \rho$, where ρ is the specified density of the granule, k_{uy} – the density coefficient for the granules is equal to 1.1–1.4; ρ_0 – initial density of wood biomass, kg/m³).

The pressure, determined by the formula (1), acts on the pushing stage and depends not only on

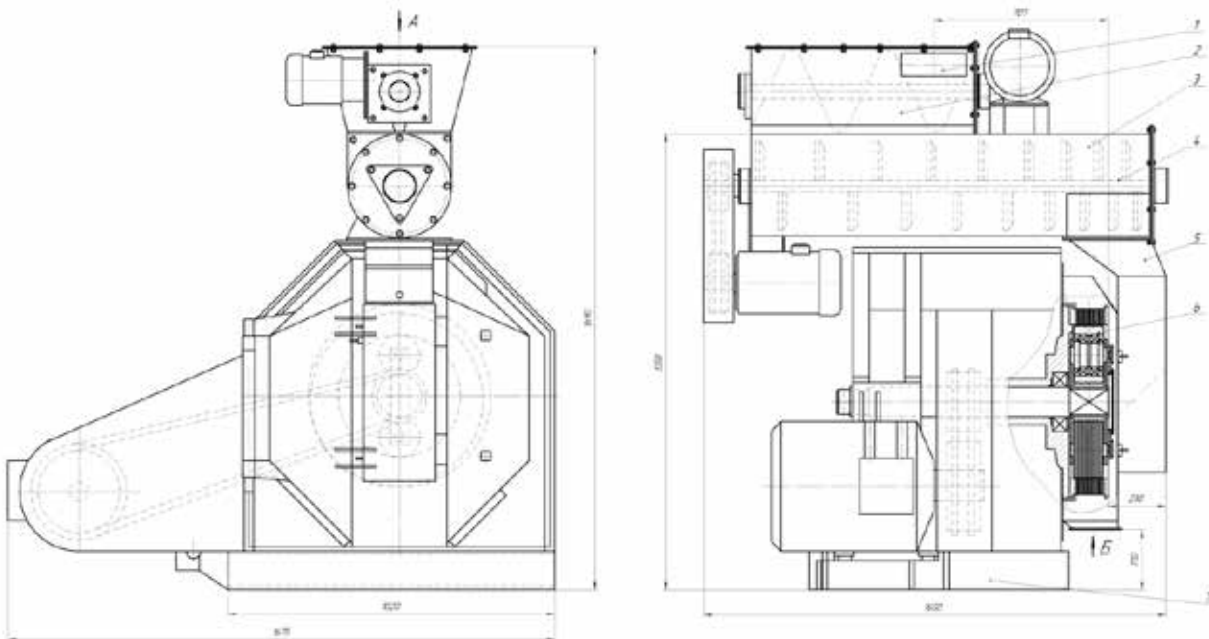


Fig. 1. General view of the perspective granulator ГТ-304/55 Д: 1 – body of the feeder; 2 – feeder-dispenser; 3 – body of the mixer; 4 – mixer; 5 – channel of supply of raw materials; 6 – point of granulation; 7 – frame

the counter pressure in the fillets, but also on the perforation coefficient of the matrix, therefore

$P_{max} = P_{ome} \left[1 + \frac{2}{3} (1 - k_n) \frac{f}{\xi \operatorname{tg} \alpha_n} \right]$, where P_{ome} – counterbalance of granules in the openings of the matrix, MPa; k_n – coefficient of perforation of the matrix; $k_n = 0.45-0.55$; ξ – lateral pressure coefficient; α_n – angle of the jumper between the holes of the matrix, degrees.

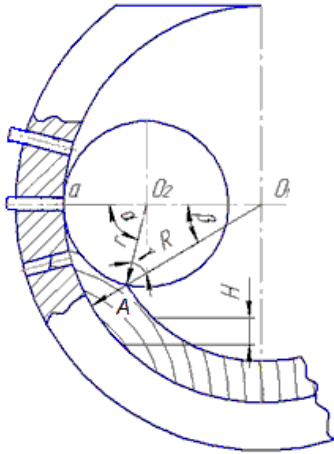


Fig. 2. Scheme to calculate parameters of the process of obtaining granules in a ring matrix

The area of the working surface of the matrix S_M on the condition of providing strong bonds in the fuel pellets is calculated by the formula [7, p. 97]:

$$S_M = \frac{q_{ns} t_{\dot{om}}}{k_n L \rho_{ome}} \lambda, \quad (2)$$

where q_{ns} – bandwidth of the compression knot, kg/s; $t_{\dot{om}}$ – time of raw material biomass in filer, s; at the granulation of wood biomass $t_{\dot{om}} = 16-18$ s; L – length of the technological opening (filer) of the matrix, m; $\rho_{ome} = (0.92-0.96) \rho_{max}$ – the density of the granule at the exit from the matrix channel, when there is some expansion of the material and a decrease in its density, kg/m³; λ – a coefficient that takes into account the uneven distribution of raw materials on the surface of the matrix. The value of λ is determined by the design of nutritional devices, for example, when using screw feeders $\lambda = 1.1-1.6$, lobed – $\lambda = 1.5-2.5$.

The number of filers in the matrix is determined in this way: $z_0 = \frac{S_M}{S_{ome}}$.

The height of the biomass layer H in the zone of its capturing by the roller, proceeding from the triangle AO_1O_2 , is preliminarily calculated according to the formula [7, p. 98]:

$$H = R - \sqrt{r^2 + (R-r)^2 + 2r(R-r)\cos\alpha}, \quad (3)$$

where R and r are the radii of the matrix and roll, m (see Fig. 2); α – angle of pressing.

In the absence of towing between the roller and the matrix of the arc of the rotation in the capture zone AB will be equal, that is, $\cup ar = \cup \beta R$, hence $\frac{\alpha}{\beta} = \frac{r}{R}$, and angle $\beta = \frac{\alpha r}{R}$. From the triangle AO_1O_2 we see that $\pi = (\pi - \alpha) + \beta + \gamma$, and $\alpha = \beta + \gamma$. Consequently, the angle $\gamma = \alpha - \beta$ or $\gamma = \alpha [1 - (r/R)]$.

To capture and compress the bulk wood biomass with a roller, it is necessary to have the angle between the radii of the roller (AO_2) and the matrix (AO_1) carried out through the capture point A does not exceed the friction angle of the biomass ($\varphi = 25-39^\circ$) on the surface of the roller. Consequently, the condition $\gamma \leq \varphi$ must be satisfied. Then the pressing angle α is determined from the condition:

$$\alpha \leq \frac{\varphi}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)}. \quad (4)$$

The need for a compact placement of the pressing rolls leads to the fact that the ratio between the radii of rollers and the matrix (r/R) varies within narrow limits. In designs with two rollers $r/R = 0.42-0.45$, with three – $0.4-0.42$.

Taking into account the obtained data, an expression was found for calculating the height of the biomass layer H :

$$H = R \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2r}{R} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right) \right] (1 - \cos\alpha)} \right]. \quad (5)$$

Width and radius of roller granulator conditioned by technical and technological parameters. In connection with this, the ratio ψ of the width of the roller to its radius r , as a rule, is $1.0-1.6$. Assuming that the width of the roll is equal to the width of the matrix, the radius of the matrix is determined:

$$R = \sqrt{\frac{S_M}{2\pi\psi}}. \quad (6)$$

The rotational speed of the matrix n (c^{-1}) is determined by the condition $n_{min} < n_m < n_{max}$:

$$n_{min} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R \sin\varphi}}, \quad n_{max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_p}{R_n b_\phi d \rho}}, \quad (7)$$

where g – acceleration of free fall, m/s²; σ_p – the destructive tension of separation in biomass of the filers, Pa; R_n – external radius of the matrix, m; b_ϕ – ratio of the length of the filers to its diameter d .

The average biomass displacement rate in a filer is determined by the formula:

$$v_{cp} = \frac{L}{t_{\dot{om}}} = \frac{P_{max} S_{ome}}{(F_{cm} \xi P_{ome} \rho_\kappa t_{\dot{om}})}. \quad (8)$$

The productivity of a granulator $Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$ with a ring matrix is determined by the formula [7, p. 101]:

$$Q = 2\pi b \rho z_o R^2 \beta (1 - \beta) \left(1 - \cos \frac{\gamma}{\beta} \right) \omega, \quad (9)$$

where b – the width of the woody biomass layer that is granulated, m; ρ – biomass density, kg/m³; z_o – number of pressing rolls, pieces; β – the ratio of the radii of the press roll to the matrix; γ – angle of natural slope of woody biomass, degree; ω – angular velocity of rotation of rollers, c⁻¹.

The power of Nrp for the granulation process is determined by the formula:

$$N_{ep} = 10^{-3} F_{mp} v_{cp} z_u, \quad (10)$$

where z_u – the number of openings in which the granulation proceeds simultaneously on the arc of the capture zone ($z_u = \frac{z_o z_o \alpha}{360}$, where z_o – number of compression rollers).

The N power to the granulator drive, without taking into account the drive of servicing mechanisms (feeder, dispenser, mixer, etc.) is determined by the formula:

$$N = \frac{(N_{ep} + N_{x.x})}{(\eta_{mp} \eta_{de})}, \quad (11)$$

where $N_{x.x}$ – power of the granulator idling, kW; $\eta_{mp} \eta_{de}$ – efficiency of transmission and electric motor at nominal load.

It is important to choose the length of the granulation channel to obtain granules of a given density. When pushing biomass in a filer, friction force F_{mp} occurs, which is defined as follows:

$$F_{mp} = f_{cm} N = f_{cm} \tau S_o = f_{cm} \cdot \tau \cdot p_n \cdot L = f_{cm} \cdot \xi \cdot P_{ome} \cdot p_n \cdot L, \quad (12)$$

where f_{cm} – static coefficient of friction of wood biomass; N – force of normal reaction, H; τ – tan-

gential tension from the lateral pressure in the filer, Pa; S_o – area of the lateral surface of the filers, m²; p_n – perimeter of the cross-section of the filers, m; ξ – lateral discharge ratio; $\xi = 0.4-0.45$; $P_{ome} = (0.1-0.4) P_{max}$ – counterbalance of granules in the openings of the matrix, kPa; L – length of the filers matrix, m.

Taking into account formula (12) and the prerequisite for friction, the value of the length of the matrix's technological opening must correspond to the following condition:

$$L \geq P_{max} S_o / (f_{cm} \xi P_{ome} p_n). \quad (13)$$

When pushing biomass into pellets, the relaxation of the stresses will end. Otherwise, due to the elastic aftereffect of the granule, when exiting the matrix, it will substantially expand and have insufficient strength. Taking into account the given productivity, the average rate of movement of the pellet over the filament v_{cp} , determines the length of the channel L_{pel} under the relaxation conditions:

$$L_{pel} = v_{cp} t_{pel}, \quad (14)$$

where t_{pel} – the required period of pelleting time in the filer for relaxation, s.

Consequently, for the effective implementation of the process of forming fuel pellets, the constructive length of the matrix filer should correspond to the following condition: $L \geq L_{pel}$.

The analysis shows that the main factors of the parameters of the granulation node are the diameter d and the length L of the matrix opening, the coefficient of friction k_{mp} of biomass about the inner surface of the filer. Several factors are secondary, in particular the diameter of the roller D_p , the angle of the chamfer α . According to the results of the research, graphic dependences of the process criteria on the size of the apertures of the matrix were constructed (Fig. 3).

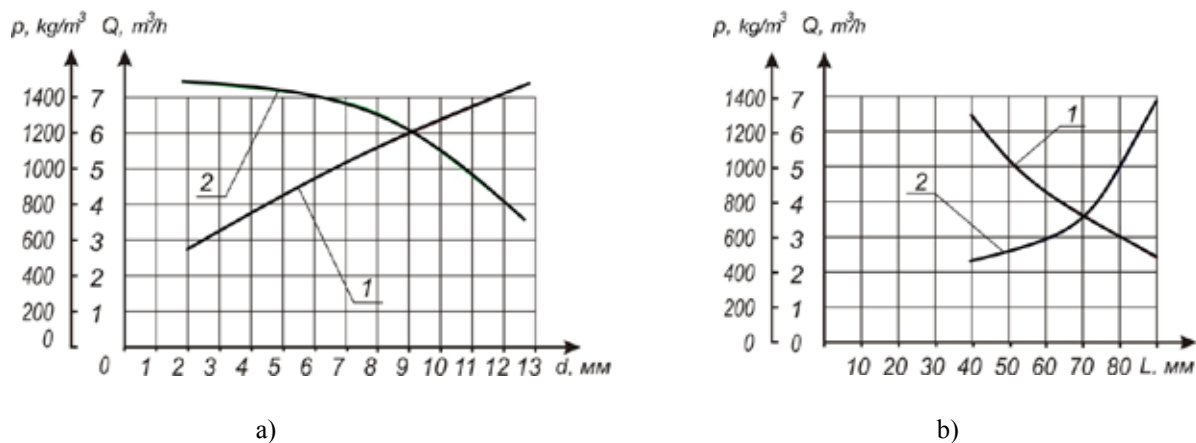


Fig. 3. Dependences of the productivity Q of the granulator (1) and the density of the granules ρ (2) on the parameters of the channel of the matrix: a – diameter d ; b – length L

The best-known experience of California Pellet Mill [6, p. 167] suggests that when the diameter of the die is from 6 mm to 8 mm (this is the most common diameter of the pellet), the length of the forming part of the channel should be 40–45 mm. Moreover, the quality of the granules with a diameter of 6 mm is higher than 8 mm.

The analysis of technology for the production of fuel pellets from willow chips has allowed to determine the main processes, namely: drying up to 10–12%, final grinding to sawdust 1–5 mm, granulation, cooling from $\approx 100^{\circ}\text{C}$ to $\approx 40^{\circ}\text{C}$, sifting, warehousing.

For agro-industrial complex it is expedient to use flexible mini-lines with the composition of domestic machines for the production of granular biofuels, which ensure implementation of fuel potential and needs of the economy in thermal energy. The well-known scheme of the technological line (Fig. 4) envisages introduction of modern technologies of willow pelleting on the basis of agricultural enterprises. In the design process, favorable technological aspects are determined according to certain technical and economic criteria. For the production of 1 ton of fuel pellets 4–5 m^3 of willow mass in the form of chips of natural moisture is required.



Fig. 4. Technological scheme of the mini-line production of fuel pellets from energetic willows:
 1 – receiving hopper; 2 – hammer crusher;
 3 – intermediate bunker; 4 – dispenser; 5 – mixer;
 6 – press granulator GT-304 D; 7 – belt conveyor;
 8 – cooler GTO-0.6; 9 – vibration sieve GTII-1;
 10 – cyclone; 11 – fan; 12 – control panel;
 13 – filters; 14 – platform

Willow cod from the storage place is delivered to a convection dryer, which may be type of tape, drum (for example, series СВУ-1.5), sectional shovel (for example, series ГТСК-0.6 of the firm ICK Group TM GRANTECH), etc. The advantages of domestic dryers are simplicity of design, versatility and reliability in work. For the process of drying, is used a mixture of air with flue gases from 150°C to 300°C , which are released when burning pellets of their own production.

The crushing of cod is carried out in a hammer crusher (for example, ГТДРМ -0.7, КДУ-2, ДМ-Ф-1, ДМБ-М) from the sizes of 20–70 mm to the size of sawdust particles of 1–5 mm. The effectiveness of the subsequent granulation process depends on the fractional composition of the raw material. In the hammer crushers, the degree of grinding is very high (reaches 20–30), and the specific energy consumption for crushing is lower than in other types of crushers. Hammer crushers differ in simplicity of construction, high productivity, lower in 3–5.5 times the cost per unit of output than in roller crushers. In hammer crushers, the power of an electric motor is lower by 14–27%.

Granulation of the prepared willow mass is carried out using a press granulator of the model GT-304/55 D with a ring matrix, investigated in this work. In the openings of the matrix under the action of biomass rollers, it is sealed under high pressure up to 40 MPa. Also, in the formation of granules there are physical phenomena of dry diffusion, which are accompanied by intense friction. As a result, the temperature rises to 100°C , which provides the separation from wood biomass lignin, which serves as a connecting agent and glues particles in densely packed up to 1200 kg/m^3 fuel pellets and contributes to the formation of a protective film on their surface. Then soft and hot granules are directed to the cooling process [6, p. 168; 8].

For the possibility of transportation and storage, the pellets are cooled to 40°C with air in countercurrent coolers (for example, a GTO-0.6 series). During cooling, lignin hardens on the surface of the granules, which gives them strength and contributes to the preservation of the shape.

Further, the granules are sifted on the vibration sieve (for example, a series of GTII-1) to separate the fine fraction and non-liquid materials, which are returned to re-granulate or used as fuel in the heat generator of the dryer. Suitable fuel pellets are sent to the warehouse of finished products [8].

Conclusions. 1. Taking into account the scientific and production achievements of foreign leading companies in the field of solid biofuel bioenergy

and the fuel potential of energy crops in Ukraine to 9 million tons, the expediency of introducing production of fuel pellets from energy plantations, including fast growing varieties of willow, poplar, acacia etc., for obtaining heat and power autonomy at the regional level.

2. The analysis of technologies of cultivation and harvesting of energetic willow varieties, such as *Salix Viminalis*, *Salix Wilhelm*, *Salix alba*, confirms the effectiveness of this direction of domestic agricultural machinery, including in the climatic zones of the forest-steppe and the northern steppe zone. The fuel value of energetic willow does not cause doubt, namely: the calorific value of fuel granules from the willow mass at a humidity of 10–12 % reaches 18 MJ/kg; low chlorine content < 0.1%, low ash content \approx 1.9%, high melting point of ash > 1500°C make insignificant slipping and corrosion of surfaces of heating installations.

3. Advantages of fuel pellets from energetic willow relative to traditional types of fuels:

- differ from the firewood with greater dryness (8–12% versus 20–40%) and the density of products (over 1000 kg/m³), which provides a higher calorific value to 18 MJ/kg against 10–15 MJ/kg;

- do not smell unlike subterranean types of fuel;
- do not self-ignite when temperatures rise, not explosive;

- high bulk density (about 650 kg/m³) of granules does not require large areas, and the volume under pellets is five times smaller than that of coal, with the same heating;

- the efficiency of the effective pellet boiler reaches 90%, which is significantly higher than coal (up to 75%) and wood – 40–50%;

- due to the small size, uniform shape, thickness and consistency of products, the processes of loading, mixing and combustion of fuel pellets are subject to automation, and the stability of their properties contributes to the exact dosage in heating installations;

- in emissions from burned granules virtually no sulfur, and carbon dioxide emission is lower in 10–50 times than in other types of solid fuel;

- the ash remaining in the pellet combustion is used as fertilizer;

- in the production of willow pellets, about 20–28% of electricity is consumed from their heat and energy output;

- fuel pellets are renewable environmentally friendly products, and the ever-rising energy sources of the subsoil have a limit to exhaustion.

4. It has been determined that for granulation of the prepared willow mass it is expedient to use

devices with circular or flat matrices. The granular nodes of the matrix type relate to mechanisms of continuous action. The technically positive aspect of the nodes is the absence of an idling speed of the actuators and their work at steady speeds, which leads to minimal action of inertial forces. A comparative analysis of rotary matrix press rollers, in particular such firms as CPM Europe (the Netherlands), Munch, Salmatec (Germany), GENERAL DIES (Italy), ICK Group TM GRANTECH (Ukraine–Germany), OGM (Lithuania), etc., indicates that the promising granulation tool for the production of pellets from the willow mass in the economy is domestic granulator model ГТ-304/55Д with an approximate productivity of 500 kg/h, used as an object for studying the granulation process.

5. Increasing the pressure up to 40 MPa when biomass propagates through the matrix openings strengthens the granules by eliminating air pores and voids, as well as increasing the area of contact between the particles, which results in the growth of molecular adhesion forces. After gaining granules without porous state, further increase of pressure becomes ineffective. The strength of the granules increases with the increase in the duration of extrusion, that is, the length of the filter must meet the condition: $L \geq L_{pen}$. The quality of the pellets depends on the degree of grinding and moisture of the willow mass.

It is determined that the main factors of the parameters of the granulation node are the diameter d and the length L of the matrix opening, the coefficient of dry friction mass on the inner surface of the filter. According to the results of the research, graphic dependences of the main criteria of the process on the dimensions of the matrix apertures are constructed.

6. According to the analysis of technological lines, it was determined that for the production of fuel pellets from energy willow in the conditions of the economy it is expedient to use universal lines of low power up to 1 t/year equipped with a set of equipment of the domestic manufacturer. High efficiency indicators were obtained during operation of the mini complex for granulating ГТЛ-304 of ICK Group TM GRANTECH. Basic equipment of the complex: receiving hopper; crusher ГТДРМ-0.7; press granulator ГТ-304/55Д; cooler ГТО-0.6; sifter ГТЛ-1; control system. Productivity of the line up to – 500 kg/h, specific energy consumption – 390–420 Joule per 1 kg of pellets, the required production space for the complex is 11 m² (5.0 x 2.2) m [8].

References:

1. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Кучерук П.П., Олейник Е.Н., Трибой А.В. Биоэнергетика в Украине: Современное состояние и перспективы развития. Часть 1. *Промышленная теплотехника*. 2015. Том. 37, № 2. С. 68–76.
2. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Трибой О.В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. *Аналітична записка БАУ № 10*. 2014. 33 с.
3. Роїк М.В., Гументик М.Я., Мамайсур В.В. Перспективи вирощування енергетичної верби для виробництва твердого біопалива. *Біоенергетика*. 2013. № 2. С. 18–19.
4. Енергетична верба – екологічно чисте біопаливо XXI століття. *Новини агротехніки*. 2012. № 1. С. 26–28. URL: <http://www.salix-energy.com> (Last accessed: 13.10.2017).
5. Думич В. Технології збирання верби. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. праць. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*, 2014. Вип. 18 (32), кн. 2. С. 228–234.
6. Єременко О.І., Халецький О.В., Чорний Р.М. Методичні основи розрахунку параметрів пресувального вузла гранулятора. *Науковий збірник «Вісник Степу»*. Кіровоград: КОД, 2013. Вип. 9, ч. 2. С. 165–170.
7. Дубровін В.О., Єременко О.І., Виговський С.М., Дженджера В.Ю., Лук'янець В.О. Техніко-технологічні передумови гранулювання біомаси на паливо. Міжвід. темат. наук. збірник *«Механізація та електрифікація с.-г.»*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2014. Вип. 99, т. 2. С. 94–102.
8. Технології і техніка для виробництва гранульованого біопалива URL: <http://www.ick.ua> (Last accessed: 07.05.2019).

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ГРАНУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЕРБИ

Розглянуті напрями виробництва біопалива з енергетичної верби. Визначено перспективний тип гранулятора з кільцевою матрицею. Досліджено процеси гранулювання вербової маси. Проведено аналіз комплексу машин для виробництва паливних гранул з енергетичної верби. Доведена доцільність переробки вербової маси у паливні гранули на обладнанні вітчизняного виробництва.

Ключові слова: енергетична верба, біопаливні гранули, процеси, розрахунки, гранулятор, обладнання.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИВЫ

Рассмотрены направления производства биотоплива из энергетической вербы. Определен перспективный тип гранулятора с кольцевой матрицей. Исследованы процессы гранулирования вербовой массы. Проведён анализ комплекса машин для производства топливных гранул из энергетической вербы. Доказана целесообразность переработки вербовой массы в топливные гранулы на оборудовании отечественного производства.

Ключевые слова: энергетическая ива, биотопливные гранулы, процессы, расчеты, гранулятор, оборудование.

Кужельний Я.В.

Чернігівський національний технологічний університет

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ

Проаналізовано методи дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Наведено основні фактори, які впливають на процес мікрорізання. Розглянуто результати експериментальних досліджень та моделювань процесів різання. Зображено 3D модель різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Наведені епюри навантаження від різальних та деформуючих кромки абразивного зерна.

Ключові слова: процес різання, 3D модель, абразивне зерно, шліфування, моделювання.

Постановка проблеми. Для забезпечення необхідних параметрів точності та якості оброблюваної деталі застосовують різні фінішні способи обробки. Найпоширенішим із способів є процес шліфування. Цей процес є нестационарним та теплонапруженим. На процес шліфування впливає велика кількість факторів: розміщення абразивних зерен у шліфувальному крузі, кут орієнтації даних зерен відносно деталі, радіус заокруглення вершини ріжучої кромки, глибина врізання в деталь тощо. Дані фактори ускладнюють дослідження процесу шліфування. Окрім цього, сили різання теж будуть мати різний напрямок та величину. Також певна частина загальної роботи буде витрачатися на пластичне і пружне деформування матеріалу заготовки, а не на знімання поверхневого шару деталі. Аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування сприятиме підвищенню ефективності фінішної обробки деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] наведені теоретичні основи моделювання алмазно-абразивних інструментів, їхні параметри та класифікація методів формоутворення робочої поверхні, закони розподілу розмірів зерен, створена методологія 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів. Також наведена велика кількість рекомендацій для вивчення процесу алмазного шліфування. Проте в даній роботі велика увага була приділена вивченню саме процесу алмазного шліфування, а не абразивного. У роботі [2] розглянуті основні відомості про механіку та кінематику процесу шліфування. Наведені експериментальні результати мікрорізання одиничним абразивним зерном, механізм утворення стружки, утворення шліфувальних рисок, закон розподілу різальних кромки. Проте в роботі не досліджено процес деформування деталі

різальними кромками інструменту. У роботі [3] наведені методологічні основи побудови моделей різання з використанням методів скінченних елементів. Розглянуті визначальні рівняння оброблювальних матеріалів, прогнозування термомеханічної моделі процесу стружоутворення під час різання металів. Також наведені принципи практичного застосування скінченно-елементних моделей для дослідження та оптимізації робочих процесів різання тощо. Однак відсутні теоретичні та практичні рекомендації застосування вищезгаданих моделей для створення 3D моделі різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів. У роботах [4, 5] наведені методики визначення сил різання під час шліфування зі схрещеними осями деталі та інструменту, але відсутній аналіз процесу деформації деталі під час шліфування.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування, що своєю чергою дасть можливість підвищити продуктивність та ефективність фінішної обробки деталей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно з дослідженням [2] під час шліфування різання зернами виконується не всіма ріжучими кромками робочої поверхні інструмента, а тільки тими, що знаходяться над зв'язкою круга. Не всі різальні кромки, що контактують з деталлю, будуть знімати стружку. Цей процес будуть виконувати тільки ті абразивні зерна, які мають необхідну форму округлення вершини та глибину врізання в деталь.

Перед початком зйому поверхневого шару деталі абразивними зернами відбувається доволі довготривале ковзання різальної кромки в місці контакту. Це ковзання супроводжується пластичною деформацією матеріалу деталі. Інші різальні

кромки в цей час виконують роботу тертя і пружної та пластичної деформації. Цей процес відбувається без зняття стружки. Для визначення моменту, коли закінчується пластична деформація і починається процес різання абразивними зернами, існує критерій, який представляє собою відношення глибини врізання до радіусу заокруглення вершини різальної кромки (a_z/ρ). Згідно з цим на формування поверхневого шару деталі також будуть впливати пластичне та пружне деформування, а не лише сам процес різання. Під час процесу шліфування певна частина роботи кожної ріжучої кромки витрачається на пластичне і пружне деформування, тертя між інструментом та деталлю та на подолання інерційних сил під час стружкоутворення.

Відповідно до роботи [2] схема стружкоутворення під час шліфування зображена на рис. 1.

Згідно з [2] під час визначення сили різання, яка діє на кожне абразивне зерно шліфувального круга, розглядають врівноважений стан її складників, враховуючи їх вплив під час процесу шліфування. В момент зняття припуску деталі вершиною абразивного зерна діють сили стиснення і зсуву в площині зсуву, тертя і нормального тиску по задній поверхні ріжучої кромки та інерційна сила стружки. Дані складники сили різання зображені у вигляді кругових діаграм (рис. 2).

Поверхня деталі після шліфування являє собою результат накладання шліфованих рисок, які утворені вершинами абразивних зерен (рис. 3).

На процес різання під час шліфування великий вплив має прийнята форма абразивного зерна. Найчастіше за максимально можливі форми абразивних зерен приймають еліпс, конус, трьохвісний еліпсоїд, циліндр, призму, піраміду та інші.

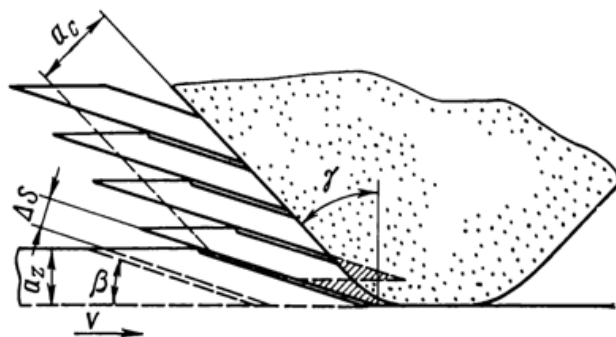


Рис. 1. Схема стружкоутворення під час шліфування:

β – кут зсуву; γ – передній кут ріжучої кромки;
 α_c – товщина стружки; α_z – глибина врізання;
 V – швидкість різання; ΔS – товщина зони зсуву

Згідно з [1] форма зерна приймається у вигляді трьохвісного еліпсоїда та за статичного моделювання прийнято наступні припущення:

- 1) кожне окреме зерно являє собою трьохвісний еліпсоїд;
- 2) розподіл розмірів діаметрів еліпсоїда за кожною із вісей відповідає нормальному закону розподілу.

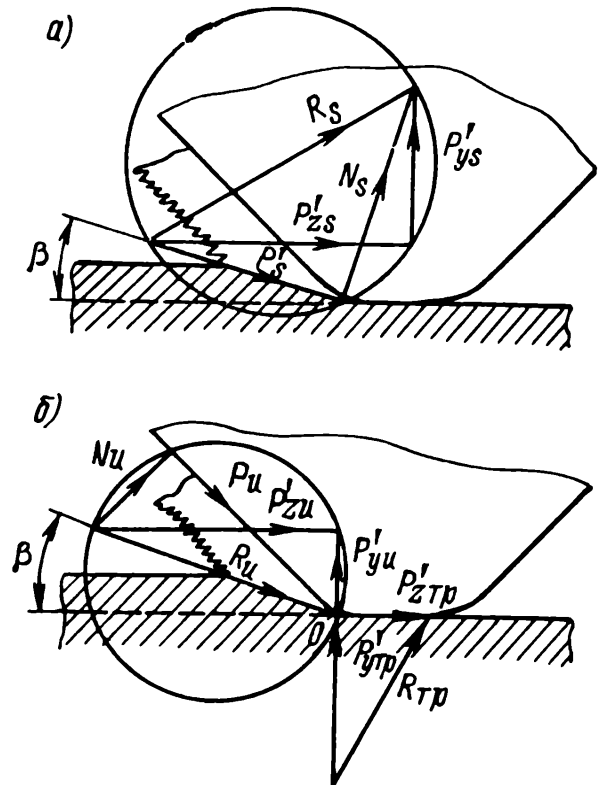


Рис. 2. Кругові діаграми сил зсуву (а), сил інерції та тертя (б), які діють при мікрорізанні одиничним абразивним зерном:

P'_{zs} – сила зсуву; P'_{ys} – тангенційний складник сили зсуву; P'_{ys} – радіальний складник сили зсуву; N_s – нормальна сила в площині зсуву; R_s – рівнодійна сили зсуву; R_{mp} – сила тертя; P'_{ytr} – радіальний складник сили тертя; P'_{ztr} – тангенційний складник сили тертя; P_u – сила інерції; P'_{zu} – тангенційний складник сили інерції; P'_{yu} – радіальний складник сили інерції; R_u – рівнодійна сили інерції; N_u – нормальний складник сили інерції

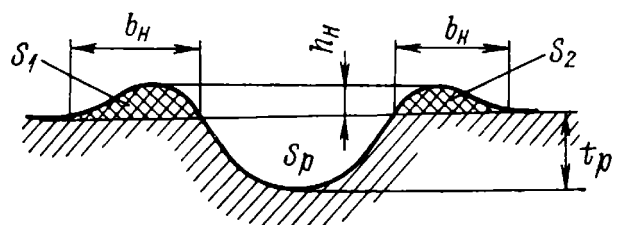


Рис. 3. Поперечний профіль шліфувальної риски із напливами:

S_1, S_2 – площа напливів; S_p – площа риски;
 b_n – ширина напливів; h_n – висота напливу;
 t_p – глибина шліфувальної риски

У вищезгаданій роботі, використовуючи результати розрахунків, було створено 3D модель робочої поверхні круга (рис. 4).

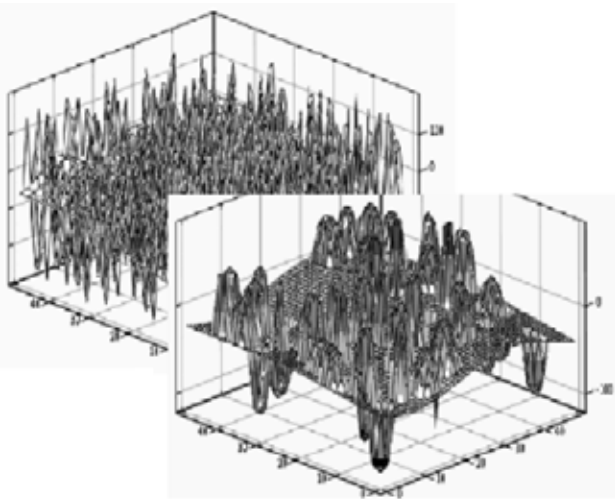


Рис. 4. 3D модель робочої поверхні круга

У роботі [3] стверджується, що, застосовуючи комп'ютерне моделювання, можливо створити віртуальну модель процесів різання із великою кількістю вхідних даних, оптимізувати його та змоделювати нові процеси механічної обробки.

Такий метод може спрогнозувати напружено-деформований стан інструменту та деталі, процес стружкоутворення, форму обробленої поверхні деталі, проекції та величини сил різання, розподіл температури тощо.

Використовуючи високошвидкісну відеозйомку, можливо порівняти результати

комп'ютерного моделювання процесу різання деталі з реальним експериментом (рис. 5).

У роботі [6] для дослідження розмірів, форми та геометрії абразивних зерен прийнято наступні припущення:

- 1) абразивні зерна приводять до форми кулі одного радіусу;
- 2) абразивні зерна замінюють еліпсоїдом обертання з постійним співвідношенням напіввісей;
- 3) виступаючі різальні вершини зерен замінюють еквівалентним конусом або пірамідою (із заокругленням або без заокруглення вершини);
- 4) поперечний переріз абразивного зерна розглядають як неправильний багатокутник, який отримується із правильної фігури (ромб або паралелограм) шляхом сколу у них однієї або декількох вершин.

Для дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном зазвичай розглядаються три положення зерна відносно деталі: повздовжнє, поперечне та перпендикулярне (рис. 6). Розміщення даних зерен відносно деталі буде впливати на продуктивність процесу шліфування, оскільки їхнє нераціональне розташування буде призводити до витрати частини роботи на пружне та пластичне деформування заготовки без знімання стружки та на перетворення в теплову енергію.

Використовуючи результати розрахунків у роботах [7, 8] та довідкові матеріали з [9], була створена 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів (рис. 7).

Також було зображено епюру навантаження від різальних та деформуючих кромок вздовж

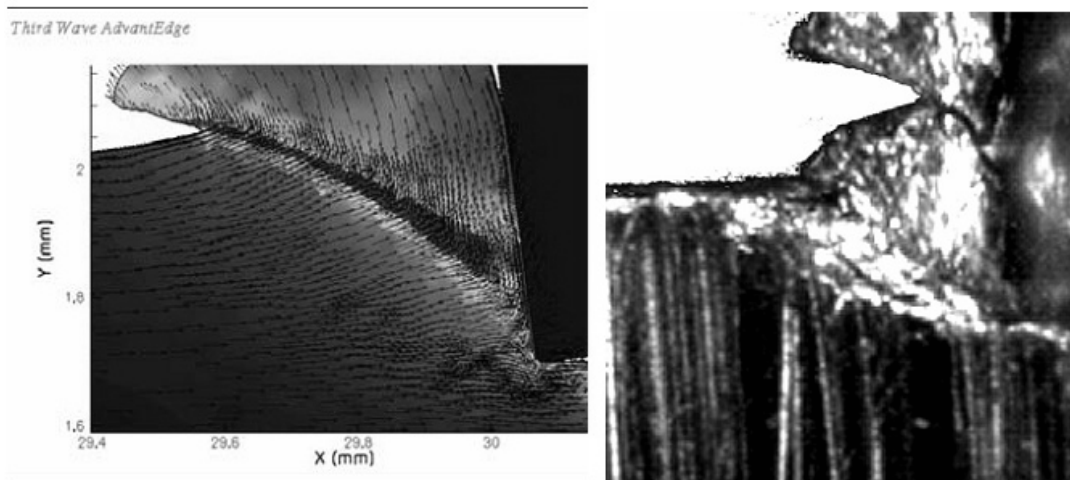


Рис. 5. Порівняння результатів моделювання елементного стружкоутворення (а) та високошвидкісної відеозйомки (б)

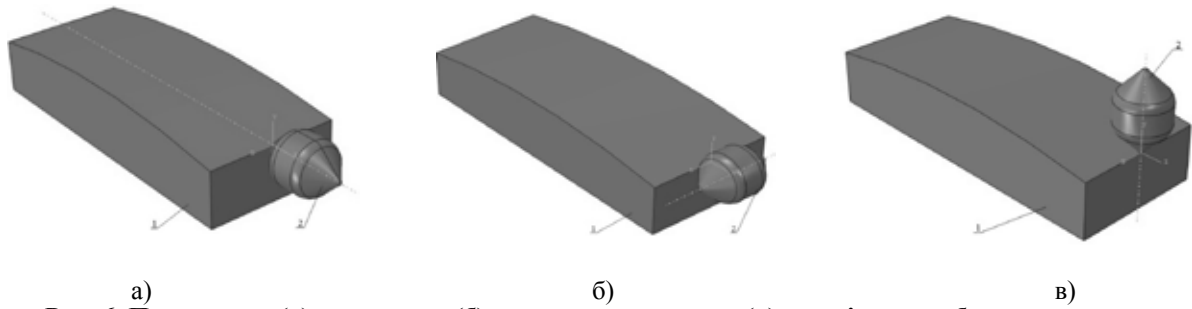


Рис. 6. Повздовжнє (а), поперечне (б) та перпендикулярне (в), розміщення абразивного зерна відносно деталі: 1 – деталь; 2 – абразивне зерно

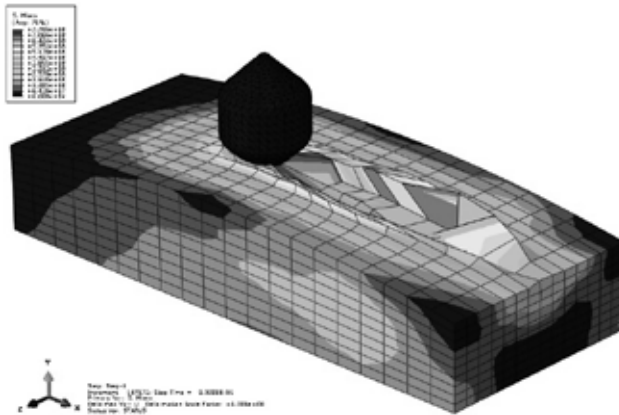


Рис. 7. 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів

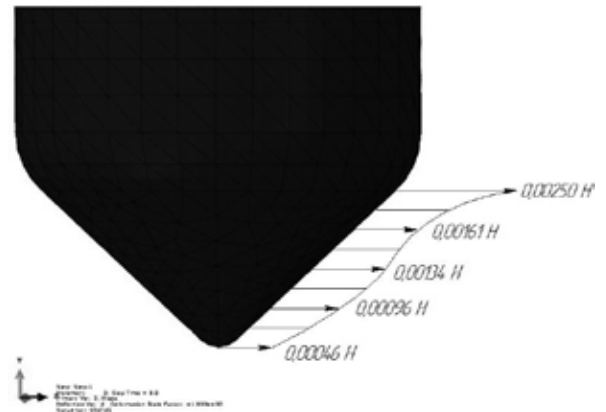


Рис. 8. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek вздовж профілю абразивного зерна

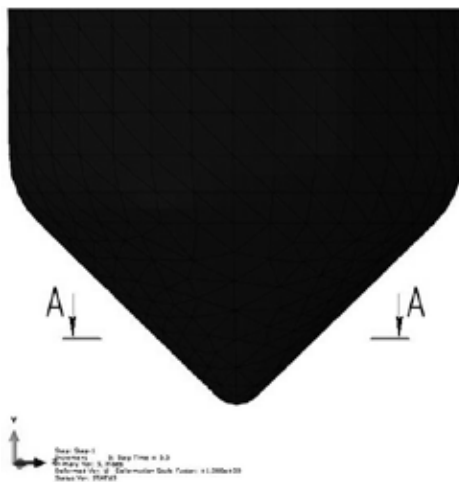


Рис. 9. Переріз абразивного зерна, в якому визначалась епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek

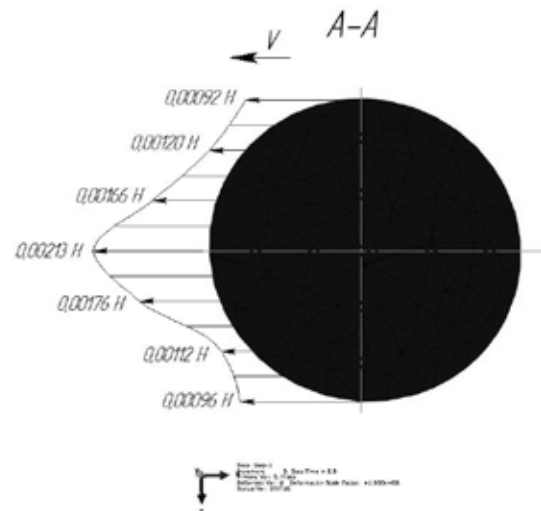


Рис. 10. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek у відповідному перерізі абразивного зерна

профілю абразивного зерна (рис. 8). Окрім цього, у відповідному перерізі абразивного зерна (рис. 9) була зображена епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek (рис. 10). У даному випадку згідно з епюрою навантаження (рис. 10) точка, у якій виникає максимальна величина навантаження, першою врізається в деталь.

Для моделювання різноманітних процесів різання існує велика кількість програмного забезпечення: ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, DEFORM тощо. Проте комп'ютерне моделювання різноманітних процесів різання порівняно з реальними експериментами має достатньо велику похибку. До причин, які призводять

до виникнення похибок, можна віднести недосконалість алгоритмів моделювання процесів та недостатня достовірність вхідних даних.

Для усунення даних похибок можливе застосування оптимальних та достовірних вхідних даних, використання найбільш сприятливих моделей, які описують різноманітні процеси під час різання, зменшення кількості факторів, які впливають на кінцеву похибку моделювання.

Висновки. У роботі проаналізовано різноманітні методи дослідження процесу різання одним абразивним зерном під час шліфування. Встановлено, що одними із основних факторів, які безпосередньо впливають на процес різання,

є геометрична форма та кут орієнтації зерна відносно деталі.

До сучасних методів дослідження процесу різання одним абразивним зерном належить комп'ютерне моделювання та створення 3D моделей. Хоча даний спосіб і має певні недоліки, але майбутнє більш детальне дослідження процесів обробки і розвиток комп'ютерного моделювання значно підвищать точність та достовірність змодельованих процесів із реальними.

Отже, застосування комп'ютерного моделювання та створення 3D моделей процесів різання є перспективними методами дослідження.

Список літератури:

1. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : Учебное пособие. Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. 364 с.
2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград : Машиностроение, 1979, 248 с., ил.
3. Криворучко Д.В., Залога В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
4. Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko, Sergiy Boyko, Nataliia Sira. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Acta mechanica et automatica*. 2017. №1 (11). P. 58–63.
5. Кальченко В.И., Погиба Н.Н., Кальченко Д.В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом. *Сверхтвердые материалы*. Киев : Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. № 2 (196). С. 58–73.
6. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Київ : Наукова думка, 1978. 207 с.
7. Кальченко В.І., Деркач О.Л., Кужельний Я.В. Моделювання процесу різання одним абразивним зерном при круглому глибинному шліфуванні. *Технічні науки та технології*. 2017. № 2 (8). С. 29–39.
8. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кужельний Я.В. Дослідження сил різання одного абразивного зерна при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. №2 (12). С. 59–68.
9. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Москва : Машиностроение, 1977. 391 с. с ил.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ ВО ВРЕМЯ ШЛИФОВАНИЯ

Проанализированы методы исследования процесса резания единичным абразивным зерном во время шлифования. Приведены основные факторы, влияющие на процесс микрорезания. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов резания. Изображена 3D модель резания единичным абразивным зерном во время шлифования. Приведенные эпюры нагрузки от режущих и деформирующих кромок абразивного зерна.

Ключевые слова: процесс резания, 3D модель, абразивное зерно, шлифование, моделирование.

ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS RESEARCH METHODS WITH A SINGLE ABRASIVE GRAIN DURING GRINDING

Analyzed the methods of researching the process of cutting a single abrasive grain during grinding. The main factors affecting the process of microcutting are given. The results of experimental research and modeling of cutting processes are considered. A 3D model of cutting with a single abrasive grain is shown during grinding. The diagrams of the load from the cutting and deforming edges of the abrasive grain are given.

Key words: cutting process, 3D model, abrasive grain, grinding, modeling.

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

UDC 629.7.014-519(043.2)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/05>

Skyrda I.I.

National Aviation University

THE BEHAVIOR-BASED APPROACH FOR REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SWARM CONTROL IN DYNAMIC ENVIRONMENT

This paper presents an algorithm for remotely piloted aircraft (RPA) swarm control applying Modified Artificial Potential Field (MAPF) approach. It is a complicated control problem, which requires developing a quick and robust system, in order to avoid collision between RPA and obstacles or RPA pairs. The MAPF use has such advantages as optimization with minimal cost, robustness that considers the global traffic condition, scalability that possesses explicit coordinates of waypoints and efficiency in implementing various tests of tuning parameters. This behavior-based approach means that each RPA shows several behaviors based on sensory inputs such as obstacle avoidance, destination tracking and swarm keeping where final control is derived from the weighting of the relative importance of each behavior. The main advantage of this approach is that it can operate in the unknown and dynamic environment because it is a parallel, real-time and distributed method, requiring less information sharing.

Key words: remotely piloted aircraft swarm, modified artificial potential field, collision avoidance, attraction and repulsion forces, behavior-based approach.

Introduction. To control the flight of Remotely Piloted Aircraft (RPA) swarm is a challenge as RPA are widely used in different domains. The RPA operation is effectively enhanced through the cooperation among them and make great impact on productivity in missions such as search and rescue, surveillance, mapping. Collision avoidance is central to the RPA swarm flight research. In order to avoid collision between RPA and obstacles or RPA pairs, it is required to consider the methods for formation switching and collision avoidance (Figure 1).

Classical path planning methods, such as potential field method, genetic algorithm, grid-based method and geometric approach are applied to single RPA

collision avoidance. Due to the shortcomings of the traditional artificial potential field (APF) method, the Modified Artificial Potential Field (MAPF) method is developed in a certain constraint reference frame to decouple the decomposed force from the MAPF method with specific physical constraints. In the constraint reference frame, the path is examined with the updated force of the MAPF method, implemented by the RPA, and corrected if the updated force disagrees with the physical constraints.

This collision avoidance manoeuvre has such advantages as optimization with minimal cost, robustness that considers the global traffic condition, scalability that possesses explicit coordinates of way-

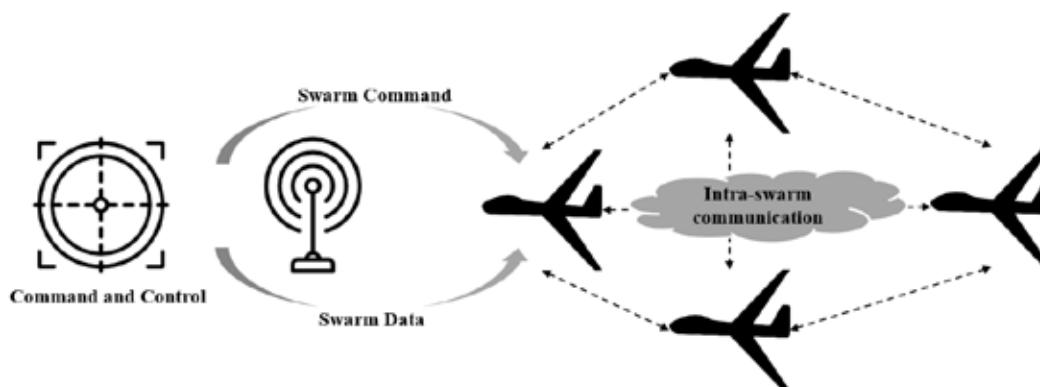


Figure 1. The scheme of RPA swarm operation

points and efficiency in implementing various tests of tuning parameters. For RPA swarm, it is necessary to consider their formation flight and collision avoidance simultaneously. Without taking into consideration the correlation between RPA, the collision avoidance method often works in a static structured environment and was not directly applied to the collision avoidance of formation flight [1, p. 2].

Related work. In the case of swarm control, RPA need to communicate with each other; therefore, information sharing plays a vital role in the overall operation. The challenge here is to make these two operations, i.e. sensing and information sharing, autonomous to achieve desired control. Autonomous RPA operation in a swarm is connected with the problems of collaboration between RPA in dynamic environment. The solution of these problems are already represented by three approaches represented on a Figure 2 [2, p. 2].

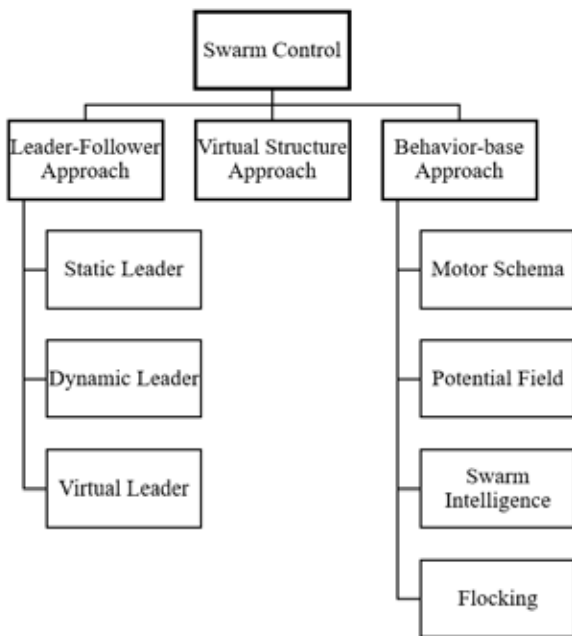


Figure 2. The swarm control method classification

In the leader-follower approach, a leader is assigned to the swarm participant and remaining members of swarm are the followers. In this approach, a leader follows its desired trajectory while follower objects track the position of the leader. There are three kinds of leader in this approach, namely static leader, dynamic leader and virtual leader. The advantage of this approach is the reduced tracking errors and can be analyzed using standard control techniques [3, p. 82]. Another benefit is that only the leader is responsible for planning trajectories and followers must follow the coordinates of the leader; therefore, it results in a

simple controller. In terms of disadvantage, a leader's fault can neutralize the whole swarm and feedback from followers to a leader is generally not applied in this approach.

In the behavior-based approach, each individual swarm member shows several behaviors based on sensory inputs such as obstacle avoidance, goal seeking and formation keeping where final control is derived from the weighting of the relative importance of each behavior. There are main four methods in this approach, namely motor scheme, potential field, swarm intelligence and flocking. This approach can be defined as a structured network of such interacting behaviors where the final action of each object is derived by the behavior coordinator. The behavior coordinator multiplies the output of each behavior by its relative weight, then summing and normalizing the results. One advantage of this approach is that it can operate in the unknown and dynamic environment because it is a parallel, real-time and distributed method, requiring less information sharing [3, p. 82].

In the virtual structure approach, a virtual rigid structure is derived that represents a form of agents. Then, the desired motion of the virtual rigid structure is given, and agents' motion is derived from the given rigid structure. Finally, to track the agents, a tracking controller for each individual agent is derived in which the formation is maintained by minimizing the error between the virtual structure and the current agent position. In this approach, the desired trajectory is not assigned to the single agent, but it is shared by the whole formation team. In terms of advantage, this approach is easy to prescribe the coordinated behavior for the whole group [3, p. 82]. In terms of disadvantage, this approach is centralized, therefore, a single point of failure can crash the whole system. Furthermore, heavy communication and computation burden is concentrated on the centralized location, which may degrade the overall system performance [4, p. 74].

Problem statement. The collision avoidance methods can be divided into the following categories: the method of potential collision resolution based on geometrical approach. This method define control commands for avoidance maneuver according to the relative distance, speed, acceleration, angle, etc., between the RPA and obstacles, but it is difficult to apply in complex dynamic airspace. The second method is based on real-time path planning. With the development of research in this field, many path-planning approaches with significant improvement in timeliness have been proposed, such as artificial potential-field approaches, artificial heuristic approaches and sampling based path-planning

approaches, etc., which can be applied to common path-planning problems in dynamic environments [5, p. 196].

In this paper, the MAPF proposed for RPA swarm control. The main problem can be divided into sub problems: obstacles detection, path planning, group formation, cooperation and data exchange between vehicles.

The traditional APF usually has problems connected with local minimums in the potential field function, which generate limitations such as:

1. No flight path between closely spaced obstacles.
2. Oscillations in the presence of obstacles.
3. Oscillations in narrow flight paths.
4. Non-reachable destination area or waypoint.

The RPA assumed as negatively charged particles and destination area as a positively charged. A repulsion force often dominates over the attraction force in scenarios containing RPA swarm causing the vehicles to never reach their destination area. Mathematical formulation of approach assumes a numerical value in each point in space and time, and whose gradient represents forces. Path planning using MAPF is based on a design of a standard attraction force function for the goal point, and repulsion force function with tunable parameters depending on shape, size and location of obstacles [6, p. 169]. At each point, the resulting potential field angle is lying along the angle of the resultant attraction and repulsion forces formulated by RPA, potential field functions considered as function of distance. The RPA motion in a dynamic environment is connected with potential conflicts presence with dynamic objects like RPA that has another speed value, shape, onboard equipment, so they cannot be compatible for position data inter-change performance. In this case, RPA should be able detect any dynamic obstacles operatively, calculate ranges and motion parameters.

Proposed approach. To solve RPA swarm flight control problem the MAPF used. The movement in general presented by kinematic equation system:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f(V_i, \Psi_i, x_i); \\ \dot{y}_i &= f(V_i, \Psi_i, y_i); \\ V_i &\in (V_{min}, V_{max}); \\ \Psi_i &\in (0^\circ, 360^\circ), \end{aligned}$$

where x_i, y_i – are the coordinates of the i -th RPA; V_i – is a flight-path velocity vector of the i -th RPA; Ψ_i – angular position of the vector V_i ; V_{min}, V_{max} – are the minimum and maximum permitted value of a speed of the i -th RPA. The value (module) of the velocity vector and the angle of its orientation (heading angle) are the control parameters in the kinematic model of the aircraft motion.

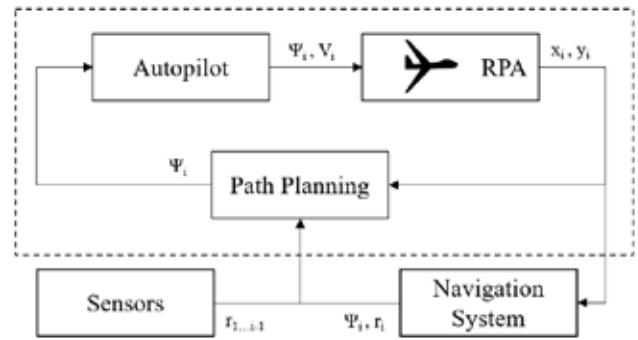


Figure 3. The RPA scheme of flight parameters processing

The RPA sensors are responsible for distances calculation between RPA and obstacles $r_{1...i-1}$ and distance to the destination r_i is provided by onboard Navigation System, also the heading to the target is provided (Figure 3). The role of Path Planning block is to define conflict free trajectory Ψ_i and Autopilot is responsible for flight trajectory correction including RPA flight performance characteristics. The result of RPA operation model will be next position coordinates:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + v(t) \cos(\Psi(t)) \Delta t; \\ y_{t+1} &= y_t + v(t) \sin(\Psi(t)) \Delta t. \end{aligned}$$

This method consist in use of the real world charged particles properties to generate a force field (electric or magnetic), which at their interaction causes attraction and repulsion forces. RPA considered as the dynamic objects with the same sign and destination point has opposite sign. General character of the attraction force from the distance for different dynamic objects is qualitatively the same: the attraction force of dynamic objects to each other dominates at large distances between them and the repulsive force act at short distances r_{cr} .

$$F_{ij}^+ = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^\alpha}; \quad \alpha \in \{2, 3, \dots\};$$

$$F_{ij}^- = \frac{Gm_i m_j r_{cr}}{r_{ij}^\beta}; \quad \beta \in \{3, 4, \dots\};$$

$$F_{ij} = F_{ij}^+ + F_{ij}^-,$$

where m_i, m_j – masses of i -th and j -th dynamic objects, G – gravitational constant and r_{ij} – distance between objects.

As a result the heading angle Ψ_i can be define as follows

$$\tan \Psi_i = \frac{F_{ijy}}{F_{ijx}}$$

Taking into account objects positive or negative sign assignments, around each RPA the artificial force field formed.

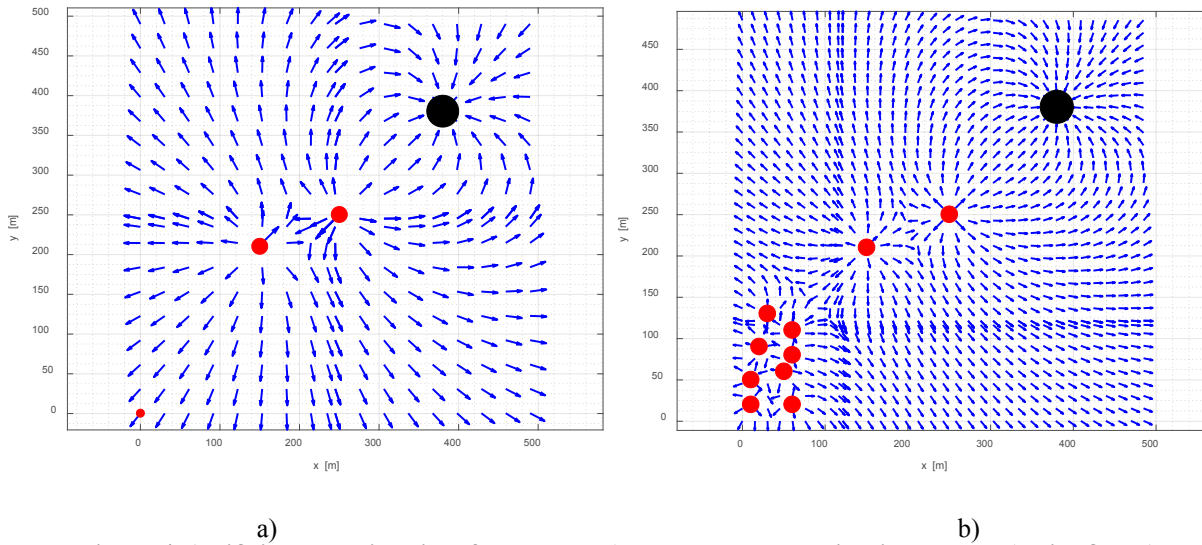


Figure 4. Artificial Potential Field formed by: a) obstacles and destinations zone; b) with 8 RPA

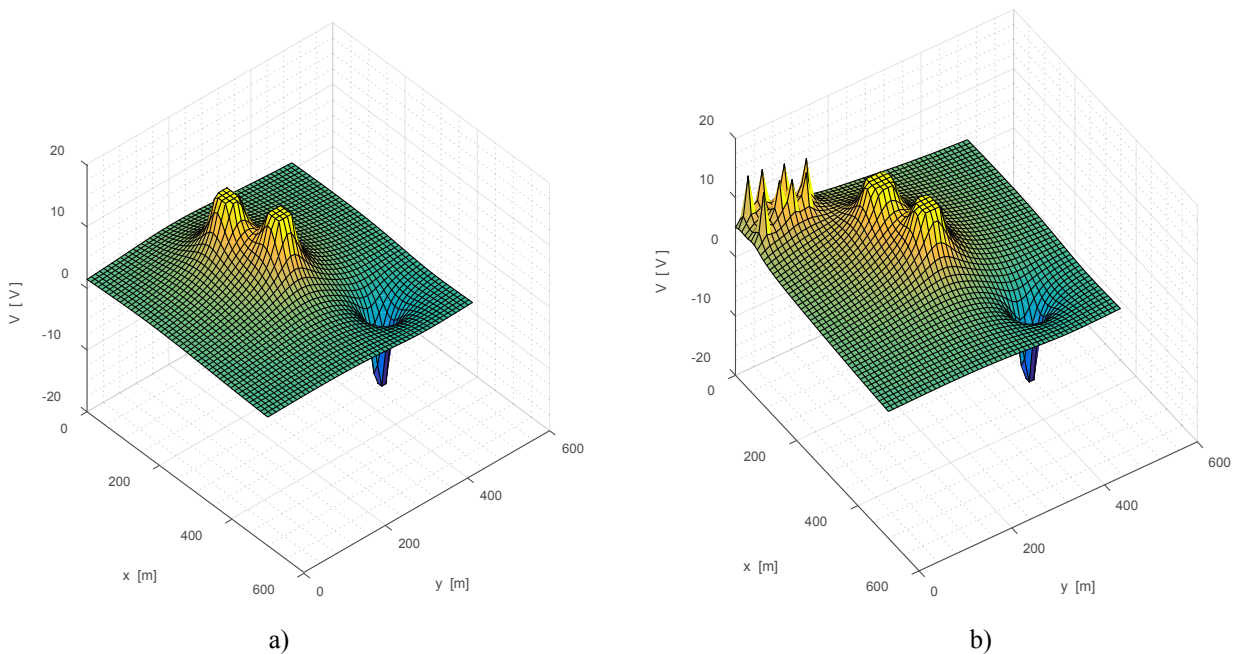


Figure 5. Artificial Potential Field with minimums (minimums) and maximums (RPA & obstacles) formed by: a) obstacles and destinations zone; b) with 8 RPA

Simulation. The RPA motion in a dynamic environment is connected with potential conflicts presence with dynamic objects like RPA that has another speed value, shape, onboard equipment, so they cannot be compatible for position data interchange performance. In this case, RPA should be able detect any dynamic obstacles operatively, calculate ranges and motion parameters. The experiment was performed in order to check the method applicability. There are 8 RPA with different masses but the same security zone performed a mission to start at the initial zone, to form a swarm and reach the destination area while avoiding collisions with static obstacles.

The main condition of flight performance was the uniform motion at a constant speed and absence of any data exchange between RPA about their position coordinates. On the Figure 6, the flight trajectory is presented where 2 obstacles are presented with inner circles and outer circles shows alert zone. These alert zones stimulate RPA to immediate actions for collisions avoidance and finding the optimal shortest way to destination zone.

The RPA main flight performance characteristics are maximum turn rate and angle. On the Figure 7 the heading angle Ψ_i of each RPA is presented, the traditional APF usually characterized by oscillations

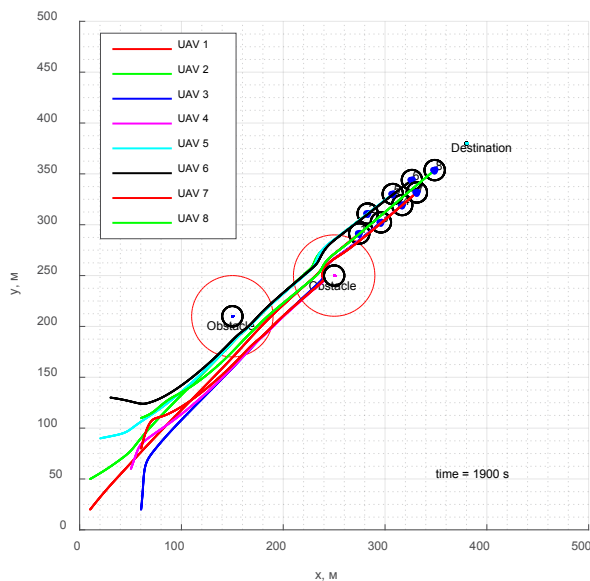


Figure 6

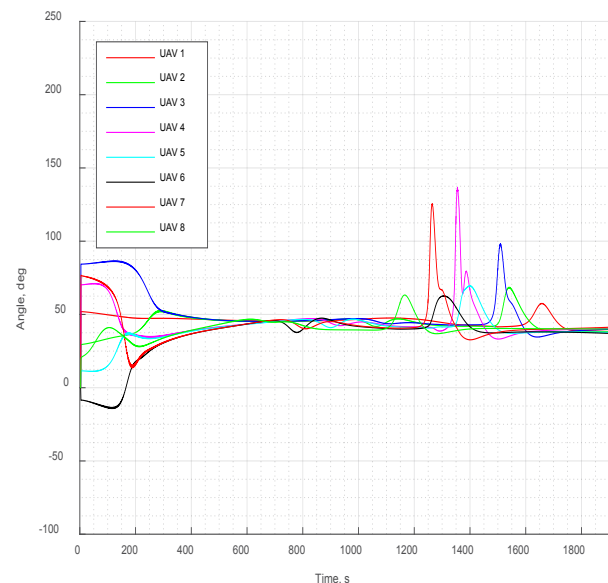


Figure 7

effects of heading value, in comparison to MAPF, which corresponds to RPA flight characteristics.

Conclusions. In this paper, the Modified Artificial Potential Field has been proposed to control a swarm of autonomous RPA to achieve the destination zone and maintain a given formation while avoiding collisions with obstacles. Behavior-Based Approach is more convenient for the task solutions

because it does not require a high computational capability and the flying trajectory can be modified in real time when an unexpected obstacle has been detected. The MAPF approach allows for significant scalability to hundreds or thousands of RPA provide enough airspace for a safe operation in a dynamic environment with non-homogeneous vehicles types.

References:

1. Zhang M. Formation flight and collision avoidance for multiple UAVs based on modified tentacle algorithm in unstructured environments. PLoS ONE 12(8): e0182006, 2017. 21 p. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182006>.
2. Soni A., Hu H. Formation Control for a Fleet of Autonomous Ground Vehicles: A Survey. *Robotics*. 7(4). 67. 2018. 25 p. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics7040067>.
3. Chunyu J., Qu Z., Pollak E., Falash M. A New Multi-objective Control Design for Autonomous Vehicles. In *Optimization and Cooperative Control Strategies*; Hirsch M.J., Commander C.W., Pardalos P.M., Murphey R. (Eds.): Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009. P. 81–102. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88063-9_5.
4. Ren W., Beard R.W. Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure Approach. *J. Guid. Control Dyn.* 2004. 27. P. 73–82. URL: <https://doi.org/10.2514/1.9287>.
5. Renke H., Ruixuan W., Qirui Zh. UAV autonomous collision avoidance approach. *Automatika*. 58:2. 2017. P. 195–204. <https://doi.org/10.1080/00051144.2017.1388646>.
6. Skyryda I. Method of the Multi-UAV Formation Flight Control Ermolayev V., Suárez-Figueroa M.C., Ławrynowicz A., Palma R., Yakovyna V., Mayr H.C., Nikitchenko M., and Spivakovsky A. (Eds.): *ICT in Education, Research and Industrial Applications. Proc. 14th Int. Conf. ICTERI 2018. Vol. I: Main Conference. Kyiv, Ukraine, May 14–17, 2018, CEUR-WS.org*, online. P. 167–178.

ПОВЕДІНКОВИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ РОЄМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛТОВАНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН У ДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті представлено спосіб управління роєм дистанційно пілтованих повітряних суден (далі – ДППС) з використанням методу модифікованих штучних потенційних полів (далі – MAPF). Це завдання вимагає розроблення швидкої і надійної системи управління, щоб уникнути зіткнення між ДППС і перешкодами або парами ДППС. Використання MAPF має такі переваги, як оптимізація маршруту польоту за критерієм мінімуму відстані, надійність, що враховує умови глобального трафіку, масштабованість, яка має явні координати шляхових точок, і ефективність під час виконання різних перевірок із різними початковими даними. Цей заснований на поведінці підхід означає, що кожне ДППС

показує кілька поведень, заснованих на вхідних даних, таких як запобігання зіткнень із перешкодами, відстеження цільової точки і утримання рою, де керуючі команди визначаються на основі зважування відносної важливості кожної поведінки. Основною перевагою цього підходу є те, що він може працювати в невідомому і динамічному середовищі, оскільки цей метод є децентралізованим і працює в режимі реального часу, що вимагає меншого обміну інформацією.

Ключові слова: рій дистанційного пілотованих повітряних суден, модифіковані штучні потенційні поля, запобігання зіткненням, сили притягання та відштовхування, підхід, заснований на поведінці.

ПОВЕДЕНЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РОЕМ ДИСТАНЦИОННО ПИЛОТИРУЕМЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В статье представлен способ управления роем дистанционно пилотируемых воздушных судов (далее – ДПВС), с использованием метода модифицированных искусственных потенциальных полей (далее – MAPF). Это задача требует разработки быстрой и надежной системы управления, чтобы избежать столкновения между ДПВС и препятствиями или парами ДПВС. Использование MAPF имеет такие преимущества, как оптимизация маршрута полета по критерию минимума расстояния, надежность, учитывающая условия глобального трафика, масштабируемость, которая имеет явные координаты путевых точек, и эффективность при выполнении различных проверок с разными начальными данными. Этот основанный на поведении подход означает, что каждое ДПВС показывает несколько поведений, основанных на входных данных, таких как предотвращение столкновений с препятствиями, отслеживание целевой точки и удержание строения роя, где управляющие команды определяются на основе взвешивания относительной важности каждого поведения. Основным преимуществом этого подхода является то, что он может работать в неизвестной и динамической среде, поскольку этот метод является децентрализованным и работает в режиме реального времени, требующего меньшего обмена информацией.

Ключевые слова: рой дистанционного пилотируемых воздушных судов, модифицированные искусственные потенциальные поля, предупреждение столкновений, силы притяжения и отталкивания, подход, основанный на поведении.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.333

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/06>

Кимстач О.Ю.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УТОЧНЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрена задача приблизительного определения по паспортным данным переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания схемы замещения асинхронного двигателя, которая отображает магнитные потери в сердечнике ротора. Алгоритм идентификации указанного параметра построен на основе метода квазиконстант. Приведён перечень квазиконстант и рекомендации по их определению. Продемонстрирован эффект, достигнутый благодаря уточнению по предложенному алгоритму, на динамические характеристики асинхронного двигателя. В результате исследований доказана целесообразность учёта магнитных потерь в роторе при анализе пусковых режимов асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель, переменные магнитные потери, метод квазиконстант, схема замещения.

Постановка проблемы. Нарастающая автоматизация производственных процессов и систем обслуживания населения неизбежно ведёт к увеличению количества применяемых электроприводов, большинство из которых построены на основе асинхронных двигателей (АД).

Для повышения качества регулирования скорости вращения и обеспечения внедрения энергосберегающих технологий широко применяются автоматизированные электроприводы с микропроцессорным управлением. Их программное обеспечение способно корректно работать только при условии наличия всех основных параметров АД, т.е. параметров Т- или Г-образной схем замещения [1]. Теория АД, построенная на основе схем замещения, имеет ряд существенных допущений [2], которые вносят значительные ошибки и нарушают корректную работу автоматизированных электроприводов. Особенно это наблюдается в переходных режимах.

Рассмотрение динамических режимов АД традиционно выполняется на основе математической модели (ММ) обобщённой электрической машины [2, 3] или её уточнённых вариантов [4–7], а также ММ в фазных координатах с частотозависимыми параметрами [8]. Усовершенствованные модели являются более предпочтительными, т.к. обеспечивают максимально возможный адекватный результат.

Анализ последних исследований и публикаций. При отсутствии учёта магнитных потерь [2;

3; 9] ММ является менее устойчивой, что характеризуется долго или полностью незатухающими колебаниями в установившемся режиме, которые присутствуют на результирующих кривых, полученных в работе [9].

Уточнённая ММ [6], учитывающая постоянные и переменные магнитные потери, является более предпочтительной в использовании, потому что магнитная цепь и, соответственно, потери мощности в ней выполняют роль своеобразного демпфера АД в процессе преобразования энергии.

Выполнить учёт постоянных магнитных потерь не представляет особых проблем [4; 7], для этого необходимо знать активное сопротивление ветви намагничивания Т-образной схемы замещения. Его можно определить при проектировании АД [4; 10] или по паспортным данным, используя одну из многочисленных известных методик [11–13].

Для корректной оценки переменных магнитных потерь необходимо знать геометрию и магнитные нагрузки для магнитопровода ротора, что возможно только при проектировании АД, а при наличии паспортных данных является недоступной информацией. В работе [6] приведена оценочная методика расчёта переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания на основе метода квазиконстант [4], но она не может быть использована в практических расчётах из-за значительной погрешности.

Формулирование целей статьи. Статическая ММ АД представляется в виде уточнённой схемы замещения (рис. 1), которая отличается наличием переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания $R_{\mu 2}(s)$, отображающей магнитные потери в магнитопроводе ротора. Тогда уравнения потокосцеплений в осях u и v уточнённой ММ АД в относительных единицах [6]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{su}}{dt} = U_{su} - r_s \cdot i_{su} + \psi_{sv} - [r_\mu + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{su} + i_{ru}); \\ \frac{d\psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - r_s \cdot i_{sv} - \psi_{su} - [r_\mu + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{sv} + i_{rv}); \\ \frac{d\psi_{ru}}{dt} = -r_r \cdot i_{ru} + s \cdot \psi_{rv} - s \cdot [r_\mu + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{su} + i_{ru}); \\ \frac{d\psi_{rv}}{dt} = -r_r \cdot i_{rv} - s \cdot \psi_{ru} - s \cdot [r_\mu + r_{\mu 2}(s)] \cdot (i_{sv} + i_{rv}), \end{cases}$$

где $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}, \psi_{su}, \psi_{sv}, \psi_{ru}, \psi_{rv}, U_{su}, U_{sv}$ – токи, потокосцепления и напряжения обмоток статора и ротора в относительных единицах по осям u и v соответственно; r_s, r_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; s – скольжение; r_μ и $r_{\mu 2}(s)$ – активные сопротивления ветви намагничивания в относительных единицах.

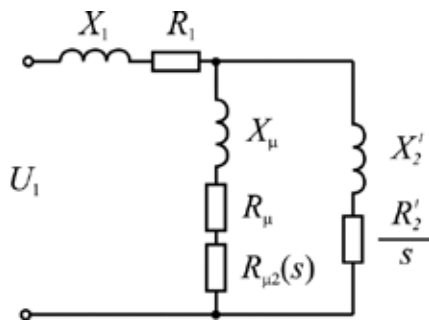


Рис. 1. Уточнённая Т-образная схема замещения АД

Система уточнённых уравнений потокосцеплений в осях u и v , представленная выше, получена путём обратных преобразований статической модели (рис. 1) по прямой аналогии, представленной в [2], при этом скорость вращения осей равняется скорости вращения поля статора, т.е. базовой величине, что в относительных единицах равняется 1,0 [4]. В целом, в качестве основы используется математическая модель обобщённой электрической машины в осях u и v [2, 4], применение которой изначально ведёт к принятию всех её допущений, за исключением пренебрежения магнитными потерями. Соответственно, токи $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}$ и потокосцепления $\psi_{su}, \psi_{sv}, \psi_{ru}, \psi_{rv}$ – это проекции пространственных комплексов на ортогональные оси u и v .

За основу построения методики расчёта переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания Т-образной схемы замещения АД используется выражение [6]:

$$R_{\mu 2}(s) = k_{\mu 2}(D_1, s) R_\mu,$$

где $k_{\mu 2}(D_1, s)$ – коэффициент, отображающий соотношение переменной и постоянной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания, D_1 – внутренний диаметр статора, s – скольжение.

Для определения коэффициента $k_{\mu 2}(D_1, s)$, как в [6], используются расчётные коэффициенты плоскостей:

– зубцовой зоны ротора

$$a(D_1) = D_1^2 - \left(D_{b2} + \frac{D_1 B_\delta}{pk_c B_{c2}} \right)^2 - \frac{4A_2 D_1}{10\Delta_2}, \quad (1)$$

где D_{b2} – внутренний диаметр магнитопровода ротора; B_δ – индукция в воздушном зазоре; B_{c2} – индукция спинки ротора; p – количество пар полюсов; k_c – коэффициент заполнения магнитопровода; A_2 – линейная нагрузка ротора; Δ_2 – плотность тока в обмотке ротора;

– спинки ротора

$$b(D_1) = \left(D_{b2} + \frac{D_1 B_\delta}{pk_c B_{c2}} \right)^2 - D_{b2}^2; \quad (2)$$

– зубцовой зоны статора

$$c(D_1) = \left(D_{1n} - \frac{D_1 B_\delta}{pk_c B_{c1}} \right)^2 - D_1^2 - \frac{4A_1 D_1}{10k_{31} \Delta_1}, \quad (3)$$

где D_{1n} – наружный диаметр магнитопровода статора; B_{c1} – индукция спинки статора; Δ_1 – плотность тока в обмотке статора; A_1 – линейная нагрузка статора; k_{31} – коэффициент заполнения паза статора;

– спинки статора

$$d(D_1) = \frac{2D_{1n} D_1 B_\delta}{pk_c B_{c1}} - \left(\frac{D_1 B_\delta}{pk_c B_{c1}} \right)^2. \quad (4)$$

С учётом выражений (1)–(4) коэффициент

$$k_{\mu 2}(D_1, s) = \frac{B_{32}^2 \cdot a(D_1) + B_{c2}^2 \cdot b(D_1)}{B_{31}^2 \cdot c(D_1) + B_{c1}^2 \cdot d(D_1)} \cdot s^\beta,$$

где β – коэффициент, который зависит от марки электротехнической стали [4, 10]; B_{31} и B_{32} – индукции зубцов статора и ротора соответственно.

Значение коэффициента $k_{\mu 2}(D_1, s)$ зависит от диаметра D_1 , который в [6] определяется как среднее арифметическое предельных границ измене-

ния его при условии, что площади зубцов статора и ротора должны быть больше нуля, т.е. фактический разброс возможных значений диаметра активной зоны определяется диапазоном от 62 мм до 89 мм. Однако такое решение не совсем корректно, т.к. даже при 5% неточности определения D_1 ошибка вычисления коэффициента $k_{\mu 2}(D_1, s)$ составляет десятки процентов. Поэтому возникает задача более точного определения границ наиболее вероятностной вариации D_1 .

Цель статьи – разработать методику расчёта переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания по паспортным данным.

Материалы исследований. Поставленная задача решается на основе общей теории конструирования АД [4; 10] и метода квазиконстант [4].

В качестве квазиконстант принимаются:

– β – коэффициент марки электротехнической стали, принимается равным 1,4 [4; 10];

– $D_{н1}$ – наружный диаметр магнитопровода статора, принимается равным $1,7h$, где h – высота оси вращения ротора;

– $D_{в2}$ – внутренний диаметр магнитопровода ротора, принимается равным диаметру третьей ступени вала ротора и рассчитывается по рекомендациям [4; 10];

– A_1 – линейная нагрузка статора, принимаемая по графикам в зависимости от наружного диаметра статора [4];

– k_A – коэффициент отношения линейных нагрузок ротора и статора, выбираемый из диапазона 0,5...0,95, нижняя граница соответствует двигателям малой мощности, при этом значение 0,8 достигается при мощности АД около полкиловатта;

– k_c – коэффициент заполнения стали, принимаемый в среднем для всех типов электротехнической стали 0,96;

– k_{31} – коэффициент заполнения паза статора, принимаемый 0,7;

– Δ_1 – плотность тока в обмотке статора, выбираемая как среднее значение из диапазона [4] по наружному диаметру статора;

– Δ_2 – плотность тока в обмотке ротора, выбираемая как среднее значение из рекомендаций [4];

– B_δ – индукция в воздушном зазоре, определяемая по расчётным кривым [4; 10];

– $B_{31}, B_{32}, B_{c1}, B_{c2}$ – индукции зубцов и спинок статора и ротора соответственно, принимаемые как средние значения диапазонов, указанных в рекомендациях [4; 10].

Плотности токов и линейная нагрузка принимаются фиксированными в рамках расчёт-

ного алгоритма, т.к. используются номинальные значения, необходимые только для вычисления геометрических размеров активной части АД. Значения же индукций в реальности в динамических режимах непостоянны и меняются в рамках электромагнитных переходных процессов, которые намного быстротечнее, чем электромеханические. Неравномерность индукции участков магнитопровода ротора связана с противодействием его обмотки резкому нарастанию магнитного поля. Это приводит к насыщению зоны коронок зубьев ротора, соответственно магнитные потери в них возрастают, а в спинке ротора уменьшаются по сравнению с установившимся режимом. Аналогично возрастают поля рассеивания статора, которые также ведут к неравномерности индукций в участках магнитной цепи статора. В первом приближении с учётом быстротечности электромагнитных переходных процессов и усреднения значений принято допущение, что индукции на всех участках магнитной цепи АД постоянны и равняются номинальным, которые определяются по проектным рекомендациям [4; 10].

Решение задачи строится на двукратном определении D_1 из уравнений равновесия описывающих площадей пластин магнитопроводов статора и ротора АД.

С одной стороны, описывающая площадь пластины магнитопровода статора

$$S_{\text{ст}} = \pi (D_{н1}^2 - D_1^2) / 4 = \pi (1,7^2 h^2 - D_1^2) / 4,$$

а с другой стороны, эту же площадь можно получить приблизительно путём сложения её составляющих:

– площадь спинки статора

$$S_{c1} = \frac{\pi B_\delta D_1}{2k_c B_{c1p}} \left(1,7h - \frac{B_\delta D_1}{2k_c B_{c1p}} \right);$$

– площадь пазов статора

$$S_{н1} = 0,1A_1\pi D_1 / (\Delta_1 k_{31});$$

– площадь равнобоких зубцов статора без учёта коронок

$$S_{31} = \frac{\pi B_\delta D_1}{2k_c B_{31}} \left(1,7h - D_1 - \frac{B_\delta D_1}{k_c B_{c1p}} \right).$$

Для решения уравнения равновесия площадей статора

$$S_{\text{ст}} \approx S_{c1} + S_{н1} + S_{31}$$

необходимо вычислить коэффициенты:

$$B_2 = 1 - \frac{B_\delta}{k_c} \left[\frac{B_\delta}{k_c p B_{c1}} \left(\frac{1}{p B_{c1}} + \frac{2}{B_{31}} \right) + \frac{2}{B_{31}} \right];$$

$$B_1 = \frac{0,4A_1}{k_{31}\Delta_1} + \frac{3,4hB_\delta}{k_c} \left(\frac{1}{p B_{c1}} + \frac{1}{B_{31}} \right);$$

$$B_0 = 1,7^2 h^2 .$$

Внутренний диаметр статора из уравнения равновесия площадей статора

$$D_{1c} = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4B_2B_0}}{2B_2} .$$

Аналогично можно найти значение D_1 при рассмотрении площадей пластины магнитопровода ротора при условии, что внешний диаметр магнитопровода ротора равняется D_1 , такое допущение не вносит существенной погрешности. Тогда, с одной стороны, описывающая площадь пластины магнитопровода ротора

$$S_{np} = \pi (D_1^2 - D_{в2}^2) / 4 ,$$

а с другой стороны, эту же площадь можно получить приблизительно путём сложения её составляющих:

– площадь спинки ротора

$$S_{c2} = \frac{\pi B_\delta D_1}{2k_c B_{c2} p} \left(D_{в2} + \frac{B_\delta D_1}{2k_c B_{c2} p} \right) ;$$

– площадь пазов ротора

$$S_{n2} = 0,1 A_1 k_A \pi D_1 / \Delta_2 ;$$

– площадь равнобоких зубцов ротора без учёта коронок

$$S_{32} = \frac{\pi B_\delta D_1}{2k_c B_{32}} \left(D_1 - D_{в2} - \frac{B_\delta D_1}{k_c B_{c2} p} \right) .$$

Для решения уравнения равновесия площадей ротора

$$S_{np} \approx S_{c2} + S_{n2} + S_{32}$$

необходимо вычислить коэффициенты:

$$B'_2 = \frac{B_\delta}{k_c} \left[\frac{B_\delta}{k_c p B_{c2}} \left(\frac{1}{p B_{c2}} - \frac{2}{B_{32}} \right) + \frac{2}{B_{32}} \right] - 1 ;$$

$$B'_1 = \frac{0,4 A_1 k_A}{\Delta_2} + \frac{2 B_\delta D_{в2}}{k_c} \left(\frac{1}{p B_{c2}} - \frac{1}{B_{32}} \right) ;$$

$$B'_0 = D_{в2}^2 .$$

Внутренний диаметр статора из уравнения равновесия площадей ротора

$$D_{1p} = \frac{-B'_1 - \sqrt{B'_1{}^2 - 4B'_2B'_0}}{2B'_2} .$$

Разница между значениями D_{1c} и D_{1p} не должна быть столь значительной, как между границами D_1 , полученными в [6]. Так, для того же АД 4А71А4У3 $D_{1c} = 85,4$ мм и $D_{1p} = 82,4$ мм, т.е. отличие составляет 3,6%.

Расчётное значение диаметра

$$D_{1расч} = (D_{1c} + D_{1p}) / 2 .$$

Для двигателя 4А71А4У3 графики относительных отличий для момента, тока и угловой частоты при моделировании пуска АД с учётом и без учёта переменных магнитных потерь (рис. 2) для предложенной методики имеют значение в активной фазе переходного процесса примерно в два раза больше, чем при алгоритме, предложенном в [6]. Что говорит о количественно и качественно новом результате и о необходимости учёта переменных магнитных потерь при моделировании АД. Это позволит более точно определить прежде всего максимальные броски тока и продолжительность их воздействия при пуске или других динамических режимах, что необходимо для корректной настройки не только устройств регулирования электроприводов, но и аппаратов защиты.

При этом $D_{1расч} = 83,9$ мм, что приблизительно на 13% больше, чем по методике [6], а диапазон разброса возможных значений всего лишь от 82,4 мм до 85,4 мм. Это приводит к уточнению

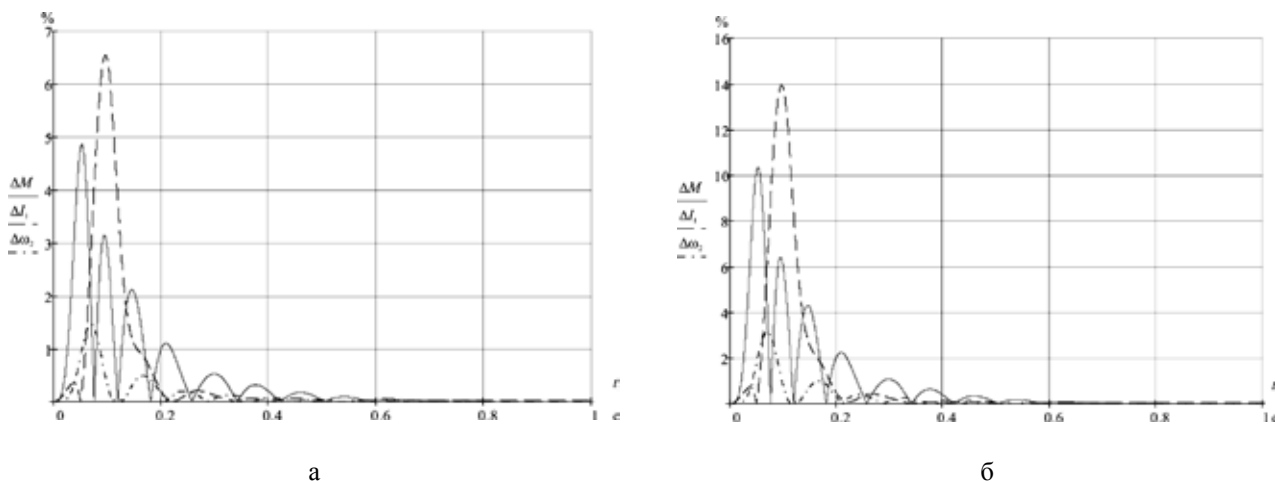


Рис. 2. Графики относительных отличий момента, тока и угловой частоты вращения ротора, рассчитанных по методике [6] (а) и предложенной (б)

расчёта $k_{\mu 2}(D_1, s)$ более чем в два раза, что подтверждается зависимостью $k_{\mu 2}(D_1, s)$ (рис. 3), которая построена для скольжения, соответствующего первому максимальному значению отличия динамических характеристик для момента (рис. 2 б) и составляющего 0,729.

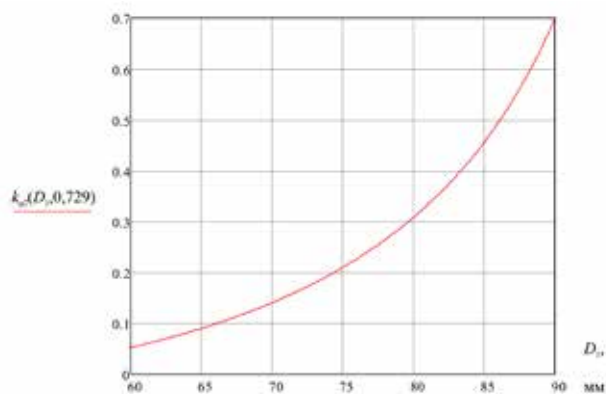


Рис. 3. Изменение коэффициента $k_{\mu 2}(D_1, s)$ при вариации диаметра активной зоны

Приведённая методика идентификации переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания базируется на теории АД малой и средней мощности, машины большой мощности имеют существенные конструктивные отличия, которые при составлении полученного алгоритма не учтены (необходимо изменить урав-

нения площадей активной зоны). Кроме этого, не учитываются явления насыщения магнитной цепи и соответственно повышенные поля рассеивания в начальные моменты переходных процессов, а также вытеснения тока в обмотке ротора, которые существенно перераспределяют магнитное поле машины, что требует дополнительных пересчётов переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания. Вопрос повышения адекватности моделирования АД за счёт рассматриваемой уточнённой математической модели требует дальнейшего дополнительного исследования. Тем не менее, проведённые исследования можно рассматривать как своеобразное усреднённое изучение вопроса весомости переменных составляющих магнитных потерь.

Выводы. 1. Предложенная методика расчёта переменной составляющей активного сопротивления ветви намагничивания Т-образной схемы замещения АД в большинстве случаев обладает погрешностью вычисления результата, вносимой неточностью определения диаметра активной зоны, в пределах 5%. 2. Рассчитанные динамические характеристики с помощью уточнённого значения сопротивления $R_{\mu 2}(s)$ показали целесообразность учёта переменных магнитных потерь при моделировании АД, что следует из графиков относительных отличий момента, тока и угловой частоты вращения ротора.

Список литературы:

1. Чепкунов Р.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по паспортным данным при вводе в эксплуатацию асинхронного электропривода. *Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах*. № 4 (4). 2013. С. 56–62. URL: <http://eetecs.kdu.edu.ua>.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Москва : Высш. шк., 2001. 327 с.
3. Прудников А.Ю. Математическая модель асинхронного двигателя с эксцентриситетом ротора / А.Ю. Прудников, В.В. Боннет, А.Ю. Логинов. *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 6. С. 94–97.
4. Кімстач О.Ю. Проектування асинхронних двигунів малої і середньої потужності загального призначення з короткозамкненим ротором : навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 2015. 188 с.
5. Кімстач О.Ю. Математическая модель трансформаторно-асинхронной системы. *Збірник наукових праць УДМУТУ*. Миколаїв : УДМУТУ, 2002. № 2(380). С. 158–165.
6. Нестерчук О.В. Вплив урахування магнітних втрат у роторі на динамічні характеристики асинхронних машин. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук : КрНУ, 2016. Вип. 4/2016 (36). С. 66–72.
7. Кулагін Д.О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення. *Техн. електродинаміка*. 2014. № 6. С. 49–55.
8. Попович О.М., Головань І.В. Математична модель для розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна з урахуванням еквівалентних контурів втрат у сталі статора і ротора. *Електротехніка і електромеханіка*. Національний технічний університет «ХПІ», 2006. № 1 С. 42–46.
9. Анищенко Н.В. Моделирование асинхронного однофазного конденсаторного двигателя / Н.В. Анищенко, А.А. Астапов, А.А. Коколева. Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы автоматизованого електроприводу. *Теорія і практика*. № 28. 2010. С. 459–461.
10. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, И.С. Свириденко; под ред. О.Д. Гольдберга. Москва : Высш. шк., 2006. 430 с.

11. Гридин В.М. Расчёт параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным. *Электричество*. № 5, 2012. С. 40–45.
12. Усольцев А.А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев. *Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение*. 2005. № 12. С. 35–41.
13. Визначення електромеханічних параметрів та характеристик асинхронних двигунів за табличними даними: звіт про НДР / НУК; кер. О.Ю. Кімстач. Миколаїв, 2016. 57 с. № ДР 0116U007797.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ УТОЧНЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розглянуто завдання приблизного визначення за паспортними даними змінного складника активного опору гілці намагнічування заступної схеми асинхронного двигуна, яка відображає магнітні втрати у сердечнику ротора. Алгоритм ідентифікації зазначеного параметра побудовано на основі методу квазіконстант. Наведено перелік квазіконстант і рекомендації з їх визначення. Продемонстровано ефект, досягнутий завдяки уточненню до запропонованого алгоритму, на динамічні характеристики асинхронного двигуна. У результаті досліджень доведено доцільність врахування магнітних втрат у роторі під час аналізу пускових режимів асинхронного двигуна.

Ключові слова: асинхронний двигун, математична модель, змінні магнітні втрати, метод квазіконстант, заступна схема.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF THE IMPROVED MATHEMATICAL MODEL OF THE INDUCTION MOTOR

The problem of approximate calculation by the label data of the variable component of the magnetization branch active resistance of the induction motor equivalent circuit, which displays the magnetic losses in the rotor core, is considered. The algorithm for identifying this parameter is formulated on the basis of the quasi-constant method. A list of quasi-constants and recommendations for their definition is given. The effect achieved due to the improvement of the proposed algorithm on the dynamic characteristics of an induction motor is shown. In a result of research the utility of taking into account the magnetic losses in the rotor, when the starting modes of an induction motor are analyzed, is proved.

Key words: induction motor, mathematical model, variable magnetic losses, quasi-constant method, equivalent circuit.

Куряк В.В.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

GENETIC METHOD FOR OPTIMAL RECONFIGURATION OF THE POWER DISTRIBUTION NETWORKS

The paper presents the general statement and innovative solution to tackle the important present-day applied problem of developing new methods for optimal configurations of high voltage distribution networks. Reconfiguration of the power distribution network considered under normal operation mode is developed by using the genetic algorithm, which enables the determination of an optimal network configuration so that power losses over transmission lines are minimized, the standard quality of electric power is provided, and the appropriate voltage at consumers' connection points is assured. Moreover, this approach allows operation economy due to minimum connectivity of electrical network circuit design, and minimal outage losses.

Key words: high voltage distribution network, reconfiguration, genetic algorithm, functional circuit design reconfiguration.

Introduction. The problem of reliable and qualitative electric power supply in 6-35 kV power distribution networks can be solved by providing the optimal control of power flows, and adjusting the parameters of regulation and compensation devices. At the present age of intellectual technologies, the solution to this problem requires developing smart electrical power networks, as stated within the scope of implementation of Smart Grid concept. Smart grid concept acquires special importance when dealing with the operation mode control problems in 6-35 kV power distribution networks, characterized by under-level of dispatching control centralization. Moreover, the problem of intellectualization of distribution network control is complicated by large dimensions of the system, low system observability, and a restricted range of technical arrangements available for adaptive control.

In operating power distribution networks there is often a problem of topology change, or that of reconfiguration of functional circuit design, intended to minimize electrical power network maintenance expenses and to ensure the appropriate power quality supply [1, c. 35; 4, c. 12].

In fact, each of the possible functional circuit designs is characterized by a range of parameters, such as the reliability of electric power supply, the power quality at consumer's connection points, and the power losses over transmission lines. Thus, it is of great importance to consider the optimization problem for functional circuit design configuration of power distribution networks.

Formulation of the problem. It should be mentioned that in order to find the solution to the problem

of optimal configuration of power distribution networks scientists today usually make use of the estimation models based on the comparison of several alternatives of electrical power network configuration. In most of the cases, the electrical power network reconfiguration is carried out by one criterion, and with imposing some restrictions. Classical optimization models and methods have not been widely used because of the complexity of the problem, which is caused by the following aspects [2, c. 86; 3, c. 10; 5, c. 174]:

- the problem of electrical power network configuration optimization is of multi-criteria, so that the problem solution should consider the requirements of operation economy (profitability), electrical power supply reliability, power quality, environmental friendliness etc. under the condition of little accuracy of explicit network state;

- optimization methods of power distribution network configuration should take into account the dynamical character of electrical supply system development;

- optimization function of electrical power network configuration is discrete and contains discontinuities;

- the information about electrical system parameters is of probabilistic or even uncertain nature.

The purpose of the present research is to develop the method of optimal reconfiguration of functional circuit design in the power distribution network on the basis of genetic algorithm.

The solution of the problem. The problem of finding the optimal functional circuit design reconfiguration of power distribution network can be solved

as a target criterion function. It allows designing the optimal configuration of electrical power network simultaneously by four criteria, namely minimum connectivity of the circuit design, voltage deviation, economic component of outage losses, and active power losses:

$$F = k_1 \sum_{i=1}^N K_i + k_2 \sum_{i=1}^M |\delta U_i| + k_3 \sum_{i=1}^M \alpha_i P_i Y_i + k_4 \sum_{i=1}^L \Delta P_i \rightarrow \min \quad (1)$$

where k_1, k_2, k_3, k_4 – are the weight coefficients intended for joining incommensurable parameters as part of the target criterion function; K_i – is alarm coefficient, which is equal to unity in case the contacts of i -th switch apparatus are closed, and to null if the contacts of i -th switch apparatus are open; N – is the total number of the switch apparatus, which determines the configuration of the functional circuit design of the electrical power network; δU_i – is the deviation of operating voltage of i -th circuit point beyond the permissible limit; M – if the total number of branch points in the circuit design; α_i – is the level of load limitation of i -th point of the functional circuit design in case of emergency perturbation; P_i – is the active power of i -th point load in the circuit design; Y_i – is the specific economic losses caused by limitation of i -th point load in the circuit design; ΔP_i – is active power losses on i -th section of the functional circuit design of the power distribution network; L – is the total number of sections in the functional circuit design under consideration.

It is obvious that in expression (1) the first component of the optimization function provides the minimal connectivity of the functional circuit design in the power distribution network; the second component represents the power quality at the points of consumer's voltage connection; the third component stands for the reliability of electrical supply, that is the economic component of outage losses; and the fourth components is the operation economy (profitability) of the system's operating mode with power losses in the network.

In determining the numerical values of weight coefficients it is recommended to reduce all four components of the target criterion function to one order, for example to unity, and to consider their mutual influence. For that reason, it is possible to adopt the following correlation for the installed power of the network P_s :

$$\begin{cases} k_1 = 1 / N; \\ k_2 = 1 / M; \\ k_3 = \frac{1}{P_s Y} = \frac{1}{(3,5\dots 4)P_s}; \\ k_4 = \frac{1}{P_s} \end{cases} \quad (2)$$

The proposed optimization function of the functional circuit design configuration of power distribution network is a complex nonlinear discrete function of many variables, the form of which restricts the use of traditional methods of optimization, in particular the methods of nonlinear programming, such as Lagrangian multiplier method and gradient descent method. Thus, following from the target criterion function proposed, the genetic algorithm has been used to determine the optimal functional circuit design configuration of power distribution network.

The key idea of the approach proposed here is to identify the characteristics and properties of the possible solutions of distribution network configuration by means of binary code and vector, which contains binary chains of the properties of alternative solutions. It is obvious that to a certain degree the vector matches the simplified mathematical model of a biological organism genotype, containing the full information about this organism. This allows us to apply the basic genetic operations of cross breeding, which will lead to the formation of new solutions with new properties.

Therefore, it is possible to present the functional circuit design configuration of the electrical power network under consideration by means of the binary chain, each bit of which contains the information on the state of a matching section of the circuit design ("0" – if the section is the open connector and is not a part of load cover section of the consumers connected; and "1" – if the section is in process). The overall search space consists of 2^n possible states, where n – is the total number of circuit design sections of the electrical power network.

Since the electrical power network may contain hundreds and thousands of sections, the problem solutions of optimal network configuration becomes very complicated. For the purpose of accelerating the operation, increasing the efficiency of genetic algorithms, and decreasing the probability of incoherent circuit design of the electrical network, we suggest restricting the search space by zone allocation of unconditional attractors of power supplies, which contain the sections of the circuit design that provide power supply of certain consumers at any combinations of permissible operation mode parameters (e.g. voltage at power supply bus-bars, load power etc.). This part of the circuit design stays unvaried, and can be neglected in the reconfiguration. The other part of the circuit design represents a "boundary" zone, where the search for places to locate reserve connectors for the purpose of optimum sectionalisation of power distribution network is directly done.

Allocation of unconditional attractor zones of power supply and “boundary” zones within the circuit design of the power distribution network allows greatly reducing the search space of optimal solution. This increases the efficiency of applying mathematical apparatus of genetic algorithms to the solution of optimization problem without additional time-consuming control of connectivity conditions of functional network diagram.

Hence, in the optimal reconfiguration of power distribution network we determine only the boundary zone with a restricted number of sections on which the breaker can be switched on or off. Boundary zone sections make up a binary chain for the genetic algorithm. Graphical interpretation of boundary zone is presented in Fig. 1.

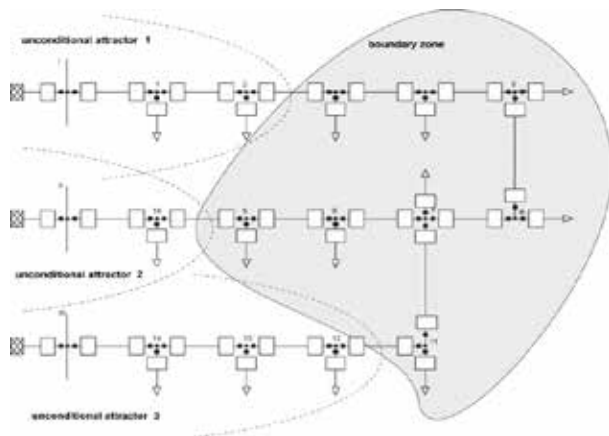


Fig.1. Graphical interpretation of a boundary zone of the electrical network

The developed method [6, c. 58] of optimal power distribution network reconfiguration based on using the genetic algorithms consists in applying the following procedures:

1. All power supplies of power distribution network are considered in succession and in pairs, and unconditional attractor zones of each power source are identified on the basis of the minimax approach. For this purpose, the power of distribution substation loads of one power supply is maximized and the power of other power supply is minimized. Further, the circuit design section to which the electric centre of load belongs is determined by the following expression:

$$l_x = \frac{\sum_{i=1}^N P_i l_{0i}}{\sum_{i=1}^N P_i}, \quad (3)$$

where N – is the total number of sections of a double-fed line; l_i – is the length of i -th section of the circuit design; P_i – is the active power of load at the end

of i th section; l_{0i} – is the distance from the beginning to the end of i -th line section.

Conditional excluded sections between electric centres of load divides the circuit design into two incoherent parts, and each incoherent part determines the unconditional attractor zone of a current power supply. These operations are also carried out for other power sources. The parts of the circuit design that are not within the area of any unconditional attractor make up a boundary zone (Fig. 1), in which the search for places to locate the reserve connectors will be done.

2. The method of coding the genetic information about power distribution network configuration is applied. For this purpose, the binary chain is formed, whose length is equal to the number of sections within a boundary zone. Each bit of the chain determines the condition of a corresponding section of the circuit design (“1” – the section is in process, “0” – the section is a reserve connector section).

3. The initial population of possible configuration solutions of circuit designs of the power distribution network is created. The volume of initial population depends on the dimensions of a boundary zone of the circuit design, and constitutes 20-30 individuals. A phenotype of all configurations of circuit designs, or of individuals of initial population, is developed. One of the configurations should match the initial circuit design of the distribution network. Other phenotypes are filled by means of the random-number generator with uniform distribution.

4. For all individuals of the initial population of possible functional circuit design configurations the values of target criterion function (1) is calculated, which determines the optimality degree of the corresponding network configuration solution. Also, the average value of the target criterion function for initial population as a whole is determined.

5. A roulette wheel for determining the current parent pair of circuit design configurations of power distribution network is created by the calculation method. For this purpose, the wheel is divided into sectors, and the number of sectors equals the number of individuals of the current population. The lower the values of the target criterion function for the corresponding configuration solution, the larger the width of sector. The width of each sector is determined in relative units by the expressions:

$$F'_i = \frac{1}{F_i}; \quad \Delta_i = \frac{F'_i}{\sum_{i=1}^N F'_i}, \quad (4)$$

where F_i – is the value of target criterion function for the circuit design of the current population; i – is

the index of the current circuit design (individual) within the population; N – is the total number of circuit designs within the population; Δ_i – is the width of “roulette” sector which matches i -th circuit design of population in relative units.

6. The roulette wheel is started twice by means of the random-number generator with uniform distribution, and two individuals of the current population whose genetic material will be used for the formation of a new daughter design are determined.

7. The genetic operator of two-point crossover is applied to the selected parent pair, and the result will be a new daughter solution.

8. By means of the random-number generator with uniform distribution it is determined whether it is necessary to apply the genetic mutation operator to the generated new phenotype, and this operator is applied in case of necessity.

9. For a new configuration solution, the value of target criterion function of optimality is calculated by expression (1).

10. The roulette wheel is formed to determine the current population individual that will be replaced by the generated new solution. In this case, the width of wheel sectors should be larger with higher values of the target criterion function of a corresponding phenotype. This width is calculated in relative units by expression:

$$\Delta_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i} . \quad (5)$$

As a result, the width of each roulette sector is directly proportional to the value of target criterion function for the corresponding configuration solution. One-time start of the roulette wheel is done by means of the random-number generator with uniform distribution to determine the individual of the current population that will be replaced by a new daughter configuration solution. The replacement and computation of the average value of criterion function is performed for the updated population of circuit designs.

11. The conditions of genetic algorithm convergence are verified. If the number of generations of the generated daughter solutions has attained the limit value, or all phenotypes of the current population of possible configurations of the functional circuit design have resulted into one solution, the work of genetic algorithm is finished, and the best configuration of the circuit design of the current population with the minimum value of criterion function is accepted as the optimum solution. Otherwise, the following cycle of genetic algorithm is carried out, starting from procedure 5.

Results and discussion. The developed method of determining the optimal circuit design reconfiguration of the power distribution network by using the genetic algorithm has been tested on a subsystem of the electrical power network formed by feeders 4 and 18 of “Gnivan” substation, feeder 20 of “Gnivan” substation, and feeder 22 of “CFD” substation (Fig. 2).

Non-selected part of the circuit design with 52 sections represents a boundary zone. The condition of connectors of this zone in the genetic algorithm is represented as a binary chain of 52 bit, for example, as “FFFEFFDFFFF7F”.

The initial population of a boundary zone of the genetic algorithm consists of 20 circuit designs, one of which is a configuration of the functional circuit design at the current position of reserve connectors, and genotypes of all others are filled by means of the random-number generator. The operation of genetic algorithm is illustrated in the diagram in Fig. 3. Here, curve $F_{min}(g)$ represents the time history of the value of target criterion function of optimality in generations for the best design solution; $F_{mid}(g)$ – is the time history of average value of criterion function for the whole generation.



Fig. 2. The distribution network with selected unconditional attractors of feeders and a boundary zone

As seen from Fig. 3, the value of the criterion function for the best individual practically does not change after 30 full cycles of genetic algorithm are complete, which demonstrates that convergence of search process has been achieved. The optimal boundary zone of the functional circuit design under consideration is presented in the diagram in Fig. 4.

Conclusion. The efficiency of the method proposed for optimal reconfiguration of the power distribution network has been proved by the practical application of genetic algorithm for optimisation of power distribution networks configuration. The example of this method described in this paper shows that the optimal

reconfiguration of power distribution network enables decreasing active power net losses by approximately 10% (from 0.19 MW to 0.17 MW), and ensures the appropriate quality and reliability of the power supply. During the algorithm implementation about 600 alternatives of configurations were considered on the boundary zone, which represents less than 0.01 % of the general search space required for a complete circuit design of power distribution network.

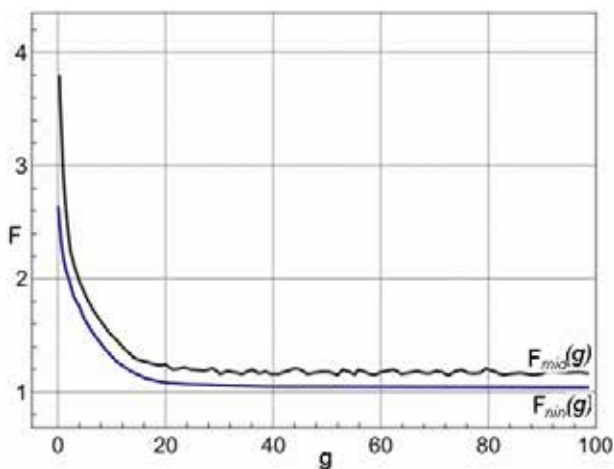


Fig. 3. Values of criterion function in generations

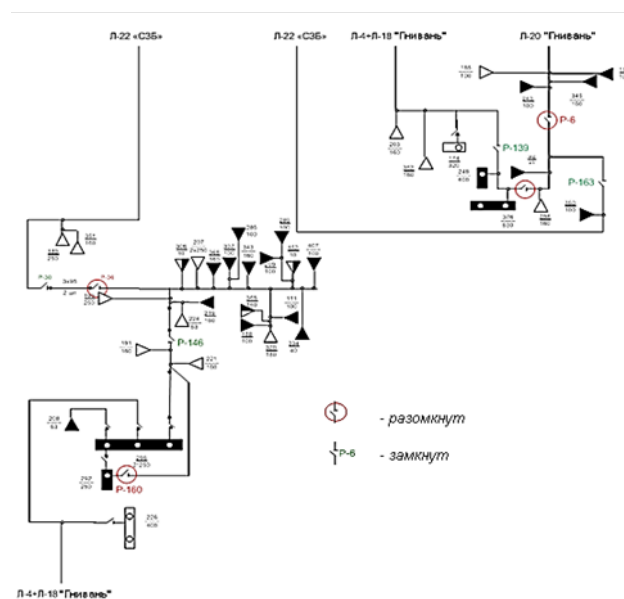


Fig. 4. An optimal boundary zone of the functional circuit design of the thirtieth generation

REFERENCES:

1. Arzamastsev D.A. Models and methods of optimization and development of grids / D.A. Arzamastsev, A.V. Lypes, A.L. Myzyn. Sverdlovsk: UPU, 1976. 148 s. (in Russian)
2. Economy and optimization of the modes of grids: inter-university collection of scientific works / otv. red. V. M. Cheban. – Novosybyrsk: Yzd-vo NETY, 1984. – 159 s. (in Russian)
3. Gay O.V., Tugai Yu.I. The optimal points of sectionalization in distributive networks. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. Iss. 28/ Pp/ 10–14. (in Ukrainian)
4. Kothari D.P. Power system optimization / D. P. Kothari, J. S. Dhillon. New Deli, Prentice-Hall of India, 2007. 572 p.
5. Kumar K. FDR Particle Swarm Algorithm For Network Reconfiguration Of Distribution Systems / K. Kumar, N. Ramana, S. Kamakshaiah. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2012. Vol. 36. №2. P.174–180.
6. Kyryk V. An increase of energy efficiency of distributive networks is with the use of SMART-technologies / B.V. Tsyhanenko, D.M. Sumsyky, V.V. Kyryk, T.L. Katsadze. *Elektronika i zviazok*. 2016. №4(93). T. 21. S. 58–63. (in Ukrainian)

ГЕНЕТИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЇ РЕКОНФІГУРАЦІЇ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

У роботі представлені загальні положення та інноваційні рішення для вирішення важливої сучасної прикладної проблеми розробки нових методів оптимальної реконфігурації високовольтних розподільних мереж. Реконфігурація розподільної електричної мережі розглянута в нормальному режимі її роботи з використанням генетичного алгоритму, який дозволяє визначити оптимальну конфігурацію мережі так, щоб втрати потужності по лініях електропередавання були мінімальними, забезпечува-

лася стандартна якість електроенергії та відповідна напруга в пункті підключення споживачів. Крім того, цей підхід забезпечує мінімальну зв'язаність схеми мережі та мінімальні економічні втрати.

Ключові слова: високовольтні електричні мережі, реконфігурація, генетичний алгоритм, цільова функція реконфігурації схеми

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В работе представлены общие положения и инновационные предложения для решения важной современной прикладной проблемы разработки новых методов оптимальной реконфигурации высоковольтных распределительных сетей. Реконфигурация распределительной электрической сети рассматривается в нормальном режиме ее работы с использованием генетического алгоритма, который позволяет определить оптимальную конфигурацию сети так, чтобы потери мощности по линиям электропередачи были минимальными, обеспечивалось стандартное качество электроэнергии и соответствующее напряжение в пункте подключения потребителей. Кроме этого, подход обеспечивает минимальную связанность схемы электрической сети и минимальные экономические потери.

Ключевые слова: высоковольтные электрические сети, реконфигурация, генетический алгоритм, целевая функция реконфигурации схемы.

ПРИЛАДИ

УДК 681.785.588

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/08>

Єгоров А.Д.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова
Національної академії наук України

Єгоров В.А.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова
Національної академії наук України

Єгоров С.А.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова
Національної академії наук України

Сінельников І.Є.

Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова
Національної академії наук України

УДОСКОНАЛЕНІ МЕТОДИКИ ОБРОБКИ ДАНИХ В ОПТИЧНИХ СПЕКТРОМЕТРАХ

Для обробки даних під час вимірювання оптичних спектрів у режимі реального часу часто доводиться застосовувати удосконалені під вирішення певних задач методи фільтрації. У цій роботі представлені такі алгоритми, які враховують специфіку реєстрації оптичних спектрів багатоканальними фотоприймачами. Вони дають змогу досить коректно здійснювати оцінку постійного складника спектра, його згладжування та спрощений пошук оптимального значення параметрів спектра методом максимальної правдоподібності. Розглянуто дію цих алгоритмів у застосуванні до синтезованої числової моделі і до результатів реальних вимірювань.

Ключові слова: оптичний спектр, багатоканальні фотоприймачі, метод максимальної правдоподібності, аналітичний параметр.

Постановка проблеми. Прогрес у створенні багатоканальних напівпровідникових фотоприймачів призводить до все більшого їх використання в спектральній апаратурі. Зараз для реєстрації спектрів використовують фоточутливі прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), прилади із зарядовою інжекцією (ПЗІ), декілька модифікацій технологій активних пікселів. Залежно від типу дисперсійної системи спектрометра застосовують прилади лінійної чи матричної структури. Незважаючи на різноманіття технологій виготовлення і схем використання фотодетекторів, їх поєднує декілька особливостей, пов'язаних з дискретною регулярною структурою фотоприймачів у разі реєстрації спектральних ліній. У цій статті представлені удосконалення деяких алгоритмів програмного забезпечення на прикладі атомно-емісійного спектрального аналізу. Завдяки унікальній точ-

ності і чутливості цей тип аналізу дуже поширений у лабораторній та виробничій практиці. Однією з особливостей цього типу аналізу є велика насиченість спектрів спектральними лініями, що потребує реєстрації ліній, ширина яких є близькою до розміру фоточутливих пікселів [1]. Для ототожнювання та інтерпретації спектрів є декілька спеціалізованих програм [2; 3], але вони здебільшого потребують втручання оператора в процес ідентифікації спектра і вимірювання параметрів спектральних ліній, що привносить деяку суб'єктивність у результати вимірювань.

Постановка завдання. У статті представлені доопрацювання алгоритмів обробки спектральних даних, у тому числі:

1. Згладжування масиву даних довільним ядром.
2. Компенсація фону.
3. Визначення параметрів спектральних ліній.

Виклад основного матеріалу дослідження.**Згладжування масиву даних довільним ядром.**

Програма знаходить масив згладжених даних $S(i)$:

$$S(i) = \frac{1}{\sum_{j=-m}^m g(j)} \cdot \sum_j s(i-j) \cdot g(j),$$

де $s(i)$ – вхідні дані при $0 \leq i \leq (N-1)$;

N – кількість членів масиву;

$g(j)$ – ядро згладжування при $-m \leq j \leq m$.

Вигляд ядра згладжування зумовлює, як правило, апаратною функцією спектрографа. Кількість членів масиву згладжених даних на $2m+1$ менше кількості вхідних даних.

Задачу згладжування в такій постановці можна вирішувати із застосуванням стандартних математичних програмних пакетів, але для випадку обробки спектральних вимірювань алгоритм доцільно дещо удосконалити. Справа в тому, що розмір пікселя детектора спектрографа такого ж порядку, що й півширина спектральної лінії. В таких умовах, як показано в роботі авторів [1], значно ускладнюється алгоритм подальшої обробки даних. Тому ми пропонуємо табуляцію ядра згладжування проводити з меншим у декілька разів кроком, ніж вхідні дані. Це дає змогу в стільки ж разів збільшити кількість відліків вихідного масиву. Тобто така процедура, крім згладжування, здійснює ще і функцію інтерполяції. Для прикладу на рис. 1 зображений результат згладжування експериментальних даних прямокутним ядром.

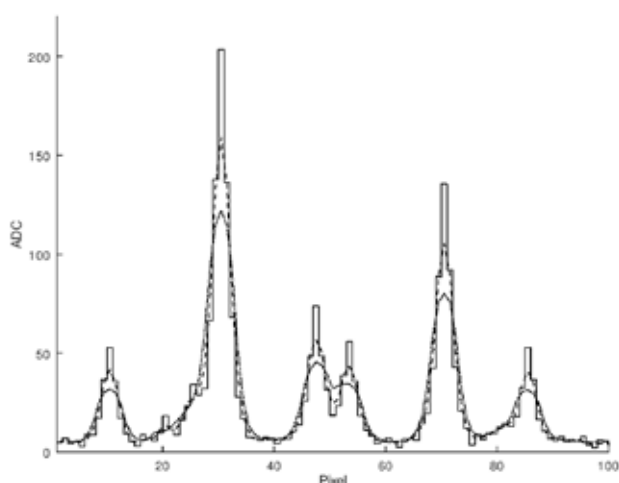


Рис. 1. Згладжування гест-функцією (прямокутним ядром згладжування).

Ступінчастий графік – зареєстрований спектр, результат згладжування прямокутним ядром розміром 3 пікселі (-----) і 5 пікселів (·-·-·-·-·)

Компенсація фону.

На ділянках спектра, де відсутні спектральні лінії, часто реєструються позитивні значення спектра, які називаються фоном. Фон, поміряний на виході спектрометра, може бути зумовлений властивостями джерела світла або недосконалістю спектрометра чи схемотехнічними особливостями електронних блоків. На лінійчатий спектр плазових утворень може накладатися як фоторекомбінаційний континуум, що несе корисну інформацію про дослідний зразок, так і постійний спектр від розігрітих електродів та пилових часток у проміжку між електродами генератора плазми, розсіяне світло в оптичному блоці та інші чинники. Це є першою і головною компонентою фону.

Друга компонента фону пов'язана з темновим струмом детектора та апаратними настройками електронних блоків. За такого поділу є можливість визначити величину цієї компоненти її реєстрацією у разі закритого оптичного входу спектрографа. Якщо поміряну таким чином другу компоненту відняти від зареєстрованого сигналу, то отримаємо різницю без постійного складника. Такий спосіб позбавлення від постійного складника рекомендується в декількох розробках [4; 5; 6]. Він може бути легко реалізований і апаратно, і програмно, але може призвести до спотворених результатів. Це буває в спектрах з малим рівнем першої компоненти, коли згадана вище різниця стає знакозмінною. У цьому разі вирахована таким чином величина світлового потоку може набувати від'ємних значень, що в принципі не має фізичного сенсу. Це призводить до порушення закону взаємозамінності яскравості лінії та тривалості експозиції, що викликає нелінійність світлосигнальної передавальної функції каналу реєстрації за малих амплітуд спектральних ліній [7].

Для запобігання цьому та для покращення читабельності спектра пропонується такий алгоритм визначення фону:

- вхідний масив даних розбивається на ділянки (розмір кожної ділянки значно більший ширини спектральної лінії);
- в межах кожної ділянки відшукується мінімальний член масиву;
- через мінімальні члени масивів із застосуванням інтерполяційного алгоритму проводиться лінія, яка є фоном.

Різниця між вхідним масивом і фоном являє собою масив даних після компенсації фону. Якщо такий масив має від'ємні значення, то методом

послідовних наближень знаходиться мінімальний доданок, що зміщує нульову лінію спектра. Величина цього доданку враховується у подальшій обробці експериментальних даних.

Визначення параметрів спектральних ліній.

У спектральному аналізі основна спектрофотометрична інформація міститься в амплітудній величині спектральних ліній хімічних елементів, що аналізуються. Для ототожнювання ліній важливо знати ще й позицію ліній. У зв'язку з цим ми обмежились розглядом задачі про знаходження двох незалежних параметрів спектральних ліній: амплітуди та фази. Співвідношення амплітуд відповідних спектральних ліній зумовлене процентним складом речовини, що аналізується. Фаза визначає положення максимуму спектральної лінії на багатоелементному детекторі. Вважаємо, що номер пікселя детектора жорстко зумовлений довжиною хвилі зареєстрованого світлового сигналу.

У зв'язку з тим, що в спектральному аналізі широко застосовується калібрування і відносні вимірювання, виникла можливість дещо спростити математичну обробку даних. Згідно з нашими оцінками в умовах реального експерименту нехтування деякою суворістю математичного підходу суттєво не впливає на кінцевий результат. Наприклад, ми не враховували асиметрію апаратної функції спектрографа і залежність її від довжини хвилі та поляризації. Ми вважали, що абераційні характеристики спектрографа такі, що завжди дають гаусів профіль лінії на його виході:

$$G(i, A, \phi, r) = A \cdot \exp\left[-\frac{(i - \phi)^2}{2 \cdot r^2}\right],$$

де i – поточна координата пікселя,
 A – амплітуда спектральної лінії,
 ϕ – фаза, тобто положення максимуму спектральної лінії,
 r – половина ширини апаратної функції спектрографа.

Якщо вхідна діафрагма спектрографа має велику ширину, за профіль спектральної лінії приймалась суперпозиція гаусових кривих.

Для практичного застосування здебільшого досить суперпозиції трьох гаусових кривих. Згідно з методикою, що представлена в [8], найбільш імовірні значення параметрів знаходимо по мінімуму функції правдоподібності $L(i, A, \phi)$, що дорівнює:

$$L(i, A, \phi) = \sum_i [G(i, A, \phi) - s(i)]^2$$

Сукупність параметрів, за якої $L(i, A, \phi)$ досягає мінімуму, знаходиться прирівнюванням нулю її першої похідної по відповідних параметрах. Для

знаходження найбільш імовірної амплітуди і фази розв'язується така система рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial A} L(i, A, \phi) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \phi} L(i, A, \phi) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Характеристикою точності визначення параметрів служить дисперсійна матриця, яка є зворотною такої матриці других похідних функції правдоподібності по відповідних параметрах:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial A^2} L(i, A, \phi) & \frac{\partial^2}{\partial A \partial \phi} L(i, A, \phi) \\ \frac{\partial^2}{\partial \phi \partial A} L(i, A, \phi) & \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} L(i, A, \phi) \end{pmatrix}$$

Беручи до уваги, що стосовно незалежних параметрів A і ϕ змішані похідні $L(i, A, \phi, r)$ тотожно дорівнюють нулю, зворотна матриця буде такою:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial A^2} L(i, A, \phi) & 1 \\ 0 & \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} L(i, A, \phi) \end{pmatrix}$$

Середня квадратична похибка визначення амплітуди σ_A зв'язана з похибкою вхідного масиву σ так:

$$\sigma_A = \frac{\sigma}{\frac{\partial^2}{\partial A^2} L(i, A, \phi)}$$

Відповідно, похибка фази σ_ϕ дорівнює:

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma}{\frac{\partial^2}{\partial \phi^2} L(i, A, \phi)}$$

Для деяких профілів спектральних ліній система (1) має аналітичні рішення. Для прикладу розглянемо гаусів профіль спектральної лінії. Результати точних числових розрахунків для цього випадку представлені на рис. 2 і рис. 3. На рис. 2 представлена залежність функції $L(i, A, \phi, r)$, а також її похідних від параметру A .

На рис. 3 відображена залежність функції $L(i, A, \phi, r)$ та її похідних від параметру ϕ .

Графік першої похідної на обох рисунках у досить малій близькості від переходу через нуль мало відрізняється від прямої. Тому, якщо параметри представити у вигляді $A=A_0 + \Delta A$, $\phi=\phi_0 + \Delta \phi$, можемо з точністю до квадратичного члена написати:

$$\frac{\partial L(i, A_0, \phi_0, r)}{\partial A} + \Delta A \frac{\partial^2}{\partial A^2} L(i, A_0, \phi_0, r) = 0 ;$$

$$\frac{\partial L(i, A_0, \phi_0, r)}{\partial \phi} + \Delta \phi \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} L(i, A_0, \phi_0, r) = 0 ,$$

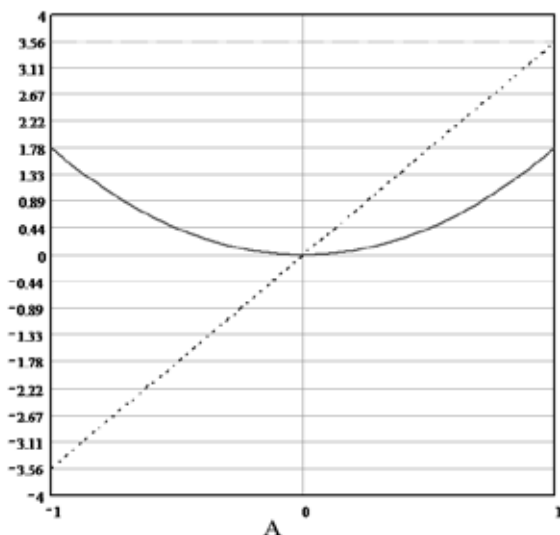


Рис. 2. Графік функції $L(i, A, \varphi, r)$ (—), а також її похідних $\frac{\partial L(i, A, \varphi, r)}{\partial A}$ (·····) та $\frac{\partial^2 L(i, A, \varphi, r)}{\partial A^2}$ (---) від параметру A

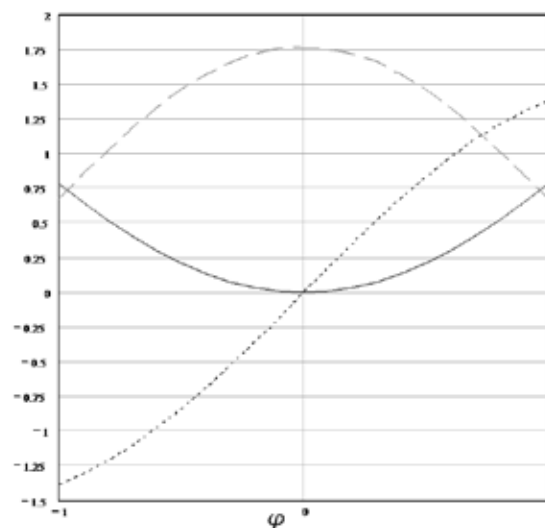


Рис. 3. Графік функції $L(i, A, \varphi, r)$ (—) та її похідних $\frac{\partial L(i, A, \varphi, r)}{\partial \varphi}$ (·····) та $\frac{\partial^2 L(i, A, \varphi, r)}{\partial \varphi^2}$ (---) від параметру φ

де A_0 та φ_0 – приблизні величини параметрів поблизу точки мінімуму функції $L(i, A, \varphi, r)$. Змішані похідні $\frac{\partial^2 L(i, A_0, \varphi_0, r)}{\partial \phi \partial A}$, $\frac{\partial^2 L(i, A_0, \varphi_0, r)}{\partial A \partial \phi}$ тотожно дорівнюють нулю, тому що A і φ – незалежні параметри.

Тобто система двох рівнянь розпадається на два незалежні рівняння. Для нашого випадку, коли розподіл світлової енергії відповідає гаусовій кривій, аналітичний вираз для ΔA і $\Delta \varphi$ буде такий:

$$\Delta A = \frac{\sum_i \frac{\partial}{\partial A} G(i, A_0, \phi_0, r) [s(i) - G(i, A_0, \phi_0, r)]}{\sum_i [\frac{\partial}{\partial A} G(i, A_0, \phi_0, r)]^2}$$

$$\Delta \varphi = \frac{\sum_i \frac{\partial}{\partial \phi} G(i, A_0, \phi_0, r) [s(i) - G(i, A_0, \phi_0, r)]}{\sum_i [\frac{\partial}{\partial \phi} G(i, A_0, \phi_0, r)]^2}$$

Результати вимірювань.

Експериментальні оцінки σ_A були одержані в процесі побудови графіків калібрування для стандартних зразків. Вони співпадають з аналітичними і лежать у межах декількох відсотків. Величина σ_φ для ліній помірної амплітуди становить декілька процентів відносно півширини спектральної лінії r . Для ілюстрації цього в таблиці 1 приведені дані розрахунків фази для декількох реалізацій ряду спектральних ліній при величині $r = 0.3 \text{ \AA}$.

Таблиця 1

Дані розрахунків фази спектральних ліній

λ табл лексп.	3227,75	3286,75	3358,49	3370,78	3413,13	3414,77	3450,33	3485,34
$\lambda 1$ експ.	3227,697	3286,601	3358,377	3370,695	3413,139	3414,76	3450,456	3485,548
$\lambda 2$ експ.	3227,691	3286,597	3358,38	3370,696	3413,142	3414,766	3450,46	3485,573
$\lambda 3$ експ.	3227,688	3286,597	3358,38	3370,691	3413,137	3414,763	3450,454	3485,575
$\lambda 4$ експ.	3227,689	3286,601	3358,369	3370,69	3413,137	3414,759	3450,448	3485,557
$\lambda 5$ експ.	3227,688	3286,603	3358,375	3370,689	3413,134	3414,762	3450,448	3485,562
$\lambda 6$ експ.	3227,685	3286,604	3358,362	3370,694	3413,14	3414,763	3450,449	3485,559
$\lambda 7$ експ.	3227,688	3286,603	3358,365	3370,695	3413,14	3414,763	3450,446	3485,553
$\lambda 8$ експ.	3227,686	3286,599	3358,372	3370,69	3413,138	3414,761	3450,449	3485,564
$\lambda 9$ експ.	3227,69	3286,611	3358,368	3370,7	3413,145	3414,769	3450,448	3485,558
$\lambda 10$ експ.	3227,687	3286,607	3358,372	3370,697	3413,142	3414,766	3450,452	3485,566
λ середня	3227,689	3286,602	3358,372	3370,694	3413,139	3414,763	3450,451	3485,562
σ	0,003348	0,004373	0,00611	0,003592	0,003134	0,003048	0,004422	0,008396

У ній застосовані такі позначення:
 λ табл. – довжина хвилі по довідкових таблицях;
 λ к експ. – довжина хвилі, що одержана з к-го експерименту із застосуванням описаного алгоритму;
 λ середня – осереднена по 10 експериментах довжина хвилі;
 σ – похибка визначення λ .
Всі дані наведені в Ангстремах.

Висновки. За результатами доопрацювання алгоритмів обробки експериментальних даних з урахуванням потреб спектрального аналізу одержані такі висновки:

1. Фільтрацію зареєстрованого масиву спектральних вимірів доцільно виконувати з ядром згладжування, що задається з меншим у декілька разів кроком, ніж вхідні дані. Це збільшує кількість членів вихідного масиву та спро-

щує послідуочу інтерполяцію і загалом сприйняття спектра.

2. Урахування постійного складника фону спектрограми відніманням її від зареєстрованого сигналу може призводити до від'ємних значень світлового потоку та порушення закону взаємозамінності яскравості лінії і тривалості експозиції. Тому проблема компенсації фону вимагає ретельного аналізу і методик із застосуванням відносних вимірювань. У цій статті пропонується інтерполяційний алгоритм із використанням мінімальних точок спектрограми.

3. Алгоритм пошуку оптимальних параметрів спектральних ліній пропонується доповнити застосуванням пошуку екстремуму функції правдоподібності розкладанням у ряд. Згідно з результатами попередніх оцінок для досягнення необхідної точності вимірювань амплітуди й фази реальних спектрів досить лінійного наближення.

Список літератури:

1. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А., Здор Е.В. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками. *Радиофизика и электроника*. 2002. Т.7. №2. С. 422–425.
2. Программное обеспечение «АТОМ». URL: http://www.vmk.ru/product/programmnoe_obespechenie/atom.html (дата звернення: 03.05.2019).
3. SpecLine software. URL: https://www.plasus.de/index.php?page=software_specline&lang=en (дата звернення: 10.05.2019).
4. Васильева И.Е., Кузнецов А.М., Васильев И.Л., Шабанова Е.В. Градуировка методик атомно-эмиссионного анализа с компьютерной обработкой спектров. *Журнал аналитической химии*. 1997. Т. 52. № 12. С. 1238–1248.
5. Программное обеспечение атомно-эмиссионного спектрального анализа (программа «АТОМ») / В.Г. Гаранин, О.А. Неклюдов, Д.В. Петроченко и др. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. № 1. ч. II. С. 69–74.
6. Jian-kang Zhou, Wei-min Shen, Min-xue Tang. Extended dynamic range techniques of CCD measurements. *Opto-Electronic Engineering J.* 2006. Vol. 33. No. 10. P. 96–114.
7. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников атомно-эмиссионных анализаторов. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019. Т. 86. № 3. С. 410–416.
8. Косарев Е.Л. Методы обработки экспериментальных данных. Москва : Физматлит, 2008. 208 с.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОМЕТРАХ

Для обработки данных при измерении оптических спектров в режиме реального времени часто приходится применять усовершенствованные под решение конкретных задач методы фильтрации. В данной работе представлены такие алгоритмы, которые учитывают специфику регистрации оптических спектров многоканальными фотоприемниками. Они позволяют достаточно корректно осуществлять оценку постоянной составляющей спектра, его сглаживание и упрощенный поиск оптимального значения параметров спектра методом максимального правдоподобия. Рассмотрено действие этих алгоритмов в применении к синтезированной числовой модели и результатам реальных измерений.

Ключевые слова: оптический спектр, многоканальные фотоприемники, метод максимального правдоподобия, аналитический параметр.

IMPROVED METHODS OF DATA PROCESSING IN OPTICAL SPECTROMETERS

It is often necessary to apply improved methods for solving certain problems of filtration, in order to process data in the measurement of optical spectra in real-time. The algorithms that take into account the specifics of the multichannel photodetectors optical spectra registration are presented in this paper. They allow fairly accurate estimate of the background of the spectrum. It simplifies the search for the optimal value of the parameters of the spectrum by the method of maximum likelihood. The effect of these algorithms in application to the synthesized numerical model and to the results of real measurements is considered.

Key words: optical spectrum, multichannel photodetectors, maximum likelihood method, analytical parameter.

УДК 620.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/09>**Иценко А.И.**Институт проблем материаловедения имени И.Н. Францевича
Национальной академии наук Украины**Шевченко А.И.**Главная астрономическая обсерватория
Национальной академии наук Украины**Богдан Г.А.**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

КОНТРОЛЬ ОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕРИАЛАХ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы проведения интегральной оценки однородности распределения прочностных характеристик в порошковых материалах, изготовленных на основе нитрида алюминия, по результатам акустических измерений. Для определения акустических параметров материала был реализован ультразвуковой метод прохождения. В качестве основного информационного параметра для исследований была использована скорость прохождения ультразвуковой волны в объекте контроля. По результатам экспериментальных исследований установлено, что в образцах присутствует разброс физико-механических характеристик (плотность, модуль упругости) в пределах 10%. Такой разброс возник за счёт вариации физико-механических характеристик сырья, технологических параметров, условий прессования и разности температуры спекания.

Ключевые слова: ультразвук, неразрушающий контроль, скорость распространения, порошковые материалы, нитрид алюминия, технология изготовления.

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день широкое распространение в различных областях промышленности получили материалы, изготовленные методами порошковой металлургии на основе нитрида алюминия (AlN) [1–6]. Нитрид алюминия – бинарное неорганическое химическое соединение алюминия с азотом, материал относится к структурам с ковалентными связями, имеющими гексагональную кристаллическую структуру типа вюрцита (рис. 1) [7].

Для создания композиционных материалов, работающих в экстремальных условиях, нитрид алюминия представляет интерес по целому ряду причин. Он отличается аномально высокой теплопроводностью. Монокристаллический AlN имеет теплопроводность около 350 Вт/(м К), что сравнимо и даже превосходит теплопроводность меди. Наряду с этим нитрид алюминия обладает значительным удельным электросопротивлением $10^{13} \div 10^{14}$ [Ом·см], низким тангенсом угла диэлектрических потерь $(3 \div 12) \cdot 10^{-4}$. Прочность на изгиб керамики на основе нитрида алюминия находится на уровне 300 МПа. Нитрид алюминия обладает

коррозионной стойкостью к воздействию расплавов многих металлов. Например, металлический алюминий не взаимодействует с нитридом алюминия до 1773 К. Такой комплекс свойств позволяет использовать материалы на основе нитрида алюминия в энергетике и металлургии для изготовле-

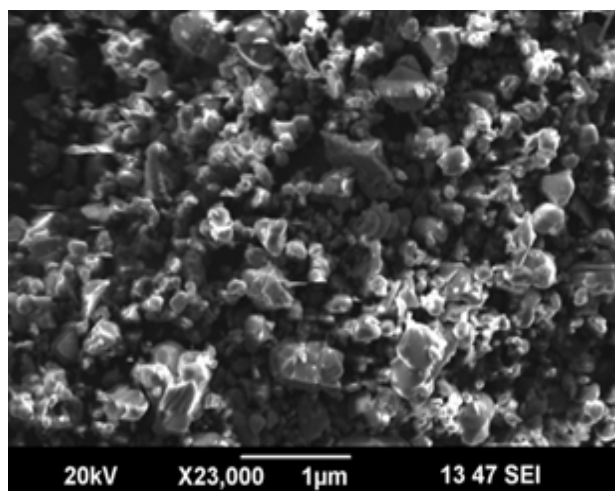


Рис. 1. Кристаллическая структура порошка нитрида алюминия

ния испарительных элементов, сопел, фильтров и тиглей для разливки металлов, защиты электролизеров и электродов, в электронике и технике СВЧ вместо керамики из оксида бериллия [1–8].

Согласно существующим на сегодняшний день методикам оценки физико-механических характеристик порошковых материалов получают путём использования разрушающих методов контроля [9]. Главными недостатками таких методов является то, что они не дают интегральную оценку распределения исследуемых физико-механических параметров материала, требуют изготовления образцов определённой формы и приводят к их полному разрушению. Для обеспечения стабильности воспроизведения служебных характеристик изделий, изготовленных на основе AlN, необходимо контролировать распределение прочностных свойств (модуль упругости) как между образцами, так и в объёме отдельно взятого объекта. Для оценки реальных физико-механических характеристик объекта контроля (ОК) на всех этапах изготовления материала рационально использовать результаты измерений, полученных на основе акустических методов неразрушающего контроля [10–11].

Постановка задачи. В данной работе рассматривается возможность исследования оценки однородности распределения прочностных характеристик в объёме образца, изготовленного из AlN, по результатам измерений скорости распространения ультразвуковой волны, а также степени повторяемости свойств между образцами одной и различных партий порошковых материалов, которые изготовлены по одной технологии.

Изложение основного материала исследования. Образцы были изготовлены в Институте проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины по следующей технологической схеме. Порошки нитрида алюминия смешивали с пластификатором (раствор каучука в бензине). Затем получали гранулы путём протирания пластифицированной массы через сито с ячейкой размером 4 мм. Гранулы засыпали в стальную прессформу и прессовали при удельном давлении 200 МПа. Спрессованные образцы спекали в высокотемпературной графитовой печи в среде азота при температуре спекания 1800÷1850°C.

В качестве объекта контроля испытывались цилиндрические заготовки диаметром от 8 до 9 мм и высотой 12÷13 мм. Их внешний вид представлен на рис. 2.

Прозвучивание ультразвуковой волной проводилось вдоль центральной оси цилиндра.



Рис. 2. Внешний вид ОК

Как известно, ультразвуковые методы неразрушающего контроля относятся к непрямым методам измерений. Искомый физико-механический параметр исследуемого материала находится по известным корреляционным или аналитическим зависимостям [12]. В качестве основного информационного параметра для наших исследований мы использовали скорость прохождения ультразвуковой волны в ОК. Скорость (C , м/с) распространения ультразвуковой волны в ОК при использовании метода прохождения рассчитывается по формуле (1):

$$C = \frac{h}{t - t_0}, \quad (1)$$

где h – геометрическая база измерения (толщина изделия в точке измерения), м; t – время прохождения ультразвукового импульса вдоль базы измерения, с; t_0 – систематическая временная поправка, с.

Для измерения времени прохождения t и геометрических размеров базы прозвучивания h была использована лабораторная установка, структурная схема которой показана на рис. 3, исследования проводились на частоте 5 МГц. Принцип действия установки описан в работе [13].

Данная установка позволяет обеспечить измерение скорости распространения ультразвуковой

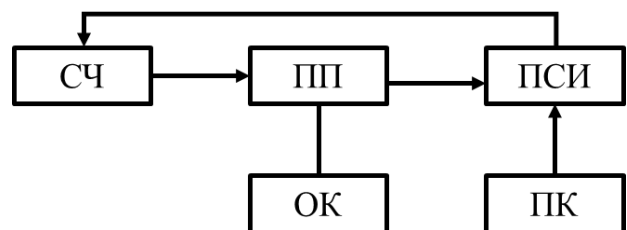


Рис. 3. Структурная схема лабораторной установки для измерения времени прохождения t и геометрических размеров базы прозвучивания h ультразвуковой волны в порошковых материалах[^]

СЧ – синтезатор сигналов; ОК – объект контроля; ПП – блок фиксации ультразвуковых преобразователей на поверхности ОК; ПСИ – плата сбора информации; ПК – персональный компьютер

волны с погрешностью менее 1%. Уменьшение погрешности достигается за счёт автоматизации процесса измерения акустических и геометрических параметров ОК, а также использования методов статистической обработки полученных экспериментальных данных.

Определение модуля упругости первого рода E исследуемого материала заложено в алгоритм работы системы и производится автоматически по команде оператора. Для его вычисления использовали формулу (2).

$$E = \frac{C_l^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)}, \quad (2)$$

где C_l – скорость распространения продольных акустических волн в материале, м/с; ρ – плотность материала, кг/м³; ν – коэффициент Пуассона.

На рис. 4 приведены усреднённые результаты определения скорости распространения ультразвуковой волны в образцах, изготовленных из AlN, по технологии описанной выше. Для каждого образца измерение его акустических параметров проводилось 50 раз.

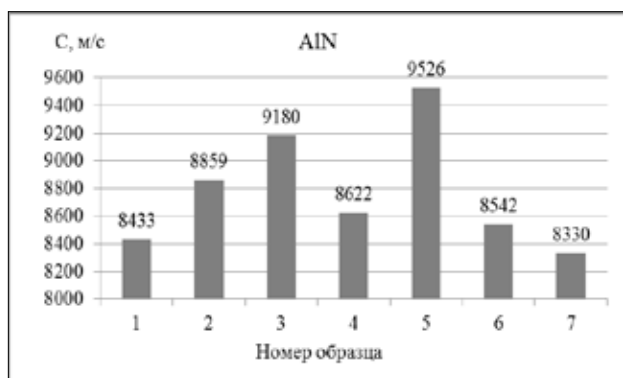


Рис. 4. Скорость распространения ультразвуковой волны в образцах AlN

В табл. 2 приведены рассчитанные по экспериментальным данным значения удельной плотности ρ , модуля упругости E (ГПа) и коэф-

фициент пропорциональности K образцов. Коэффициент пропорциональности K показывает отношение величин удельной плотности к модулю упругости.

Из рисунка 4 видно, что скорость распространения УЗ волны в исследуемых образцах изменяется в пределах 10%, что значительно превышает суммарную погрешность измерения для данного лабораторного стенда. Из этого можно сделать вывод, что и разброс прочностных характеристик между образцами будет лежать в пределах 10%. В тоже время изменение скорости распространения ультразвуковой волны в объёме отдельно взятого образца не превышает 1%, что соизмеримо с суммарной погрешностью используемого измерительного оборудования. Поэтому можно сделать вывод о стабильности распределения акустических, а значит и прочностных, характеристик в объёме отдельно взятого образца при их изготовлении по описанной технологии.

Анализ данных, приведённых в таблицы 1 и на рисунке 4, показал, что изменение скорости распространения УЗВ и модуля упругости первого рода в образцах коррелирует с изменением удельной плотности. Из этого можно сделать выводы, что, несмотря на использование одних и тех же параметров, при технологии изготовления данных порошковых материалов пористость в полученных образцах варьируется. В тоже время коэффициент пропорциональности K из таблицы 1 сохраняет близкие значения на образцах разной плотности.

Разброс акустических и прочностных свойств исследуемых порошковых материалов на основе нитрида алюминия можно объяснить разбросом физических свойств исходных порошковых компонентов, необеспечением стабильности технологических параметров при изготовлении материалов, а также неравномерностью температуры спекания в объёме образца.

Таблица 1

Физико-механические параметры нитрида алюминия

№ образца	Удельная плотность, $\rho, \frac{кг}{м^3}$	Модуль упругости $E, ГПа$	Коэффициент пропорциональности, $K = \frac{\rho}{E}, \frac{кг}{м^3} \cdot ГПа$
1	2883	174	16,6
2	2891	192	15,1
3	3109	222	14
4	3004	189	15,9
5	3199	246	13
6	2883	178	16,2
7	2955	174	16,9

Выводы. Результаты работы показали, что по результатам акустических измерений можно судить о проведении интегральной оценки однородности распределения прочностных характеристик в порошковых материалах, изготовленных на основе нитрида алюминия, как в объёме отдельно взятого образца, так и об их повторяемости в пределах партии образцов. По результатам экспериментальных исследований установлено, что в партии образцов, изготовленных по одной и

той же технологии, присутствует разброс физико-механических характеристик (плотность, модуль упругости) в пределах 10% за счёт разброса значительного сырья, технологических параметров, условий прессования и разности температуры спекания, в то время как в пределах одного образца распределение данных характеристик стабильно.

Таким образом, предложенная методика может быть использована для неразрушающего контроля материалов на основе нитрида алюминия.

Список литературы:

1. Костенко В.И., Серегин В.С., Грошкова Л.А., Василевич А.И. Перспективы использования высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия в космическом приборостроении. *Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении*. Труды семинара ИКИ РАН. Таруса, 2004. С. 250–256.
2. Флоренцев С.Н. Силовая электроника начала тысячелетия. *Электротехника*. 2003. № 6. С. 3–9.
3. Лоренц Л. Состояние и направление дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения полупроводниковых приборов. *Электротехника*. 2002. № 3. С. 2–16.
4. Belyanin A.F., Bouilov L.L., Zhirnov V.V., Kamenev A.I., Kovalskij K.A., Spitsyn B.V. Application of aluminum nitride films for electronic devices. *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. No (2–5). P. 369–372.
5. Бершадская М.Д., Аветиков В.Г. и др. Нитрид алюминия – новый высокотеплопроводный диэлектрик. *Электронная техника. Серия 6. Материалы*. 1984. Вып. 6 (191). С. 54–57.
6. Белянин А.Ф., Самойлович М.И., Житковский В.Д. Ударостойкие защитные плёночные покрытия на основе AlN в электронной технике. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2005. № 5. С. 35–41.
7. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А. и др. Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
8. Никитушкин И.В., Анненков Ю.М. Теплопроводная нанокерамика из нитрида алюминия и сопутствующие материалы, полученные методами высокоинтенсивных технологий. Матер. рос. молодежн. науч.-техн. конф. «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодёжи», Томск, 2013. С. 58–61.
9. Арзамасов В.Б., Волчко А.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для студентов высших учебных заведений. Москва : Академия, 2009. 448 с.
10. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / под ред. В.В. Клюева. Москва : Машиностроение, 2003. 656 с.
11. Безымянный Ю.Г., Богдан Г.А., Евко И.Г., Иванюк Н.А., Козирацкий Е.А. Контроль неоднородности свойств порошковых материалов по результатам акустических измерений. *Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. научн. тр. Темат. вып.: Электроэнергетика и преобразовательная техника*. Харьков : НТУ «ХПИ». 2011. № 19. С. 204–211.
12. Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю : підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 263 с.
13. Богдан Г.А., Баженов В.Г., Кравченко М.В. Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов. *Международный научно-исследовательский журнал*. Екатеринбург, 2016. № 4(46). Часть 2. С. 36–39.

КОНТРОЛЬ ОДНОРІДНОСТІ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ В МАТЕРІАЛАХ З НІТРИДУ АЛЮМІНІЮ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АКУСТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

У статті розглянуті питання проведення інтегральної оцінки однорідності розподілу міцнісних характеристик порошкових матеріалів, які виготовлені на основі нитриду алюмінію, за результатами акустичних вимірювань. Для визначення акустичних властивостей матеріалу був реалізований ультразвуковий метод проходження. Основним інформаційним параметром для досліджень була використана швидкість проходження ультразвукової хвилі в об'єкті контролю. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що є розбіжність фізико-механічних характеристик (густина,

модуля пружності) у межах 10%. Такий розкид виник за рахунок варіації фізико-механічних характеристик за рахунок розкиду значень сировини, технологічних параметрів, умов пресування та відмінності температур спікання.

Ключові слова: ультразвук, неруйнівний контроль, швидкість поширення, порошкові матеріали, нітрид алюмінію, технологія виготовлення.

CONTROL OF HOMOGENEITY OF DISTRIBUTION OF DURABILITY DESCRIPTIONS IN MATERIALS FROM NITRIDE OF ALUMINIUM ON RESULTS OF ACOUSTIC MEASURING

In the article the questions of realization of integral estimation of homogeneity of distribution of durability descriptions are considered in the powder-like materials made on basis nitride of aluminum, on results the acoustic measuring. For determination of acoustic parameters of material, the ultrasonic method of passing was realized. As basic informative parameters for researches speed of passing of ultrasonic wave was used in the object of control. It is set on results experimental researches, that in standards there is variation of physical and mechanical descriptions (closeness, module of resiliency) within the limits of 10%. Such a due to variation of values of raw material, technological parameters, terms of pressing and difference of temperature of sintering.

Key words: ultrasound, non-destructive control, speed of distribution, powder-like materials, nitride of aluminum, technology of making.

Цокота М.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОТОРЕГЕНЕРАЦІЇ ХРОНІЧНИХ РАН ІЗ ВИПРОМІНЮВАННЯМ НИЗЬКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ

За останні роки методика лікування хронічних ран із використанням низькоінтенсивних лазерів виокремилася як нова та ефективна з-поміж інших немедикаментозних засобів. В цьому дослідженні розглядаються методи лазерного випромінювання та їх параметри для лікування різних ран, та клінічні міркування. Крім того, обговорюються механізми дії низькоінтенсивної лазерної терапії (НІЛТ), пов'язані з процесами загоєння ран, контролю температури, представлено огляд наукових досліджень та процедур на різних стадіях загоєння, з дотриманням визначених необхідних параметрів лазерного впливу.

Ключові слова: лазерна терапія низького рівня, рани, фоторегенерація, клінічний розгляд, механізми дії, адаптивна терапія.

Постановка проблеми. В терапевтичній та лікарській практиці часто стикаються з ранами та великим їх різноманіттям і підходами до лікування. Травматичні рубці і хірургічні рубці утворюють широкий спектр гострих і хронічних ран. Від вчених вимагається знаходження ефективних методів їх лікування та загоювання, тому вивчення лазерного випромінювання контрольованої дії з метою проведення фоторегенерації є нагальним питанням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги якісної клінічної діагностики вимагають збільшення глибини роздільної здатності та проникнення випромінювання, адже нині воно є обмеженим глибиною проникнення.

Попередньо авторами [1] було проведено аналіз використання високо інтенсивного випромінювання для корекції ускладнень ранового процесу, цей метод забезпечує гомеостаз, стерильність і загоєння, проте використовується короткочасно та приводить, з одного боку, до некротичних реакцій, з іншого – до утворення плівки для біологічного бар'єру, що перешкоджає проникненню вмісту ранової поверхні в середину тканин і стимулюючому регенеративному процесу. Для певного результату необхідний точний контроль впливу із випромінюванням низької інтенсивності.

Класифікація ран як гострих і хронічних типів є ключовим для знання медичних рекомендацій і особливо якості лікувальних циклів при лікуванні рани. Для цього використовують терапію з низьким випромінюванням [4].

Більш конкретно, хірургічні рани являють собою поверхневі або глибокі рани на шкірі, слизових оболонках і м'язових шарах. При традиційному лікуванні рани використовують деякі

специфічні тематичні адміністративні препарати [5]. Протягом останнього десятиліття було розроблено декілька методів на основі лазерних, електричних та магнітних полів, світла та ультразвуку як альтернативне або допоміжне лікування при хронічній та гострій лікуванні ран [6]. Незважаючи на обмежене терапевтичне вікно лазерної терапії низького рівня (НІЛТ) в деяких пацієнтів, лазери багатьом пацієнтам здаються багатообіцяючими, на основі знань про терапевтичну дію [7].

Хоча лазерна терапія використовується місцево при лікуванні ран, підвищення її ефективності потребує також врахування просторового розподілу розсіяного випромінювання [8].

Механізм біофізичної дії в рані та утворення рубців описане в джерелах [1; 7; 9], та описано тільки біологічну складову частину.

Такі фактори, як розміри рани, включаючи глибину, ширину і довжину, тип некротичної тканини, тип і кількість ексудату, навколишній колір шкіри, набряк периферичної тканини і грануляційна тканина, є основними параметрами, що визначають відповідну методику загоєння ран. Деякі рани включають некротичні тканини; Більшість часу гіперглікемія у хворих на цукровий діабет викликає інфекцію, прогресуючу і некротичну рани після простої травми. Головною характеристикою таких ран є, що глибина рани не може бути діагностована, якщо некротичні матеріали або сміття покривають виразку [6].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз та формулювання раніше не досліджених принципів використання низькоінтенсивного випромінювання для фоторегенерації хронічних ран, огляд методик впливу для використання з клінічною метою.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Лікування ран включає поверхневий та глибинний вплив випромінюванням для формування дієвого терапевтичного ефекту проведення процедур.

Лікування препаратами має свої побічні дії та у процесі лікування рани спричиняє стійкість організму до медичних компонентів [11].

Задля розробки та оптимізації ефективної методики НЛЛТ необхідно визначити точні механізми дії та взаємодії лазера з живими тканинами.

Дослідження, проведені на тваринах [12; 13], показали, що, зокрема, підвищений рівень цукру в крові та кислотність затримують загоєння рани.

Дослідження, які визначали лазер як допоміжне або альтернативне лікування хірургічних ран, довели його ефективність у посиленні хірургічного закриття, зменшенні інфекції та болю, скороченні загального періоду загоєння рани. Лазерна терапія показала багатообіцяючий результат у лікуванні венозної виразки нижніх кінцівок як додаткового лікування стандартної терапії [14]. Параметри лазера (довжина хвилі, потужність, енергія, частота пульсу, тривалість імпульсу тощо) та умови опромінення (час експозиції, частота та тривалість лікування) на пряму впливають на результат лікування [5]. Тому для розробки успішного лікування необхідний відповідний відбір цих параметрів.

НЛЛТ при лікуванні ран.

Терапевтичні ефекти ЛЛЛТ для лікування пошкоджених тканин і придушення болю роблять цю методику підвищеною як форма лазерної медицини, яка використовує лазер низького рівня або світловипромінюючі діоди для зміни функцій клітин [15]. Основні сфери застосування LLLT в медицині представлені на рис. 1.

Як показали дослідження [16], що низькі дози лазерного випромінювання впливають на фер-

ментативні ланцюгові реакції, клітинні імунітет, кількість і якість імунних клітин, процес проліферації клітин, виділення тканин тощо. Низькі дози лазера, які використовуються в LLLT, впливають на ферментативні ланцюгові реакції, клітинний імунітет, кількість і якість імунних клітин, процес проліферації клітин, секрету тканин і т.д. достатньо терапевтичних вражень.

Як було запропоновано раніше, щоб не перевищувати одноразово допустиму дозу більше 4 Дж/см², інколи можна використовувати збільшену енергію для більш гострих чи складних уражень, із контролем температури [3]. Зокрема, ідентифікація когнітивних та перцептивних змін можлива з використанням розроблених діагностичних методів та інструментів [21].

Фізичні параметри LLLT.

Найважливішою фізичною характеристикою лазера, що робить його придатним для медикаментозної терапії, є поширення електромагнітного випромінювання з певними властивостями; когерентність монохроматичності та низька дивергенція. Інтенсивність лазера, що корелює з його спектральним розподілом, відомий як монохроматичність; хоча для цілей LLLT це не є критичним параметром. Операційну схему лазера можна описати шляхом збудження середовища через введення енергії [2]. Найбільш істотною взаємодією лазерного пучка і тканини є поглинання.

Як показують дослідження [5], немає необхідності мати чіткий вузький спектр лазера, оскільки він зумовлюється шириною смуг поглинання тканини.

Лазерна біологічна взаємодія тканин.

Як і будь-яка інша електромагнітна обробка, первинні ефекти взаємодії лазера з біологічною тканиною поділяються на термічні і нетермічні.

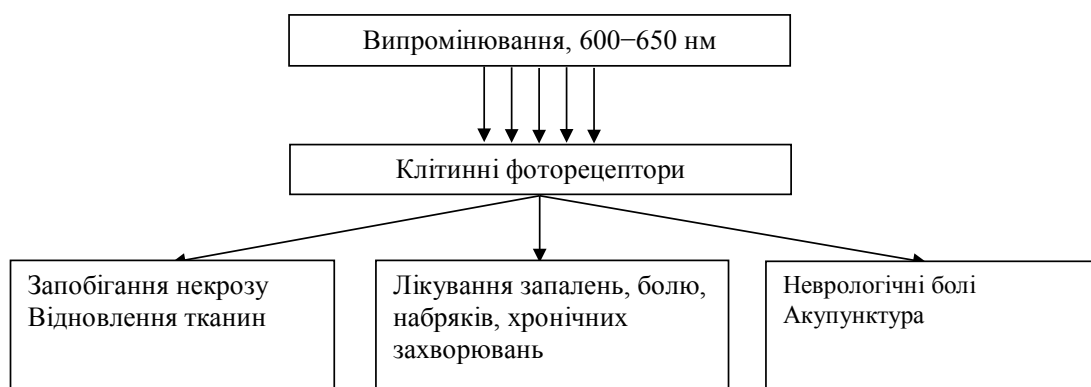


Рис. 1. Схематичне зображення основних областей застосування лазерного випромінювання в терапії

НІЛТ в основному не включає теплову дію, проте має контролюватися від перегріву.

Лазерне світло має деякі унікальні характеристики, що робить його придатним для різних медичних застосувань. Найбільш важливі функції включають монохромність, когерентність і поляризацію. З них монохромність є найважливішим параметром, що впливає на терапевтичні ефекти. Попередні дослідження запропонували три основні реакції для лазерно-тканинних взаємодій: фотохімічний, фототермічний і фотоплазматичний [12]. При фотохімічній реакції функція клітини тимчасово інактивується внаслідок дуже низької потужності опромінення, яке викликало токсичні хімічні процедури.

У такому вигляді взаємодія світла поглинається тканинними хромофорами, крім того, підвищення місцевої температури викликає процес передачі тепла (провідності) в більш прохолодні області.

Також велика доза тепла для тканин може призвести до денатурації, некрозу і навіть випаровування і відколу. Опромінення видимого світла низької інтенсивності може змінити активність таких біомолекул, як ДНК і РНК, але ці молекули не поглинають світло безпосередньо. Клітинна мембрана, ймовірно, є первинним поглиначем енергії, яка потім генерує внутрішньоклітинні ефекти через відповідь другого зв'язку. Величина зворотного зв'язку, частково визначається станом клітин/тканин до опромінення, узагальнено у простому твердженні, що «голодні клітини є більш світлочутливими, ніж ті, що добре харчуються». Потім опромінення тканин лазерним випромінюванням розглядається як тригер для зміни клітинних метаболічних процесів через процес трансдукції фотосигналу.

Основними фізіологічними та клітинними ефектами лазерно-тканинної взаємодії є модуляція клітинної проліферації, рухливість клітин, активація фагоцитів і макрофагів, стимуляція імунних відповідей, підвищення клітинного метаболізму, модуляція проліферації фібробластів, зміна потенціалів клітинної мембрани, стимуляція ангиогенезу, зміна потенціалів дії та зміна ендогенного виробництва.

Клінічні міркування дози НІЛТ при лікуванні ран

Нині в клінічних умовах LLLT використовуються для різних типів ран як допоміжне або альтернативне лікування, коли немає остаточного медикаментозного лікування [13; 15]. Було проведено кілька клінічних випробувань із метою дослідження та розробки LLLT для хронічних ран [2]. Серед інших були виділені численні дослід-

ження діабетичних ран, тому що некротична тканина внаслідок гіперглікемії відкладає найвищий діапазон захворюваності на себе, як шкірні рани, включаючи екскоріацію, поверхневі і глибокі рани внаслідок венозної і артеріальної обструкції [17].

Однією з проблем використання LLLT є застосування оптимальної дози опромінення [18]. Багато досліджень, проведених на тканинах, довели, що глибина проникнення лазера відрізняється в різних тканинах, слизова порожнина рота досить трансплантаційна, оскільки довжина хвилі не поглинає світло, кістки і шкіра приблизно такі ж, як слизова, тоді як м'язи поглинають найбільше світла [2].

Однією з основних проблем при розробці лазерної терапії в клінічних умовах є суперечність у визначенні однієї глобальної дозової одиниці. Різні дослідження повідомляли про різні одиниці доз. Крім того, різні лазерні випромінювачі працюють із різними одиницями, такими як Дж/см², Дж, Вт, Вт/см² тощо. Найбільш критичною і надійною дозою для лазерної терапії є щільність енергії в Дж/см².

В роботі [1] представлено метод обрахунку дози опромінення для НІЛТ, з дотриманням необхідних значень. Для запису та моніторингу даних впливу на біологічний об'єкт використовуються алгоритм, описаний авторами [22].

Тим не менш, останні дослідження та докази стверджують, що саме потужність енергії може бути найбільш критичним параметром, а не щільність енергії. Доза випромінювання на деяких апаратах обраховується математично, а на інших вимагає розрахунків від людини. Більшість рекомендацій вказує на те, що щільність енергії на сеанс лікування має бути в межах 0,1–12,0 Дж/см². Однак є деякі вказівки при спеціальних захворюваннях і умовах впливу, які рекомендують до 30 Дж/см².

Раніше пропонували не перевищувати максимальну (одноразову) дозу 4 Дж/см². Знову ж, нижчі дози слід застосовувати до більш гострих уражень, які, здається, більш чутливі до енергії.

Переваги НІЛТ з-поміж інших видів лікування

Процес загоєння рани є динамічною і складною процедурою, яка вважається природною реакцією на будь-яку травму в живих тканинах. Початковим чинником досягнення успішного та ефективного лікування ран є процедура після лікування та оцінка всього пацієнта [19].

Електричні та магнітні стимуляції є двома основними методами, які використовують для лікування при загоєнні ран [3; 7]. Електрична стимуляція – допоміжна терапія, яка не викорис-

товується в пластичній хірургії і може поліпшити виживаність клаптів і трансплантатів, прискорити післяопераційне відновлення і зменшення некрозу. Також було запропоновано зменшити інфекцію і поліпшити клітинний імунітет. В результаті контроль стану тканин можливий з адитивною лазерною терапією та налаштуванням лазерного випромінювача для конкретного випадку терапії.

Майбутні перспективи

Відповідно до широкого спектру застосування НЛЛТ, зокрема в області загоєння ран, нині лазерна терапія – це не просто наука, а піддається техніці для практично будь-яких видів рани. Тому з метою досягнення кращих результатів, актуальними є дослідження, які допоможуть удосконалити методики та пристрої, які використовуються для лазерної терапії.

Клінічне застосування лазера просте в реалізації та впровадженні, і пацієнти можуть добре його переносити. Хоча вчені [16; 19; 20] продовжують отримувати допоміжні дані та проводити дослід-

ження, пов'язані з лікуванням ран при підвищенні якості терапії НЛЛТ, необхідно надати методичку з мінімізацією побічних ефектів.

Висновки. Розглянута лазерна терапія з низькою інтенсивністю випромінювання, що показує надійну лікувальну ефективність для різних хронічних ран, особливо шкірних ран і діабетичних виразок і некротичних ран, та представлено дослідження з допустимими рівнем потужності випромінювання при коректному підборі параметрів впливу.

Показано метод фоторегенерації як один із найуспішніших із використанням НЛЛТ для загоєння ран.

Проте кілька основних питань залишаються відкритими, подальшого дослідження потребують точні механізми лазерно-тканинної взаємодії зокрема на молекулярному та клітинному рівнях, найважливіші параметри, що визначають терапевтичні наслідки і ефективність НЛЛТ для різних умов лікування хронічних ран тощо.

Список літератури:

1. Цокота. М.В. Особенности лазерного взаимодействия с живой тканью. Погляд у майбутнє приладобудування», *Інформаційно-вимірвальна техніка та технології біомедичних досліджень* – секція № 6: XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів, 15–16 травня 2018 р., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ. С. 374–378.
2. Михайлусов Р.Н. Возможности использования высокоэнергетического лазерного излучения при лечении ран. *Експериментальна і клінічна медицина*. 2015. № 2 (67). С. 124–128.
3. Тимчик Г.С. Моніторинг зміни температур при лазерній терапії / Г.С. Тимчик, М.Ф. Терещенко, М.Р. Печена. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*. 2014. № 47. С. 156–162.
4. Posten W., Wrone D., J Dover JS, Arndt K., Silapunt S., Alam M. Low level laser therapy for wound healing: mechanism and efficacy. *Dermatologic surgery*. 2005. 31(3):334-40.
5. A Junior Rocha B Vieira, L Andrade, F Aarestrup. Effects of low-level laser therapy on the progress of wound healing in humans: the contribution of in vitro and in vivo experimental studies. *Jornal Vascular Brasileiro*. 2007. 6(3):257-65. С. 35–48.
6. Green B., Metelitsa A. Optimizing outcomes of laser tattoo removal. *Skin Therapy Lett*. 2011. 16(10):1-3.
7. Hawkins D., Houreld N., Abrahamse H. Low level laser therapy (LLLT) as an effective therapeutic modality for delayed wound healing. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2005. 1056(1):486-93.
8. Безугла Н.В. Вплив осьової анізотропії розсіяння біологічних середовищ на точність визначення оптичних коефіцієнтів методом Монте-Карло / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Г.С. Тимчик, К.П. Вонсевич. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2015. № 1 (99). С. 85–91.
9. Yadollahpour A., Rashidi S. Therapeutic Applications of Electromagnetic Fields in Musculoskeletal Disorders: A Review of Current Techniques and Mechanisms of Action. *Biomedical and Pharmacology Journal*. 2014. 7(1):23-32.
10. Baranoski S., Ayello E.A. Wound care essentials: Practice principles: Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
11. Szymt K., Lukasz K., Bobkiewicz A., Cybulka B., Ledwosinski W., Gordon M., et al. Comparison of the effectiveness of the treatment using standard methods and negative pressure wound therapy (NPWT) in patients treated with open abdomen technique. *Polski przeglad chirurgiczny*. 2015. 87(1):22-30.
12. Al-Watban F., Zhang X., Andres B. Lowlevel laser therapy enhances wound healing in diabetic rats: a comparison of different lasers. *Photomedicine and laser surgery*. 2007. 25(2):72-7.
13. Calin M., Coman T., Calin M. The effect of low level laser therapy on surgical wound healing. *Romanian Reports in Physics*. 2010. 62(3):617-27.
14. Junior Rocha B., Vieira, Andrade L., Aarestrup F. Effects of low-level laser therapy on the progress of wound healing in humans: the contribution of in vitro and in vivo experimental studies. *Jornal Vascular Brasileiro*. 2007. 6(3):257-65. С. 35–48.

15. Hopkins J., McLoda T., Seegmiller J., Baxter G. Low-level laser therapy facilitates superficial wound healing in humans: a triple-blind, sham-controlled study. *Journal of athletic training*. 2004. 39(3):223.
16. Hussein A., Alfars A., Falih M., Hassan A. Effects of a low level laser on the acceleration of wound healing in rabbits. *North American journal of medical sciences*. 2011. 3(4):193.
17. Osman A., Kamel M., Wahdan M., Algazaly M. Assessment to the Effects of Low Power Diode Laser on Wound Healing in Diabetic Rats. *Life Science Journal*. 2013. 2:10.
18. Herascu N., Velciu B., Calin M., Savastru D., Talianu C. Low-level laser therapy (LLLT) efficacy in post-operative wounds. *Photomedicine and Laser Therapy*. 2005. 23(1):70-3.
19. A Hussein, A Alfars, M Falih, A Hassan. Effects of a low level laser on the acceleration of wound healing in rabbits. *North American journal of medical sciences*. 2011. 3(4):193.
20. A Medrado, L Pugliese, S Reis, Z Andrade. Influence of low level laser therapy on wound healing and its biological action upon myofibroblasts. *Lasers in surgery and medicine*. 2003. 32(3): 239-44.
21. Безугла Н.В. Просторова потокова біометрія середовищ еліпсоїдальними рефлекторами / Н.В. Безугла, М.О. Безуглий, Ю.В. Чмир. *Електроніка і зв'язок*. 2014. Том 19. № 6 (83). С. 8–93.
22. Безуглий М.А., Ключко Т.Р., Скицюк В.І., Тимчик Г.С. Моделювання автоматизованої системи рестрації та моніторингу біотехнічних об'єктів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. 2003. № 4 (21). Т. 1. С. 116–121.

ФОТОРЕГЕНЕРАЦИИ ХРОНИЧЕСКИХ РАН С ИЗЛУЧЕНИЕМ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

За последние годы методика лечения хронических ран с использованием низкоинтенсивных лазеров выделилась в качестве новой и эффективной среди других немедикаментозных средств. В данном исследовании рассматриваются методы лазерного излучения и их параметры для лечения различных ран, и клинические соображения. Кроме того, обсуждаются механизмы действия низкоинтенсивной лазерной терапии (НИЛТ), связанные с процессами заживления ран, контроля температуры, представлен обзор научных исследований и процедур на различных стадиях заживления, с соблюдением определенных необходимых параметров лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазерная терапия низкого уровня, раны, фоторегенерация, клинический рассмотрение, механизмы действия, адаптивная терапия.

PHOTOREGENERATION OF CHRONIC RAS WITH LOW INTENSITY RADIATION

In recent years, the technique of treatment of chronic wounds using low-intensity lasers has emerged as a new and effective, among other non-medicated means. This study examines the methods of laser radiation and their parameters for the treatment of various wounds, and clinical considerations. In addition, mechanisms of action of low-intensity laser therapy (NILT) are discussed, connected with processes of healing of wounds, temperature control, an overview of scientific researches and procedures at different stages of healing, with observance of certain necessary parameters of laser influence.

Key words: low-level laser therapy, wounds, photoregeneration, clinical examination, mechanisms of action, adaptive therapy.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.37

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/11>**Бугайов М.В.**

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ МАТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ЗІ СТРИБКОПОДІБНОЮ ЗМІНОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ В СКЛАДНІЙ СИГНАЛЬНІЙ ОБСТАНОВЦІ

У роботі запропоновано частотно-часовий матричний метод виявлення та оцінювання параметрів радіосигналів зі стрибкоподібною зміною робочої частоти (СЗРЧ) на фоні вузькосмугових та імпульсних перешкод і широкосмугового шуму. Основою запропонованого методу є виявлення вузькосмугових сигналів у смузі частот аналізу та подальше оброблення отриманої частотно-часової матриці. У результаті такого оброблення отримують оцінки значень параметрів як сигналів зі СЗРЧ, так і перешкод. Запропонований метод може бути використаний у автоматичних комплексах радіомоніторингу для виявлення та оцінювання параметрів сигналів зі СЗРЧ.

Ключові слова: стрибкоподібна зміна робочої частоти, виявлення, вузькосмугова перешкода, широкосмуговий шум, імпульсна перешкода, ітеративне порогове оброблення, частотно-часова матриця.

Постановка проблеми. У сучасних цивільних та військових цифрових системах зв'язку широко використовують радіосигнали зі СЗРЧ. Такі системи використовують велику кількість частотних позицій і за рахунок розширення смуги частот шляхом стрибкоподібною зміни робочої частоти володіють високою енергетичною розвідзахищеністю та стійкістю до впливу вузькосмугових перешкод [1, с. 752; 2, с. 129].

Сучасні радіостанції в режимі СЗРЧ працюють у діапазоні частот від 1,5 МГц до 2 ГГц, кількість частотних каналів може перевищувати 3000, а кількість змін робочої частоти досягати 20000 за секунду, а канална швидкість передачі даних може досягати 11 МБіт/с. При цьому схеми символної модуляції можуть бути найрізноманітнішими.

Оскільки для будь-якої системи радіомоніторингу задача виявлення сигналів є базовою [3, с. 10], то без її якісного розв'язання складно розраховувати на задовільну якість роботи системи в цілому. Усе це зумовлює необхідність розроблення стійких методів виявлення та оцінювання параметрів радіосигналів зі СЗРЧ в умовах невизначеності щодо швидкості перебудови частоти, кількості частотних каналів та рознесення між ними, зайнятості смуги частот, що аналізується, рівня широкосмугового шуму та потужності імпульсних і вузькосмугових перешкод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням виявлення радіосигналів зі СЗРЧ при-

свячено значну кількість вітчизняних та закордонних наукових публікацій, у яких висвітлено основні підходи до виявлення та оцінювання параметрів таких сигналів. Основними напрямками виявлення сигналів зі СЗРЧ є використання енергетичних широкосмугових, вузькосмугових та скануючих радіометрів [4, с. 278; 5, с. 32], частотно-часового [6–7] та вейвлет-аналізу [8]. У роботах [9–10] запропоновано підхід до виявлення радіосигналів зі СЗРЧ, сутність якого полягає у стисненні прийнятого сигналу за рахунок змішування із широкосмуговим сигналом з лінійною модуляцією частоти. Запропоновані у роботах [11–12] алгоритми ґрунтуються на обчисленні деякої статистики із використанням значень миттєвої частоти сигналу і потребують знання параметрів сигналу, що виявляється.

До основних недоліків розглянутих методів та алгоритмів можна віднести низьку ефективність під час роботи в умовах апріорної невизначеності щодо параметрів радіосигналів зі СЗРЧ, широкосмугового шуму та інших радіосигналів, що містяться в смузі частот аналізу.

Постановка завдання. Метою статті є забезпечення автоматизації процесу виявлення та оцінювання параметрів радіосигналів зі СЗРЧ у складній сигнальній обстановці в умовах апріорної невизначеності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель прийнятої реалізації радіосигналу.

Модель прийнятої реалізації радіосигналу має враховувати паразитну амплітудну модуляцію за рахунок поширення через канал із завмираннями, широкосмуговий адитивний шум, а також імпульсні і вузькосмугові перешкоди. Запишемо модель прийнятого в смузі частот ΔF радіосигналу в такому вигляді:

$$x(t) = A(t) \cos \{2\pi f_i t + \varphi_i(t)\} + \sum_{j=1}^J s_j(f_j, \Delta f_j, t) + p(t) + \xi(t),$$

$$iT_{FH} \leq t \leq (i+1)T_{FH}, \quad (1)$$

де $A(t)$ – функція, що описує обвідну прийнятого сигналу і враховує зміну амплітуди за рахунок завмирання та символічної модуляції;

f_i – частота i -го частотного елемента (центральна частота каналу), Гц;

$\varphi_i(t)$ – приріст фази несучої за рахунок символічної модуляції, рад;

J – кількість вузькосмугових перешкод s_j у смузі аналізу ΔF ;

$f_j, \Delta f_j$ – середня частота та ширина спектра j -ї вузькосмугової перешкоди, Гц;

$p(t)$ – імпульсна перешкода;

$\xi(t)$ – широкосмуговий шум;

T_{FH} – тривалість частотного елемента, с.

У заданій моделі невідомими вважаються частотно-часові та енергетичні параметри всіх складників прийнятої реалізації $x(t)$. Причому заважаючими є енергетичні параметри всіх компонент і частотно-часові параметри перешкод, а тривалість частотних елементів T_{FH} радіосигналу зі СЗРЧ та їх центральні частоти f_i підлягають оцінюванню. Також на етапі виявлення невідомим є вид символічної модуляції, а значення ширини спектра символу ΔF_s є заважаючим і вважається незмінним протягом сеансу радіопередачі.

Сутність методу. Вихідними даними для запропонованого методу є такі значення параметрів сигналу зі СЗРЧ, як: мінімальний очікуваний крок сітки частот ΔF_{\min} та мінімальна T_{\min} і максимальна T_{\max} очікувані тривалості частотних елементів. Вказані граничні значення є необхідними для вибору основних параметрів методу.

Першим етапом розробленого методу є розрахунок енергетичного спектра прийнятої в заданій смузі частот реалізації сигналу на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Оскільки радіосигнали зі СЗРЧ можна розглядати як вузькосмугові, то із [13, с. 571] відомо, що така обробка є оптимальною. Довжина вікна N ШПФ обирається виходячи із компромісу між точністю визначення тривалості частотного елемента (вища точність за менших N) і ймовірністю виявлення

(вища за більших N). Якщо частота дискретизації сигналу f_s , то мінімальна N_{\min} та максимальна N_{\max} кількість реалізацій ШПФ, що вкладаються на один частотний елемент, може бути розрахована за такими виразами:

$$N_{\min} = \lfloor T_{\min} f_s / N \rfloor \text{ і } N_{\max} = \lceil T_{\max} f_s / N \rceil. \quad (2)$$

Кожна розрахована реалізація енергетичного спектра підлягає пороговому обробленню відповідно до ітеративного методу виявлення вузькосмугових сигналів, який було запропоновано у [14]. Значення порогу γ_0 обирають виходячи із заданої ймовірності хибної тривоги незалежно від значення потужності шуму. При цьому враховуються лише структурні особливості шуму, а саме відсутність явно виражених піків енергетичного спектра. Тому імпульсні перешкоди, які також займають практично всю смугу частот, що аналізується, на цьому етапі оброблення сигналу будуть відкинуті.

Інтервал аналізу прийнятого сигналу T_a рекомендовано обирати із співвідношення $T_a \approx (4..5)T_{\max}$. Результатом ітеративного порогового оброблення реалізації сигналу тривалістю T_a є частотно-часова матриця $\mathbf{P} = (p_{ji})_{j=0,1,\dots,K; i=1,2,\dots,M}$ з кількістю рядків $K = 0,5N - 1$ (кількість елементів розділення за частотою) та кількістю стовпців $M = \lfloor T_a f_s / N \rfloor$ (кількість елементів розділення за часом) заповнена значеннями частотних відліків p_{ji} , що перевищили поріг. За наявності в смузі аналізу вузькосмугових сигналів значення деяких елементів матриці \mathbf{P} будуть ненульовими.

На рис. 1 а наведено спектрограму прийнятої реалізації, що є відповідно до моделі (1) адитивною сумішшю сигналу зі СЗРЧ, широкосмугового шуму, імпульсної перешкоди та чотирьох вузькосмугових перешкод. Відношення сигнал–шум становить 10 дБ, а відношення сигнал–вузькосмугова перешкода – 7 дБ, 0 дБ, -2 дБ та -4 дБ. Рознесення між частотними каналами становить 30 кГц, тривалість частотного елемента – 25 мс. Вид символічної модуляції – двійкова частотна маніпуляція з тривалістю символу 2,5 мс і частотним рознесенням 4 кГц. Частотно-часовий розподіл енергії вузькосмугових складників для довжини вікна ШПФ $N = 1024$, які перевищили поріг, наведено на рис. 1 б, де відлік часу проводиться у номерах реалізацій ШПФ, а частоти – у бінах ШПФ.

Для виявлення вузькосмугових перешкод замінимо ненульові елементи матриці \mathbf{P} одиницями і після цього розрахуємо суми елементів у рядках $S_j = \sum_{i=1}^M p_{ji}$. Значення сум утворять вектор

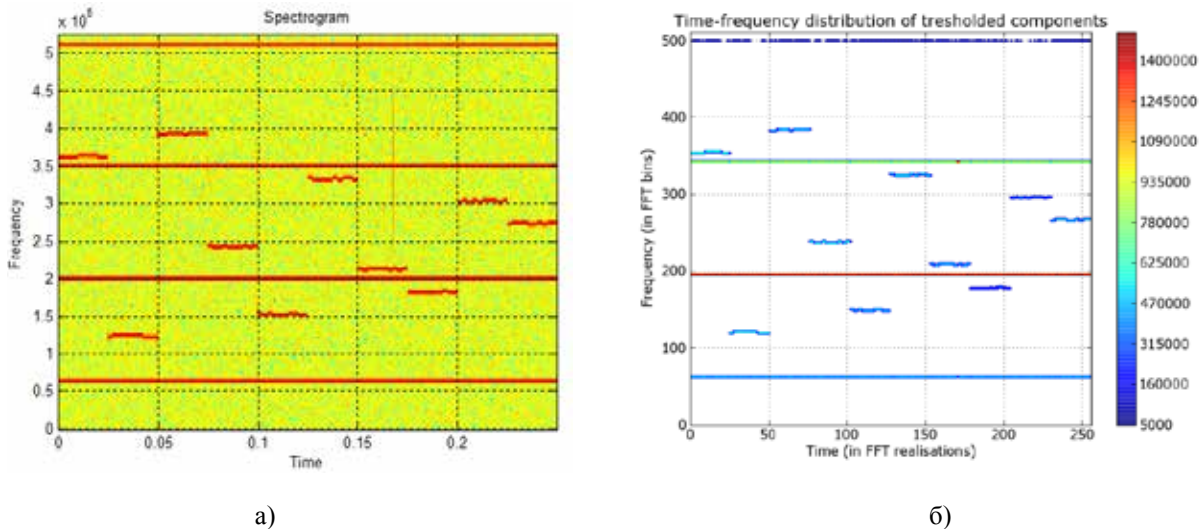


Рис. 1. Спектрограма прийнятої реалізації (а) та частотно-часовий розподіл енергії складників після порогового оброблення (б)

$S = (S_0, S_1, \dots, S_K)$, елементи якого відображають кількість перевищень порогу частотного відліку з номером j за час аналізу T_a . Якщо деякі елементи цього вектора перевищують значення $\gamma_2 = N_{\max}$ (вузькосмугові перешкоди) або не перевищують значення $\gamma_1 = N_{\min}$ (шумові викиди), то елементи матриці \mathbf{P} , які знаходяться у рядках з такими номерами j , замінюємо нулями. Якщо значення елементів вектора \mathbf{S} знаходяться в межах $[\gamma_1; \gamma_2]$, то їхні номери j відповідають частотним елементам сигналу зі СЗРЧ. Вказані значення γ_1 і γ_2 є лише орієнтовними. На практиці значення нижнього порогу γ_1 (здебільшого і верхнього γ_2) потребує уточнення залежно від виду символної модуляції.

Вказаний підхід добре працює, якщо потужність вузькосмугової перешкоди набагато більша або менша за потужність сигналу зі СЗРЧ. Якщо ж потужність такої перешкоди приблизно така ж, як і сигналу, то в деякі моменти часу вона може не перевищувати поріг γ_0 і у разі подальшого оброблення попадати в межі $[\gamma_1; \gamma_2]$ на заданому інтервалі аналізу T_a . Особливістю такої перешкоди є те, що вона перевищує поріг γ_0 в моменти часу, які не зосереджені на досить короткому інтервалі, що відповідає тривалості частотного елемента. Для виявлення такої перешкоди замінимо ненульові елементи у стовпцях частотно-часової матриці \mathbf{P} номерами даних стовпців і отримаємо нову матрицю $\mathbf{H} = (h_{ji} = i) \forall p_{ji} > 0$. Після цього розрахуємо різниці між кожним наступним і попереднім значенням у рядках матриці \mathbf{H} та отримаємо матрицю $\mathbf{D} = (d_{ji} = h_{ji+1} - h_{ji})_{i, j=1, 2, \dots, M-1}$. У такій матриці відкинемо всі її елементи d_{ji} , що

не перевищують одиниці, і розрахуємо для кожного рядка значення статистики:

$$\sigma_j = \frac{\sum_{l=1}^{M-1} d_{jl}^2 - \left(\sum_{l=1}^{M-1} d_{jl} \right)^2}{L_j}, \quad (3)$$

де L_j – кількість ненульових елементів у j -му рядку матриці \mathbf{D} .

Для вузькосмугової перешкоди значення σ_j дисперсії буде набагато більшим, ніж для частотного елемента сигналу зі СЗРЧ. Елементи матриці \mathbf{P} у рядках з номерами j , де значення σ_j перевищує деякий поріг γ_3 , необхідно замінити нулями. Порогове значення статистики σ_j залежить від багатьох факторів (виду символної модуляції, довжини ШПФ, типу віконної функції) і потребує уточнення в кожному конкретному випадку.

Після всіх етапів порогового оброблення ненульові елементи частотно-часової матриці \mathbf{P} у рядках заповнюють номерами таких рядків (значеннями частот) і формують матрицю $\mathbf{F} = (F_{ji} = j)$. Далі розраховують суми елементів у стовпцях матриці \mathbf{F} , у результаті чого утворюється вектор \mathbf{R} з елементами $R_i = \sum_{j=1}^{0.5N-1} F_{ji}$. Після цього знаходять абсолютні значення різниць попереднього і наступного елементів утвореного вектора. Моменти часу, у яких відбувається перевищення отриманих значень різниць величини порогу $\gamma_F = \lfloor N \Delta F_{\min} f_s^{-1} \rfloor$, відповідають часовим межах частотних елементів.

На рис. 2 а наведено частотно-часовий розподіл частотних елементів після видалення вузькосмугових перешкод. Як бачимо, в момент часу,

що відповідає імпульсній перешкоді, не було перевищення жодним частотним відліком енергетичного спектра порогового значення γ_0 і значення частоти становить 0. Залежність тривалості частотних елементів від часового положення наведено на рис. 2 б. Сьомий частотний елемент був розділений імпульсною перешкодою на три часові інтервали, тривалості яких у сумі дадуть

тривалість частотного елемента. При цьому максимальна помилка оцінювання тривалості частотного елемента T_{FH} становить Nf_s^{-1} .

Очевидно, що запропонований частотно-часовий матричний метод виявлення може також бути застосований для визначення часових параметрів радіосигналів зі СЗРЧ, тривалість частотних елементів яких змінюється в часі.

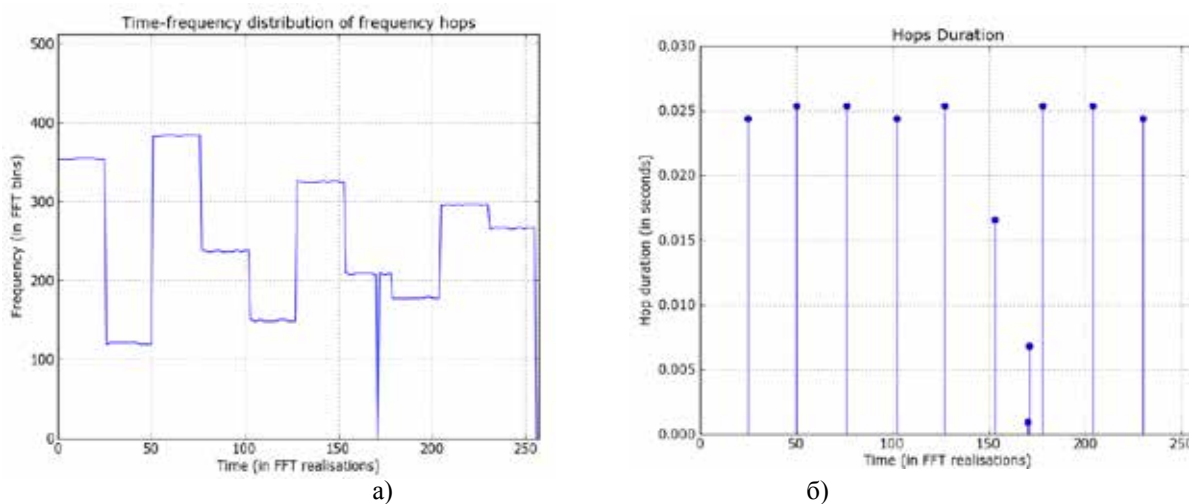


Рис. 2. Частотно-часовий розподіл частотних елементів (а) та залежність тривалості частотних елементів від часового положення (б)

Висновки. Таким чином, для виявлення радіосигналів зі СЗРЧ у складній сигнальній обстановці запропоновано метод, який поєднує у собі ітеративну порогову обробку реалізацій енергетичного спектра з подальшим обробленням отриманої частотно-часової матриці. Перевагами методу є нечутливість до флуктуацій потужності як сигналу, так і вузькосмугових перешкод. Запропонований метод виявлення

та оцінювання параметрів сигналів цифрових радіостанцій зі СЗРЧ може бути застосований у автоматичних комплексах радіомоніторингу. Метод буде роботоздатним за наявності в смузі аналізу лише одного сигналу зі СЗРЧ. Тому перспективи подальших досліджень доцільно зосередити в напрямі розроблення методів виявлення та розділення кількох радіосигналів зі СЗРЧ в одній смузі частот.

Список літератури:

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр.; / пер. с англ. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
2. Torrieri D. Principles of spread-spectrum communication systems. Springer Science, 2005. 457 p.
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / под ред. А.М. Рембовского. Изд. второе. Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. 623 с.
4. Poisel R. Modern Communications Jamming Principles and Techniques. 2nd edition. Artech House, 2011. 895 p.
5. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищённость систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : монография. Санкт-Петербург : Свое издательство, 2013. 166 с.
6. Chevva L., Sagar G.V.R. FH Signal Interception Based on the Time-Frequency Spectrogram by Image Enhancement Techniques. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. Vol. 2, Issue 2. P. 687–692.
7. Chen T.-C. Frequency Hopping Signal Identification Using Time-Frequency Transforms. *Journal of China Institute of Technology*. Vol. 38. 2008. P. 217–231.
8. Overdyk H.F. Detection and estimation of frequency hopping signals using wavelet transforms : Thesis for the degree of master of science in electrical engineering. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 1997. 114 p.

9. Yuan J., Tian P., Yu H. The identification of frequency hopping signal using compressive sensing. *Communication and network*. Vol. 11008, 2009. P. 52–56.
10. Feng L. Compressive Measurement of Spread Spectrum Signals. Electronic Dissertation, The University of Arizona, 2015. P. 26–47.
11. Бугайов М.В., Павлюк В.В. Алгоритм виявлення радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти каналів дистанційного керування безпілотними літальними апаратами. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем* : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2017. Вип. 14. С. 4–14.
12. Бугайов М.В., Молодецький Б.В. Метод виявлення радіосигналів зі стрибкоподібною зміною робочої частоти на фоні вузькосмугових перешкод. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем* : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2018. Вип. 15. С. 27–36.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Радио и связь, 1989. 656 с.
14. Бугайов М.В. Ітеративний метод виявлення вузькосмугових сигналів на основі аналізу коефіцієнта варіації спектральних оцінок. XI науково-практична конференція «Пріоритетні напрями розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в Операції об'єднаних сил». 8–9 листопада 2018 року. Київ : ВІТІ, 2018. С. 69–70.

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ СО СКАЧКООБРАЗНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ В СЛОЖНОЙ СИГНАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКЕ

В работе предложен частотно-временной матричный метод обнаружения и оценивания параметров радиосигналов со скачкообразным изменением рабочей частоты (СИРЧ) на фоне узкополосных и импульсных помех и широкополосного шума. Основой предлагаемого метода является обнаружение узкополосных сигналов в полосе частот анализа и дальнейшая обработка полученной частотно-временной матрицы. В результате такой обработки получают оценки значений параметров как СИРЧ сигналов, так и помех. Предложенный метод может быть использован в автоматических комплексах радиомониторинга для обнаружения и оценивания параметров СИРЧ сигналов.

Ключевые слова: скачкообразное изменение рабочей частоты, обнаружение, узкополосная помеха, широкополосный шум, импульсная помеха, итеративная пороговая обработка, частотно-временная матрица.

TIME-FREQUENCY MATRIX METHOD OF FREQUENCY HOPPING SIGNALS DETECTION IN SOPHISTICATED SIGNAL ENVIRONMENT

In the paper proposed a time-frequency matrix method for detecting and estimating the parameters of frequency hopping (FH) radio signals at the background of narrowband and impulse interference and wideband noise. The basis of the proposed method is detection of narrowband signals in the analyzed frequency band and processing of the received time-frequency matrix. In result of matrix' processing obtained estimates of FH signals and interference parameters. Proposed method reasonably to implement in automatic radio monitoring complexes for detection and estimating the parameters of FH signals.

Key words: frequency hopping, detection, narrowband interference, wideband noise, impulse interference, iterative threshold processing, time-frequency matrix.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.9

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-1/12>

Булгакова І.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

ТЕХНОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКИ 3D-ТУРІВ СОЦІАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МІСТА БАХМУТА

У статті розглянуто питання щодо актуальності створення 3D-турів для сервісу Google Карти. Наведені попередні дослідження у цьому напрямі. Викладено алгоритм створення 3D-турів для сервісу Google Карти. Наведено приклади створених віртуальних турів.

Ключові слова: сферичні панорами, 3D-тури, Google Карти, сферична камера, користувачі Google, віртуальні тури.

Постановка проблеми. Віртуальні 3D-тури, які з кожним днем набувають популярності, дають змогу будь-якій людині потрапити в місце, яке її зацікавило, в інтерактивному режимі. Натепер це не тільки актуальний рекламний продукт, що дає змогу в повному масштабі показати клієнту товар або послугу реалістичніше, ніж під час перегляду фотографій і відеороликів, читання опису товару, але й можливість брати активну участь у перегляді, прогулянці або подорожі, що набагато цікавіше за пасивне спостереження.

Сферичні панорами дають яскраві враження і чітке представлення про те, з чим маєш справу, тому 3D-фото можна використовувати у різних сферах діяльності.

Віртуальний тур – це унікальний дизайн, що складається з низки сферичних панорам, які мають перехід із однієї кімнати до іншої, із парку до скверу, із номера готелю до холу...

Завдяки віртуальним турам можна продемонструвати наочно глядачу зовнішній вигляд будь-якого об'єкта, ознайомити його з інтер'єром, з туристичними та історичними пам'ятками, дозволити прогулятися по музеях або виставкових залах тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що ця тематика раніше висвітлювалась тільки у рекламній та туристичній сферах. Завдяки Google опитуванню ми побачили, що користувачі Google хочуть більше 3D-турів, про це свідчить статистика: більше 65% усіх опитаних користувачів пошукової системи вважають, що віртуальних турів має бути більше, 26% ставляться до них ней-

трально і лише 7% респондентів назвали їх непотрібними [2].

Формулювання цілей статті. Об'єктом дослідження є 3D-тури для сервісу Google Карти.

Метою роботи є значне скорочення дистанції між закладом та цільовою аудиторією, також надання швидкого доступу до пам'яток культури та архітектури (музеї, виставки, бібліотеки, театри тощо), зацікавлення та долучення молоді до культурної спадщини країни, підвищення культурно-освітнього складника населення міста та країни в цілому.

Для яких соціальних об'єктів актуальні 3D-тури в Google: кафе, ресторани, готелі, мотелі, розважальні центри, медичні центри, торговельні комплекси, фітнес-клуби, салони краси, навчальні заклади, санаторії та бази відпочинку, нерухомість, офіси компаній, виставкові зали, музеї, театри, площі, парки, сквери тощо.

Завдання роботи:

1. Логістика – пошук та аналіз соціальних об'єктів, що потребують 3D-зйомки, та розробка віртуального туру.

2. Панорамна зйомка соціальних об'єктів.

3. Налаштування та верифікація Google+.

4. Створення віртуального туру для соціальних об'єктів.

5. Розміщення 3D-туру соціальних об'єктів на Google Картах.

Для реалізації проекту використовуються такі ресурси:

1) сферична камера Samsung Gear 360 та смартфон з операційною системою android 4.2.2 та вище;

- 2) штатив-монопод;
- 3) програмне забезпечення для обробки сферичних панорам;
- 4) Google Сервіси (Street View та Google Maps).

Методи і технології роботи. Логістика – пошук та аналіз соціальних об’єктів, що потребують 3D-зйомки, та розробка віртуального туру.

Пошук і аналіз соціальних об’єктів для 3D-зйомки проводиться за принципом обробки статистичних даних інтернет-запитів у пошуковій системі Google, які свідчать про зацікавленість користувачів мережі Інтернет цими закладами. Також деякі підприємства міста надсилали до нашого навчального закладу офіційні листи-прохання щодо проведення 3D-зйомки соціально важливих об’єктів.

Панорамна зйомка соціальних об’єктів відбувається за допомогою сферичної камери Samsung Gear 360 та смартфона з операційною системою android 4.2.2 та вище.

Підключення і настройка.

Для роботи з Samsung Gear 360 можна використовувати смартфон, камера підключається до нього через Wi-Fi Direct і Bluetooth 4.1, для цього знадобиться програма Gear 360.

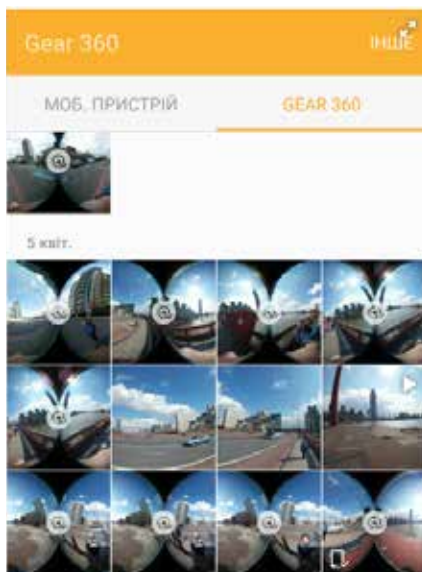


Рис. 1. Інтерфейс програми Gear 360

При цьому сам по собі пристрій є повністю автономним, змінювати налаштування, перемикається між режимами зйомки, а також робити фото та відео можна і без смартфона.

Налаштування в додатку Gear 360 (рис. 2) дають змогу змінювати дозвіл фото і відео, керувати чутливістю ISO, включати автокорекцію кута і зменшення шуму вітру.

Налаштування та верифікація Google+.

Користувачі більш схильні підписуватися і рекомендувати справжні сторінки, які верифіковані, така сторінка викликає більше довіри у аудиторії, також відкриває деякі чудові можливості. Галочка у верхній частині сторінки свідчить, що сторінка верифікована. Є 2 типи верифікації:

– Верифікація імені (дає можливість користувачам дізнаватися, що саме ваша + сторінка є підтвердженою та офіційною).

– Верифікація сайту (дає змогу покращити рекомендації в оголошеннях та пошуковий запит у Google). Прив’язка сайту до верифікованої Google+ сторінки дає можливість отримати персональний URL та пошукову соціальну карту.

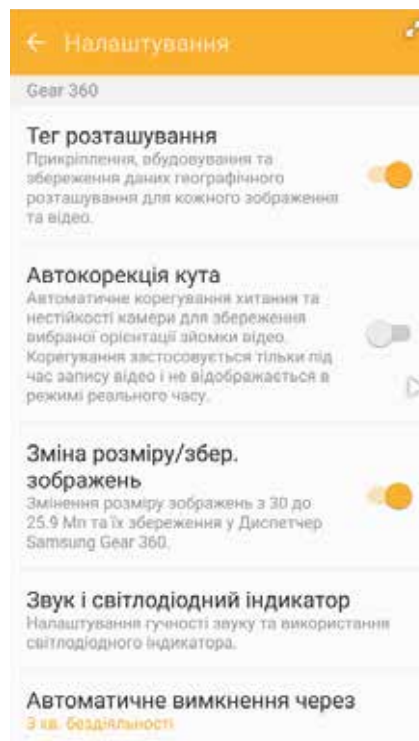


Рис. 2. Налаштування додатка Gear 360

Розробка віртуального туру для соціальних об’єктів.

Камера Gear 360 сумісна з додатком Google Перегляд вулиць, що дає можливість знімати сферичні панорами та одразу ж публікувати їх.

За допомогою додатка Google Перегляд вулиць імпортуємо сферичні панорами (рис. 3).

Після публікації та вибору місця розташування на картах Google переглядаємо вид профілю (рис. 4).

Розміщення та налаштування 3D-туру соціальних об’єктів на Google Картах зображено на рисунку 6.

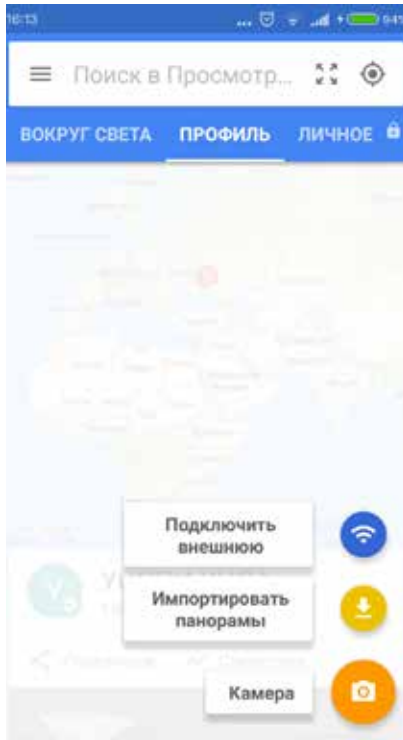


Рис. 3. Імпорт панорами

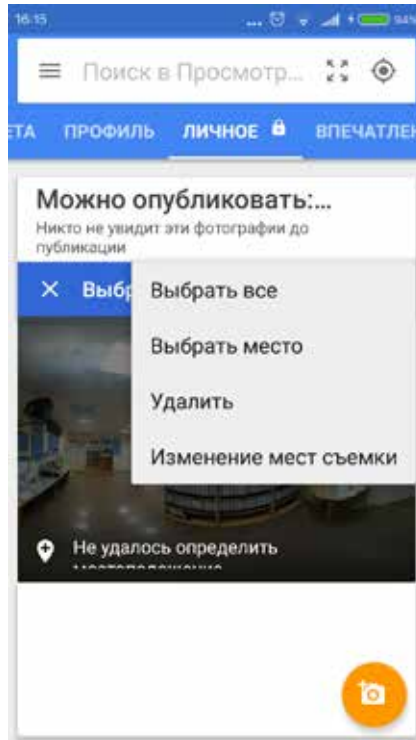


Рис. 4. Публікація та вибір місця розташування на картах Google

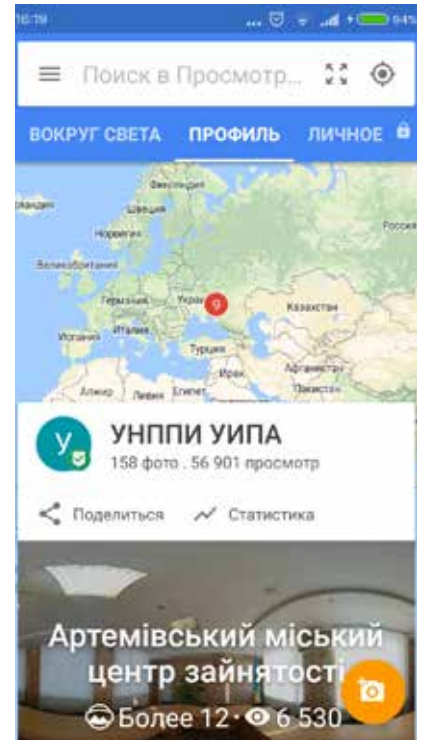


Рис. 5. Вид профілю після публікації



Рис. 6. Налаштування 3D-туру

Результатами роботи є: Проект з 3D-візуалізації включає в себе розташування 3D-туру на Google Картах та звернення уваги цільової аудиторії.

У рамках проекту з 3D-візуалізації культурно та соціально важливих об'єктів створено та опубліковано на картах Google 3D-тури:

- спортивного комплексу «Металург» (<https://goo.gl/maps/Kath611njAC2>);
- Міського центру культури та дозвілля імені Євгена Мартинова (<https://goo.gl/maps/86ASxxqXa4L2>);
- басейну ДЮК «Дельфін» (<https://goo.gl/maps/NNk2AbmJ4242>);
- Центральної міської бібліотеки в місті Бахмуті (<https://goo.gl/maps/fWUUi5JeZM2>);
- двох корпусів Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії м. Бахмута (<https://goo.gl/maps/pRaozXDPWkw>) (<https://goo.gl/maps/aFD7pNVu7C92>);
- КНП Центр первинної медичної допомоги м. Бахмута та його філії (<https://goo.gl/maps/PU9AE8FHV3u>), (<https://goo.gl/maps/xixoe3GbB8L2>), (<https://goo.gl/maps/yHCyHYDWgoJ2>);
- готелю «Бахмут» (<https://goo.gl/maps/VjqRkisoqFo>);
- Бахмутського краєзнавчого музею (<https://goo.gl/maps/3Aej6JU4SVB2>);
- Музею Історії міста Києва (<https://goo.gl/maps/e6Mhi9ou3BK2>).



Рис. 7. Зображення на дисплеї смартфона для VR-окулярів

У майбутньому планується продовження роботи над проектом з 3D-візуалізації, будуть створені віртуальні тури громадських міст відпочинку, скверів, парків та пам'яток культури, а також розширено території дії проекту не тільки в межах міста, а й району та області.

Висновок. 3D-тури надають змогу значно зекономити час (переглянути об'єкти міста можна в будь-який зручний момент для користувача); попереднього, досить детального перегляду всіх наявних у місті цікавих об'єктів; у низці сфер віртуальний тур надає прекрасну допомогу у перегляді наявних пропозицій; оригінальності та привабливості в рекламуванні досить відмінним від багатьох конкурентів способом, викликаючи значно більше зацікавленості, ніж звичайний текст чи фотографії; скоротити час між розробкою віртуального туру та знайомством з ним користувача

(на створення та поширення рекламного буклету серед аудиторії витрачається значна кількість часу, а віртуальний тур буде доступним мільйонам користувачів Інтернет-мережі одразу після його розробки та опублікування в мережі); цілодобової доступності (сферичні панорами, які розміщені на сайтах, доступні в будь-який час доби для перегляду); різноманітного використання одних і тих самих турів як в Інтернет-мережі, так і у вигляді презентацій, для демонстрування на виставці.

Все перелічене вище дає змогу:

- розширити охоплення аудиторії користувачів;
- підвищити імідж міста як високотехнологічного та інноваційного;
- підвищити відвідуваність сайтів, на яких розміщені тури;
- проводити віртуальні екскурсії для відвідувачів.

Список літератури:

1. Google панорами інтер'єрів більше ніж просто 3D-тури. URL: <https://g360.com.ua>.
2. Сервіс Гугл Карти. URL: <https://www.google.com.ua/maps>.
3. Сайт Samsung. URL: http://www.samsung.com/ua_ru/wearables/gear-360-c200.

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ 3D-ТУРОВ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРОДА БАХМУТА

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся актуальности создания 3D-туров для сервиса Google Карты. Приведены предыдущие исследования в данном направлении. Изложен алгоритм создания 3D-туров для сервиса Google Карты. Приведены примеры созданных виртуальных туров.

Ключевые слова: сферические панорамы, 3D-туры, Google Карты, сферическая камера, пользователи Google, виртуальные туры.

TECHNOLOGY AND METHODS OF DEVELOPMENT OF 3D-TOURS OF SOCIAL OBJECTS OF BAKHMUT

The article discusses issues related to the relevance of creating 3D tours for the Google Map service. The previous studies in this theme are given. The algorithm of creating 3D tours for Google Maps service is presented. Examples of created virtual tours are given.

Key words: spherical panoramas, 3D tours, Google Maps, spherical camera, Google users, virtual tours.

Герасін О.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Козлов О.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кондратенко Ю.П.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Скакодуб О.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ГУСЕНИЧНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

У статті проведений синтез та дослідження математичної моделі багатоцільового гусеничного мобільного робота (МР) з притискними електромагнітами, здатного переміщуватися та виконувати різноміснї технологічні операції на похилих феромагнітних поверхнях. Авторами розроблена математична модель рушійного комплексу МР для рівномірного та нерівномірного просторового руху, яка пов'язує швидкість переміщення, курсовий кут та створюване роботом притискне зусилля. Синтезована модель МР дає змогу досліджувати поведінку цього складного технічного об'єкта керування в різних умовах руху та може бути застосована в подальших дослідженнях під час розробки та налагодження систем автоматичного керування (САК) основними координатами МР.

Ключові слова: мобільний робот багатоцільового призначення, гусеничний рушій, притискний електромагніт, система автоматичного керування, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Сучасні засоби автоматизації, зокрема роботи, витісняють людину з великої кількості технологічних процесів та операцій у виробництві [1]. Так, багатоцільові мобільні роботи, що здатні переміщуватися по похилих феромагнітних поверхнях та виконувати різноміснї технологічні операції у важкодоступних і небезпечних для людини місцях, знаходять застосування в суднобудуванні та судноремонті [2; 3]. Слід зазначити, що такі МР потребують синтезу складних САК для автоматизації процесів виконання заданих технологічних операцій. Синтез САК МР доцільно проводити з метою забезпечення високої точності технологічних операцій, що визначається якістю керування його основними координатами: притискним зусиллям, швидкістю та курсовим кутом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-технічній літературі є певна кількість публікацій стосовно автоматизації виконання технологічних операцій за допомогою МР вертикального переміщення, які оснащуються різноміснїми притискними пристроями та рушійми для переміщення по вертикальних поверхнях [2–10].

Під час опрацювання феромагнітних поверхонь найбільш ефективні МР, оснащені магнітокерованими притискними пристроями з гусеничними рушійми [8; 10]. Гусениці мають більшу площу контакту з поверхнею порівняно з іншими рушійми, що забезпечує менший тиск та краще зчеплення у разі переміщення. Крім конструкцій, автори попередніх досліджень описують здебільшого системи дистанційного керування такими роботами [3; 5–7]. При цьому найбільший інтерес являють саме САК такими МР, синтез керуючих пристроїв (регуляторів) яких доцільно проводити на основі математичних моделей роботів. Однак кількість публікацій стосовно моделювання багатоцільових МР для вертикального переміщення по феромагнітних поверхнях у науковій літературі обмежена, зокрема, в роботі [10] запропоновані моделі окремих компонентів МР, а також механізми визначення моментів інерції його частин. Тому розробка адекватних математичних моделей подібних МР для синтезу та дослідження їх САК натепер є актуальною задачею.

Постановка задачі. Багатоцільовий гусеничний МР вертикального переміщення є складним

об'єктом керування рухом. Тому для синтезу його САК необхідно мати досить адекватні математичні моделі, які враховують основні конструктивні особливості самого робота, а також умови його функціонування (нахил поверхні, виконувану операцію, створюване притискне зусилля). Метою цієї статті є розробка математичної моделі багатоцільового гусеничного МР з магнітокерованими притискними пристроями як складного об'єкта керування та дослідження процесів його переміщення по феромагнітній поверхні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нерівномірний рух багатоцільового гусеничного МР по похилій поверхні вгору схематично показаний на рис. 1, де введені такі позначення: γ – кут нахилу поверхні, R_K – радіус ведучого колеса, V_{MP} – лінійна швидкість переміщення робота, ω_K – кутова швидкість обертання коліс; G – сумарна вага робота, F_f – сила опору руху, F_{TO} – сила опору від виконуваної технологічної операції та/або тяги причепа (буксирування обладнання), X_K – реакція поверхні, паралельна шляху руху робота, N – реакція поверхні, нормальна до площини поверхні, F_J – сила інерції маси робота, F – сила притискного магніту, M_J – сумарний момент дотичних сил інерції привідних і напрямних коліс, котків, ланок гусениці і деталей передачі, встановлених на поперечних валах [11].

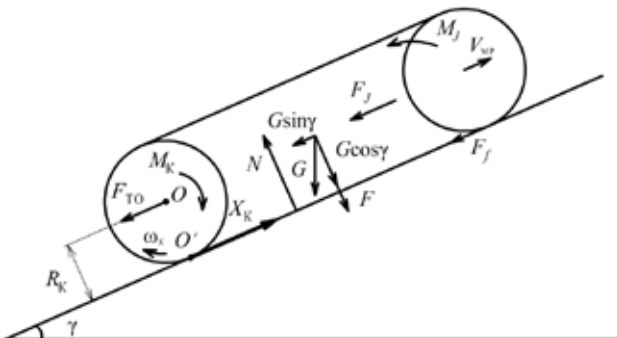


Рис. 1. Схема сил, що діють на МР під час руху по похилій поверхні

На робот, що нерухомо стоїть на горизонтальній площадці, із зовнішніх сил діє вага G ($G = m_{MP}g$, m_{MP} – маса робота, g – прискорення вільного падіння) і викликана нею нормальна реакція поверхні N . Коли МР знаходиться на підйомі або ухилі, вага G може бути розкладена на два складники, спрямовані відносно поверхні: паралельно – $G\sin\gamma$ й нормально – $G\cos\gamma$. Складник $G\sin\gamma$ чинить додатковий опір руху робота на підйомах. На ухилах ця сила спрямована по ходу робота і є рушійною силою, яка частково повертає

енергію, витрачену на підйом. Сила $G\cos\gamma$ разом з силою F та іншими силами і моментами визначає величину і точку прикладання реакції N з боку робочої ФП та визначається як зціпна вага [12].

Абсолютна величина сумарної сили F_f опору коченню МР у разі сталого руху його на горизонтальній ділянці відповідає силі, що витрачається на переміщення самого робота, і завжди спрямована проти руху, а її величина залежить від ваги МР, конструкції рушія та стану поверхні. Приймається, що сила F_f не залежить від швидкості руху. Сила опору коченню для МР визначається як:

$$F_f = f(G \cos \gamma + F) = F_{f1} + F_{f2},$$

де f – коефіцієнт кочення робота, $f \approx 0,01..0,03$ для твердої феромагнітної поверхні; F_{f1} , F_{f2} – сили опору з боку лівої та правої гусениць відповідно.

Сили інерції F_J окремих частин МР виникають у разі його нерівномірного прямолінійного поступального руху і можуть бути замінені їх рівнодійною, яка додається в центрі ваги робота і спрямовується паралельно шляху руху в бік, протилежний прискоренню. Величина цієї рівнодійної $F_J = m_{MP}a\lambda$, a – прискорення прямолінійного поступального руху робота, λ – зведений коефіцієнт маси, який враховує вплив інерції обертючих частин робота під час нерівномірного поступального руху, для орієнтовних розрахунків гусеничного рушія використовують емпіричну залежність $\lambda = 1,15 + 0,001 k_p^2$ [13].

Обертання привідного колеса під час руху МР викликається привідним моментом, переданим до нього від двигуна через редуктор. Під час кочення ведучого колеса з гусеницею, крім нормальної складової реакції поверхні, з'являється складова реакції поверхні X_K , спрямована в бік руху робота паралельно шляху руху. Ця реакція поверхні є рушійною і штовхає робота з силою, що викликає переміщення робототехнічного агрегату. З достатньою для практики точністю можна вважати, що у разі рівномірного руху реакція поверхні X_K дорівнює коловому зусиллю на ободі ведучого колеса F_T – дотичній силі тяги, визначеній з урахуванням втрат на тертя в привідній частині гусениці [11]. У цьому разі сила тяги, яку розвивають два двигуни, F_T для гусеничного робота описується рівнянням:

$$F_T = \frac{M_2 k_p}{R_K} \eta_p \eta_{ГР} = F_{T1} + F_{T2}$$

де M_2 – корисний крутний момент двигуна, $M_2 = M_{EM} \eta_d$ (M_{EM} – електромагнітний момент двигуна, η_d – ККД двигуна); $\eta_{ГР}$ – ККД гусеничного рушія [12]; η_p – ККД редуктора; F_{T1} , F_{T2} – сили тяги гусениць.

Необхідно відзначити, що максимальне можливе значення привідного моменту і дотичної сили тяги залежить не тільки від двигуна і передаточного числа редуктора, а й від зчеплення гусениць. На якість зчеплення МР, здатного переміщуватися по вертикальних поверхнях, впливає сила реакції опору самої поверхні N , яка може бути визначена як:

$$N = G \cos \gamma + F = N_1 + N_2 = G_{зч},$$

де N_1, N_2 – нормальні реакції поверхні, діючі на опорні ділянки лівої та правої гусениць, $G_{зч}$ – зчепна вага робота.

Забезпечення надійного зчеплення рушія МР з похилою або стельовою поверхнею є дуже непротистим завданням та потребує забезпечення контролю значення притискного зусилля F [9; 14–15]. Для здійснення переміщення робота гусениці мають притискатися до поверхні з силою, рівною зчепній вазі $G_{зч}$. Відповідно, сила тяги F_T має дорівнювати силі зчеплення гусениць з поверхнею $F_{зч}$ (розрахунковій силі тяги за зчепленням):

$$F_{зч} = \sum_{i=1}^n \mu' N_i \approx \phi' N,$$

де μ' – коефіцієнт тертя між опорною ділянкою трака та поверхнею, N_i – нормальне навантаження на трак, n – кількість траків опорної гілки гусениці, ϕ' – коефіцієнт пропорційності, що характеризує якість зчеплення та визначається дослідним шляхом для таких умов руху [12; 13].

На основі рис. 1 можна скласти рівняння тягового балансу МР:

$$F_T = F_f \pm F_{TO} \pm G \sin \gamma \pm F_J, \quad (1)$$

де знак «+» для сили $G \sin \gamma$ стосується підйому, а «-» – спуску. Своєю чергою знаки «+» та «-» для сили F_J відповідають розгону і гальмуванню. Враховуючи вирази для F_f, F_J та вираз (1), можна отримати диференціальне рівняння руху центра тяжіння МР:

$$\ddot{x} = \pm \frac{1}{m_{MR} \lambda} [F_T - G(f \cos \gamma \mp \sin \gamma) - fF \mp F_{TO}], \quad (2)$$

де \ddot{x} – прискорення робота ($\ddot{x} = a$).

Розрахункове значення сили тяги, яку необхідно забезпечити у разі нерівномірного руху МР по похилій поверхні, визначається з урахуванням умов подолання максимальних сил опору, що зустрічаються в основному під час подолання великих підйомів. Водночас сила тяги двигунів F_T не може бути більшою за силу зчеплення $F_{зч}$. Інакше буде спостерігатися явище буксування, що є несприятливою ситуацією і призводить до витрат енергії на буксування [11]. Отже, сила тяги

двигунів, що розвивається під час прискореного руху робота ($F_J \neq 0$), має дорівнювати як максимальній силі опору руху на підйомі, так і силі зчеплення [12], тобто

$$F_T = F_{TO} + F_f + G \sin \gamma + F_J = \phi N,$$

де ϕ – коефіцієнт зчеплення, для незмінюваних умов руху $\phi = \phi'$.

Підставивши отримані вище залежності для сил та розділивши отриману рівність на G , отримаємо вираз:

$$F_T^* = F_{TO}^* + f \cos \gamma + fF^* + \sin \gamma + \lambda a/g = \phi \cos \gamma + \phi F^*,$$

де F_T^*, F_{TO}^*, F^* – значення питомих сил тяги двигунів, причепа та притискних магнітів відносно сили тяжіння G , $F_T^* = F_T/G$, $F_{TO}^* = F_{TO}/G$, $F^* = F/G$. У цьому рівнянні значення коефіцієнтів опору руху та зчеплення з поверхнею є фізично зумовленими та не можуть бути змінені під час руху. Однак воно пов'язує між собою значення кута нахилу робочої феромагнітної поверхні та необхідного притискного зусилля для забезпечення руху без буксування:

$$F^* = \frac{F_{TO}^* + f \cos \gamma + \sin \gamma - \phi \cos \gamma + \lambda a/g}{\phi - f}. \quad (3)$$

Отримана залежність є дуже важливою, позаяк безпосередньо дає змогу забезпечувати умови поздовжньої та поперечної стійкості МР. Так, на нерухомий гусеничний МР, що знаходиться на похилій поверхні, діє складник ваги $G \sin \gamma$, яка прагне перекинути корпус робота, повернувши його щодо осі, що проходить через точку O' (рис. 1). Складник $G \cos \gamma$ діє в зворотному напрямку і прагне притиснути робот до поверхні. За збільшення кута підйому γ перекидальна сила $G \sin \gamma$ й момент її щодо точки O' збільшуються, а притискна сила до поверхні $G \cos \gamma$ і момент її щодо тієї ж точки зменшуються, аж до її зникнення для кута в 90° . Тому завдяки наявності притискної сили магнітів забезпечується утримання корпусу МР на феромагнітній поверхні незалежно від кута нахилу. За відсутності навантаження від технологічної операції та притискного зусилля ($F_{TO} = 0$, $F = 0$) максимальний кут, який може подолати МР, визначається з виразу: $(\phi - f) \cos \gamma - \sin \gamma = \lambda a/g$, тоді як для рівномірного руху $\gamma = \arctg(\phi - f)$.

У загальному випадку рівняння моментів відносно осі ведучих коліс O (рис. 1) у разі нерівномірного прямолінійного руху МР матиме вигляд:

$$M_K = (F_f \pm G \sin \gamma \pm F_{TO} \pm F_J) R_K \pm M_J, \quad (4)$$

де рухомий момент колеса M_K з урахуванням витрат у ведучій частині гусениці дорівнює сумі

таких моментів: моменту, відповідному складовій силі тяги причепа, паралельній поверхні шляху, і рівного $F_{TO}R_K$; моменту, відповідному складовій ваги робота, паралельній поверхні шляху, і рівного $GR_K \sin \gamma$; моменту, відповідному силі інерції у разі прямолінійного поступального руху робота, рівного $F_J R_K$; моменту, відповідному силі кочення, рівного $F_J R_K$; моменту M_J , відповідного силам інерції обертових деталей рушія (знак «+» для M_J стосується розгону, а «-» – гальмування).

Далі необхідно врахувати моменти опору повороту МР, які створюють додаткове навантаження на привідні двигуни. Поворот гусеничного рушія забезпечується різними силами тяги і швидкостями руху на кожній гусениці. Гусениця, що рухається з більшою швидкістю (забіжна гусениця), повертає корпус робота в бік відстаючої

гусениці (рис. 2). При цьому мобільний робот одночасно наче бере участь у двох рухах – поступальному та обертальному навколо поточного полюса $O_{Ц}$ (рис. 2 а).

Співвідношення взаємозв'язку кінематичних параметрів для опису повороту МР записуються з урахуванням [10; 13] та рис. 2 як:

$$\omega_{MP} = V_{MP} / R_{П} = (V_{Г2} - V_{Г1}) / B; \quad (5)$$

$$V_{MP} = (V_{Г2} + V_{Г1}) / 2; \quad (6)$$

$$V_{Г1} = \omega_{MP} (R_{П} - 0,5B) = \omega_{K1} R_K; \quad (7)$$

$$V_{Г2} = \omega_{MP} (R_{П} + 0,5B) = \omega_{K2} R_K, \quad (8)$$

де $V_{Г1}$, $V_{Г2}$ – поточні лінійні швидкості відстаючої та забіжної гусениць; $R_{П}$ – радіус повороту робота, $R_{П} = 0,5B(V_{Г2} + V_{Г1}) / (V_{Г2} - V_{Г1})$; V_{MP} , φ_{MP} – поточна лінійна швидкість та курс робота,

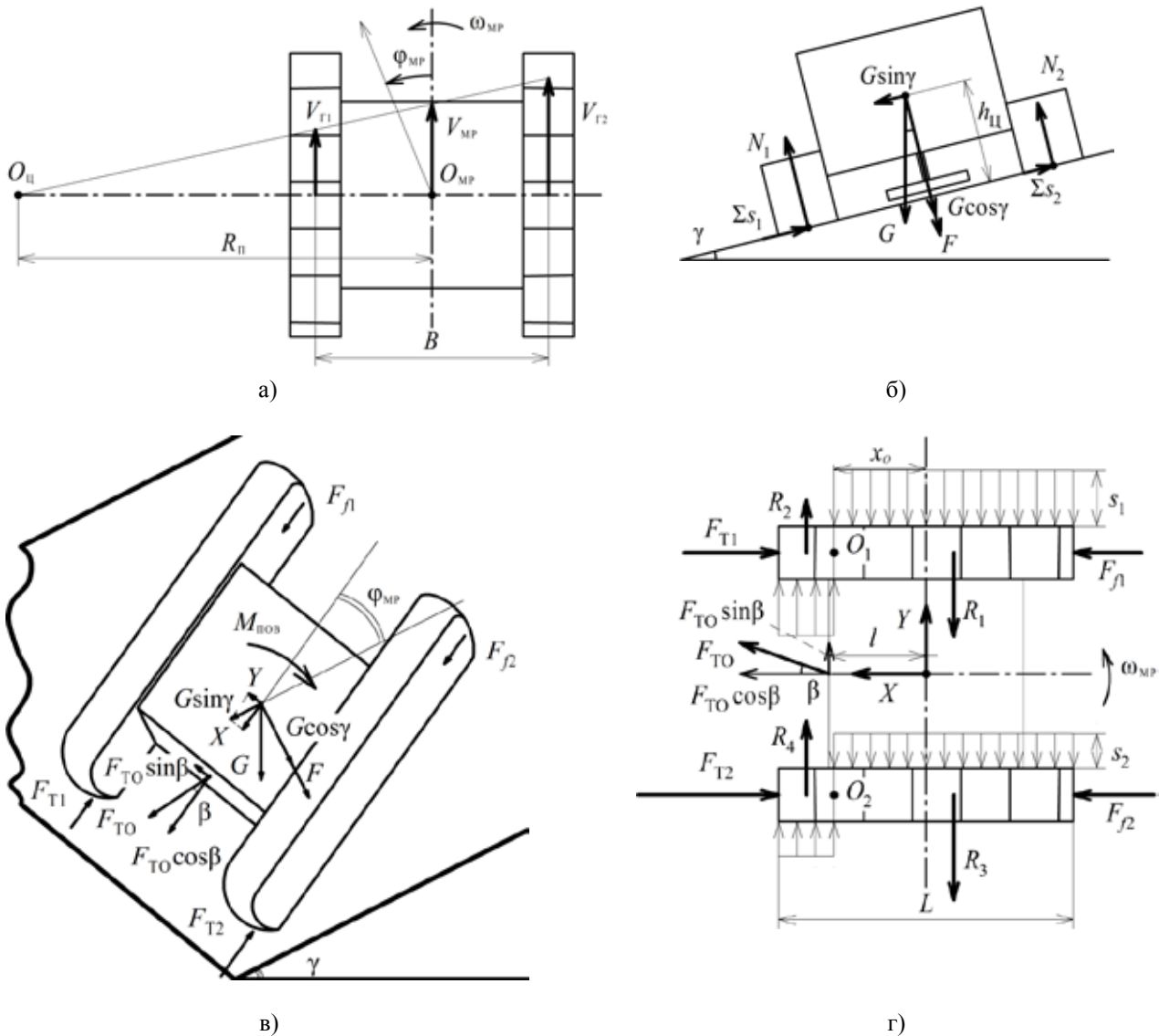


Рис. 2. Поворот МР: кінематична схема (а), розрахункові схеми сил під час повороту МР на похилій поверхні у разі чистого крену (б) та довільного положення (в, г)

$\varphi_{MP} = d\omega_{MP}/dt$; B – відстань між центрами гусениць; ω_{K1} , ω_{K2} – кутові швидкості відстаючого та забіжного привідних коліс.

Розглянемо поворот мобільного робота на похилій феромагнітній поверхні з рівномірною кутовою швидкістю ω_{MP} (відцентрова сила відсутня). На відміну від повороту на горизонтальній ділянці, крім реакцій поверхні на МР під час повороту на підйомі (спуску), діють сили у вигляді поздовжньої складової сили ваги або у вигляді поперечної складової ваги під час повороту з положення крену [12]. За довільних положень робота на похилій поверхні одночасно діють поперечна і поздовжня складові ваги G . Одночасно діють поперечна і поздовжня сили як складові відцентрової сили, а також сили інерції. Отже, доцільно розглянути більш загальний випадок руху – поворот гусеничного мобільного робота за наявності поздовжніх і поперечних сил [12].

На рис. 2 в зображено довільне положення МР на похилій площині, яке визначається курсовим кутом φ_{MP} причому складова ваги робота паралельна площині руху і рівна $G\sin\gamma$, своєю чергою, дає складову X , спрямовану уздовж поздовжньої осі робота, і поперечну складову Y , перпендикулярну цій осі. Враховуючи курс робота та силу, створювану притискними пристроями, отримаємо такі залежності:

$$X = G\sin\gamma\cos\varphi_{MP}; Y = G\sin\gamma\sin\varphi_{MP}.$$

Сили опору повороту, що діють у напрямку, перпендикулярному до напрямку руху, спрямовані проти повороту. Сили опору повороту залежать від ваги МР, притискного зусилля, конструкції ходової частини і їх можна виразити через коефіцієнт пропорційності між поперечними реакціями поверхні та нормальним тиском опору повороту $\mu_{пов}$. При цьому s_1 та s_2 – питомі поперечні сили, що діють на одиницю довжини опорних поверхонь відстаючої та забіжної гусениць (на рис. 2 г у межах однієї гусениці вони рівні між собою), рівнодійні яких позначені як R_1 , R_2 , R_3 та R_4 . Коефіцієнт опору повороту залежить від радіусу повороту та визначається з виразу [12]:

$$\mu_{пов} = \frac{\mu_{max}}{a_{\pi} + (1 - a_{\pi}) \frac{R_{\pi}}{B}}, \quad (9)$$

де μ_{max} – значення $\mu_{пов}$ при $R_{\pi} = B$, для гусениць робота можна прийняти $\mu_{max} \approx 0,4 \dots 0,8$ – більше значення μ_{max} приймають для одного типу фрикційного матеріалу гусениць, що відноситься до роботів з більшим середнім питомим тиском та з

більшою довжиною опорної поверхні гусениць; a_{π} – дослідний коефіцієнт, у розрахунках приймають $a = 0,8 \dots 0,87$ [12].

Для знаходження сил тяги гусениць F_{T1} та F_{T2} припустимо, що епюри поперечних реакцій поверхні на гусениці є прямокутними, відповідно не буде врахований перерозподіл нормальних навантажень на опорні поверхні гусениць від дії поздовжньої сили X . Схема зовнішніх сил, що діють на МР у розглянутому випадку, показана на рис. 2 г, де епюра навантажень має несиметричний вигляд. Нерівномірність розподілу навантаження вносить також наявність сили опору від технологічної операції F_{TO} (рис. 2 г). У такому разі доцільно прийняти такі припущення: точка прикладення F_{TO} розташована на поздовжній осі робота, її напрямок паралельний робочій площині, а вплив поздовжнього зсуву центру тиску на зміщення центру повороту не враховується.

Під час повороту МР його гусениці повертаються відповідно довкола полюсів обертання O_2 та O_1 , а рівняння моментів має вигляд:

$$(F_{Ti} - F_{\beta})B + jR_1 \frac{x_0 + L/2}{2} + jR_3 \frac{x_0 + L/2}{2} + jR_2 \frac{L/2 - x_0}{2} + jR_4 \frac{L/2 - x_0}{2} + jF_{TO}(l - x_0)\sin\beta = jYx_0 + F_{TO} \frac{B}{2} \cos\beta + \frac{XB}{2},$$

де $i = 1, j = 1$ – для відстаючої гусениці; $i = 2, j = -1$ – для забіжної гусениці; L – довжина МРБП (рис. 2 г); x_0, l – відстані від поперечної осі робота до центрів повороту гусениць та до точки закріплення технологічного обладнання (рис. 2 г); β – кут відхилення лінії дії сили F_{TO} від поздовжньої вісі робота (рис. 2 в).

В отриманих рівняннях момент опору повороту МР на похилій площині МПОВ визначається як:

$$M_{пов} = R_1 \frac{x_0 + L/2}{2} + R_2 \frac{L/2 - x_0}{2} + R_3 \frac{x_0 + L/2}{2} + R_4 \frac{L/2 - x_0}{2},$$

де

$$R_1 = \frac{\mu_{пов} Q_1}{L} (x_0 + L/2); R_2 = \frac{\mu_{пов} Q_1}{L} (L/2 - x_0);$$

$$R_3 = \frac{\mu_{пов} Q_2}{L} (x_0 + L/2); R_4 = \frac{\mu_{пов} Q_2}{L} (L/2 - x_0),$$

де Q_1 та Q_2 – нормальні навантаження на відстаючу та забіжну гусениці (рівні за значенням, але протилежні за знаком до реакцій опори N_1 та N_2), які не рівні між собою та перерозподіляються під впливом поперечної сили Y , а відповідно змінюються і реакції опори N_1 та N_2 (рис. 2 б) як:

$$N_1 = Q_1 = \frac{G\cos\gamma + F}{2} + G\sin\gamma \frac{h_{ц1}}{B}; N_2 = Q_2 = \frac{G\cos\gamma + F}{2} - G\sin\gamma \frac{h_{ц1}}{B},$$

$$N = N_1 + N_2 = Q_1 + Q_2 = G \cos \gamma + F,$$

де $h_{Ц}$ – висота центру тяжіння МР. На рис. 2 б і г Σ_{S_1} та Σ_{S_2} – результуючі поперечних реакцій поверхні на відстаючу та забіжну гусениці.

Враховуючи вищевикладене, момент опору повороту МР:

$$M_{\text{пов}} = \frac{\mu_{\text{пов}} L Q}{4} \left(1 + \frac{4x_o^2}{L^2} \right) = \frac{\mu_{\text{пов}} L (G \cos \gamma + F)}{4} \left(1 + \frac{4x_o^2}{L^2} \right),$$

а сили опору кочення у разі довільного просторового положення:

$$F_{\beta_i} = f N_i = f \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2} + j G \sin \gamma \sin \varphi_{\text{МР}} \frac{h_{Ц}}{B} \right).$$

З урахуванням (1) сили тяги визначаються як:

$$F_{T_i} = f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \varphi_{\text{МР}}}{2} + j \frac{x_o}{B} \sin \varphi_{\text{МР}} + j f \frac{h_{Ц}}{B} \sin \varphi_{\text{МР}} \right) - j \frac{\mu_{\text{пов}} L (G \cos \gamma + F)}{4B} \left(1 + \frac{4x_o^2}{L^2} \right) + F_{\text{ТО}} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - j \frac{(l - x_o)}{B} \sin \beta \right). \quad (10)$$

Для визначення x_o в цьому разі спроектуємо всі сили на поперечну вісь (рис. 2 г), а R_1 - R_4 виразимо через питомі поперечні сили:

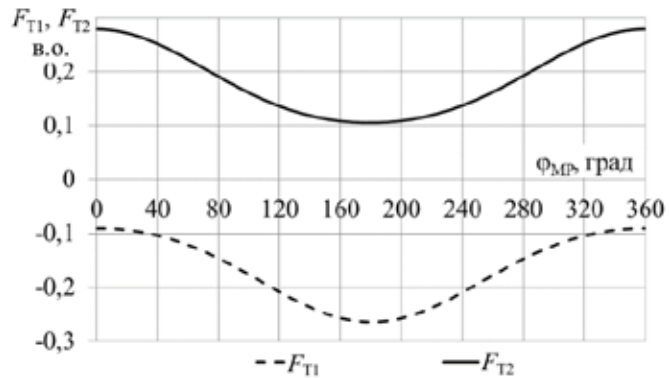
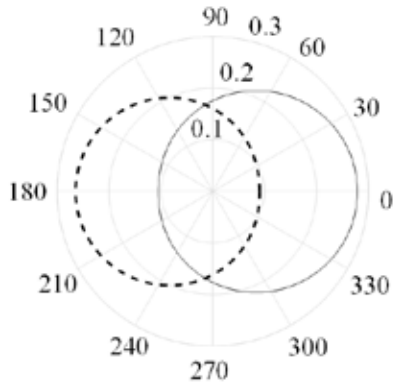
$$Y + F_{\text{ТО}} \sin \beta = 2x_o (s_1 + s_2).$$

Враховуючи, що $(s_1 + s_2) = \mu_{\text{пов}} (G \cos \gamma + F) / L$, отримаємо вираз

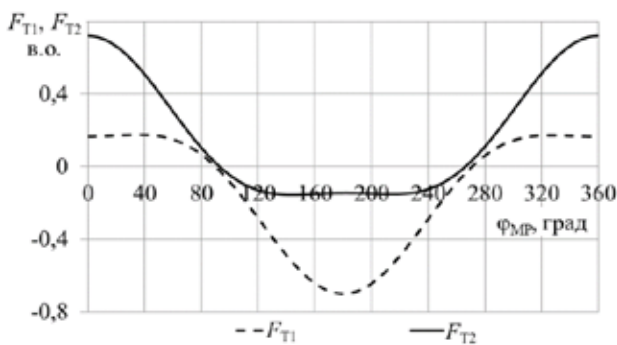
$$x_o = \frac{L (G \sin \gamma \sin \varphi_{\text{МР}} + F_{\text{ТО}} \sin \beta)}{2 \mu_{\text{пов}} (G \cos \gamma + F)}. \quad (11)$$

Для покращення поворотності гусеничних рушіїв під час конструювання відношення L/B доцільно підтримувати у межах 1,0–1,7 [12].

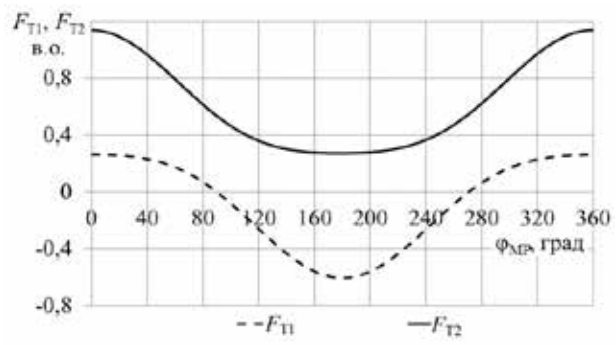
Користуючись отриманими залежностями (3), (5)–(11), які представляють модель рівномірного руху МР, можна розрахувати значення сил тяги F_{T_1} та F_{T_2} за рівномірного руху для всього діапазону зміни кута $\varphi_{\text{МР}}$ від 0 до 360° відносно G ($F_{T_1}^* = F_{T_1}/G$, $F_{T_2}^* = F_{T_2}/G$). Результати таких розрахунків для параметрів моделі робота ($L = 1$ м, $B = 0,8$ м; $h_{Ц} = 0,2$ м) та робочої поверхні ($\mu_{\text{пов}} = 0,6$; $f = 0,015$, $\gamma = 10^\circ$) без урахування сил $F_{\text{ТО}}$ та F наведені у полярних та декартових координатах на рис. 3 а. Як видно з полярної діаграми, наведеної на рис. 3 а, для забезпечення рівномірного повороту робота з постійним радіусом на похилій площині необхідно безперервно змінювати величини сил F_{T_1} (сила F_{T_1} має знак мінус для всіх значень $\varphi_{\text{МР}}$ а на рис. 3 а в полярних координатах F_{T_1} взята за модулем) та F_{T_2} . З діаграми видно, що найбіль-



а)



б)



в)

Рис. 3. Графіки зміни відносних сил тяги $F_{T_1}^*$ (пунктирна лінія) та $F_{T_2}^*$ (суцільна лінія) в координатах курсового кута $\varphi_{\text{МР}}$: $\gamma = 10^\circ$, $F_{\text{ТО}} = F = 0$ (а); $\gamma = 60^\circ$, $F_{\text{ТО}} = 0$, $F = 0,76G$ (б); $\gamma = 60^\circ$, $F_{\text{ТО}} = 0,5G$; $F = 1,5G$ (в)

шого значення сила F_{T2} досягає на «чистому» підйомі, найменшого – на «чистому» спуску. Для F_{T1} діє зворотна закономірність: за «чистих» кренів значення сил F_{T2} та F_{T1} менше значень цих сил під час повороту МР на горизонтальній ділянці.

На рис. 3 б показані графіки для F_{T1}^* та F_{T2}^* у разі нахилу поверхні $\gamma = 60^\circ$ з урахуванням сили F^* ($F^* = F/G$), яка розрахована для заданих умов руху і тих самих параметрів моделі робота за виразом (3). Видно, що для забезпечення рівномірного повороту МР на похилих поверхнях з великим кутом нахилу з потрібним значенням F характер зміни сил тяги зберігається, але тепер вони мають змінюватися і за знаком, і за модулем, причому на «чистому» підйомі F_{T1} , на відміну від попереднього випадку, має додатний знак, але значно менше значення за F_{T2} , а на «чистому» спуску обидві сили мають від’ємний знак, що пояснюється суттєво більшим моментом опору повороту $M_{пов}$ через наявність притискного зусилля F .

На рис. 3 в показані графіки для F_{T1}^* та F_{T2}^* у разі нахилу поверхні $\gamma = 60^\circ$ з урахуванням сил F^* та F_{TO}^* ($F_{TO}^* = F_{TO}/G$, $\beta = 30^\circ$) для заданих умов руху і тих самих параметрів моделі робота. Видно, що для забезпечення рівномірного повороту МР на похилих поверхнях з великим кутом нахилу та наявності F_{TO} від заданої технологічної операції значення сил тяги F_{T2} має змінюватися за модулем, а F_{T1} – і за знаком, і за модулем, що пояснюється взаємним впливом притискного зусилля F та зусилля F_{TO} .

Для опису нерівномірного руху МР залежно для сил F_{T1} та F_{T2} необхідно додати (у разі розгону) або відняти (у разі гальмування) силу інерції. Із залежностей для N_1 та N_2 можна визначити масу робота, яка припадає на кожну гусеницю як $m_{Г1} = N_1/g$, $m_{Г2} = N_2/g$, тоді сила інерції, що діє на кожну гусеницю $F_{Г1}$ та $F_{Г2}$, визначається як:

$$F_{Гi} = \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2g} + jG \sin \gamma \sin \varphi_{MP} \frac{h_{Гi}}{gB} \right) \frac{dV_{Гi}}{dt},$$

де $\frac{dV_{Г1}}{dt}$, $\frac{dV_{Г2}}{dt}$ – прискорення відстаючої та забіжної гусениць.

Динамічний момент у разі нерівномірного повороту на похилій площині робота можна виразити як: $M_{динп} = J_{MP} d\omega_{MP}/dt$, де J_{MP} – момент інерції робота. Величина J_{MP} може бути визначена експериментально для горизонтальних поверхонь (без дії притискного зусилля магніту). Для наближених розрахунків можна умовно прийняти МР у вигляді тонкої пластини масою m_{MP} ширини B та довжини L . Тоді момент інерції

такої пластини $J_{ПМП}$ відносно вісі, що проходить через її геометричний центр, знаходиться як: $J_{ПМП} = m_{MP}(B^2 + L^2)/12$ [16]. Вплив притискного зусилля на момент інерції може бути врахований через додавання до маси МР еквівалентної маси, рівної F/g , тоді отримаємо вираз:

$$M_{динп} = \left(m_{MP} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B^2}{12} \frac{d\omega_{MP}}{dt}.$$

Приймаючи $M_{динп}$ парою еквівалентних динамічних сил опору з плечем B , тоді еквівалентна динамічна сила опору від повороту, що діє на кожну з гусениць, може бути врахована як $F_{динп} = M_{динп}/B$.

Тоді рівняння сил тяги гусениць у динаміці $F_{T1д}$ та $F_{T2д}$ виглядають як:

$$F_{Tд} = F_{Ti} + F_{Гi} + F_{динп}.$$

Враховуючи вираз (4), складемо рівняння математичної моделі динаміки МР, що містить вирази для кожної з гусениць:

$$M_{EMi} = \frac{J_{я} d\omega_{д}}{\eta_{д}} + \frac{1}{k_p \eta_{MP}} \left[J_{ск} \frac{d\omega_{к}}{dt} + R_k \left(f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \varphi_{MP}}{2} + j \frac{x_0}{B} \sin \varphi_{MP} + j f \frac{h_{Гi}}{B} \sin \varphi_{MP} \right) - j \frac{\mu_{пов} L (G \cos \gamma + F)}{4B} \left(1 + \frac{4x_0^2}{L^2} \right) + F_{TO} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - \frac{(l-x_0)}{B} \sin \beta \right) + \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2g} + jG \sin \gamma \sin \varphi_{MP} \frac{h_{Гi}}{gB} \right) \frac{dV_{Гi}}{dt} + \left(m_{MP} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B^2}{12B} \frac{d\omega_{MP}}{dt} \right], \quad (12)$$

де M_{EM1} та M_{EM2} – електромагнітні моменти двигунів відстаючої та забіжної гусениць відповідно; η_{MP} – ККД мобільного робота, $\eta_{MP} = \eta_{д} \eta_{р} \eta_{Гр}$.

Отже, загальна математична модель МР складається із залежностей (2), (3), (5)–(12), а також моделей двигунів та редукторів, наведених у [10]. За допомогою цієї розробленої моделі отримані результати комп’ютерного моделювання у вигляді графіків перехідних процесів основних технологічних параметрів робота, які зображені на рис. 4–7.

На рис. 4 наведена залежність лінійної швидкості переміщення робота у разі подачі напруги 220 В на обидва привідні двигуни від кута нахилу робочої феромагнітної поверхні. Зі збільшенням кута γ від 0 до 90° результуюча швидкість зменшується через збільшення навантаження, створюваного силою тяжіння. При $\gamma = 270^\circ$ робот рухається вниз, відповідно сила тяжіння сприяє переміщенню МР, тому його результуюча швидкість вища, ніж у попередніх випадках (верхня лінія 4 на рис. 4).

Рис. 5 показує, що для $\gamma = 60^\circ$ та живлення електродвигунів МР напругою 220 В у разі появи навантаження, наприклад, створюваного технологічною операцією очищення за значення модельного часу 1 с, усталене значення швидкості переміщення після перехідного процесу зменшується та не повертається до попереднього значення, що вказує на необхідність синтезу та введення в імітаційну модель МР керуючих пристроїв (регуляторів) [10].

Повороти робота для зміни його курсу (кута φ_{MP}) здійснюються зміною живильної напруги на кожному з привідних двигунів. При цьому одночасно змінюється і лінійна швидкість переміщення МР. Зміна координат φ_{MP} та V_{MP} за різних значень напруги, що живить привідні двигуни (U_1, U_2 – напруги на двигунах відстаючої та забіжної гусениць), показана на рис. 6 та 7 відповідно, де через ΔU_{12} позначена різниця живильних напруг, $\Delta U_{12} = U_2 - |U_1|$. З рис. 6 видна лінійність

залежностей кута повороту МР від різниці напруг, що живлять привідні двигуни, для $\alpha = 60^\circ$ та у разі включення навантаження 2,1 кН, створюваного технологічним обладнанням, за значення модельного часу 3 с. При цьому створюване технологічним інструментом навантаження не суттєво впливає на графік $\varphi_{MP}(t)$, а найбільша кутова швидкість робота ω_{MP} досягається у разі зустрічного вмикання двигунів з напругами $U_2 = 220$ В, а $U_1 = -220$ В (лінія 1 на рис. 6).

Рис. 7 показує вплив різниці живильної напруги двигунів на значення лінійної швидкості МР при $\alpha = 60^\circ$ та включенні навантаження 2,1 кН, створюваного технологічним обладнанням, за значення модельного часу 3 с. Причому у разі збільшення цієї різниці результуюча швидкість МР збільшується, що пояснюється зміщенням центру повороту від геометричного центру робота. У разі включення навантаження характер зменшення швидкості зберігається. Після 3 с

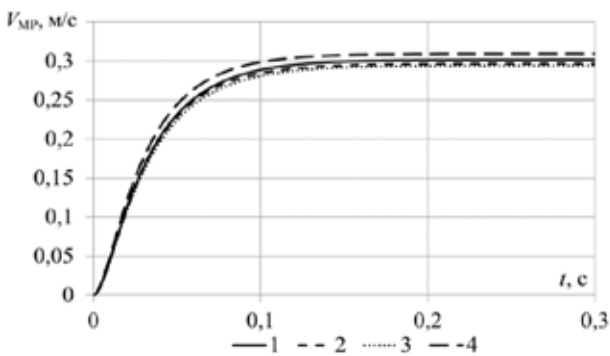


Рис. 4. Зміна лінійної швидкості МР за різних значень кута γ : 1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – $\gamma = 45^\circ$; 3 – $\gamma = 90^\circ$; 4 – $\gamma = 270^\circ$

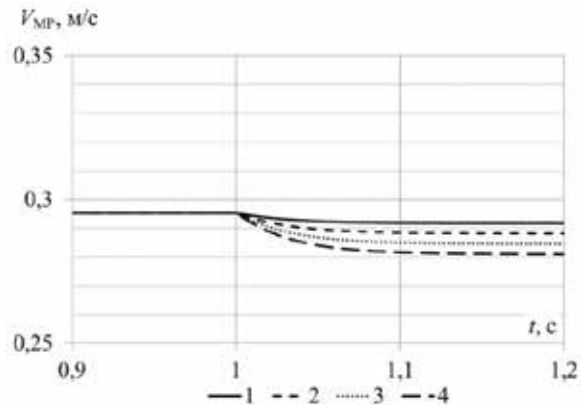


Рис. 5. Зміна лінійної швидкості МР за різних значень навантаження: 1 – 700 Н; 2 – 1400 Н; 3 – 2100 Н; 4 – 2800 Н

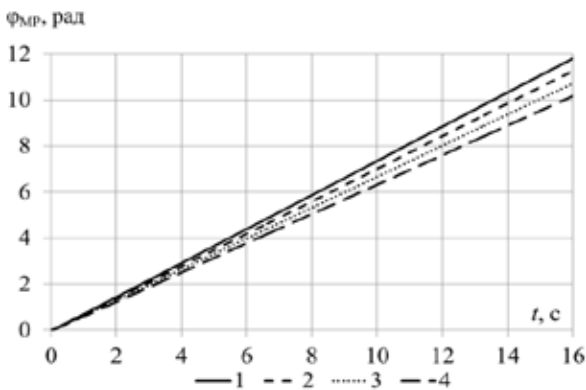


Рис. 6. Зміна кута повороту МР за різниці по модулю в живильній напрузі обох ДПС: 1 – $\Delta U_{12} = 0$ В; 2 – $\Delta U_{12} = 20$ В; 3 – $\Delta U_{12} = 40$ В; 4 – $\Delta U_{12} = 60$ В

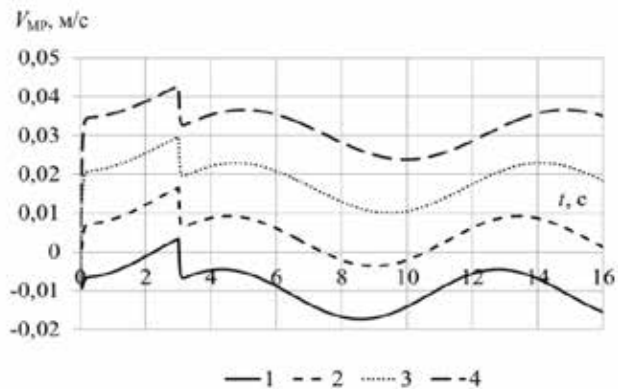


Рис. 7. Зміна лінійної швидкості переміщення МР за різниці по модулю в живильній напрузі обох ДПС ΔU_{12} : 1 – $\Delta U_{12} = 0$ В; 2 – $\Delta U_{12} = 20$ В; 3 – $\Delta U_{12} = 40$ В; 4 – $\Delta U_{12} = 60$ В

моделювання швидкість має коливальний характер через відповідні коливання навантаження від змінюваних поздовжніх та поперечних сил на валах двигунів.

Отримані результати на рис. 4–7 показують адекватність отриманих результатів за характером зміни основних технологічних параметрів реальним процесам переміщення існуючих МР в аналогічних умовах. У майбутньому доцільно розглянути синтез регуляторів САК просторовим рухом робота по похилій робочій поверхні.

Висновки. У цій роботі представлений синтез математичної моделі гусеничного МР, яка пов'язує конструктивні параметри, притискне зусилля, швидкість переміщення, курсовий кут,

враховує залежність моменту опору повороту від радіуса повороту, а також збурення від виконуваної технологічної операції. Результати моделювання показують наявність істотного впливу кута нахилу робочої поверхні та збурення від технологічної операції на основні керовані координати – швидкість та притискне зусилля. Своєю чергою на курс МР цей вплив незначний. Таким чином, синтезована модель повною мірою відображає основні властивості реального мобільного робота як складного об'єкта керування, дає змогу досліджувати його поведінку в різних умовах руху та може бути застосована в подальших дослідженнях під час розробки та налагодження високоєфективних САК основними координатами МР.

Список літератури:

1. Kozlov O.V., Gerasin O.S., Kondratenko Y.P., Kushnir V.O. Automation of the monitoring and control processes of a mobile robot for processing of large inclined surfaces. *International Journal "SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE"*, No. 1 (9), 2018, P. 59–66.
2. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. Москва : Тип. Мин. образования РФ, 1997. 223 с.
3. Souto D., Faica A., Lypez-Peca F., Duro R.J. Lappa: a New Type of Robot for Underwater Non-magnetic and Complex Hull Cleaning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Karlsruhe, Germany, May 6–10, 2013). Germany, 2013. P. 3394–3399.
4. Ross, B., Bares, J., Fromme, C. A Semi-Autonomous Robot for Stripping Paint from Large Vessels. *The International Journal of Robotics Research*. July–August, 2008. P. 617–626.
5. Christensen, L., Fischer, N., Kroffke, S., Lemburg, J., Ahlers R. Cost-Effective Autonomous Robots for Ballast Water Tank Inspection. *Journal of Ship Production and Design*. 2011. No. 27 (3). P. 127–136.
6. Souto, D., Faiña, A., Deibe, A., Lopez-Peña, F., Duro, R. J. A Robot for the Unsupervised Grit-Blasting of Ship Hulls. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. Vol. 9. P. 1–16.
7. Longo D., Muscato G. A Small Low-Cost Low-Weight Inspection Robot with Passive-Type Locomotion. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2004. Vol. 11. P. 339–348.
8. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна: пат. 100341 Україна: МПІК В25J 19/00. № u2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 9 с.
9. Кондратенко Ю.П., Рудольф Й., Козлов О.В., Запорожець Ю.М., Герасін О.С. Нейро-нечіткі спостерігачі для ідентифікації притискного зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 53–61.
10. Gerasin O.S., Kozlov O.V., Kondratenko G.V., Mingxin H. Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement. *Проблеми інформаційних технологій*. 2018. № 1 (23). С. 87–97.
11. Беспяты́й Ф.С., Троицкий И.Ф. Конструкция, основы теории и расчёт трактора. Изд. второе. Москва : «Машиностроение», 1972. 502 с.
12. Сергеев Л.В. Теория танка. Москва, 1973. 495 с.
13. Вікович І.А. Теорія руху транспортних засобів : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.
14. Kondratenko Y.P., Zaporozhets Y.M., Rudolph J., Gerasin O.S., Topalov A.M., Kozlov O.V. Features of clamping electromagnets using in wheel mobile robots and modeling of their interaction with ferromagnetic plate. *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. Bucharest, Romania, 2017. Vol. 1. P. 453–458.
15. Kondratenko Y., Zaporozhets Y., Rudolph J., Gerasin O., Topalov A., Kozlov O. Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots. *International Journal of Computing*. 2018. № 17 (1). P. 33–46.
16. Піцан Р.М., Бардачевський В.Т., Бойчук Б.Г. Збірник задач до курсу «Електропривід». *Розімкнені системи електропривода*. Частина І. Львів : Вид-во Державного університету «Львівська політехніка», 1999. 425 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЦЕЛЕВОГО ГУСЕНИЧНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

В статье проведён синтез и исследование математической модели многоцелевого гусеничного мобильного робота (МР) с прижимными электромагнитами, способного перемещаться и выполнять различные технологические операции на наклонных ферромагнитных поверхностях. Авторами разработана математическая модель движущего комплекса МР для равномерного и неравномерного пространственного движения, которая связывает скорость перемещения, курсовой угол и создаваемое роботом прижимное усилие. Синтезированная модель МР позволяет исследовать поведение данного сложного технического объекта управления в различных условиях движения и может быть применена в дальнейших исследованиях при разработке и настройке систем автоматического управления (САУ) основными координатами МР.

Ключевые слова: *мобильный робот многоцелевого назначения, гусеничный движитель, прижимной электромагнит, система автоматического управления, математическое моделирование.*

MATHEMATICAL MODELING OF MULTIPURPOSE CATERPILLAR MOBILE ROBOT FOR VERTICAL MOVEMENT

The article contains a synthesis and study of a mathematical model of a multipurpose caterpillar mobile robot (MR) with clamping electromagnets, capable of moving and performing various technological operations on inclined ferromagnetic surfaces. The authors developed a mathematical model of the MR's moving complex for uniform and uneven spatial movement, which connects the speed of movement, the course angle and the clamping force created by the robot. The synthesized MR's model allows to investigate the behavior of this complex technical control object in the various movement conditions and can be applied in further studies at the development and adjustment of automatic control systems (ACS) of the MR's main coordinates.

Key words: *mobile multipurpose robot, caterpillar mover, clamping electromagnet, automatic control system, simulation.*

Говорущенко Т.О.

Хмельницький національний університет

Медзатий Д.М.

Хмельницький національний університет

Боднар М.А.

Хмельницький національний університет

КОМПЕНСАТОРНА МОДЕЛЬ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ SQUARE

У статті розроблено компенсаторну модель якості програмного забезпечення на основі моделі SQuaRE, яка забезпечує можливість надання коректних кількісних оцінок якості, враховуючи важливість та взаємовпливи атрибутів якості ПЗ. Розроблена модель дає змогу зробити висновок: наявність яких атрибутів є пріоритетною та необхідною для забезпечення відповідного рівня достовірності оцінювання якості ПЗ.

Ключові слова: програмне забезпечення (ПЗ), якість ПЗ, характеристики якості, атрибути якості, компенсаторна модель.

Постановка проблеми. Ключовим фактором забезпечення ефективного застосування програмного забезпечення (ПЗ) та однією з основних вимог користувачів і зацікавлених осіб до сучасного ПЗ є досягнення високих значень показників його якості. Якість ПЗ є основним чинником для його успішного впровадження та експлуатації. Потреба у забезпеченні якості ПЗ випливає з того, що помилки та відмови ПЗ загрожують катастрофами, які призводять до людських жертв, екологічних катаклізмів, значних часових втрат та фінансових збитків [1].

Загальний підхід до моделювання якості ПЗ полягає в тому, щоб спочатку ідентифікувати невеликий набір характеристик якості найвищого рівня абстракції, а потім у напрямку «згоризонтизу» розбити ці характеристики на підхарактеристики та набори підлеглих атрибутів. Стандарт ISO 25010 [2], який описує модель якості SQuaRE, є типовим прикладом такого загального підходу та найбільш використовуваною моделлю для оцінки якості ПЗ.

Під час оцінювання якості ПЗ для усунення проблеми суб'єктивного оцінювання та формального задоволення якості варто враховувати як можливість обчислення та ступінь вираженості характеристик, підхарактеристик та атрибутів якості, так і їх значущість.

Якщо атрибути, які входять до складу декількох підхарактеристик та (або) характеристик якості, визначені неточно або відсутні, то одно-

часне використання цих атрибутів суттєво вплине на достовірність отриманих оцінок якості ПЗ. За такої ситуації важливою є умова пом'якшення впливу взаємної кореляції таких характеристик та підхарактеристик під час використання їх у моделі якості. Таке пом'якшення здійснюється шляхом виявлення спільних атрибутів, забезпечення їх наявності, підвищення точності їх значень або за можливості обмеження одночасного задіявання наборів підхарактеристик, що містять однакові атрибути.

Отже, нині актуальною є проблема розроблення багатоатрибутної компенсаторної моделі якості ПЗ, яка враховує важливість кожного атрибута та показує ступінь впливу атрибута на якість кінцевого продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Модель якості, створена в межах стандарту [2], визначається 8 загальними характеристиками якості продукту: функційна придатність, ефективність, сумісність, зручність використання, надійність, захищеність, супроводжуваність або ремонт придатність, можливість переносу. Кожна характеристика якості ПЗ є функцією від декількох підхарактеристик якості (всього 31 підхарактеристика, згідно зі стандартом [2]). Нижній рівень ієрархії представляють атрибути якості ПЗ, які підлягають точному опису та вимірюванню. Атрибути якості ПЗ визначені та описані у стандарті ISO 25023 [3]. Аналіз робіт [4–7] та стандарту [3] дав можливість визначити залеж-

ність підхарактеристик якості від 203 атрибутів. Викладена концепція оцінювання якості ПЗ представлена на рис. 1.



Рис. 1. Сучасна концепція оцінювання якості ПЗ у рамках моделі SQuaRE (ISO 25010)

Натепер оцінювання атрибутів якості ПЗ виконується суб'єктивно, оскільки відсутні єдині стандарти щодо їх оцінювання. Інтерпретація величин атрибутів також здійснюється суб'єктивно, оскільки відсутні стандартизовані «еталонні» значення атрибутів. Градування шкали оцінки знову-таки суб'єктивне, тому що залежить від можливих ступенів відповідності атрибуту накладеним обмеженням, а ступені відповідності не стандартизовані і визначаються софтверною організацією [8–11].

Отже, оцінювання якості ПЗ як функції основних восьми характеристик є суб'єктивним, оскільки софтверна організація інтерпретує одержані значення атрибутів як максимальні, градуєє шкалу оцінки кожної характеристики, виходячи з власної інтерпретації значень атрибутів та можливих ступенів відповідності атрибутів обмеженням, у результаті чого одержує максимальні значення кожної характеристики, а, відповідно, і максимальне значення якості ПЗ [8–11]. Насправді ж відбувається лише формальне задоволення якості ПЗ унаслідок неповного покриття стандартами об'єктів стандартизації, а також унаслідок вибору розробником вигідних для себе стандартів та пристосування цих стандартів до своїх потреб.

Основна ідея моделі SQuaRE [2] полягає в тому, що оцінювання якості ПЗ, а також її характеристик та підхарактеристик має проводитись комплексно, з урахуванням усіх зазначених характеристик, підхарактеристик та атрибутів відповідно. Але відсутні комплексні методології, які дадуть змогу оцінити не лише вплив кожної окремої характеристики на якість ПЗ (цьому питанню присвячена низка робіт), але й забезпечать можливість оцінити наявність усіх атрибутів, необ-

хідних для визначення всіх підхарактеристик та характеристик якості (достатність інформації), а також оцінити взаємовплив характеристик.

Аналіз робіт [4–7] та стандартів ISO 25010 [2], ISO 25023 [3] дав можливість зробити висновок, що є атрибути, від яких залежать більше однієї підхарактеристики та характеристики якості ПЗ, тобто має місце кореляція підхарактеристик та характеристик за певними атрибутами (так, згідно зі стандартом [3] підхарактеристики якості залежать від 203 атрибутів, але всього від 138 різних атрибутів). Існування взаємозв'язків (кореляції) між характеристиками та підхарактеристиками за атрибутами впливає на значущість та вагу атрибутів якості ПЗ [12]. Однією з проблем моделей якості натепер є саме визначення значущості атрибутів якості.

З огляду на потребу врахування значущості та ваги атрибутів під час оцінювання якості ПЗ, варто для моделювання якості ПЗ використати компенсаторну модель. Компенсаторна модель – це багатоатрибутна модель процесу прийняття рішень на етапі оцінювання альтернатив, в якій один атрибут або група атрибутів є компенсуючими для іншого атрибута або групи атрибутів у загальній оцінці об'єкта або ідеї [13]. Компенсаторними такі моделі названі тому, що низька оцінка, одержана для одного атрибута, може бути компенсована високим балом за іншим атрибутом. В основі дії компенсаторних моделей лежить оцінка ступеня впливу атрибутів на кінцеву властивість (якість ПЗ) з урахуванням значущості цих атрибутів. Однією з відомих компенсаторних моделей є модель сумарної оцінки за атрибутами з урахуванням їх значущості, у якій кінцева властивість оцінюється з урахуванням ступеня вираженості та значущості атрибута [14]. Труднощами під час розроблення компенсаторної моделі є саме визначення впливовості та значущості атрибутів якості.

У [15] розроблено метод оцінювання вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ, який складається з таких етапів: 1) визначення спільних атрибутів для характеристик якості ПЗ; 2) визначення спільних атрибутів для підхарактеристик якості ПЗ; 3) розрахунок вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ на основі кількості підхарактеристик, які залежать від цих атрибутів – ваговий коефіцієнт h -го атрибута обчислюється за формулою: $w_h^m = \frac{ksch_h}{km}$, де $ksch_h$ – кількість підхарактеристик, які залежать від h -го спільного атрибута; km – загальна кількість атрибутів (оскільки натепер підхарактеристики якості залежать від 138 різних атрибутів, то $km = 138$). Згідно з розробленим методом, у [15]

проведено розрахунок вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ, які будуть використовуватись у майбутньому розробленні компенсаторної моделі якості ПЗ.

Постановка завдання. Проведений аналіз наявних досліджень та публікацій у галузі оцінювання якості ПЗ на основі моделі SQuaRE показав, що нині невирішеною є проблема розроблення багатоатрибутної компенсаторної моделі якості ПЗ, яка враховує важливість кожного атрибута та показує ступінь впливу атрибута на якість кінцевого продукту. Натепер проведено розрахунок вагових коефіцієнтів атрибутів якості ПЗ, визначених у стандарті ISO 25023. Отже, метою цього дослідження є розроблення компенсаторної моделі якості ПЗ на основі моделі SQuaRE.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якість ПЗ (Q) відповідно до стандарту [2] є функцією від восьми основних характеристик: $Q = f(Fs, Pe, Ub, Rb, Cb, Scr, Mb, Pb)$, де: Fs – функційна придатність, Pe – ефективність, Ub – зручність використання, Rb – надійність, Cb – сумісність, Scr – захищеність, Mb – супроводжуваність, Pb – можливість переносу.

Кожна з вищевказаних характеристик якості є функцією від декількох підхарактеристик якості. Наприклад, функційна придатність є функцією від функційної повноти ($FCom$), функційної коректності ($FCor$) та функційної доцільності ($FAppr$): $Fs = f_1(FCom, FCor, FAppr)$. Водночас кожна підхарактеристика якості ПЗ є функцією певних атрибутів якості ПЗ, описаних у стандарті ISO 25023 [3]. Наприклад, функційна повнота є функцією від кількості функцій (Nof), повноти функційної реалізації ($Ficn$), функційної адекватності (Faq), покриття функційної реалізації (Fic).

Якість ПЗ може бути виражена не тільки функцією від підхарактеристик якості, але й зваженим середнім арифметичним з урахуванням значень атрибутів та коефіцієнтів їхньої вагомості. Отже, представимо компенсаторну модель якості програмного забезпечення на основі моделі SQuaRE в узагальненому теоретико-множинному вигляді:

$$Q = f(Fs, Pe, Ub, Rb, Cb, Scr, Mb, Pb) = f(f_1(FCom, FCor, FAppr), \dots) = \phi(w_i^m \cdot qms_i),$$

де w_i^m – ваговий коефіцієнт i -го атрибута якості ПЗ, $i = 1, 138$, $qms_i \in QMS$, $QMS = \{qms_1, \dots, qms_{138}\}$ – множина атрибутів якості ПЗ.

Враховуючи вагові коефіцієнти атрибутів якості ПЗ, розраховані у [15], розробимо компенсаторну модель якості програмного забезпечення на основі моделі SQuaRE:

$$Q = \phi \left(\frac{11}{138} \cdot Nof, \frac{2}{138} \cdot Ficn, \frac{2}{138} \cdot Faq, \frac{17}{138} \cdot Fic, \frac{1}{138} \cdot Ot, \frac{8}{138} \cdot Nic, \frac{1}{138} \cdot Ndi, \frac{1}{138} \cdot Ca, \frac{2}{138} \cdot Pc, \frac{2}{138} \cdot Nmot, \frac{1}{138} \cdot Rt, \frac{2}{138} \cdot Noe, \frac{1}{138} \cdot Tnt, \frac{1}{138} \cdot Tskt, \frac{2}{138} \cdot Mathr, \frac{6}{138} \cdot Nofl, \frac{2}{138} \cdot Niore, \frac{1}{138} \cdot Uwt, \frac{1}{138} \cdot Nmre, \frac{1}{138} \cdot Ntre, \frac{1}{138} \cdot Tcc, \frac{1}{138} \cdot Iou, \frac{1}{138} \cdot Nolcd, \frac{1}{138} \cdot Ioll, \frac{1}{138} \cdot Mmu, \frac{1}{138} \cdot Mtu, \frac{1}{138} \cdot Mote, \frac{1}{138} \cdot Ncu, \frac{1}{138} \cdot Cbw, \frac{1}{138} \cdot Sdb, \frac{1}{138} \cdot Nott, \frac{1}{138} \cdot Niodi, \frac{1}{138} \cdot Cnd, \frac{1}{138} \cdot Fua, \frac{1}{138} \cdot Uaio, \frac{1}{138} \cdot Efl, \frac{1}{138} \cdot Hfq, \frac{1}{138} \cdot Eudhs, \frac{1}{138} \cdot Haa, \frac{1}{138} \cdot Cudhf, \frac{1}{138} \cdot Ecr, \frac{1}{138} \cdot Nsf, \frac{2}{138} \cdot Nuec, \frac{1}{138} \cdot Nac, \frac{1}{138} \cdot Nop, \frac{1}{138} \cdot Niwccd, \frac{1}{138} \cdot Nmi, \frac{2}{138} \cdot Nie, \frac{1}{138} \cdot Pha, \frac{1}{138} \cdot Neum, \frac{1}{138} \cdot Nurs, \frac{1}{138} \cdot Optdo, \frac{1}{138} \cdot Nouheo, \frac{1}{138} \cdot Niewusc, \frac{1}{138} \cdot Nacie, \frac{1}{138} \cdot Necwusc, \frac{1}{138} \cdot Tnect, \frac{1}{138} \cdot Nfuet, \frac{1}{138} \cdot Tnfric, \frac{1}{138} \cdot Tniop, \frac{1}{138} \cdot Nige, \frac{1}{138} \cdot Dipu, \frac{1}{138} \cdot Disu, \frac{1}{138} \cdot Dea, \frac{1}{138} \cdot Drwmu, \frac{1}{138} \cdot Ewscbusd, \frac{1}{138} \cdot Ewusd, \frac{1}{138} \cdot Ffrusd, \frac{1}{138} \cdot Susd, \frac{1}{138} \cdot Ppsa, \frac{3}{138} \cdot Nofl, \frac{1}{138} \cdot Ps, \frac{5}{138} \cdot Ntc, \frac{4}{138} \cdot Nrf, \frac{1}{138} \cdot Ncf, \frac{1}{138} \cdot Fdatc, \frac{1}{138} \cdot Frn, \frac{1}{138} \cdot Frl, \frac{1}{138} \cdot Mtbf, \frac{1}{138} \cdot Tmy, \frac{1}{138} \cdot Elfd, \frac{1}{138} \cdot Fdy, \frac{1}{138} \cdot Tidwsis, \frac{1}{138} \cdot Nob, \frac{1}{138} \cdot Tdt, \frac{2}{138} \cdot Nbd, \frac{3}{138} \cdot Nio, \frac{1}{138} \cdot Tir, \frac{1}{138} \cdot Dt, \frac{1}{138} \cdot Nrs, \frac{1}{138} \cdot Nrn, \frac{1}{138} \cdot Ray, \frac{1}{138} \cdot Ndfri, \frac{1}{138} \cdot Ndfbe, \frac{1}{138} \cdot Nip, \frac{1}{138} \cdot Deay, \frac{2}{138} \cdot Nidc, \frac{2}{138} \cdot Nat, \frac{2}{138} \cdot Ncr, \frac{2}{138} \cdot Aca, \frac{1}{138} \cdot Ndiced, \frac{1}{138} \cdot Ndbred, \frac{1}{138} \cdot Net, \frac{1}{138} \cdot Nepuds, \frac{1}{138} \cdot Nernrp, \frac{1}{138} \cdot Nasdrsl, \frac{1}{138} \cdot Naao, \frac{1}{138} \cdot Npam, \frac{1}{138} \cdot Nmm, \frac{1}{138} \cdot Nv, \frac{1}{138} \cdot Nm, \frac{1}{138} \cdot Fcy, \frac{1}{138} \cdot Nfcy, \frac{1}{138} \cdot Vrn, \frac{1}{138} \cdot Aay, \frac{1}{138} \cdot Tay, \frac{1}{138} \cdot Cra, \frac{2}{138} \cdot Ert, \frac{1}{138} \cdot Nirbl, \frac{1}{138} \cdot Ndfri, \frac{1}{138} \cdot Atc, \frac{1}{138} \cdot Nrv, \frac{1}{138} \cdot Ccca, \frac{1}{138} \cdot Ntcpbm, \frac{1}{138} \cdot Ntspam, \frac{1}{138} \cdot Nbtfr, \frac{1}{138} \cdot Ntdos, \frac{1}{138} \cdot Ncp, \frac{1}{138} \cdot Puf, \frac{1}{138} \cdot Nds, \frac{1}{138} \cdot Eoi, \frac{1}{138} \cdot Aads, \frac{1}{138} \cdot Hea, \frac{1}{138} \cdot Sea, \frac{1}{138} \cdot Nofwnc, \frac{1}{138} \cdot Tnfwde, \frac{1}{138} \cdot Nso, \frac{1}{138} \cdot Nis$$

де Nof – кількість функцій, $Ficn$ – повнота функційної реалізації, Faq – функційна адекватність, Fic – покриття функційної реалізації, Ot – час роботи, Nic – кількість неточних обчислень, Ndi – кількість елементів даних, Ca – обчислювальна точність, Pc – точність, $Nmot$ – кількість задач, Rt – час реакції, Noe – кількість оцінок, Tnt – час обробки, $Tskt$ – час задачі, $Mathr$ – середнє значення пропускнуої здатності, $Nofl$ – кількість відмов, $Niore$ – кількість помилок введення-виведення, Uwt – час очікування користувача під час введення-виведення, $Nmre$ – кількість помилок пам'яті, $Ntre$ – кількість помилок передачі даних, Tcc – потужність передачі даних, Iou – кількість буферів під час введення-виведення, $Nolcd$ – безпосередня кількість рядків коду, $Ioll$ – ліміт завантаження пристроїв введення-виведення, Mtu – максимум використовуваної пам'яті, Mte – максимум використовуваної пере-

дачі даних, *Mote* – середня поява помилки передачі, *Ncu* – кількість одночасних користувачів, *Cbw* – ширина смуги комунікації, *Sdb* – розмір бази даних, *Nott* – кількість посібників, *Niodi* – кількість елементів даних введення-виведення, *Cnd* – повнота описів, *Fua* – зрозумілість функціоналу, *Uaio* – зрозумілість входів та виходів, *Efl* – простота вивчення функціоналу, *Hfq* – частота звертань до довідки, *Eudhs* – ефективність системи допомоги, *Haa* – доступність довідки, *Cudhf* – повнота довідкового фонду, *Ecr* – частота корекції помилок, *Nsf* – кількість екранів або форм, *Nues* – кількість помилок або змін користувача, *Nac* – кількість спроб налаштування, *Nop* – кількість операцій, *Niwccd* – кількість елементів, які можна перевірити на наявність дійсних даних, *Nmi* – кількість виконаних повідомлень, *Nie* – кількість елементів інтерфейсу, *Pha* – фізична доступність, *Neum* – кількість легко зрозумілих повідомлень, *Nurs* – кількість невдало відновлених ситуацій, *Optdo* – час роботи під час спостережень, *Nouheo* – кількість випадків операційних помилок користувача, *Niewusc* – кількість вхідних помилок, які користувач успішно виправляє, *Nacie* – кількість спроб коригування вхідних помилок, *Necwusc* – кількість помилкових умов, які користувач успішно виправляє, *Tnect* – загальна кількість перевірених помилкових умов, *Nfiuet* – кількість функцій, виконаних з толерантністю до помилки користувача, *Tnfrtc* – загальна кількість функцій, що вимагають можливості толерантності, *Tniop* – загальна кількість некоректних шаблонів операцій, *Nige* – кількість графічних елементів інтерфейсу, *Dipu* – ступінь збільшення задоволення користувача, *Disu* – ступінь збільшення задоволеності потреб користувача, *Dea* – ступінь ергономічної привабливості, *Drwmu* – ступінь використання метафор реального світу, *Ewsebuusd* – обсяг, до якого ПЗ можуть користуватись користувачі з обмеженими можливостями, *Ewusd* – ефективність роботи користувачів з обмеженими можливостями, *Efrusd* – свобода від ризику для користувачів з обмеженими можливостями, *Susd* – задоволення потреб користувачів з обмеженими можливостями, *Ppsa* – наявність властивостей, які підтримують доступність, *Noft* – кількість збоїв, *Ps* – розмір продукту, *Ntc* – кількість тестових випадків, *Nrf* – кількість фіксованих відмов, *Nef* – кількість усунутих збоїв, *Fdate* – щільність відмов відносно до тестових випадків, *Frn* – роздільна здатність відмов, *Frl* – усунення збоїв, *Mtbf* – середній час між відмовами, *Tmy* – випробувальний термін, *Elfd* –

орієнтовна щільність прихованих збоїв, *Fdy* – щільність збоїв, *Tidwsis* – загальний час, протягом якого програма перебуває у стані зростання, *Nob* – кількість спостережуваних несправностей, *Tdt* – загальна тривалість простоїв, *Nbd* – кількість несправностей, *Nio* – кількість недозволених операцій, *Ttr* – час ремонту, *Dt* – тривалість простою, *Nrs* – кількість перезапусків, *Nrm* – кількість відновлень, *Ray* – відновлюваність, *Ndfrt* – кількість форматів даних, пов'язаних інструментом, *Ndfbe* – кількість форматів даних для обміну, *Nip* – кількість протоколів інтерфейсу, *Deay* – обмінність даних, *Nidc* – кількість випадків пошкодження даних, *Nat* – кількість типів доступу, *Ncr* – кількість контрольованих вимог, *Aca* – керованість доступу, *Ndiced* – кількість елементів даних, які правильно зашифровані та розшифровані, *Ndibred* – кількість елементів даних, які потребують шифрування та розшифрування, *Nepuds* – кількість подій, оброблених за допомогою цифрового підпису, *Nernrp* – кількість подій, що вимагають властивості невідхилення, *Nasdrsl* – кількість доступів до системи та даних, записаних у системний журнал, *Naa0* – кількість дійсно набутих доступів, *Npam* – кількість наданих методів перевірки автентичності, *Nmm* – кількість внесених змін, *Nv* – кількість змінних, *Nm* – кількість модулів, *Fcy* – функційна спільність, *Nfey* – нефункційна спільність, *Vrn* – міцність варіабельності, *Aay* – застосовність, *Tay* – пристосованість, *Cra* – заміна компонентів, *Ert* – час помилки, *Nirbl* – кількість елементів, необхідних для запису в журналі, *Ndfr* – кількість необхідних діагностичних функцій, *Atc* – можливість аудиту сліду, *Nrv* – кількість переглянутих версій, *Ccca* – можливість управління змінами, *Ntepbm* – кількість проблем протягом певного періоду до модифікації, *Ntspam* – кількість проблем за той же період після модифікації, *Nbfr* – кількість необхідних вбудованих тестових функцій, *Nidos* – кількість тестових залежностей на інших системах, *Ncp* – кількість контрольних точок, *Puf* – портативна дружність користувача, *Nds* – кількість структур даних, *Aads* – адаптивність структур даних, *Hea* – адаптивність апаратного оточення, *Sea* – адаптивність програмного оточення, *Noftwnca* – кількість операційних функцій, завдання яких не були виконані або неадекватні, *Tnfwtdc* – загальна кількість функцій, які були випробувані за різних умов, *Nso* – кількість операцій налаштування, *Nis* – кількість кроків інсталяції, *Eoi* – простота інсталяції, *Net* – кількість сутностей.

Висновки. Актуальність проблем підвищення якості ПЗ зумовлює необхідність розроблення моделей оцінювання якості ПЗ, які б враховували вплив та важливість різних факторів під час управління якістю.

Аналіз моделі SQuaRE (ISO 25010) показав, що низка атрибутів якості входять до складу декількох підхарактеристик та характеристик. Якщо такі атрибути відсутні, то одночасне їх використання під час визначення якості ПЗ суттєво вплине на достовірність отриманих оцінок якості ПЗ, тобто кореляція характеристик за атрибутами може погіршувати точність та достовірність визначення якості ПЗ.

Існування кореляції характеристик і підхарактеристик якості за атрибутами збільшує важливість таких атрибутів під час оцінювання якості,

відтак збільшує вагові коефіцієнти атрибутів якості ПЗ.

У статті розроблено компенсаторну модель якості ПЗ на основі моделі SQuaRE, яка забезпечує можливість надання коректних кількісних оцінок якості, враховуючи важливість та взаємовпливи атрибутів якості ПЗ. У разі побудови такої моделі використано раніше отримані вагові коефіцієнти атрибутів. Чисельник вагового коефіцієнта кожного атрибута якості вказує на кількість підхарактеристик якості ПЗ, які залежать від такого атрибута, а знаменник відображає загальну кількість атрибутів якості в моделі SQuaRE (стандарт ISO 25023 [3]). Розроблена компенсаторна модель дає змогу зробити висновок: наявність яких атрибутів є пріоритетною та необхідною для забезпечення відповідного рівня достовірності оцінювання якості ПЗ.

Список літератури:

1. Говорущенко Т.О., Малярчук Р.А., Вовк І.В. Аналіз інцидентів, спричинених помилками програмного забезпечення. *Інтелектуальні технології в системному програмуванні* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів (Хмельницький, 18–19 квітня 2013 р.). Хмельницький, 2013. С. 187–198.
2. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models. Introduced 01.03.2011. Geneva (Switzerland), 2011. 34 p. (International standard).
3. ISO 25023:2016. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Measurement of system and software product quality. Introduced 31.03.2016. Geneva (Switzerland), 2016. 45 p. (International standard).
4. Abran A., Al-Quitash R.E., Desharnais J.-M., Habra N. ISO-based models to measure software product quality. *Software Quality Measurement: Concepts and Approaches*. 2014. Chapter 5. Pp. 61–96.
5. Montagud S., Abrahao S., Insfrán E. A systematic review of quality attributes and measures for software product lines. *Software Quality Journal*. 2012. No. 20 (3–4). Pp. 425–486.
6. A framework for evaluating reusability of core asset in product line engineering / J. Sun Her and others. *Information and Software Technology*. 2007. No. 49. Pp. 740–760.
7. Biscoglio I., Marchetti E. Definition of software quality evaluation and measurement plans: a reported experience inside the audio-visual preservation context. *The 9-th International Joint Conference on Software Technologies: Proceedings* (Vienna, August 29–31, 2014). Vienna (Austria), 2014. Pp. 63–80.
8. Макконнелл С. Совершенный код. Мастер-класс. Москва : Изд. «Русская редакция», 2013. 896 с.
9. Maedche A., Botzenhardt A., Neer L. Software for people: fundamentals, trends and best practices (Management for professionals). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 293 p.
10. Липаев В.В. Программная инженерия: методологические основы. Москва–Берлин : Директ-Медиа, 2015. 608 с.
11. Глухих М., Ицыксон В.М. Программная инженерия. Обеспечение качества программных средств методами статического анализа : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд. политехн. ун-та, 2011. 150 с.
12. Sugiyanto S., Rochiman S. Integration of DEMATEL and ANP methods for calculate the weight of characteristics software quality based model ISO 9126. *The 5-th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Proceedings* (Yogyakarta, October 7–8, 2013). Yogyakarta (Indonesia), 2013. Pp. 143–148.
13. Decision making. URL: <http://www.cindy.sifonis.com/Classes/Cog316/cogline/Decision.pdf> (дата звернення: 23.05.2019).
14. Бидихова И.С. Методология и методика социологического анализа конкурентоспособности потребительских товаров. URL: <http://cheloveknauka.com/metodologiya-i-metodika-sotsiologicheskogo-analiza-konkurentosposobnosti-potrebitelskih-tovarov> (дата звернення: 23.05.2019).
15. Novorushchenko T. Method of Evaluating the Weights of Software Quality Measures and Indicators. *Application and Theory of Computer Technology*. 2017. Vol. 2. No. 2. Issue 2. Pp. 16–25.

КОМПЕНСАТОРНАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ SQUARE

В статье разработана компенсаторная модель качества программного обеспечения (ПО) на основе модели SQuaRE, которая обеспечивает возможность предоставления корректных количественных оценок качества, учитывая важность и взаимное влияние атрибутов качества ПО. Разработанная модель позволяет сделать вывод: наличие каких атрибутов является приоритетным и необходимым для обеспечения соответствующего уровня достоверности оценки качества ПО.

Ключевые слова: программное обеспечение (ПО), качество ПО, характеристики качества, атрибуты качества, компенсаторная модель.

COMPENSATORY MODEL OF SOFTWARE QUALITY BASED ON SQUARE MODEL

The paper devotes to the compensatory model of software quality based on the SQuaRE model, which provides the possibility of providing accurate quantitative estimates of quality, taking into account the importance and mutual influences of software quality measures. The developed model makes it possible to conclude about the priority and necessity of the presence of certain measures for providing the appropriate level of reliability of the evaluation of software quality.

Key words: software, software quality, software quality characteristics, software quality measures, compensatory model.

Grygorchuk G.V.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Oliynyk A.P.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Grygorchuk L.I.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

THE RESEARCH OF THE MODEL DEFORMATION PROCESS OF ROTATING OBJECTS

The stress-strained state mathematical model of rotating objects with the complex geometric configuration is offered. The class of the model is chosen as an mathematical physics equations incorrect problem for the rectilinear, toroidal and conical areas. The model of the stressed state of objects is realized, the directions for further researches are revealed.

Key words: rotating objects, incorrect problem, types of models, deformation, stress.

Introduction. The rotating objects technical state with the complex geometric configuration is considered in this article, and the basic characteristics of these objects are evaluated. Let's define three basic approaches to its solution. For a simulated object, the initial characteristics are known, which include all design parameters and expected operating conditions. Determine the value of the parameters by solving a certain functional equation. For objects with known characteristics it is possible to determine the functions that determine the action of the most common force, physical, climatic and other factors – for example, operating pressure in the system, rotation mode, thermal characteristics, etc. Consider the most general and natural case that arises when solving control problems, or aspects of the technical state. At the initial moment of time (for example, at the beginning of operation), the initial characteristics of the object are known, and the results of a technical survey determine the characteristics of the object, which are actually changed during the operation of the initial characteristics. The problem of studying the technical state of rotating objects of complex geometric configuration with the corresponding initial conditions and determine the deformation process and the stressed state of the object is formulated.

The problem formulation. During the analysis of the technical state of rotating objects of complex geometric configuration, in addition to the experimental evaluation methods [1; 2] of the main characteristics, there are widely applied methods of mathematical modeling [3–5], the implementation of which is complicated by the nature of phenomena and pro-

cesses, simulated for existing objects. According to the approach proposed in [6], any problem of managing the existing objects, or assessing its technical state, can have three main approaches to its solution.

1. Let the initial characteristics \bar{x} , which include all design parameters and expected operating conditions, of the simulated object be known. In this case, the values of the \bar{y} parameters, in which \bar{x} characteristics transmit during the operation, can be obtained by solving a certain functional equation:

$$\bar{y} = A(V_1, V_2, \dots V_n) \bar{x} \quad (1)$$

where $A(V_1, V_2, \dots V_n)$ is a certain operator that formalizes all influences $V_1, V_2, \dots V_n$, acting on the object during the operation; its structure is known. In fact, (1) is an equation, or a system of equations of mathematical physics with correctly defined practical and initial conditions, for which the resolution (exact or approximate) exists and is uniquely determined, as evidenced by the corresponding mathematical calculations and results [7]. Problem (1) is usually solved at the design stage. In this case, the characteristics $V_1, V_2, \dots V_n$ are clearly formalized. In terms of practical use, the problem (1) for assessing the technical condition or object management can only be used to obtain preliminary results on the project state of the object during operation for the most standard model values of parameters $V_1, V_2, \dots V_n$, which are significantly different from the actual operating conditions $V_1(t), V_2(t), \dots V_n(t)$, which are functions of time. They often take into account the actual operating conditions, but in the vast majority of cases the structure and quantitative characteristics of these functions are unknown.

2. If \bar{x} characteristics are known for the objects, as well as the functions $V_1(t), V_2(t), \dots, V_m(t)$ specify the action of the most common force, physical, climatic and other factors – for example, working pressure in the system, mode rotation, thermal characteristics, etc. The peculiarity of this approach is that $V_1(t), V_2(t), \dots, V_m(t), m < n$ are known functions. In this case, the problem is written in the following form:

$$\bar{y} = A_i(V_1(t), \dots, V_m(t))\bar{x} \quad (2)$$

where A_i differs from A , given in (1), by a simpler structure. In this case, the correspondences are also established for the system or equation (2), but the boundary and initial conditions are simpler than in (1). In some cases, the problem (2) takes into account changes in the spatial configuration of the object being studied.

The most common and natural case that arises when solving management problems or aspects of the technical state of the objects being studied is the following: \bar{x} characteristics of the object are known at the initial moment of time (for example, at the beginning of operation), and \bar{y} characteristics of the object, which are \bar{x} characteristics, actually changed during the operation, are determined according to the results of technical examination. In real cases, \bar{x} and $\bar{y} \in$ are not determined on the entire surface of the body being studied (it is often impossible), but only at some area (subset) of this object. In this case, the task of management or technical state of an object is formalized as follows: the following problem must be solved:

$$\begin{cases} \bar{y} = A \cdot \bar{x} \\ \bar{x}(\Omega) = \bar{x}_B \\ \bar{y}(\Omega) = \bar{y}_B \end{cases}, \quad (3)$$

where Ω is the part of the surface, in which \bar{x}_B and \bar{y}_B are given, A is an operator with an unknown structure, (\bar{x}_B and \bar{y}_B are parameters of the object state at the entire area that it occupies). Obviously, the problem (3) is incorrectly set; it is necessary to propose certain conditions of regularization for its solution [8]. In this case, the problem (3) is decomposed into the following tasks:

- a) defining \bar{x} and \bar{y} on the entire area, occupied by the studied object by the known values \bar{x}_B and \bar{y}_B ;
- b) defining the structure of the operator A to determine the nature of the forces and loads acting on the object being investigated and its quantitative characteristics.

Problem solving:

- a) with the choice of interpolation or data approximation apparatus, which allows you to reproduce

\bar{x} and $\bar{y} \in$ for the known \bar{x}_B and \bar{y}_B . In this case, the device of cubic spline interpolation or the same splines with smoothing as well as the approximation device depending on information on the measurement accuracy \bar{x}_B and \bar{y}_B or on the nature of the change in the value \bar{x} and \bar{y} during the operation (linearity of dependencies, allocation of the most characteristic forces and loads, temperature regimes, etc.).

In the stage b), the structure of the operator A is renewed based on the defined values of \bar{x} and \bar{y} . For example, the model of the deformation process and the stressed state is chosen, then the problem of type (2) is solved, and based on the known \bar{x} there are defined:

$$\bar{y}_i = A_i^*(V_1(t), \dots, V_m(t))\bar{x}. \quad (4)$$

The choice of A_i operator is considered to be complete if \bar{y}_i value differs little from \bar{y} . According to the calculated operator:

$$A_i = \lim_{i \rightarrow N} A_i^*,$$

The result of choosing A_i^* during the N -fold solution of the problem (4) is determined not only by \bar{y} value but also by the predicted values of \bar{y}_B , which make it possible to make predictions for estimating the residual resource of the object.

The proposed approaches can be illustrated in the following example. During the study of the geometrical configuration of rotary kilns in the enterprises manufacturing cement, drying equipment in the sugar industry, etc., a simplified scheme of the mentioned constructions can be presented as a combination of contiguous rectilinear conic and toroidal areas:

- a) straight-conical conjugation;
- b) rectilinear-toroidal conjugation.

Let the coordinates of some set of points be specified at the control and the initial moments of time on the surface of the objects under study. Using interpolation procedures and methods of differential geometry, one can get an idea for three types of elements of the studied bodies construction:

- at the initial moment of time the radius vector of any point for a straight line area is written as:

$$\vec{V}_0 = \begin{cases} x = s \\ y = r \cos \varphi \\ z = r \sin \varphi \end{cases}. \quad (5)$$

S is a longitudinal coordinate, $SE [S_0, S_n]$, where S_0 is the initial, and S_n is the end point of the rectilinear axis, $\varphi \in [0; 2\pi]$ is the polar angle; $V = [R_1, R_2]$, R_1 is the internal, and R_2 is the external radii for the control moment of time representation (5) is transformed into the following representation:

$$\bar{r}_k = \begin{cases} x = s + (\alpha_n(s) \cdot \sin\varphi + \alpha_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r, \varphi) \\ y = y(s) + (\beta_n(s) \sin\varphi + \beta_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r, \varphi) \\ z = z(s) + (r_n(s) \sin\varphi + r_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r, \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

where $\rho(s, r, \varphi)$ is a function that defines the law of changing the radius of the area, $\{s, y(s), z(s)\}$ are the coordinates of the deformed axis of the area; the functions $y(s)$ and $z(s)$ are the results of implementation of the interpolation procedures [6], $\{\alpha_n(s), \beta_n(s), r_n(s)\}$ and $\{\alpha_b(s), \beta_b(s), r_b(s)\}$ are the coordinates of the unit vectors of the normal and the binormal to the pipeline axis, which are determined according to known formulas of differential geometry [9], the representation for the radius vector at the initial moment of time for the conical area is written as follows:

$$\bar{V}_0 = \begin{cases} x = s \\ y = \rho(r, s) \cos\varphi \\ z = \rho(r, s) \sin\varphi \end{cases} \quad (7)$$

where $\rho(r, s) = \frac{R_0 - R_1}{S_0 - S_1} s + \frac{R_1 S_0 - R_0 S_1}{S_0 - S_1} + v$

R_0 and R_1 , respectively, are the largest and smallest radii of the conical area;

S_0 and S_1 are the initial and final longitudinal coordinates of the conical area;

$r \in [0; \delta]$; δ is the thickness of the wall. At the control moment of time, the dependence (7) has the following form:

$$\bar{V}_k = \begin{cases} x = s + (\alpha_n(s) \cdot \sin\varphi + \alpha_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r) \\ y = y(s) + (\beta_n(s) \sin\varphi + \beta_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r) \\ z = z(s) + (r_n(s) \sin\varphi + r_b(s) \cos\varphi) \rho(s, r) \end{cases} \quad (8)$$

where, $\{s; y(s); z(s)\}$; $\{\alpha_n(s); \beta_n(s); r_n(s)\}$; $\{\alpha_b(s); \beta_b(s); r_b(s)\}$ are the components of the axis points of the deformed conical area, the normal and the binormal to it, respectively, $\rho(s, r)$ is determined similarly to (7). If the radii R_0 , R_1 and coordinates S_0 , S_1 change during the deformation process, these values are substituted in expression (7) for $\rho(s, r)$. For determining the coordinates $\{s, y(s), z(s)\}$ it is expedient to use the technique of Hermite polynomials in representation (8) on the condition that:

$$\begin{aligned} H(s_0) &= \varepsilon_0 & H(s_1) &= \varepsilon_2 \\ H'(s_0) &= \varepsilon_1 & H'(s_1) &= \varepsilon_3, \end{aligned} \quad (9)$$

the experimentally determined values of $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, as a rule, satisfy the condition:

$$|\varepsilon_i| \ll 1, i=1,2,3,4. \quad (10)$$

In addition, ε_0 and ε_1 must meet the conditions for conjugation of the rectilinear and conical areas.

Under the conditions (9), the polynomial takes the following form:

$$\begin{aligned} H(s) &= \varepsilon_1 \left[(s - s_1)^2 \left(\frac{2S}{(S_0 - S_1)^3} + \frac{-S_1 + 3S_0}{(S_0 - S_1)^3} \right) \right] + \\ &+ \varepsilon_2 \left[\frac{(S - S_0)(S - S_1)^2}{(S_0 - S_1)^2} \right] + \varepsilon_3 \left[(s - s_0)^2 \left(\frac{-2S}{(S_1 - S_0)^3} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{3S_1 - S_0}{(S_1 - S_0)^3} \right) \right] + \varepsilon_4 \left[\frac{(S - S_0)^2 (S - S_1)}{(S_1 - S_0)^2} \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

– for a toroidal area at an initial moment of time:

$$\bar{V}_0 = \begin{cases} x = (R_0 + r \cos\varphi) \cos\theta \\ y = (R_0 + r \cos\varphi) \sin\theta \\ z = r \sin\varphi, \quad \varphi \in [0; 2\pi]; \end{cases} \quad (12)$$

r is $[R_1; R_2]$ and θ is $[\varphi_1; \varphi_2]$, where R_1 and R_2 respectively, are the internal and external radii of the toroidal area; R_0 is its radius of curvilinear; φ_1 and φ_2 are the angles of opening the toroidal area ($\varphi_1 = 0$; $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$). All of these parameters are known from the design documentation; the representation (12) has the following form at the control point of time:

$$\bar{V}_k = \begin{cases} x = (R_H + r \cos\varphi) \cos\theta \\ y = (R_H + r \cos\varphi) \sin\theta \\ z = r \sin\varphi, \quad \varphi \in [0; 2\pi], \end{cases} \quad (13)$$

where R_H is a new radius of curvilinear of a toroidal area. According to the coordinates of the points $A_1(x_1, y_1, z_1), A_2(x_2, y_2, z_2), A_3(x_3, y_3, z_3)$ (Fig. 1), the locus of the points, equally distant to A_1, A_2 and A_3 , from the following system [6].

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \end{cases} \quad (14)$$

System (14) is a parametric equation of a straight line, which can be written after transformations as follows:

$$\begin{cases} x = x_1 + \alpha t \\ y = y_1 + \beta t \\ z = z_1 + \gamma t \end{cases} \quad (15)$$

Where (15) is the direction vector of a straight line, which is determined from (14). The equation of a plane passing through the points (A_1, A_2, A_3) is written as follows:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (16)$$

Substituting the relation (15), taking into account (13) in equation (16), we find the coordinates (x^*, y^*, z^*) of the point of intersection of the plane (16) with the straight line (15), and then:

$$R_H^2 = (x^* - x_1)^2 + (y^* - y_1)^2 + (z^* - z_1)^2 \quad (17)$$

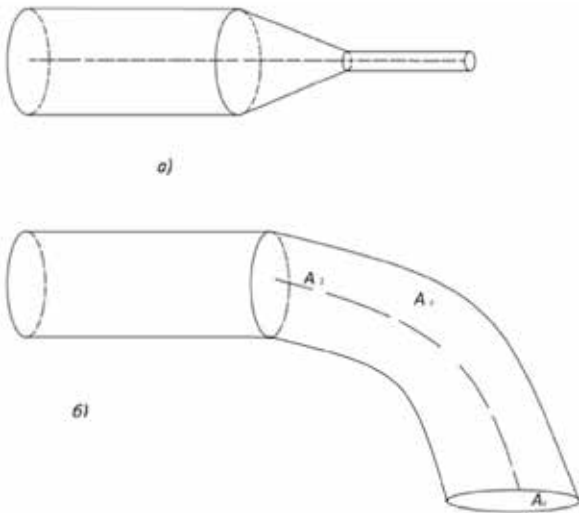


Fig. 1. Circuits of elements conjugation of rotating objects construction

The presentations (5–6), (7–8) and (12–13) fully describe the undeformed and deformed object of the study, and then one can assess the change in the stress-state state of the object within the framework of the theory of elasticity according to the known method [7]:

1. There are calculated components of the vectors of local bases for three types of areas according to formulas (5)–(6) – for rectilinear, (7)–(8) – for conic and (12)–(13) – for toroidal areas:

$$\bar{\mathcal{A}}_i^o = \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial x_i}, x_1 = v; x_2 = \varphi; x_3 = s \quad (18)$$

for rectilinear and conical areas:

$$\bar{\mathcal{A}}_i^o = \frac{\partial \bar{r}_0}{\partial x_i}, x_1 = r; x_2 = \varphi; x_3 = \theta. \quad (19)$$

at the initial moment and:

$$\bar{\mathcal{A}}_i^k = \frac{\partial \bar{r}}{\partial x_i} \quad (20)$$

at a control moment of time.

2. The components of the matrix tensor are calculated as follows:

$$\begin{aligned} g_{ij}^0 &= \bar{\mathcal{A}}_i^o \cdot \bar{\mathcal{A}}_j^o \\ g_{ij}^k &= \bar{\mathcal{A}}_i^k \cdot \bar{\mathcal{A}}_j^k \end{aligned} \quad (21)$$

3. Then the components of the deformation tensor are calculated:

$$\varepsilon_{IJ} = \frac{1}{2} (g_{ij}^k - g_{ij}^0) \quad (22)$$

4. Then the components of the stress tensor are calculated in the framework of the linear theory of elasticity:

$$\sigma_{IJ} = \lambda I_r(\varepsilon) g_{IJ} + 2\mu \varepsilon_{IJ} \quad (23)$$

Where λ and μ are the parameters of the Lamé material, $I_r(\varepsilon)$ is the first invariant of the deformation tensor:

$$I_r(\varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ij} \quad (24)$$

where g^{ij} are the components of the matrix, inverse to $\{g_{IJ}\}$, calculated according to (21) for the initial moment of time. Thus, the initial model of the process of deformation and the tense state of objects of complex geometric shape, which operate in conditions of rotation around one of the axes (usually-longitudinal), is fully developed.

Conclusions. We have developed an initial model for the process of deformation and stressed objects of complex geometric form, which operate in rotational conditions around one of the axes (generally, longitudinal):

- investigated the process of exploitation of objects and determined that the possible change in the process of operation depends on the initial conditions and the geometric shape of the object;

- the obtained results of the complex geometric configuration rotating objects work modeling were obtained by the method of data configuration..

References:

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочное пособие. / Под редакцией В.В. Клюева. Москва : Машиностроение. 2003. 654 с.
2. Вологжанинов Ю.И. Приближенные методы разделения напряженной и экспериментальной механике. Киев : Наукова думка. 1993. 157 с.
3. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. Москва : Машиностроение. 1991. 336 с.
4. Федоренко Д.П. Приближенные решения задач оптимального управления. Москва : Наука 1978. 478 с.
5. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. / Г.С. Писаренко, А.Л. Яковлев, В.В. Матвеев. Киев : Наукова думка. 1975. 704 с.
6. Олійник А.П. Математичний апарат для контролю НДС трубопроводів при зміні їх просторового положення. /А.П. Олійник, Л.М. Заміховський. Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2008. 306 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Москва : Наука 1984. 572 с.
8. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. /А.Н. Тихонов, В.Я. Аренив. Москва : Наука 1979. 285 с.
9. Побезря Б.Е. Лекции по тензорному анализу. Издательство МГУ. 1986. 264 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Пропонується математична модель процесу деформування та напруженого стану протяглих обертових об'єктів складної геометричної конфігурації. Обрано клас моделі як некоректної задачі рівнянь математичної фізики. Запропоновано модель процесу деформування прямолінійної тороподібної та конічної ділянок. Запропоновано модель напруженого стану об'єктів, виявлено напрями подальших досліджень.

Ключові слова: обертові об'єкти, некоректна задача, типи моделей, деформація, напруження.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Предлагается математическая модель процесса деформирования и напряженного состояния протянутых вращающихся объектов сложной геометрической конфигурации. Избран класс модели как некорректной задачи уравнений математической физики. Предложена модель процесса деформирования прямолинейных торообразных и конических участков. Предложена модель напряженного состояния объектов, выявлены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: вращающиеся объекты, некорректная задача, типы моделей, деформация, напряжение.

Добаріна О.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС

У статті розроблено систему регулювання потужності енергоблока з підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою, який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу, математичну модель регулювання потужності за компромісною програмою. Українські енергоблоки АЕС працюють на енергосистемі з великою кількістю споживачів електроенергії. Споживання електроенергії досить стрибкоподібне, це пов'язане з різними потребами її використання, яке залежить від сезону, дня тижня, а також часу доби. Ситуація на енергоринку України така, що енергоблоки АЕС починають залучати для тижневого і добового маневрування. Енергоблоки з ВВЕР-1000 проектувалися для роботи тільки в базовому режимі, тому питання маневрування енергоблоками на тепер є гострим, а вирішення такої задачі неоднозначне. Будь-яка циклічність навантаження обладнання підсилює ефект зносу, насамперед це відбивається на тепловиділяючих елементах. Відомо, що для регулювання потужності енергоблока є три основні програми регулювання та їх модифікації. Підтримка технологічних параметрів відповідно до кожної з програм по-різному впливає на знос обладнання енергоблока. Вибір програми регулювання залежить від багатьох факторів, але завжди зміна програми регулювання проводиться після зупинки енергоблока, аналізу, профілактики і, якщо це необхідно, ремонту. Однак були проведені дослідження, які показали, що можливі ситуації, коли виникає необхідність перейти з однієї програми регулювання на іншу, і це можна зробити без зупинки енергоблока. Тому виникла необхідність синтезу та аналізу автоматизованої системи регулювання потужності енергоблока АЕС, що дає змогу підтримувати характерний технологічний параметр, який вибирається залежно від застосовуваної програми регулювання без зупинки енергоблока.

Ключові слова: АЕС, енергоблок, програма регулювання, потужність, аксіальний офсет.

Постановка проблеми. У багатьох роботах, присвячених проблемі покриття змінної частини графіків навантажень [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], вказується, що підвищення частки атомних електростанцій (далі – АЕС) у загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС у змінному режимі. У [3, с. 56–59] був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблока. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУТП енергоблока була розроблена математична модель [4, с. 108–122], за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблока за різних програм регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий регулятор потужності енергоблока. Таким чином, стаття присвячена дослідженню властивостей регулятора потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив концентрації борної кислоти, а точніше атомів бору ^{10}B на енерговиділення в актив-

ній зоні реактора ВВЕР-1000 досліджувався в низці робіт.

Так, у роботі [5, с. 29–56] показано, що використання борної кислоти для управління потужністю реакторної установки дає змогу значно збільшити час експлуатації тепловиділяючих елементів, підвищуючи економічність експлуатації АЕС без зниження показників безпеки.

У роботі [6, с. 18] наведені результати дослідження системи автоматичного регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС. Показана принципова можливість застосування стандартного ПІ-закону регулювання для керування нелінійним об'єктом.

Робота [7, с. 134–140] присвячена дослідженню регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблока АЕС з ВВЕР-1000. Показано, що у разі регулювання потужності реактора зміною концентрації борної кислоти реактор без регулятора є стійким на всіх рівнях потужності. Стійкість забезпечується регулятором аксіального офсету.

Постановка завдання. Мета статті – вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблока з підтримки теплотехнічного параметра за компромісною програмою, який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між виробленою енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється (для двоконтурної АЕС) зі зміною тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Запорукою надійної та безпечної експлуатації енергоблока є стійкість реактора у разі збурень як під час роботи на постійному рівні навантаження, так і в маневреному режимі. Кількісною мірою стійкості реактора є аксіальний офсет (АО) – технологічна характеристика рівномірності енерговиділення, тому мірою ефективності експлуатації енергоблока з ВВЕР-1000 є

мінімізація відхилення АО. Вона реалізує компромісну програму. Регулятор реактора АРМ вимірює і стабілізує середню температуру теплоносія 1-го контуру впливом на приводи регулюючих стрижнів. Зміна тиску пара в 2-му контурі сприймається коригуючим регулятором тиску P_p , який через нелінійний елемент (обмежувач) змінює завдання регулятору середньої температури теплоносія. Зі зміною t_{cp} відновлюється тиск 2-го контуру. Зі збільшенням потужності енергоблока (через регулятор потужності турбіни) до певного її значення тиск пари перед турбіною зберігається постійним і заданим, а середня температура теплоносія 1-го контуру зростає. Подальше підвищення потужності енергоблока, що призводить до зниження тиску пари, не приводить через наявність обмеження до зміни завдання і відповідно до середньої температури 1-го контуру. Так реалізується друга частина програми регулювання, на якій $t_{cp} = \text{const}$, а тиск перед турбіною зменшується.

Компромісна програма передбачена для реалізації в енергоблоці з ВВЕР-1000. За такої програми $t_s = \text{const}$, а за більших – за програмою $t_{cp} = \text{const}$. Величина потужності для переходу з однієї програми на іншу визначається величиною гранично допустимого тиску в ПГ і частотою очікуваних знижень навантаження. Поблизу номінальної потужності 1-й контур працює за оптимальною програмою.

Математична модель системи регулювання. Під час розробки і дослідження систем автоматичного управління ядерними енергетичними установками (ЯЕУ) користуються математичним моделюванням. Для сучасних 2-контурних ЯЕУ з реактором типу ВВЕР математична модель (ММ), що враховує всі складні динамічні процеси, описується системою багатьох нелінійних диференціальних рівнянь. Рішення і дослідження такої системи утруднено. Водночас для деяких інженерних і навчальних задач можливе використання спрощених ММ, які забезпечують достатню точність. У такому проекті ставиться задача розробки спрощеної ММ ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР з дослідженням таких ММ на ЕОМ. Вже була побудована структурна схема моделі АСР у прикладному пакеті Simulink, підставимо знайдені настройки регулятора і

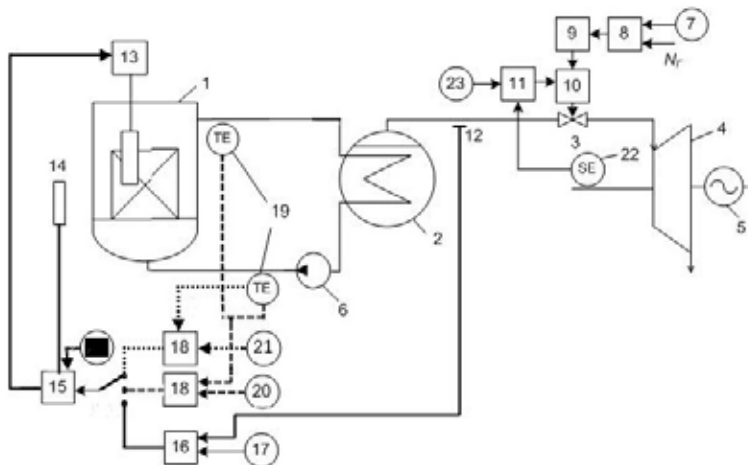


Рис. 1. Удосконалена принципова схема АСР енергоблока з реактором ВВЕР-1000

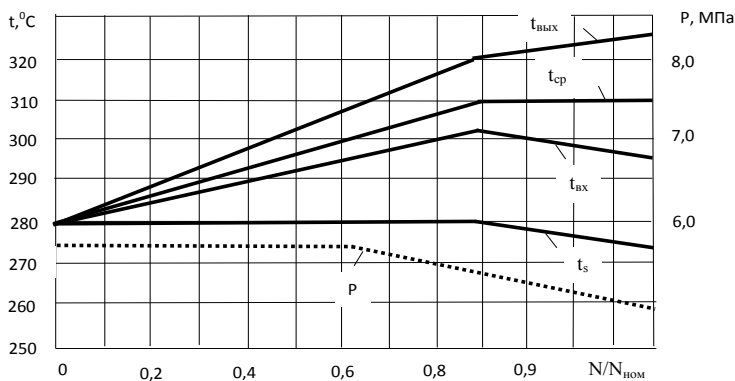


Рис. 2. Компромісна програма схеми регулювання потужності енергоблока в режимі «К»

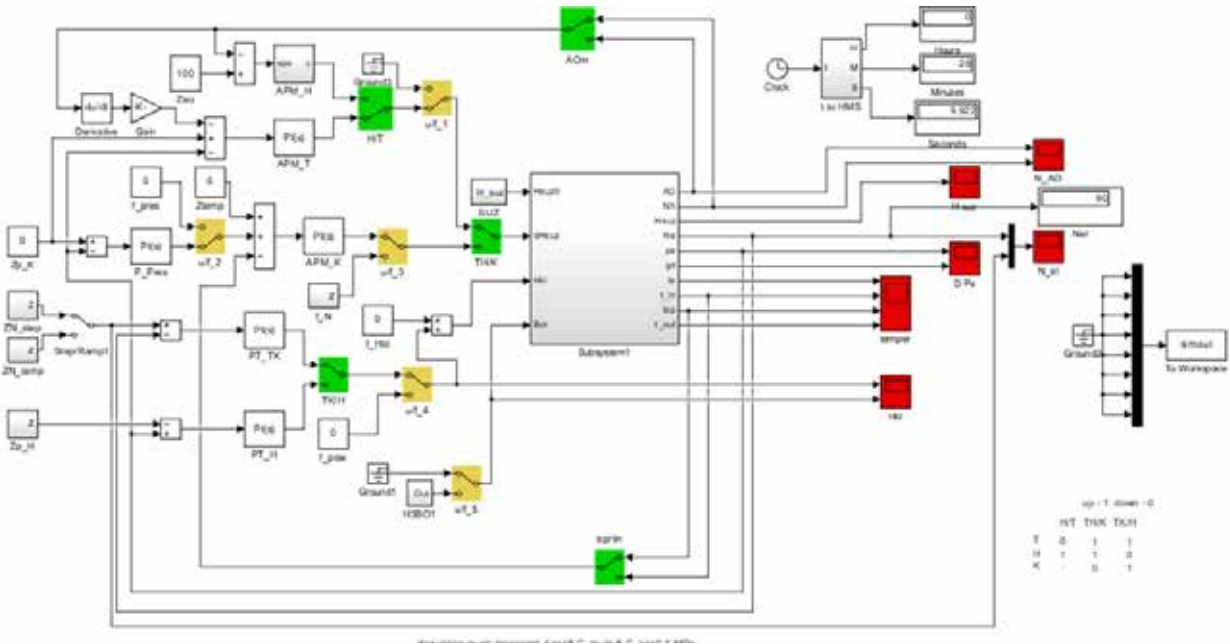


Рис. 3. Структурна схема ММ у середовищі Simulink

скоректуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів. У разі вибору статичних програм регулювання враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільшого поширення набули програми з постійним тиском пари в 2-у контурі ($P=\text{const}$), з постійною середньою температурою теплоносія в 1-у контурі ($t_{cp}=\text{const}$) і компромісні програми.

На рисунку 4 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з $p=\text{const}$ на $t_{cp}=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 4,9%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 5 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з $t_{cp}=\text{const}$ на $p=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.1%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 6 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності від-

бувається перемикання програм регулювання з $t_{cp}=\text{const}$ на $t_{vx}=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.6%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 7 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності

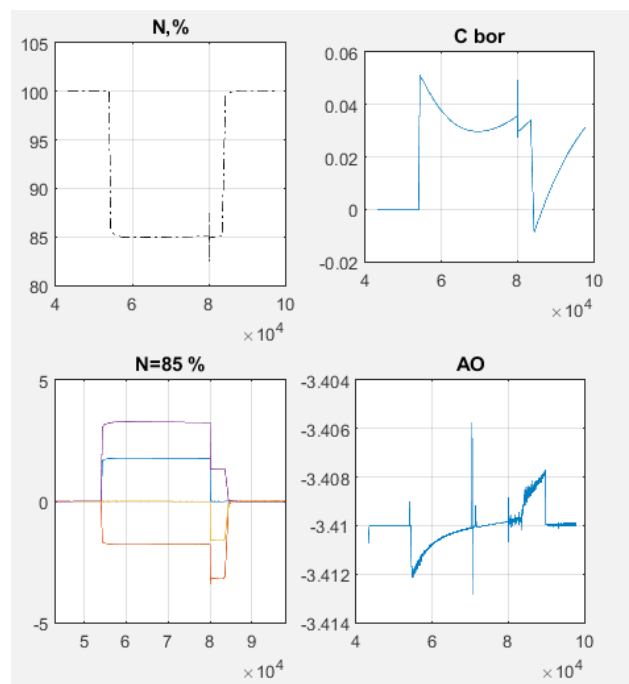


Рис. 4. Перехідний процес регулювання при $p=\text{const}$ перехід на $t_{cp}=\text{const}$

відбувається перемикання програм регулювання з $t_{вх}=\text{const}$ на $p=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 2.9%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 8 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю

енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з $p=\text{const}$ на $t_{вх}=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 1.5%.

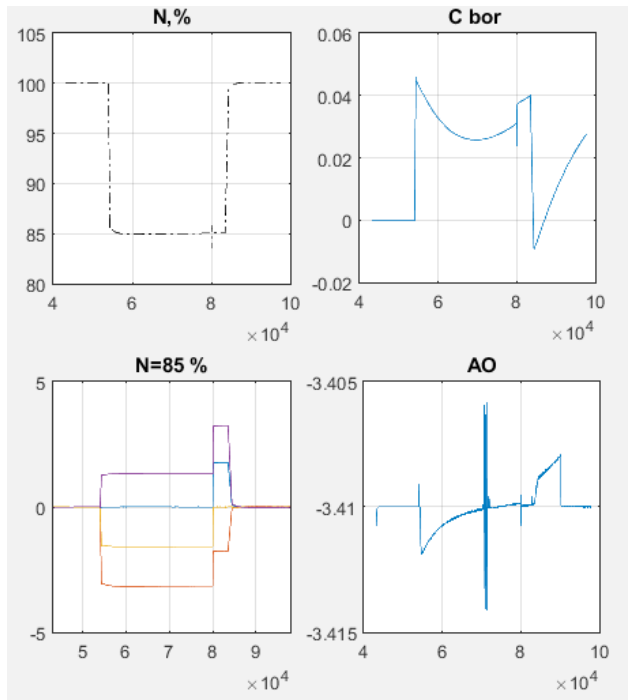


Рис. 5. Перехідний процес регулювання при $t_{ср}=\text{const}$ перехід на $p=\text{const}$

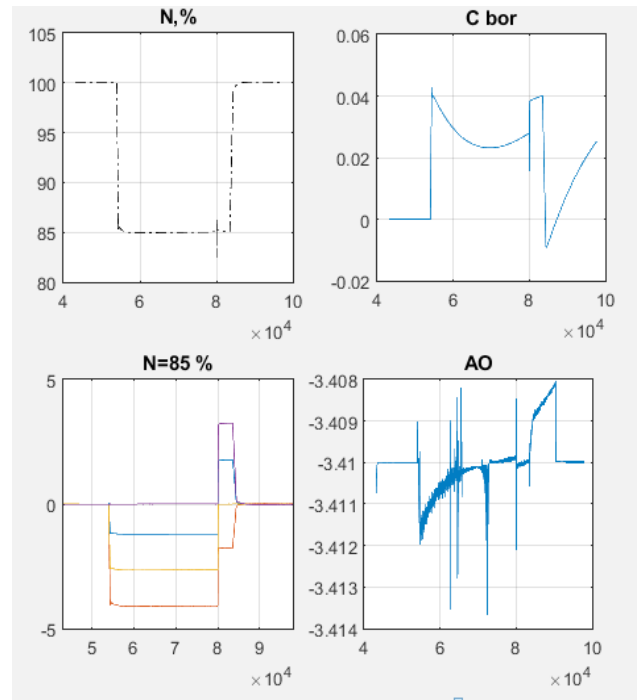


Рис. 7. Перехідний процес регулювання при $t_{вх}=\text{const}$ перехід на $p=\text{const}$

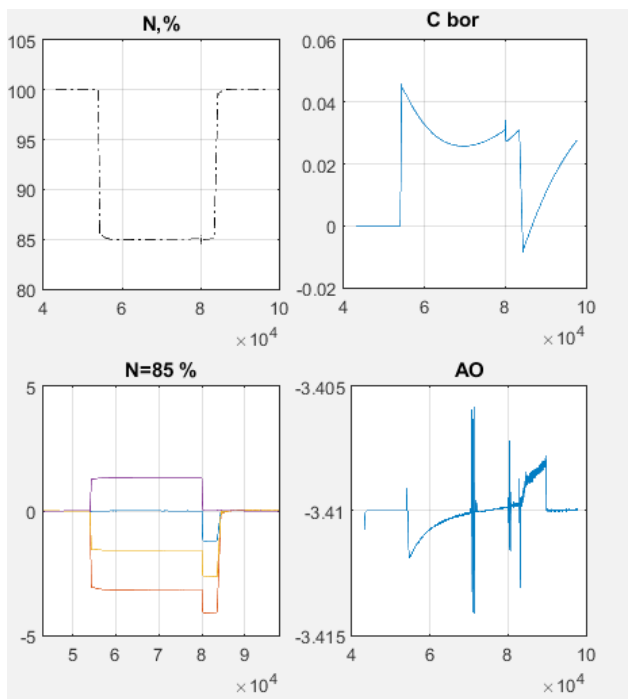


Рис. 6. Перехідний процес регулювання при $t_{ср}=\text{const}$ перехід на $t_{вх}=\text{const}$

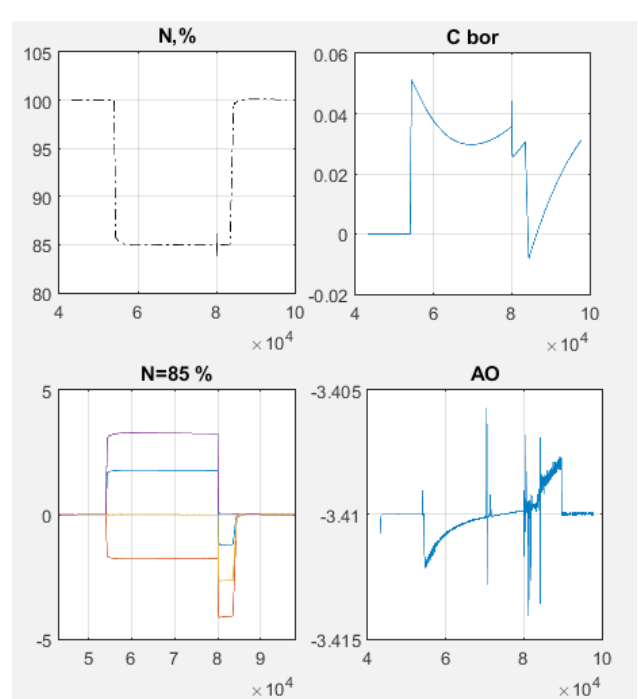


Рис. 8. Перехідний процес регулювання при $p=\text{const}$ перехід на $t_{вх}=\text{const}$

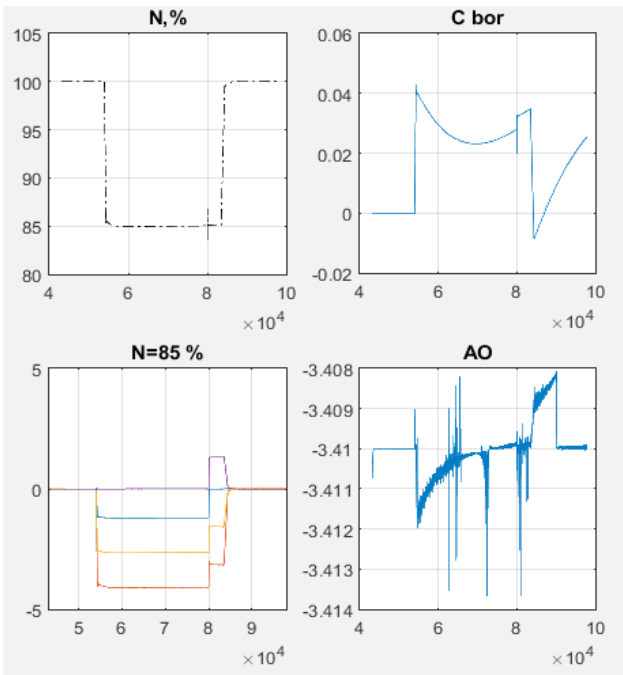


Рис. 9. Перехідний процес регулювання при $t_{вх}=\text{const}$ перехід на $t_{ср}=\text{const}$

Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

На рисунку 9 показано перехідний процес регулювання у разі маневрування потужністю енергоблоком, а саме зниження потужності зі 100% до 85% з подальшим поверненням на повну потужність. При цьому у разі зниження потужності відбувається перемикання програм регулювання з $t_{вх}=\text{const}$ на $t_{ср}=\text{const}$. З графіка видно, що потужність відхилення становить 2%. Відхилення АО від номінального не вийшло за допустимі межі.

Порівняння відхилень ОР СУЗ показує, що величина переміщення практично однакова для різних програм регулювання.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що перемикання між програмами регулювання не є однаково ефективним з точки зору якості перехідного процесу. Для зручності подаль-

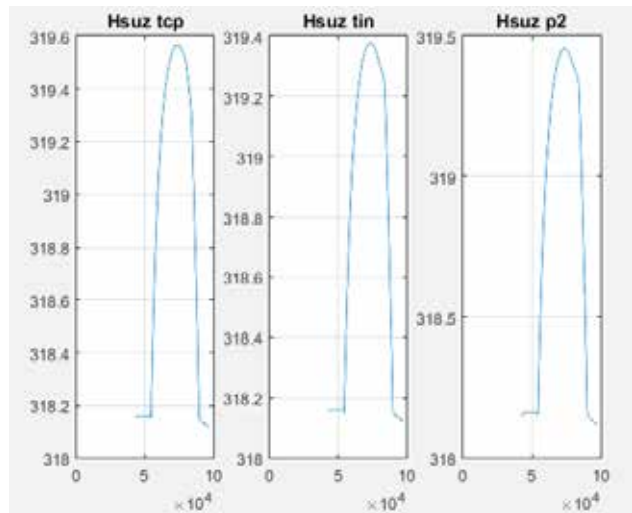


Рис. 10. Перехідний процес регулювання H_{suz}

шого аналізу алгоритму перемикання зведемо відхилення потужності в одну таблицю.

Таблиця 1

Відхилення потужності	
$p_{ср} \rightarrow t_{ср}$	4.9%
$t_{ср} \rightarrow p_{ср}$	1.1%
$t_{ср} \rightarrow t_{вх}$	1.6%
$t_{вх} \rightarrow p_{ср}$	2.9%
$p_{ср} \rightarrow t_{вх}$	1.5%
$t_{вх} \rightarrow t_{ср}$	2%

Висновки. У роботі розглянутий технологічний процес регулювання потужності енергоблоку з порівнянням процесів регулювання у разі переключення між різними програмами. З'ясовано, що з точки зору якості підтримання потужності переключення не є еквівалентним, а саме: перехід з програми регулювання $p_{ср}=\text{const}$ на $t_{ср}=\text{const}$ супроводжується відхиленням потужності на 5%. Зворотне переключення супроводжується відхиленням потужності на 1.1%. Тому для розробки алгоритму регулювання енергоблоку необхідно враховувати якість регулювання та обирати найкращий алгоритм переключення.

Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. Вип. 6. 19 с.
2. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Вісті вузів. Серія «Ядерна енергетика»*, 2008. Вип. 4. С. 128–139.
3. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2007. Вип. 2(28). С. 56–59.
4. Сучасні технології управління : монографія: в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 2002. Вип. 2(22) С. 29–56.

6. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблока АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*, 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18–24.

7. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблока АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія «Технічні науки», 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Украинские энергоблоки АЭС работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Потребление электроэнергии довольно скачкообразно, это связано с различными потребностями её использования, которое зависит от сезона, дня недели, а также времени суток. Энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы только в базовом режиме, поэтому вопрос маневрирования энергоблоками на сегодняшний день является острым, а решение такой задачи неоднозначно. Выбор программы регулирования зависит от многих факторов, но всегда изменение программы регулирования производится после остановки энергоблока, анализа, профилактики и, если это необходимо, ремонта. Однако были проведены исследования, которые показали, что возможны ситуации, когда возникает необходимость перейти с одной программы регулирования на другую, и это можно сделать без остановки энергоблока. Поэтому возникла необходимость синтеза и анализа автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС, позволяющей поддерживать характерный технологический параметр, который выбирается в зависимости от применяемой программы регулирования без остановки энергоблока.

Ключевые слова: АЭС, энергоблок, програма регулювання, потужність, аксиальний оффсет.

AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM OF NPP POWER UNIT

Ukrainian nuclear power units operate on a power system with a large number of electricity consumers. Electricity consumption is quite abrupt, this is due to the different needs of its use, which depends on the season, day of the week, as well as the time of day. Power units with VVER-1000 were designed for operation only in the basic mode, so the issue of maneuvering power units today is acute, and the solution of such a problem is ambiguous. The choice of a control program depends on many factors, but always a change in the control program is made after the power unit is stopped, analyzed, prevented and, if necessary, repaired. However, studies have been conducted that have shown that there may be situations where there is a need to move from one regulatory program to another and this can be done without stopping the power unit. Therefore, it became necessary to synthesize and analyze an automated system for regulating the power of the NPP unit, which allows to maintain the characteristic technological parameter, which is selected depending on the applied control program without stopping the power unit.

Key words: NPP, power unit, control program, power, axial offset.

Дудатьєв А.В.

Вінницький національний технічний університет

Войтович О.П.

Вінницький національний технічний університет

Миرونюк В.В.

Вінницький національний технічний університет

МОДЕЛЬ ЗАГРОЗ СОЦІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ: СОЦІАЛЬНИЙ АСПЕКТ

У представленій статті запропонована модель загроз для соціальної частини соціотехнічної системи, яка враховує спеціально створену інформацію – мемі та можливі джерела впливу: внутрішні і зовнішні. Представлена модель взаємодії різнорідних складників соціотехнічної системи, яка демонструє можливі деструктивні впливи соціуму на технічну частину системи. У статті також представлена ситуаційна модель взаємодії складників соціотехнічної системи, яка демонструє можливість реалізації прямого й опосередкованого впливу людини на технічну частину системи. Запропоновані моделі пропонуються використовувати під час побудови комплексних систем захисту інформації.

Ключові слова: інформаційна безпека держави, модель загроз, ситуаційна модель взаємодії складників соціотехнічної системи.

Постановка проблеми. Інформаційна безпека держави як соціотехнічної системи (СТС) залежить від стану її складників – технічного і соціального. Стан інформаційної захищеності соціального складника СТС відіграє значущу роль для визначення стану всієї системи, оскільки соціум перебуває під дією спеціальних кібернетичних операцій, зокрема інформаційно-психологічних операцій (ІПО). Наслідком проведення таких операцій стає зміна свідомості елементів соціального складника СТС і, як наслідок, можливість проведення деструктивних інформаційних впливів на технічний складник системи. Для технічного складника, з точки зору забезпечення комплексної інформаційної безпеки, найбільш важливими є різноманітні автоматизовані системи (АС) обробки інформації, інформаційно-телекомунікаційні системи (ІТС), що забезпечують роботу різноманітних промислових підприємств, об'єктів фінансової інфраструктури і насамперед об'єктів критичної інфраструктури. До таких об'єктів належать насамперед підприємства енергетичної та хімічної галузей, транспортні системи, системи зв'язку, військові системи тощо. Таким чином, порушення інформаційної безпеки окремого об'єкта захисту, наприклад енергогенеруючого об'єкта, може привести до зміни режимів управління цим об'єктом, а також до негативних екологічних, техногенних, соціальних наслідків.

Тому від рівня інформаційного захисту окремого підприємства (групи підприємств) залежить загальний стан безпеки регіону (групи регіонів) і, як наслідок, держави в цілому. У роботі [1] наведена статистика інцидентів на різних підприємствах за участю персоналу, а у роботі [2] наведено дані щодо порушень інформаційної безпеки у інформаційних системах, при цьому зауважено, що людина за певних умов стає джерелом загроз.

Аналіз досліджень. Модель загроз є одним з базових понять для формулювання загальних вимог до створення комплексних систем захисту інформації (КСЗІ). Зокрема, у НД ТЗІ 1.4-001-2000 визначається, що у процесі упорядкування матриці загрози/компоненти може уточнюватися список загроз і об'єктів захисту, внаслідок чого коригуватись модель загроз. Фактично для створення моделі загроз необхідно: скласти перелік суттєвих загроз, описати методи і способи їх здійснення, визначити, якими з можливих способів можуть здійснюватися загрози в АС, визначити основні види загроз для безпеки інформації, які можуть бути реалізовані стосовно АС, визначити перелік можливих загроз і класифікувати їх за результатом впливу на інформацію.

У роботі [3] запропонована модель загроз, що враховує зовнішні дестабілізуючі фактори, зокрема загрозу – інформаційно-психологічну операцію, що спрямовується на персонал АС. Запро-

понована у наведеній статті модель є фактичним розвитком моделі, наведеної у роботі [3], яка враховує можливі канали і механізми реалізації ППО.

Постановка завдання. Для забезпечення заданого рівня інформаційної безпеки СТС шляхом побудови ефективного захисту потрібно вирішити низку складних і важливих задач, однією з яких є побудова узагальненої моделі загроз. Тому рішення вищенаведеної задачі є актуальним завданням. Метою роботи є розробка моделі загроз, яка формалізує ймовірні впливи на соціальний складник СТС, що дасть можливість підвищити ефективність захисту інформаційного простору.

Нехай маємо множину загроз R_z , яка відображає реалізацію загрози – появу зовнішніх мемів, множину R_t , яка відображає реалізацію загрози опосередкованого впливу на технічний складник, та множину загроз R_v , яка відображає реалізацію загрози – появу внутрішніх мемів.

За умови незалежності і несумісності загроз та наявності сприятливих умов Q_k для реалізації загроз задача розробки моделі загроз соціальній компоненті СТС буде полягати у побудові інтегрованої моделі загроз, яка об'єднує всі можливі типи загроз.

Модель загроз. Загрози з боку соціального складника СТС можуть виникнути внаслідок проведення спеціальних інформаційно-психологічних операцій. Метою проведення таких операцій є загострення всіляких проблем і потреб працівників, ініціація міжособистісних конфліктів тощо. Проведення ППО, використовуючи соціальний аспект, може бути реалізовано через поширення спеціально створених мемів – умовних одиниць інформації, які призначені для так званої культурної еволюції, зміну культурного наслідування або зміну культурного коду. За аналогією із теорією генного наслідування головною задачею мему є забезпечення процесів наслідування та змін інформаційного простору, в якому відбувається життєдіяльність соціального складника СТС. Таким чином, соціокультурний аспект відіграє суттєву роль у забезпеченні комплексної інформаційної безпеки СТС [4; 5].

Соціотехнічну систему можна представити виразом:

$$STS = \{SuBSTS_t, SuBSTS_s\},$$

де $SuBSTS_t$ – підсистема СТС, яка представляє технічний складник системи, $SuBSTS_s$ – підсистема СТС, яка представляє соціальний складник системи. Своєю чергою $SuBSTS_t$ може бути представлена такими ознаками, як: критичність об'єкта, специфіка системи управління, характеристика інформаційно-телекомунікаційної системи, ознаки автоматизованої системи, технології, що використовують на об'єкті захисту, обладнання, яке розташовано на об'єкті.

Підсистема $SuBSTS_s$ може бути представлена такими ознаками, як: мета впливу, розташування суб'єкта впливу, кваліфікація, доступ до спеціальних технологій, обладнання тощо.

Сучасні СТС функціонують в умовах критичних глобальних змін, основними ознаками яких є:

- різного роду аварії і катастрофи;
- збільшення використання енергії різного походження;
- погіршення стану екології навколишнього середовища;
- терористичні акти.

При цьому життєдіяльність СТС характеризується невизначеністю, яка може бути викликана невчасно отриманою, неповною або навмисно перекрученою інформацією. Варто також відзначити можливість використання конфіденційної інформації потенційними конкурентами у власних цілях, що вже є ознакою інформаційного протистояння.

Для подальшої формалізації моделі загроз, пов'язаних саме із соціальним складником СТС, представимо модель взаємодії різнорідних систем (соціальної і технічної), а також їх імовірний взаємний вплив.

Функціонування різнорідних частин СТС пропонується представити як взаємодію детермінованого автомата (ДА), який формалізує технічну частину СТС та недетермінованого автомата (НДА), який представляє соціальний складник. Схема причинно-наслідкового комплексу, який представляє взаємодію двох різнорідних частин, наведена на рис. 1.

Недетермінований автомат може бути представлений як абстрактна система:

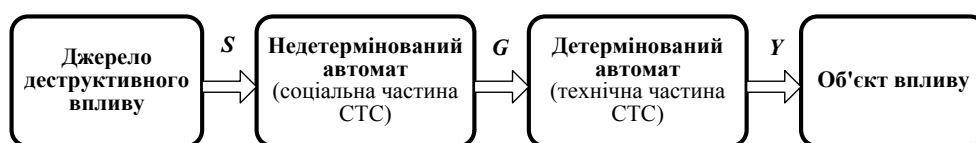


Рис. 1. Схема причинно-наслідкової взаємодії частин СТС

$$N = (S, Q, G, f, \mu),$$

де S – множина вхідних сигналів, $Q = \{Q_c, Q_n\}$ – множина внутрішніх станів, де Q_c – стійкий внутрішній стан, Q_n – нестійкий внутрішній стан, $G = \{G_c, G_n\}$ – множина вихідних станів, де G_c – стійкий вихідний стан, G_n – нестійкий вихідний стан, f – функція переходів, μ – функція виходів. Стан НДА (соціальної частини СТС) формує вхідний сигнал для ДА або технічного складника СТС, що може бути описаний як система:

$$A = (Z, X, Y, \delta, \lambda),$$

де Z – множина станів, $X = G$ – множини вхідних сигналів, Y – множина вихідних сигналів, δ – функція переходів, λ – функція виходів.

На запропонованій схемі на вхід НДА надходить множина вхідних сигналів S яка впливає на соціальну частину СТС. Під вхідними сигналами ми сприймаємо мему. Під їхньою дією НДА може перейти у так званий нестійкий стан Q_n , або залишитись у стійкому стані Q_c . Нестійкий внутрішній стан Q_n формує вихідний сигнал G_n , який є несприятливим для технічної частини СТС. Такий стан призведе до деструктивного впливу соціальної частини СТС на техніко-технологічну частину СТС або інші ресурси об'єкта захисту, що своєю чергою у разі незадовільного комплексного захисту призведе до нестійкого стану всієї системи, але бажаного стану для суб'єкта, який проводив ППО, з метою виведення з ладу всієї системи.

З урахуванням представленої моделі взаємодії складників СТС важливим моментом є врахування загроз і відповідних вразливостей, які впливають на людину або персонал.

На соціальний складник СТС можуть впливати такі спеціально створені мему:

- зовнішні, які створюються і поширюються ймовірними конкурентами;
- внутрішні, які створюються і поширюються спеціально підготовленими особами-агентами;
- внутрішньо-технічні, які опосередковано створюються за рахунок впливу технічного складника на соціальний (рефлексивне управління).

Можливі різні комбінації взаємодії технічного і соціального складників системи і, як наслідок, різні ризики потенційних деструктивних інформаційних впливів.

Ситуаційна модель взаємодії складників СТС, яка демонструє комбінації ймовірних впливів соціального складника на технічний, представлена на рис. 2.

Наведена ситуаційна модель взаємодії різних частин СТС демонструє реалізацію деструктивного впливу, який може бути реалізований такими шляхами:

- безпосередній вплив соціального складника на технічний;
- опосередкований вплив, реалізований через рефлекторний вплив технічного складника на соціальний.

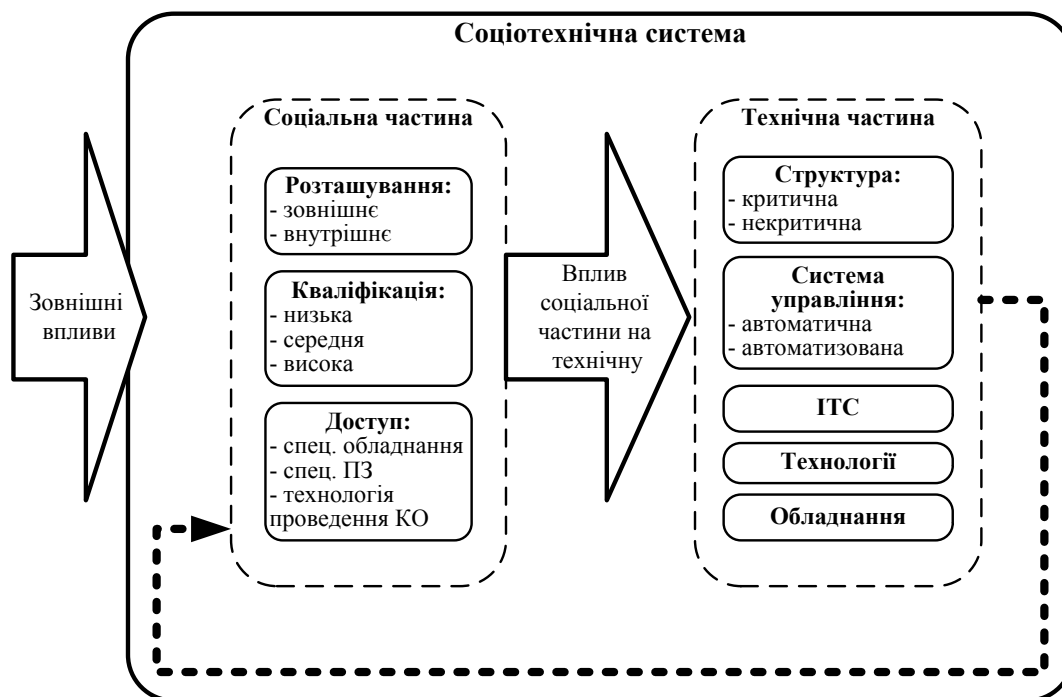


Рис. 2. Ситуаційна модель взаємодії частин СТС

З урахуванням типів мемів, які можуть впливати на соціальний складник СТС, узагальнена модель загроз соціального складника СТС представлена у вигляді виразу:

$$R = F(R_z, R_v, R_t).$$

Необхідно зазначити, що кінцева мета деструктивного впливу на соціум (персонал) з боку конкурента полягає здебільшого у впливі на технічний складник СТС, якщо це стосується впливу, наприклад, на локальний промисловий об'єкт, і навпаки, кінцевою метою може бути соціум, якщо це стосується масштабів держави.

Реалізація зовнішньої загрози (зовнішнього мему) формалізується виразом:

$$P(R_z) = \sum_{k=1}^k P(R_z | Q_k) \cdot P(Q_k).$$

Реалізація внутрішньої загрози (внутрішнього мему) представлена виразом:

$$P(R_v) = \sum_{k=1}^k P(R_v | Q_k) \cdot P(Q_k).$$

Реалізація загрози через опосередкований вплив людини на техніку формалізується виразом:

$$P(R_t) = \sum_{k=1}^k P(R_t | Q_k) \cdot P(Q_k).$$

У представлених виразах: R_z – подія, яка відображає реалізацію загрози – появу зовнішніх мемів, R_v – подія, яка відображає реалізацію загрози – появу внутрішніх мемів, R_t – подія, яка відобра-

жає реалізацію загрози шляхом опосередкованого впливу на технічний складник, Q_k – подія, яка відображає сприятливі умови.

За умови незалежності і несумісності подій R_z , R_v та R_t ймовірність реалізації ППО можна представити таким виразом:

$$P(R_v) = \sum_{k=1}^k P(R_v | Q_k) \cdot P(Q_k) + \sum_{k=1}^k P(R_z | Q_k) \cdot P(Q_k) + \sum_{k=1}^k P(R_t | Q_k) \cdot P(Q_k).$$

Перелік загроз, оцінки їх реалізації та модель ситуаційної взаємодії складників СТС, яка фактично є моделлю ймовірного зловмисника, є основою для аналізу ризику реалізації загроз.

Висновки. Запропонована модель загроз дає змогу враховувати кількісні оцінки ймовірностей виникнення слабоформалізованих загроз – ППО. З огляду на це, можна зробити висновок, що для забезпечення комплексної інформаційної безпеки необхідно приділяти значну увагу захищеності соціальної компоненти СТС. Фактично це може бути реалізовано у розробці спеціальних методів та методик щодо захисту соціального складника соціотехнічної системи і дасть змогу вирішити актуальну задачу щодо інформаційної підтримки управління комплексною інформаційною безпекою відповідно до ISO/IEC 27001:2013.

Список літератури:

1. Гончар С.Ф., Леоненко Г.П., Юдин А.Ю. Анализ угроз и уязвимостей промышленных автоматизированных систем управления. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. 2013. Вип. 2(26). С. 9–14.
2. Анализ угроз сетевой безопасности. URL: <http://ypn.ru/138/analysis-of-threats-to-network-security/6/>.
3. Гончар С.Ф., Леоненко Г.П., Юдин А.Ю. Загальна модель загроз безпеці інформації АСУ ТП. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. 2015. Вип. 1(29). С. 78–82.
4. Артёмов А.А. Теоретические основы информационного управления. *Информационные войны*. 2015. № 3. С. 83–97.
5. Дудатьев А.В. Комплексна інформаційна безпека СТС: моделі впливу та захисту : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 128 с.

МОДЕЛЬ УГРОЗ СОЦИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

В представленной статье предложена модель угроз для социальной части социотехнической системы, которая учитывает специально созданную информацию – мемы и возможные источники влияния: внутренние и внешние. Представлена модель взаимодействия разнородных составляющих социотехнической системы, которая демонстрирует возможное деструктивное влияние социума на техническую часть системы. В статье также представлена ситуационная модель взаимодействия составляющих социотехнической системы, которая демонстрирует возможность реализации прямого и опосредованного воздействия человека на техническую часть системы. Предложенные модели предлагается использовать при создании комплексных систем защиты информации.

Ключевые слова: информационная безопасность государства, модель угроз, ситуационная модель взаимодействия составляющих социотехнической системы.

THE THREAT MODEL OF SOCIO-TECHNICAL SYSTEM: SOCIAL ASPECT

Information security of the state to a large extent depends on the level of security of the society, which is an integral part of the socio-technical system. Special destructive information-psychological operations conducted against the social component of the system pursue the main goal of the information war – reprogramming the consciousness of society. Achieving this goal will allow to make further “necessary” transformations over the entire system and eventually achieve controllability of the influence object or its destruction. This circumstance emphasizes the need to ensure comprehensive protection of information resources, the essence of which boils down to solving two tasks: protecting your own information resources and protecting against possible information-psychological operations of competitors. There is the threats model which takes into account possible sources of influence: internal and external for the social part of the socio-technical system is proposed in the article. The model of the interaction of socio-technical system heterogeneous components which demonstrates the possible destructive influence on the society technical part is presented. The article also presents the situational model of interaction between the socio-technical system components, which demonstrates the possibility of implementing direct and indirect human influence on the technical part of the system. The models can be used while designing complex information security system.

Key words: *information security of the State, threat model, situational model of interaction of the socio-technical system components.*

Зленко С.М.

Вінницький національний технічний університет

Тимчик С.В.

Вінницький національний технічний університет

Криворучко І.О.

Вінницький національний технічний університет

Паламарчук М.І.

Вінницький національний технічний університет

ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРІВ: АНАЛІЗ СИТУАЦІЇ

У статті запропоновано алгоритм адаптивного тестування для визначення психологічного профілю оператора, який передбачає цілісний, направлено-мотивований підбір методик для реєстрації змін психологічного стану на кожному з рівнів тестування, і розроблення механізму, який давав би змогу співвідносити результати діяльності зі змінами персоніфікованого функціонального стану.

Ключові слова: функціональний стан, артеріальний тиск, серцево-судинна система, симпатонія, електроенцефалограма.

Вступ. Визначення стану особистості передбачає вивчення ролі фізіологічних, психічних реакцій і станів організму здорової людини в забезпеченні ефективної і надійної роботи. Методи цих напрямів дають змогу паралельно провести якісний і кількісний аналіз динаміки діяльності. Якісний аналіз спрямовується на розкриття сутності психофізіологічної регуляції, зокрема, реєструються зовнішні прояви діяльності, що дає змогу судити про характер і причини, які виникають під час професійної діяльності. Кількісний аналіз на основі фізіологічних показників дає змогу достовірно інтерпретувати дані, отримані під час використання адекватного методу оцінки надійності діяльності оператора [4; 5; 6].

З точки зору системної психофізіології [5] функціональний стан (ФС) оператора можна розглядати як якісно унікальну, загальну реакцію всіх функціональних систем організму на зовнішні і внутрішні впливи, що виникають за граничних і пікових навантажень. Оптимальний функціональний стан є одним з можливих функціональних станів, який характеризується максимальною ефективністю і продуктивністю. Зміни різних психофізіологічних систем неоднаково відображаються і проявляються у вигляді специфічних, поведінкових і психологічних реакцій організму.

Вибір інформативних фізіологічних показників для оцінювання функціонального стану операторів у кожному конкретному випадку має носити персоніфікований характер і здійснюватися з урахуванням насамперед тих систем організму, які є найбільш важливими, інформативними і такими, що мають пріоритетне значення для діагностики і відбору операторів тієї чи іншої спрямованості. Процес відбору передбачає і процедуру ранжування, за якої визначення меж класів здійснюється на основі середньо квадратичного відхилення δ аналогічно тому, як це зроблено в [3]. У цій роботі йдеться про нормативний розподіл ознак або симетричний, за якого позитивні і негативні відхилення однакової величини зустрічаються однаково часто, а основна частина відхилень від середньої величини перебуває в межах $\pm 5\%$ (68,3% всіх показників) і в межах $\pm 25\%$ (95,5% всіх показників).

Аналіз літературного контенту. Як відомо, частота пульсу в кожен певний момент є результатом сукупного впливу на серцево-судинну систему (ССС) парасимпатичного і симпатичного відділів вегетативної нервової системи. Переважання парасимпатичних впливів веде до уповільнення пульсу в положенні лежачи, завдяки чому певною мірою можна оцінювати стан тонуусу відділів вегетативної нервової системи.

Про збудливість парасимпатичного відділу дає уявлення проба Ашнера, симпатичного відділу – ортостатична проба. Чим вища реакція на роздратування, тим вища збудливість [9].

Більш чутливими індикаторами ФС є не самі значення частоти серцевих скорочень (ЧСС) і артеріального тиску (АТ), а комплексний показник типу коефіцієнта ефективності кровообігу [8]. А.Н. Лук'янов і М.В. Фролов [10] вважають, що безперервний контроль ФС оператора можна вести за двома найбільш важливими проявами змін узгодженості психічних процесів і функцій під час діяльності людини: характеристиками уваги та емоційної напруги. Причому обидві ці характеристики автори визначають фізіологічними методами.

Сегмент ST електрокардіограми оперативно реагує на процеси правильного і неправильного запам'ятовування інформаційного потоку [7]. Обмеження рухової активності оператора викликає зменшення температури тіла і ЧСС до кінця роботи. При цьому доцільно враховувати і зміну показників ССС, яка викликана добовою ритмікою і гіпокінезією [8].

Найбільш чутливим методом для оцінювання стану мозку в нормі та патології є субмікрровольтні коротколатентні викликані потенціали мозку (СКВПМ), отримані за допомогою акустичної соматосенсорної стимуляції [11].

Часто діагностику стану оператора пов'язують з аналізом електроенцефалограм (ЕЕГ) [12]. При цьому вважається можливим використовувати три типи ЕЕГ: десинхронізований, перехідний і синхронізований із зовнішніми подразниками, які при цьому можуть служити критерієм функціонального стану ЦНС оператора. Крім ЕЕГ, використовуються електроміограма (ЕМГ), ЕКГ, пневмограма (ПГ), які враховуються для оцінювання стану оператора за граничними значеннями, визначеними за допомогою обчислювального алгоритму, заснованого на використанні статистичних методів.

Ступінь психоемоційного напруження коливається від незначної емоційної збудливості у одних людей до емоційної інертності в інших. Емоційне вираження виявляється перш за все у змінах регуляції діяльності внутрішніх органів, яке здійснюється симпатичною та парасимпатичною нервовими системами [1; 2].

У більшості (80%) людей діяльність цих систем перебуває у динамічній рівновазі, що є ознакою нормотонії, але приблизно у 12% людей є чітка симпатична спрямованість вегетативного тону

(симпатонія), а у 7% людей спостерігається переважання парасимпатичної системи в регуляції вегетативного тону організму (парасимпатонія). Симпатотоніки та парасимпатотоніки відрізняються за рівнем емоційного збудження та реактивності (за Стреляу). Висока реактивність ЦНС часто є причиною неадекватних реакцій індивіда на різні за силою подразники і лежить в основі особистісної тривожності [1; 2].

Вегетативний баланс організму можна визначити досить простим способом, використовуючи основні фізіологічні параметри кардіореспіраторної системи – артеріальний тиск (AT_c – систолічний та AT_d – діастолічний), частоту пульсу (P) і частоту дихальних рухів (D). Одним з показників вегетативного балансу є індекс Кердо (IK), який розраховується за формулою [11]:

$$IK = (1 + AT_d/P) * 100. \quad (1)$$

Якщо одержана величина буде позитивною (+), це свідчить про симпатотонію, а якщо негативною (-), то це ознака парасимпатотонії.

Іншим показником, який застосовується для визначення вегетативного балансу організму, є хвилинний об'єм крові (XOK), що розраховується за формулою [1; 2]:

$$XOK = (AT_c - AT_d)/AT * 100 * P; AT = (AT_c + AT_d)/2. \quad (2)$$

Якщо XOK буде вищий за 4244,58 – це свідчить про симпатотонію, а якщо менший за 2311,54 – це ознака парасимпатотонії; проміжні значення властиві для нормотоніків.

Наявна проблема. Проблема полягає в необхідності забезпечення максимальної ефективності та адекватності визначення стану оператора шляхом розроблення критерію відповідності рівня та інформативності психофізіологічних показників поточному функціональному стану оператора.

Виклад основного матеріалу. Вибір психофізіологічних показників для визначення ФС оператора має визначатися рівнем їх інформативності, базуватися на фактичному стані оператора і бути адекватним стосовно тих систем організму оператора, які є відповідальними за такий його стан та відповідати одному з рівнів класифікації, що нижченаведена: 1 рівень – стан відмінний, всі показники в межах норми; 2 рівень – стан задовільний, діапазон коливань значень показників до $\pm 15\%$; 3 рівень – стан середньої тяжкості, діапазон коливань показників до $\pm 25\%$; 4 рівень – стан тяжкий, оператор непрацездатний, діапазон показників до $\pm 50\%$.

Одним зі шляхів вирішення проблеми визначення функціонального стану операторів є

вибір методів дослідження. Діагностика стану оператора може здійснюватися декількома способами: 1) використання тестових проб; 2) безперервний поточний контроль; 3) аналіз стану за результатами реально виконаної діяльності [15; 16].

Перший спосіб (контроль за допомогою тестів) має низку недоліків. Основна проблема полягає в тому, що сама тестова процедура іноді впливає на результат діяльності. Сигнали тесту представляють деякі «чужорідні» вторгнення в поточну діяльність, відволікають увагу оператора.

Відповіді на сигнали тесту вимагають максимальних зусиль, а на роботі – оптимальних. Довільні рухові дії найбільшою мірою відчувають на собі вплив компенсаторних механізмів. Відхилення у функціональному стані можуть бути виявлені занадто пізно, коли падіння працездатності буде на межі втрати контролю за керованим процесом [15].

Інший шлях полягає в безперервному поточному контролі за станом функціональних систем, що здійснюють реалізацію діяльності. У різні періоди роботи і залежно від характеру поставленої задачі навантаження на функціональні системи може варіюватись. Тому поточний контроль має вестися за всіма системами організму і насамперед за тими, які найбільш задіяні в професійній діяльності. Безперервний поточний контроль дає змогу завчасно прогнозувати тривалість підтримки оптимальної працездатності оператора. Однак реалізація і цього підходу пов'язана з низкою труднощів. Використання контактних методів зняття інформації з оператора в реальних умовах діяльності ускладнюється відсутністю необхідної апаратури збору та реєстрації (давачі, телеметрія тощо), високоінформативних показників працездатності. Тому традиційні методи психофізіології практично мало придатні для контролю за поточним функціональним станом. Перспективною вважається розробка методів безконтактної реєстрації показників [15].

Третій підхід до діагностики функціональних станів заснований на використанні аналізу результатів самої діяльності, але він так само викликає серйозні заперечення. Відомо, що високо мотивований оператор або оператор, що володіє хорошою саморегуляцією, може більш повно реалізувати свої функціональні резерви і за рахунок цього підтримувати якість діяльності на високому рівні [1; 15].

Пошуки уніфікованих методів діагностики функціональних станів закінчилися відсутністю

вагомих результатів, оскільки кожна конкретна діяльність висуває свої специфічні вимоги до функціональних станів. Використання однієї фізіологічної характеристики як інтегрального показника функціонального стану також не принесло бажаного успіху, оскільки відображало зміни, що відбувалися тільки в одній функціональній системі, а не організму в цілому.

Авторами запропоновано алгоритм адаптивного тестування для визначення психологічного профілю оператора, який передбачає цілісний, наведено-мотивований підбір методик для реєстрації змін психологічного стану на кожному з рівнів тестування і розроблення механізму, який давав би змогу співвідносити результати діяльності зі змінами персоніфікованого функціонального стану. Використання системного підходу забезпечує оперативне оброблення великого обсягу інформації, пов'язаної із розробленням та використанням методів автоматизованої діагностики функціональних станів, які пропонується розглядати як фасетну систему з двома рівнями аналізу: психологічного і фізіологічного.

Стан психологічного рівня діагностувався за допомогою методів, заснованих на самооцінці самопочуття, активності і настрою, самозвіту про стан окремих функціональних систем організму під час роботи, методики дослідження психічної працездатності та іншими.

Стан фізіологічного рівня визначався використанням методів, які характеризують діяльність різних функціональних систем; 1) серцево-судинної (методика математичного аналізу серцевого ритму); 2) центральної і вегетативної нервової систем (методики вегетативного балансу організму і критичної частоти злиття світлових миготінь – КЧЗСМ); 3) функціонального стану людини-оператора в нормальних (8-годинний експеримент) та екстремальних (12-годинна робота в режимі безперервної діяльності) умовах та інших.

Оцінка ФСО за фізіологічними показниками враховувала вид операторської діяльності, умови роботи, характер зовнішніх впливів і, з одного боку, забезпечила необхідну, максимально можливу інформативність і точність, а з іншого – мінімальне число фізіологічних показників, що зумовили досягнення необхідної інформативності і точності оцінки ФСО.

З урахуванням сказаного таблиця інформативності та впливу фізіологічних показників на функціональний стан оператора може бути представлена таким чином (таблиця 1).

**Оцінювання інформативності та впливу фізіологічних показників
на функціональний стан оператора**

Реєстрований показник	Обчислювані показники	Ступінь інформативності та впливу на стан оператора	Примітка
1. Електрокардіограма – грудні відведення	ЧСС; стандартне відхилення ЧСС; зміщення сегмента ST; амплітуди зубців P, R, Q, ST; інтервали R-R, P-R, S-T.	Напруженість роботи оператора; правильність запам'ятовування інформаційного потоку; здатність виконувати виробничі функції.	
2. Артеріальний тиск	Систолічний – АТС; діастолічний – АТД.	АТС – на початку тривалої роботи знижується, до кінця зростає; АТД – до кінця зростає.	
3. Тетраполярна реограма	$\left(\frac{dz}{dt}\right)_{\max}$; загальний периферійний опір (ЗПО); мінімальний об'єм крові (МОК); ударний об'єм (УО); потужність лівого шлуночка $P_{\text{лш}}$; коефіцієнт ефективності кровообігу.	Стан серцево-судинної системи характеризує погіршення ФСО.	
4. Електроенцефало-грама	α – ритм θ – ритм	Характеризує емоційну стійкість; рівень активності, здатність до прийняття рішень. Характеризує індекс емоційного збудження.	
5. Реоенцефалограма	Дикротичний і систолічний індекси, максимальна амплітуда реографічної хвилі.	До кінця роботи поступово збільшуються; характеризує стан судин головного мозку.	
6. Критична частота злиття світлових миготінь (КЧЗСМ)		Характеризує ступінь втоми ЦНС.	
7. Швидкість реакції на аварійно-попереджувальний сигнал (АПС)		Характеризує працездатність оператора.	
8. Кореляція між А, КЧЗСМ та АПС	Коефіцієнт кореляції між пульсовим кровонаповненням А, КЧЗСМ і АПС.	У разі зменшення кровонаповнення знижується поріг сприйняття КЧЗСМ, зростає латентний період реакції на АПС.	
9. Скроневий тиск справа і зліва		Різниця у 10 і більше мм рт. ст. справа і зліва свідчить про наявність асиметрії.	

Висновки.

1. Критерії оцінювання трудової діяльності оператора мають носити безперервний характер, що передбачає дискретно-безперервну оцінку його фізіологічних і психологічних показників. У міру зміни якості критеріїв у бік погіршення система контролю має формувати такі тестові впливи, які, не порушуючи порядку трудового процесу, могли б оцінити стан людини-оператора.

2. Медичні бази даних, що входять до складу багатофункціональних систем і комплексів для оцінювання ФСО, масиви значень норми фізіологічних показників для кожного з рівнів функціо-

нування операторів визначаються в основному результатами експериментальних досліджень, а також даних, отриманих статистичним шляхом, і уточнюються на етапі визначення операторської діяльності та вибору контрольованих фізіологічних показників.

3. Проектування багатофункціональних систем і комплексів для оцінювання ФСО може бути досягнуто за умови обов'язкової відповідності між рівнями функціонального стану оператора і рівнями апаратно-програмних засобів, що забезпечують нормальне функціонування оператора на кожному з рівнів ФСО.

Список літератури:

1. Мурик С.Э. Оценка функционального состояния организма человека. В 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы. Учебное пособие. Иркутск : Издательство ИГУ, 2013. 159 с.
2. Общая и военная гигиена / под ред. Ю.В. Лизунова, С.М. Кузнецова. Санкт-Петербург : СпецЛит, 2012. 736 с.
3. Юшкова О.И. Основы физиологии человека : учебное пособие для горных вузов. Москва : Московский государственный горный университет, 2004. 246 с.
4. Балабанова Л.М. Категорія норми у дослідженні та регулюванні функціональних станів людини : автореф. дис. д-ра психол. наук : спец. 19.00.02 «Психофізіологія». Київ : Ін-тут психології ім. Г.С. Костюка АПН України, 2001. 32 с.
5. Сайт доктора Биттерлиха. URL: <http://bitterlikh.com/kak-prozhit-dolgo-i-umeret-zdorovenkim/kak-predupredit-dementsiyu-i-bolezn-altsgejmerya/309-test-zapominaniya-5-slov.html>.
6. Злепко С.М., Павлов С.В., Коваль Л.Г., Навроцька К.С., Клапоущак А.Ю. Інформаційна технологія для корекції функціонального стану оператора. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : матеріали XVII міжнар. наук.-техн. конференції (8–13 червня 2017 р., м. Одеса).
7. Захаров И.В., Кулагин Б.В. Оценка профессиональной деятельности военнослужащих по психофизиологическим показателям. *Воен.-мед.-журнал*. 1982. №8. С. 36–37.
8. Литвенцев С.В., Черняшин С.В., Маклаков А.Г. Методологические аспекты оценки нервнопсихической устойчивости военнослужащих. *Морской медицинский журнал*. 1997. № 3. С. 5–8.
9. Спортивная медицина : учебник для институтов физической культуры / Карпин В.Л. Москва : Физкультура и спорт, 1987. 304 с.
10. Фролов М.В. Контроль функционального состояния человека-оператора. Москва : Наука, 1987. 196 с.
11. Методы исследования вегетативной нервной системы. URL: <https://psyera.ru/metody-issledovaniya-vegetativnoy-nervnoy-sistemy-9475.html>.
12. Классификация типов ЭЭГ – электроэнцефалограмма и функциональное состояние человека. URL: lekmed.ru/info/arhiv/electroencefalogramma-i-funkcionalnye-sostoyaniya-cheloveka-17.html.
13. Здоровье человека и углекислый газ (CO₂). Влияние повышенного содержания углекислого газа на организм человека. URL: <https://iplants.by/zdorove-cheloveka-i-uglekislyi-gaz-so2>.
14. Изменение показателей церебральной гемодинамики у военных моряков в зависимости от условий учебно-боевой деятельности. *Экология человека*, 2008. № 6. С. 3–9.
15. Медведев В.И. Физиология трудовой деятельности. Основы современной физиологии. Санкт-Петербург : Наука, 1993. 528 с.
16. Сысоев В.Н., Апчел В.Я., Корнилова А.А., Питикин Д.А., Жаркен С.Т. Динамика функционального состояния операторов в период рабочей смен. *Вестник Рос. воен. мед. академии*. 2012. № 4 (40). С. 169–173.

ВЫБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ: АНАЛИЗ СИТУАЦИИ

В статье предложен алгоритм адаптивного тестирования для определения психологического профиля оператора, который предусматривает целостный, направленно-мотивированный подбор методик для регистрации изменений психологического состояния на каждом из уровней тестирования, и разработки механизма, который позволял бы соотносить результаты деятельности за изменениями персонифицированного функционального состояния.

Ключевые слова: функциональное состояние, артериальное давление, сердечно-сосудистая система, симпатония, электроэнцефалограмма.

SELECTION OF INFORMATIONAL PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FOR EVALUATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF OPERATORS: ANALYSIS OF THE SITUATION

The article proposes an adaptive testing algorithm to determine the operator's psychological profile, which involves a holistic, directionally-motivated selection of techniques for recording changes in the psychological state at each of the levels of testing and developing a mechanism that would allow correlating the results of the activity with changes in the personified functional state.

Key words: functional state, arterial pressure, cardiovascular system, sympathy, electroencephalogram.

Іродов В.Ф.

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Шантала Д.Є.

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА, РОЗТАШОВАНОГО У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ КАНАЛІ

Одним зі шляхів підвищення ефективності роботи систем теплопостачання є використання трубчастих газових нагрівачів, які є автономними, високоефективними та багатофункціональними системами. Розроблено технічне рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі, конструкція якого зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового потоку. Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, характерною особливістю якої є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною. З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Ключові слова: математичне моделювання, трубчастий газовий нагрівач, підземний горизонтальний канал, нагріте повітря, вузьконаправлений конвективний тепловий потік.

Постановка проблеми. Ресурсозбереження натеper є дуже актуальним питанням. Очевидною є необхідність розробки та впровадження нових, прогресивних рішень щодо підвищення ефективності роботи систем теплопостачання.

Одним зі шляхів вирішення цього питання є використання трубчастих газових нагрівачів, які є автономними, високоефективними та багатофункціональними системами. Вони одночасно здатні поєднувати в собі функції теплогенеруючих пристроїв, опалювальних приладів, акумуляторів теплоти, підігрівачів води та повітря. Трубчасті газові нагрівачі можуть бути вбудованими в будівельні конструкції, працювати з рециркуляцією теплоносія та на різних видах палива.

Необхідно продовжувати дослідження нових можливостей застосування трубчастих газових нагрівачів для підвищення енергоефективності процесів опалення та підігріву повітря, а також виконувати розробку науково-методичної бази для проведення моделювання, розрахунків та будівництва нових технічних рішень систем теплопостачання з трубчастими нагрівачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Натеper для підвищення енергоефективності систем теплопостачання розроблено технічні рішення з трубчастими газовими нагрівачами [1], серед яких – нагрівачі: з подачею підігрітого повітря на газовий пальник; з підігрівом припливного повітря; з ежектором; з рециркуляцією

та природним рухом теплоносія; багатоконтурні; типу «газоповітряна суміш–вода»; розташовані у будівельних конструкціях та інші. Висока ефективність цих нагрівачів, мала інерційність систем теплопостачання, а з ними і низькі капітальні витрати зумовили досить широке застосування таких систем практично у всіх регіонах України.

Для розробки математичних моделей указаних технічних рішень використовуються принципи гідравлічних ланцюгів з розподіленими параметрами, а для розрахунку – еволюційні алгоритми випадкового пошуку [2].

Аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також відомих технічних рішень трубчастих газових нагрівачів показав, що у разі використання трубчастих газових нагрівачів для теплопостачання вагому частину займає конвективний спосіб передачі теплоти за рахунок нагрівання навколишнього повітря, що оточує трубчастий нагрівач. Конвективний складник процесу теплопередачі може бути корисним або виступати втратою теплоти відносно її використання. Тому є відомі технічні рішення променистих нагрівачів, які передбачають раціональне використання теплового повітря.

Є технічні рішення, які дають змогу використовувати конвективне нагріте повітря на опалення приміщення. Одним з таких технічних рішень є пристрій променистого опалення (рис. 1), що містить джерело теплоти, наприклад газовий

пальник, трубчастий лінійний нагрівач та розташований над ним відбивач теплових потоків. Відбивач теплових потоків такого пристрою виконаний у вигляді багатошарового зонта, перший його шар виконано суцільним з поверхневою теплоізоляцією, а кожний наступний – з перфорацією, при цьому перфорація на одному шарі зміщена відносно перфорації на іншому шарі в шаховому порядку, канали між шарами зонта сполучені через повітропровід з вентилятором [3].

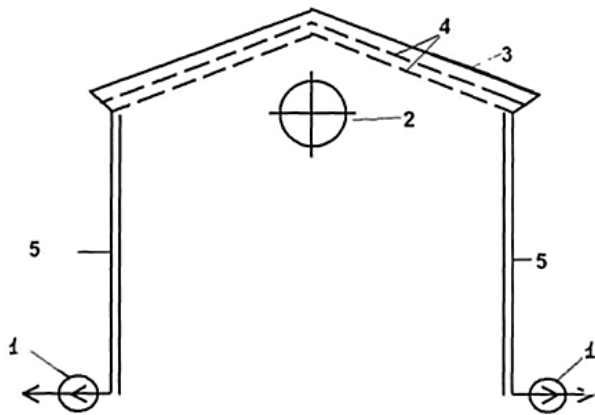


Рис. 1. Пристрій для променистого опалення:
1 – вентилятор, 2 – трубчастий лінійний нагрівач,
3 – суцільний шар зонта, 4 – шари зонта
з перфорацією, 5 – повітропровід

Також є нагрівач, в якому конвективний тепловий потік використовується для нагрівання припливного повітря на потреби вентиляції приміщень [4], та нагрівач, в якому нагріте повітря служить засобом підвищення випромінювальної здатності пристрою [5].

Постановка завдання. Мета роботи – розробити математичну модель для розрахунку гідравлічних і теплових режимів нового технічного рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблено технічне рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі (рис. 2).

Трубчастий нагрівач, розташований у горизонтальному каналі, являє собою пристрій, розташований нижче нульової позначки землі, який генерує теплоту, транспортує її вздовж внутрішньої поверхні нагрівальної труби (внутрішнього простору нагрівача), через стінку якої нагрівається зовнішнє повітря, що забирається у зовнішній простір нагрівача (навколо нагрівальної труби) через спеціальний вертикальний канал.

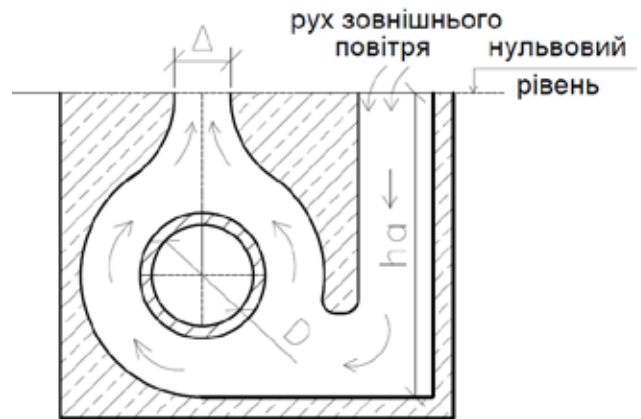


Рис. 2. Схема трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі:
D – діаметр труби трубчастого нагрівача,
 h_d – висота підйому повітря, яке нагрівається
всередині каналу, Δ – ширина вихідного отвору
для нагрітого повітря в каналі

Рух зовнішнього повітря зумовлений природною тягою, яку забезпечує конструкція нагрівача, без допомоги тягодуттєвих пристроїв, що підвищує енергоефективність та безпечність технічного рішення. Нагріте повітря подається вузьконаправленим потоком через отвір на рівні нульової позначки землі, що характеризується величиною Δ (рис. 2).

Таким чином, конструкція трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового потоку.

Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі. Характерною особливістю математичної моделі нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача (процесу 1) з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною (процес 2). З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Математична модель процесу 1 нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, розроблена на основі математичної моделі трубчастого нагрівача підвищеного випромінювання [6]. У процесі 2 розглядається природний

рух припливного повітря у зовнішньому просторі вздовж нагрівача, з нагріванням повітря та подачею його назовні через вузький вертикальний отвір на рівні нульової позначки землі. Для процесу 2 (повітряна частина) було складено групу рівнянь теплообміну та гідравліки:

$$M = \rho w F = \text{const} \quad (1)$$

$$p = \rho R T \quad (2)$$

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (3)$$

$$dQ_{\text{IK}} = \pi D dx a_1(T - T_{wi}) \quad (4)$$

$$dQ_{\text{III}} = \pi D dx c_0 \varepsilon (T^4 - T_{wi}^4) 10^{(-8)} \quad (5)$$

$$dQ_2 = \pi D dx \frac{\lambda}{\delta} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (6)$$

$$dQ_3 = \pi D dx c_0 \varepsilon_w (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(-8)} \quad (7)$$

$$dQ_4 = \pi D dx a_2(T_{wo} - T_o) \quad (8)$$

$$dQ_1 = dQ_{\text{IK}} + dQ_{\text{III}} \quad (9)$$

$$d(\rho w F c_p T) = -dQ_1 \quad (10)$$

$$dQ_1 = dQ_2 \quad (11)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (12)$$

де ρ, ρ_a – щільність газоповітряної суміші у нагрівачі та повітря у навколишньому середовищі, $\text{кг}/\text{м}^3$; w – середня лінійна швидкість руху газоповітряної суміші по випромінюючій трубі, $\text{м}/\text{с}$; F – площа поперечного перетину труби, м^2 ; p , T – абсолютні тиск та температура газоповітряної суміші у такому перетині випромінюючої труби, Па, К; R – газова постійна, $\text{Дж}/(\text{кг К})$; dp – перепад тиску у разі течії газоповітряної суміші у випромінюючій трубі на ділянці довжиною dx ; Λ – коефіцієнт тертя; D – внутрішній діаметр труби, м; dQ_1 – тепловий потік від газоповітряної суміші до стінки випромінюючої труби, переданий конвекцією, Вт; a_1 – коефіцієнт тепловіддачі від потоку газоповітряної суміші до стінки труби, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$; T_{wi} – температура внутрішньої поверхні стінки труби у такому перетині; dQ_2 – тепловий потік від внутрішньої поверхні стінки випромінюючої труби до зовнішньої поверхні, переданий теплопровідністю, Вт; λ, δ, T_{wo} – відповідно коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{Вт}/\text{м К}$; товщина, м та температура зовнішньої поверхні стінки випромінюючої труби, К; dQ_3, dQ_4 – теплові потоки випромінюванням і конвекцією від поверхні випромінюючої труби в навколишнє середовище відповідно, Вт; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, ε_g – ступінь чорноти матеріалу каналу, c_p – теплоємність за постій-

ного тиску газоповітряної суміші, dQ_0 – тепловий потік, що надходить у газоповітряну суміш під час згоряння горючого газу, dh – елементарна ділянка підйому трубчастого нагрівача.

Маємо залежність $h=h(x)$ – відома функція по довжині нагрівача. Тоді $dh = h'(x)dx$. У разі горизонтального розташування нагрівача маємо $dh = 0$.

Розроблений загальний підхід для використання моделі (1)–(12) під час розрахунку теплового та гідравлічного режиму нагрівачів [3]. Система рівнянь теплообміну (4)–(12) замкнена, але нелінійна. За допомогою чисельного методу вирішується система рівнянь (4)–(12) і знаходяться $dQ_1, dQ_2, dQ_3, dQ_4, T_{wi}, T_{wo}$. Після перетворень системи (1)–(12) отримаємо вирази для диференціалів:

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh(\rho_a - \rho)g \quad (13)$$

$$d\rho = (dp - \rho R dt)/(RT) \quad (14)$$

$$dw = (-w F dp - \rho w dF)/(\rho F). \quad (15)$$

Ці вирази можна використовувати для чисельного інтегрування під час розрахунків теплового та гідравлічного режимів розроблених нагрівачів без урахування каналу, в якому розташований нагрівач.

Якщо ми маємо горизонтальний канал, в якому розташований трубчастий нагрівач, то математичну модель трубчастого газового нагрівача слід доповнити математичною моделлю теплообміну та гідравліки для повітряного середовища між трубчастим газовим нагрівачем та стінками каналу. Цей додатковий блок рівнянь математичної моделі має вигляд:

$$\rho_a w_a F_a = M_a \quad (16)$$

$$(\rho_0 - \rho_a)gh_a = \rho_a w_a^2 / 2 \quad (17)$$

$$dQ_a = a_2(T_{we} - T_a) = c_p \rho_a w_a F_a (T_a - T_0), \quad (18)$$

де індексом а позначені параметри, що відносяться до повітря, яке нагрівається трубчастим нагрівачем і виходить до зовнішнього простору, а індексом 0 позначені параметри, що відносяться до повітря навколишнього середовища.

Рівняння (1)–(12) та (16)–(17) сукупно дають замкнуту математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі.

Чисельне вирішення сукупності диференціальних рівнянь розробленої математичної моделі дадуть змогу розраховувати параметри гідравлічного та теплового режиму трубчастого газового

нагрівача, який розташований нижче нульового рівня у горизонтальному каналі.

Висновки. Розроблено технічні рішення трубчастого газового нагрівача, розташованого у горизонтальному каналі, конструкція якого зводить до мінімуму використання променистого складника теплообміну та призначена переважно для нагрівання зовнішнього повітря і подальшого використання його у вигляді вузьконаправленого конвективного теплового

потoku. Розроблено математичну модель трубчастого газового нагрівача, розташованого у підземному горизонтальному каналі, характерною особливістю якої є наявність взаємного зв'язку теплового та гідравлічного режимів газової частини нагрівача з режимом підігріву зовнішнього повітря – повітряною частиною. З урахуванням цього факту модель являє собою гідравлічний ланцюг з розподіленими та регульованими параметрами.

Список літератури:

1. Иродов В.Ф., Хацкевич Ю.В., Чорноморець Г.Я. Развитие технических решений теплоснабжения с трубчастыми газовыми нагревателями. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. Дніпро, 2017. Вип. 5. С. 233–234.
2. Дудкин К.В., Ткачева В.В., Иродов В.Ф. Трубчатые газовые нагреватели для теплоснабжения в сельской местности. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 156 с.
3. Газовий трубчастий променистий нагрівач: пат. 87028 Україна: МПК F24D 10/00; заявл. 25.02.2009; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 11.
4. Осетянская Д.Е. (Шаптала Д.Е.) Экспериментальные исследования режимов работы трубчатого нагревателя с распределённой организованной подачей приточного воздуха. Gdańsk: Wydawca: Sp. z o.o. "Diamond trading tour", 2012. 88 str. С. 18–25.
5. Осетянська Д.Є. (Шаптала Д.Є.) Підвищення ефективності газових трубчастих нагрівачів для променевого опалення. *Технологічний аудит і резерви виробництва* : матеріали науково-практичної конференції "Наукові підсумки 2012 р.", Т. 1. Харків : ПП «Технологічний Центр», 2012. С. 31–32.
6. Иродов В.Ф., Осетянская (Шаптала) Д.Е. Моделирование трубчатого газового нагревателя повышенного лучеиспускания. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. Придніпров. держ. акад. буд-ва та архітектури. Дніпро, 2012. Вип. 6. С. 10–14.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Одним из путей повышения эффективности работы систем теплоснабжения является использование трубчатых газовых нагревателей, которые являются автономными, высокоэффективными и многофункциональными системами. Разработано техническое решение трубчатого газового нагревателя, расположенного в горизонтальном канале, конструкция которого сводит к минимуму использование лучистой составляющей теплообмена и предназначена преимущественно для нагревания наружного воздуха и дальнейшего использования его в виде узконаправленного конвективного теплового потока. Разработана математическая модель трубчатого газового нагревателя, расположенного в подземном горизонтальном канале, характерной особенностью которой является наличие взаимной связи теплового и гидравлического режимов газовой части нагревателя с режимом подогрева наружного воздуха – воздушной частью. С учётом этого факта модель представляет собой гидравлическую цепь с распределёнными и регулируемым параметрами.

Ключевые слова: математическое моделирование, трубчатый газовый нагреватель, подземный горизонтальный канал, нагретый воздух, узконаправленный конвективный тепловой поток.

MATHEMATICAL MODELING OF A TUBULAR GAS HEATER LOCATED IN A HORIZONTAL CHANNEL

One of the ways to improve the efficiency of heating systems is the use of tubular gas heaters, which are autonomous, highly efficient and multifunctional systems. A technical solution has been developed for a tubular gas heater located in a horizontal channel. The heater design minimizes the use of the radiant component of heat transfer. The heater is primarily intended for heating outside air and its further use in the form of a narrowly directed convective heat flow. A mathematical model of a tubular gas heater located in an underground horizontal channel has been developed. A characteristic feature of the model is the existence of a mutual connection between the thermal and hydraulic modes of the gas part of the heater and the mode of heating the outside air – the air part. Given this fact, the model is a hydraulic circuit with distributed and adjustable parameters.

Key words: mathematical modeling, tubular gas heater, underground horizontal channel, heated air, narrow convection heat flow.

Лазурчак Л.В.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Вдовичин Т.Я.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

Жидик В.Б.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА RAD STUDIO ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОРИСТУВАЦЬКИХ ПРОЕКТІВ

Процес підготовки користувацьких проектів з програмування передбачає формування знань і вмінь, а також професійних навичок щодо базових конструкцій певного обраного середовища програмування. Аналізуючи різноманітні середовища, можна виокремити RAD Studio, що пропонує користувачу вибір між такими мовами програмування, як Delphi та C++. Функціональні можливості RAD Studio мають ряд переваг, що можуть бути застосовані для створення різноманітних користувацьких проектів. Зокрема, у даному дослідженні продемонстровано реалізацію базових операцій обробки одновимірних масивів.

Ключові слова: користувач, проект, середовище програмування, RAD Studio.

Постановка проблеми. Основою розробки користувацької програми в обраному середовищі програмування є проект, центральною частиною якого є форма, на яку поміщаються необхідні для вирішення конкретної задачі компоненти.

Обираючи певне середовище для програмування, користувач повинен володіти базовими конструкціями роботи у ньому та проаналізувати його переваги та недоліки. Зокрема, C++ Builder – надзвичайно потужна система розробки прикладних програм для Windows, яка дає широкі можливості для розробки складних і ефективних програм, забезпечує швидкість візуальної розробки та продуктивність, володіє удосконаленими інструментами та різномасштабними засобами доступу до баз даних. MS Visual Studio – потужний інструмент, що ідеально підходить для розробки великих проектів, однак для початківця є достатньо громіздкими. Головними особливостями середовища Delphi є інтегроване середовище розробки додатків та візуальна технологія розробки програм.

Середовище RAD Studio пропонує розробникам вибір між двома мовами програмування – Delphi та C++, що може бути надійно і ефективно використано для створення власних проектів. Включене до складу RAD Studio Delphi має нові розширені властивості, які дозволяють розробнику працювати над проектами значно швидше. Нова версія RAD Studio вводить нове базове позначення XE, що означає «Підтримка гетерогенних баз даних без додаткових витрат». Цією версією впроваджено нові зміни і доповнення, зокрема: розширена розробка багаторівневих застосунків, потужна інтегрована інструментальна підтримка, хмарні обчислення, вища продуктивність і покращене керування кодом, інструменти для автоматизації і підсилення процесу компіляції [1].

В основі середовища RAD Studio лежить технологія візуального проектування і подієвого програмування, суть якої полягає в тому, що середовище розробки бере на себе більшу частину рутинної роботи, залишаючи користувачу конструювання діалогових вікон і написання функцій обробки подій.

Інтегроване середовище розробки RAD Studio має ряд переваг:

– дозволяє писати і редагувати код швидко і раціонально, завдяки використанню сучасних засобів об'єктно-орієнтованого програмування в поєднанні з надійним програмним забезпеченням;

– передбачає автоматичне доповнення коду на основі бібліотек, що використовуються;

– дозволяє прискорити навігацію під час роботи з громіздкими блоками коду;

– вбудовані засоби реструктуризації вхідного коду (перейменування ідентифікаторів, оголошення нових змінних і полів, перейменування класів і полів в базі вхідного коду, перетягування коду в новий метод, синхронізація описів і інтерфейсів);

– містить оператори скелета кода (інтерактивні шаблони Live Templates) для багаторазового використання, що дозволяють розробнику швидко створювати код для повторюваних структур.

Аналіз актуальних досліджень. Короткий огляд основних базових конструкцій різних мов програмування та їх практичне застосування висвітлено у працях таких вчених, як Т. Павловська, Ю. Щупак, С. Загребельний [8], Т. Сопронюк [10], Ю. Грицюк, Т. Рак [6], Г. Шілдрт [4], М. Вайсфельд [3], С. Гилберт, Б. Маккарті, Д. Холингворт, Б. Сворт, М. Кешмен, П. Густавсон.

З можливостями інтегрованого середовища RAD Studio та основами роботи в ньому можна ознайомитися, аналізуючи різноманітні інтернет-ресурси. Зокрема, на сайті американської компанії Embarcadero Technologies, що займається розробкою програмного забезпечення для створення баз даних і засобів управління ними [2].

Постановка завдання – проаналізувати можливості інтегрованого середовища RAD Studio для створення власних користувацьких проєктів, зокрема, на прикладі стандартних функцій обробки одновимірних масивів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Масив – впорядкований набір фіксованої кількості однотипних елементів, які зберігаються в послідовно розташованих комірках оперативної пам'яті, мають порядковий номер і спільне ім'я, що надає користувач. Нумерація індексів масиву в середовищі C++ починається з 0 [5]. До базових операцій обробки одновимірних масивів відносять:

- уведення-виведення масиву, його ініціалізацію;
- пошук максимального або мінімального елемента масиву;
- обчислення узагальнюючих характеристик (сум елементів, їх добутків тощо);
- пошук заданого елемента;
- перестановку елементів, або обмін значеннями між елементами масиву;
- вставку та видалення елемента масиву;
- сортування масиву тощо [7].

У середовищі RAD Studio легко реалізувати вищенаведені операції обробки одновимірних масивів.

Приклад. Створити та відсортувати відомими методами одновимірний масив цілих чисел (рис. 4).

Для реалізації програм обробки одновимірних масивів RAD Studio пропонує компоненти ListBox – екземпляр класу TListBox, розміщений на вкладці Standard палітри компонентів (рис. 1). Основна його властивість Items дозволяє формувати масив, розділяючи його елементи клавішею Enter.

Основні методи компонента ListBox:

- Add(const AnsiString S) – додає рядок в кінець списку;
- Assign(TPersistent *Source) – переносить рядки з вказаного об'єкта у даний;
- Clear() – очищує список;
- Delete(int Index) – видаляє зі списку вказаний рядок;
- Insert(int Index, const AnsiString S) – вставляє вказаний рядок у задану позицію Index;
- Move(int CurIndex, int NewIndex) – змінює позицію рядка з індексом CurIndex, надаючи індекс NewIndex;
- LoadFromFile(const AnsiString FileName) – заповнює список рядками тексту з файлу FileName;
- SaveToFile(const AnsiString FileName) – зберігає рядки списку у файлі з вказаним ім'ям FileName [2].

Для сортування одновимірного масиву оберемо методи вибору та вставки. Метод прямого вибору полягає в тому, що вибирається мінімальний елемент масиву, а потім виконується його обмін з першим елементом таблиці. Після цього перший елемент вважається впорядкованим, і процес повторюється для підмасиву, що містить на один елемент менше, ніж початковий, тобто елементи з 2-го до останнього. Процес повторюється кожного разу для масиву, зменшеного на один елемент. Закінчується він тоді, коли неупорядкований підмасив стає довжиною в один елемент. Таким чином, загальна кількість повторень дорівнює $N - 1$ (N – кількість елементів масиву). Метод вставки забезпечує вставку



Рис. 1. Розміщення компонента ListBox в RAD Studio

кожного елемента невідсортованого масиву на своє місце в уже впорядкований масив. На початку сортування масив розбивається на два підмасиви, лівий з яких повинен бути впорядкованим, а правий – ні. У невідомому масиві тільки один елемент можна вважати впорядкованим, тому спочатку ліва відсортована частина складається лише з одного елемента. Потім по черзі беруться елементи з другої невідсортованої частини, і для них знаходиться місце вставки в першу частину таке, щоб впорядкованість не порушувалась. Це означає, що під час сортування за зростанням необхідно знайти таке місце в масиві, де лівий елемент буде меншим від того, що вставляється, або рівним, а правий – більшим від того, що вставляється. Після цього в масиві необхідно зробити зсув елементів, щоб звільнити місце, на яке і вставити черговий елемент [9].

Вид та методи сортування задає компонент **RadioGroup**, що розміщений на вкладці **Standard** (рис. 2) та використовується для створення групи кнопок.

Форма, що зображена на рис. 3, містить такі компоненти:

- **lb1** — текстове поле «ВХІДНИЙ МАСИВ»;
- **lb2** — текстове поле «ВІДСОРТОВАНИЙ МАСИВ»;

- **rg1** — вибір методу сортування;
- **rg2** — вибір виду сортування;
- **lst1** — компонент для відображення заданого вхідного масиву;
- **lst2** — компонент для відображення відсортованого масиву;
- **Button1** — кнопка для створення події «ВВЕСТИ МАСИВ»;
- **Button2** — кнопка для створення події «ВІДСОРТУВАТИ МАСИВ»;
- **btn1** — кнопка для створення події «ЗАВЕРШИТИ РОБОТУ».

Для вводу масиву використовується функція **InputBox**:

`InputBox(Prompt[,Title] [,Default] [,XPos] [,YPos] [,HelpFile,Context]).`

Дана функція виводить на екран діалогове (модальне) вікно з кнопкою закриття, що містить задане повідомлення, поле вводу, кнопки **OK** та **Cancel**. За задання не тільки одного першого параметра необхідно застосувати функцію **InputBox** у виразі. Для пропуску деяких параметрів використовується розділювач у вигляді коми.

Фрагмент програмного коду формування масиву продемонстровано на рис. 5 та 6.



Рис. 2. Розміщення компонента **RadioGroup** в RAD Studio

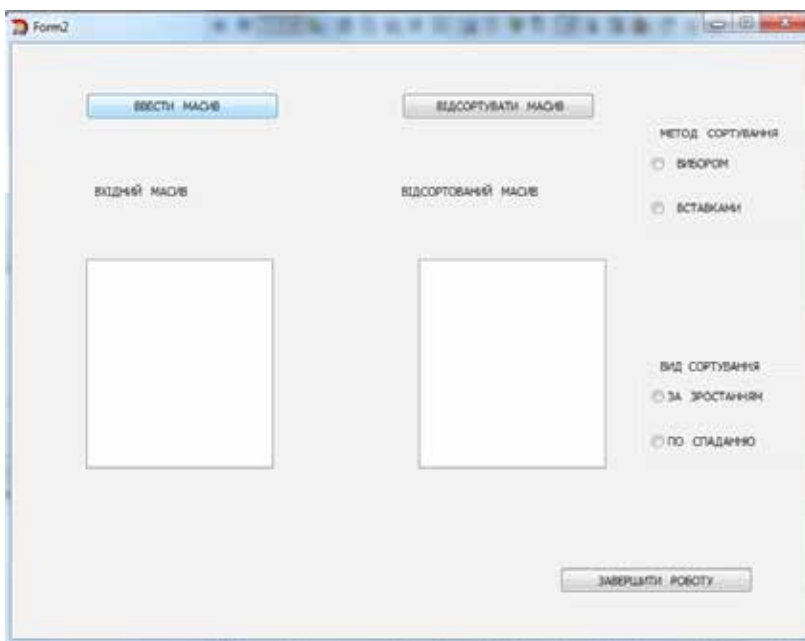


Рис. 3. Початкова форма для опрацювання одновимірного масиву

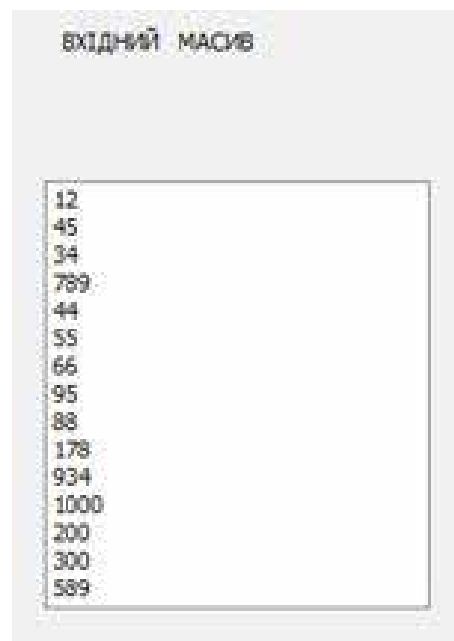


Рис. 4. Вхідний масив

```
void __fastcall TForm2::Button1Click(TObject *Sender)
{
    lst1->Clear();lst2->Clear();
    for ( i=0;i<n;i++)
    {
        st=InputBox(" ВВІД МАСИВУ ", "ВВЕДИТЬ"+IntToStr(i+1)+" ЕЛЕМЕНТ МАСИВУ", "");
        mas[i]=StrToFloat(st);
        lst1->Items->Add(FloatToStr(mas[i]));}
}
```

Рис. 5. Програмний код вводу масиву

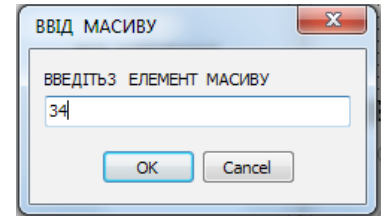


Рис. 6. Результат виконання програмного коду вводу масиву

Фрагмент програмного коду, що реалізує сортування масиву методом вибору та вставки, продемонстровано на рис. 7–9.

```
void __fastcall TForm2::Button2Click(TObject *Sender)
{
    switch (rg1->ItemIndex)
    {
        case 0:
        {
            lst2->Items->Text="СОРТУВАННЯ ВИБОРОМ ";
            for (i=0;i<n-1;i++)
            {nmin=i;
             for (j=i+1;j<n;j++)
             if (mas[j]<mas[nmin]) nmin=j;
             p=mas[i];
             mas[i]=mas[nmin]; mas[nmin]=p;
            }
            break;
        }
        case 1:
        {
            lst2->Items->Text=" СОРТУВАННЯ ВСТАВКАМИ ";
            for (i=1;i<n;i++)
            {rab=mas[i];
             for (j=i;j>0 && rab<mas[j-1];j--)
             mas[j]=mas[j-1];
             mas[j]=rab;
            } break;
        }
    }

    switch (rg2->ItemIndex)
    {
        case 0:
        {for (i=0;i<n;i++)
         lst2->Items->Add(FloatToStr(mas[i]));
         break; }
        case 1:
        {for (i=n-1;i>=0;i--)
         lst2->Items->Add(FloatToStr(mas[i]));
         break; }
    }
}
```

Рис. 7. Програмний код сортування масиву методом вибору та вставки

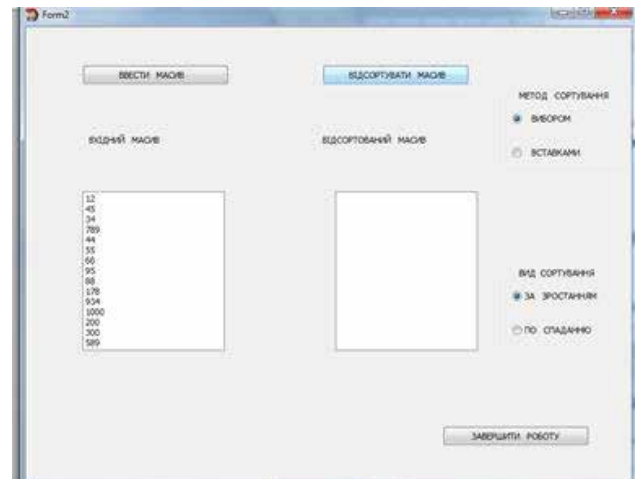


Рис. 8. Сортування масиву методом вибору за зростанням

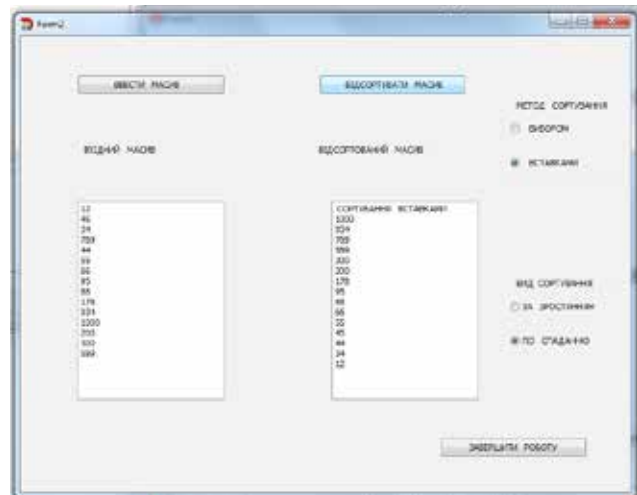


Рис. 9. Сортування масиву методом вставки за спаданням

Як бачимо, потужні функціональні можливості інтегрованого середовища RAD Studio дозволяють легко, швидко, візуально та ефективно опрацьовувати масиви даних різної розмірності. Зокрема, в даному дослідженні продемонстровано стандартні задачі обробки одновимірних масивів.

Висновки. Програмування з допомогою RAD Studio більш ефективно, ніж на інших платформах швидкої розробки, таких як Visual Basic, .NET, Java. Бібліотека візуальних компонент (VCL) інкапсулює потужні готові функції у зручні компоненти багаторазового застосування. Вона повністю інтегрована в середовище розробки. Це

значно полегшує керування компонентами через програмний код і у візуальному режимі. Під час розробки додатків за допомогою бібліотеки VCL користувач пише, відлагоджує і тестує значно менше програмних стрічок, зберігаючи водночас продуктивність і функціональні можливості. Додатки, створені з використанням бібліотеки VCL, є високоякісними, зручними для роботи і добре модифікуються.

Проведене дослідження дозволяє констатувати, що інтегроване середовище RAD Studio радикально скорочує термін розробки користувацьких проектів. Це можливо завдяки:

- візуальному середовищу швидкої розробки програмного забезпечення;
- бібліотеки візуальних компонентів;
- швидких компіляторів з підтримкою сучасних функцій, включаючи узагальнення, анонімні методи та атрибути;
- високої продуктивності і незначного споживання ресурсів під час виконання;
- потужних інтерактивних користувацьких інтерфейсів;
- унікальної можливості підключення до баз даних;
- відсутності громіздкого середовища виконання.

Список літератури:

1. Embarcadero Delphi: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Embarcadero_Delphi (дата звернення: 22.05.2019).
2. Embarcadero RAD Studio: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Embarcadero_RAD_Studio (дата звернення: 22.05.2019).
3. Вайсфельд М. Объектно-ориентированный подход: Java, .Net, C++. Москва : КУДИЦА-ОБРАЗ, 2005.
4. Г. Шилдт. C++: базовый курс. 3-е издание. Москва : Вильямс, 2010.
5. Глинський Я.М., Анохін В.Є., Рязьська В.А. C++ і C++ Builder : Навч. посібн. 5-те вид. Львів : СПД Глинський, 2011.
6. Грицюк Ю.І., Рак Т.С. Об'єктно-орієнтоване програмування мовою C++ : навчальний посібник. Львів : Вид-во Львівського ДУ БЖД, 2011.
7. Дудзяний І.М. Програмування мовою C++. Частина 1 : Парадигма процедурного програмування : навчальний посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2013.
8. Загребельний С.Л., Костіков А.А., Мірінський В.Е. Основи візуального програмування в середовищі Visual Studio 2010 : Навчальний посібник. Краматорск, Україна : ДГМА, 2012.
9. Лазурчак Л.В., Вдовичин Т.Я. Програмування : Тексти лекцій [для підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» спеціальності 014 «Середня освіта (інформатика)»]. Дрогобич : Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2018.
10. Сопронюк Т.М. Технології візуального й узагальненого програмування в C++Builder : Навчальний посібник. Чернівці : ЧНУ, 2009.

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ RAD STUDIO ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРОЕКТОВ

Процесс подготовки пользовательских проектов по программированию предусматривает формирование знаний и умений, а также профессиональных навыков базовых конструкций определенной избранной среды программирования. Анализируя различные среды, можно выделить среду RAD Studio, предлагающую пользователю выбор между такими языками программирования, как Delphi и C++. Функциональные возможности RAD Studio имеют ряд преимуществ, которые могут быть применены для создания разнообразных пользовательских проектов. В частности, в данном исследовании продемонстрирована реализация базовых операций обработки одномерных массивов.

Ключевые слова: пользователь, проект, среда программирования, RAD Studio.

POSSIBILITIES OF THE INTEGRATED ENVIRONMENTAL RAD STUDIO FOR USE OF USEFUL PROJECTS

The process of preparing custom programming projects involves the formation of knowledge and skills, as well as professional skills in the basic design of a particular programming environment. By analyzing a variety of environments, one can distinguish between RAD Studio, which offers the user the choice between programming languages like Delphi and C++. The functionality of RAD Studio has several advantages that can be applied to create a variety of custom projects. In particular, this study demonstrates the implementation of basic operations for the processing of one-dimensional arrays.

Key words: user, project, programming environment, RAD Studio.

Лошак К.Р.

Одеський національний політехнічний університет

Ложечніков В.Ф.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЗМІШУВАЛЬНОГО БАКА ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

Об'єктом проектування є змішувальний бак хімічних речовин, що входить у систему водовідведення котлів ТЕС та виконує функцію нейтралізації кислих стічних вод. Враховуючи необхідність забезпечення одержання великої кількості продукту однакової якості, розглядається змішувальний бак безперервної дії. Здійснюється розрахунок і вибір регулюючого органу для підтримки рівня нейтралізованих стоків та концентрації солей. Для одержання коефіцієнтів регуляторів автоматизованої системи управління досліджується математична модель об'єкта, реалізована у середовищі Simulink.

Ключові слова: змішувальний бак хімічних речовин, нейтралізація стічних вод, автоматизована система управління, регулюючий орган.

Постановка проблеми. Опис технологічного процесу. Теплоенергетика є однією з галузей, що істотно забруднюють природне середовище. Ступінь шкоди стічних вод теплових електростанцій для навколишнього середовища залежить від багатьох факторів, головним з яких є хімічний склад стічних вод. Найбільш небезпечними для природних водойм вважаються скиди, що містять масла, нафтопродукти, а також важкі метали. Саме для цих забруднювачів передбачаються жорсткі нормативи по залишковим концентраціям, що вимагають серйозного ставлення до технологій очищення промислових стічних вод.

Введення в дію сучасних і вдосконалених технологій водоочищення одночасно вирішує багато проблем, зокрема:

- реалізація процесів пом'якшення, знезалізнення та очищення виробничого конденсату;
- очищення відпрацьованих відмивних і миючих розчинів, що містять рідкі та концентровані сполуки (кислоти, луги), у тому числі розчинів для промивання парових котлів;
- очищення замаслених технічних вод, що піддаються скиданню;
- очищення і відділення шлаків і жирів від зливних і талих стічних вод, зібраних з території підприємства.

На ТЕС повинна діяти єдина система водопостачання-водовідведення, за якої стічні води одного типу, безпосередньо або після певної обробки, могли б бути вихідними для інших споживачів тієї ж ТЕС (або зовнішніх).

Всі стічні води, які повертаються в «голову» процесу, не повинні бути такими, що мають

додатково оброблятися реагентами на етапі попередньої очистки, в разі ж необхідності обробки вапном, содою і коагулянтном вони повинні перемішуватися (усереднюватися) у збірному баку.

Крім єдиної загальної каналізації, для всіх видів прісних вод ВПУ повинні бути і окремі скидні канали для засолених і кислих вод (лужні мають цілковито використовуватись в циклі, в тому числі для нейтралізації). Ці води потрібно збирати в спеціальні баки-котловани.

Зважаючи на періодичну роботу земляних котлованів (переважно в літній час), для миючих розчинів і відмивних вод котлів після хімічних промивок, після установок для нейтралізації цих вод і обмивальних вод РВП слід передбачати можливість подання на ці споруди різних видів вод ВПУ, що скидаються – кислих, лужних і засолених – для спільної чи попереминої нейтралізації, відстоювання, окислення і передачі їх в систему ГЗУ або іншим споживачам. При цьому нейтралізована установка або принаймні її насоси та арматура повинні розміщуватися в утепленому приміщенні.

Стічною водою є будь-який потік води, що виводиться з циклу електростанції. До стічних, або скидних вод, крім вод систем охолодження, належать: скидні води систем гідрозолоуловлення (ГЗУ), відпрацьовані розчини після хімічних промивок теплосилового обладнання або його консервації; регенераційні і шламові води від водоочисних (водопідготовчих) установок; нафтозабруднені стоки, розчини і суспензії, що виникають при обмивах зовнішніх поверхонь нагріву, передусім повітряпідігрівників і водяних економайзерів котлів, що спалюють сірчистий мазут.

Стоки після хімічної промивки або консервації теплосилового обладнання достатньо різноманітні за своїм складом внаслідок великої кількості промивальних розчинів. Для промивок застосовуються соляна, сірчана, плавикова, сульфамінова мінеральні кислоти, а також органічні кислоти: лимонна, ортофталева, адипинова, щавелева, мурашина, оцтова та інші. Поряд з ними використовуються трилон Б, різні інгібітори корозії, поверхнево-активні речовини, тіосечовина, гідразин, нітроти, аміак.

В результаті хімічних реакцій в процесі промивок або консервації обладнання можуть скидатися різні органічні і неорганічні кислоти, луги, нітрати, солі амонію, заліза, міді, трилон Б, інгібітори, гідразин, фтор, уротропін, каптакс і так далі.

Кислі та лужні води змінюють показник рН води водойми в районі їхнього скидання. Зміна рН негативно впливає на флору і фауну водойми, порушує біохімічні процеси і фізіологічні функції у риб і інших живих організмів: за підвищення лужності води (наприклад, за $\text{pH} > 9,5$) у риб руйнується шкірний покрив, тканини плавників і зябра, водні рослини пригнічуються, погіршується самоочищення водойми; за зниження показника ($\text{pH} < 5$) неорганічні (сірчана, соляна, азотна) і органічні (оцтова, молочна, виокам'яна та інші) кислоти чинять на риб токсичний вплив.

Якщо концентрація кислоти або лугу в стічних водах перевищує допустимі показники, то необхідно застосовувати попередню нейтралізацію (рис. 1.1). Здебільшого стічні води іонообмінної частини водопідготовчих установок після змішання скидів регенеративних вод від катіонітів і аніонітних фільтрів мають кислу реакцію. Для нейтралізації застосовують такі лужні реагенти, як доломіт, різні луги, але частіше за все – вапно.

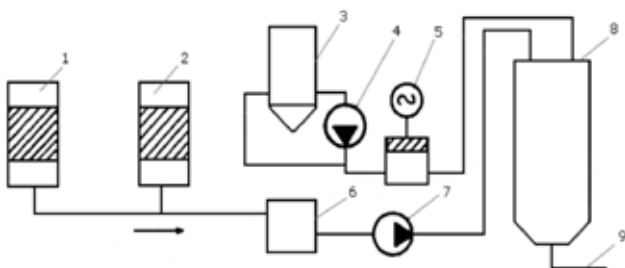


Рис. 1 – Схема нейтралізації стічних вод:

- 1 – Н-катіонні фільтри; 2 – аніонітні фільтри;
- 3 – мішалка вапняного молока;
- 4 – перекачувальний насос; 5 – насос-дозатор;
- 6 – проміжний бак збору регенераційних вод;
- 7 – перекачувальний насос; 8 – бак-нейтралізатор;
- 9 – охолоджуюча або природна води.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та дослідження автоматизованої системи управління змішувального бака хімічних речовин

Виклад основного матеріалу дослідження.
Опис об'єкта автоматизації. Якщо необхідно забезпечити одержання великої кількості продукту однакової якості, віддають перевагу проведенню хімічного процесу в безперервно діючих реакторах з усталеним режимом. Поширеним видом таких проточних апаратів є реактори змішування. Проточний реактор змішування може працювати як в не стаціонарному, так і в стаціонарному, тобто сталому режимі.

Реактор змішування безперервної дії являє собою апарат (рис. 2), в який безперервно подають реагенти і безперервно їх виводять у вигляді продуктів реакції. У реакторі спостерігається різка зміна концентрації вихідної речовини під час входу в реактор в результаті миттєвого змішування з реакційною масою.

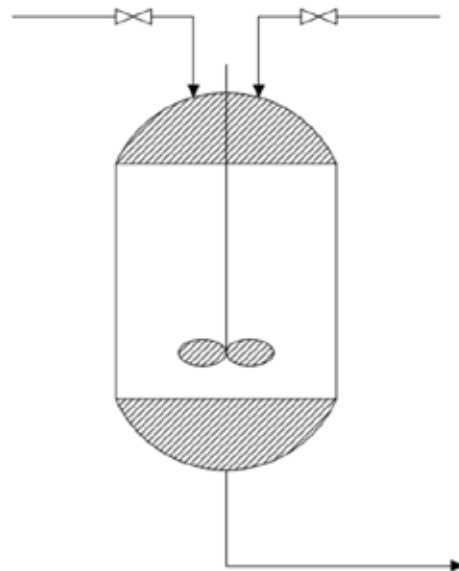


Рис. 2. Змішувальний реактор безперервної дії

Для моделі ідеального змішування приймається ряд припущень:

1) у результаті інтенсивного перемішування встановлюються абсолютно однакові умови у будь-якій точці реактора (концентрації реагентів і продуктів, ступеня перетворення реагентів, температура, швидкість хімічної реакції і так далі);

2) у проточному реакторі ідеального змішування концентрації реагентів у вихідному потоці в момент часу t дорівнюють концентраціям тих же речовин в реакторі;

3) перехід від однієї концентрації до іншої в реакторі ідеального змішування не повинен мати

протяжності в часі; зміна концентрації вихідного реагенту від початкової у вхідному потоці в даний момент часу до концентрації в реакторі в цей же момент часу повинна відбуватися миттєво (стрибокподібно).

Наблизитися до режиму ідеального змішування можна, забезпечивши інтенсивне перемішування реакційної суміші за допомогою механічних мішалок різного типу або циркуляційних насосів, що створюють високу кратність циркуляції. Змішання, близьке до ідеального, легше здійснити в ємнісних апаратах з приблизно рівними діаметром і висотою.

Розробка математичної моделі змішувального баку. Розглянемо технічну систему – змішувальний бак:

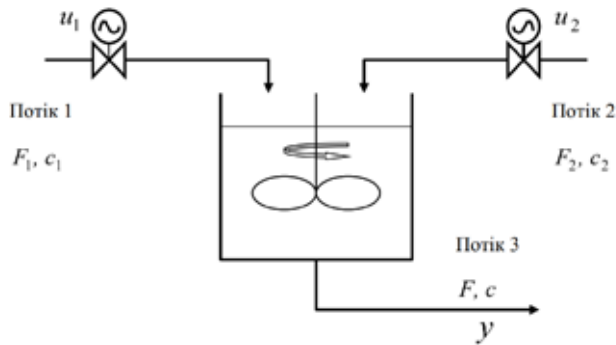


Рис. 3. Технологічна схема технічної системи «змішувальний бак», де F_1, F_2, F – витрати рідини на притоці і витоці системи, m^3/c ; c_1, c_2, c – концентрації на притоці і витоці системи, $кмоль/m^3$; h – рівень рідини у бакові, $м$; S – площа бака, m^2 ; V – об’єм рідини у бакові, m^3 .

Запишемо рівняння системи у стаціонарному (встановленому) стані, коли притік дорівнює витоку (рівняння матеріального балансу): $F_{10} + F_{20} - F_0 = 0$; $c_1 \cdot F_{10} + c_2 \cdot F_{20} - c_0 \cdot F_0 = 0$, де індекс 0 означає встановлений стан.

Записавши умови балансу кінетичної і потенціальної енергії на виході з бака (вважається, що рідина витікає самопливом) $\rho \cdot q \cdot h = 0,5 \cdot \rho \cdot w^2$, де ρ – густина рідини, $кг/m^3$; w – швидкість витоку, $м/с$; q – прискорення вільного падіння, $q = 9,81 м/с^2$; і припустивши, що d – діаметр вихідного трубопроводу, $м$; одержимо: $F = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot h} = k \cdot \sqrt{h}$ чи, відповідно, $F_0 = k \cdot \sqrt{h_0} = k \cdot \sqrt{\frac{V_0}{S}}$, де k – коефіцієнт.

За зміни витрат у системі відбувається накопичення речовини і перехід до нового встановленого стану. Цей перехідний процес описується диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - F(t), \\ \frac{d(c(t) \cdot V(t))}{dt} = c_1 \cdot F_1(t) + c_2 \cdot F_2(t) - c(t) \cdot F(t), \end{cases}$$

де $\frac{dV}{dt}$ – приріст об’єму рідини, $\frac{d(c \cdot V)}{dt}$ – приріст маси рідини.

Наведемо цю систему у стандартному вигляді

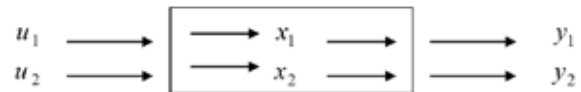


Рис. 3.2. Параметрична схема технічної системи «змішувальний бак»

Позначимо $\begin{cases} u_1(t) = F_1(t) - F_{10} \\ u_2(t) = F_2(t) - F_{20} \end{cases}$,

де $u_1(t)$ – зміна у часі відхилення витрати від номінального значення щодо першого каналу; $u_2(t)$ – те ж щодо другого каналу.

$$\begin{cases} x_1(t) = V(t) - V_0 \\ x_2(t) = c(t) - c_0 \end{cases}$$

де $x_1(t)$ – зміна у часі відхилення об’єму від номінального у бакові; $x_2(t)$ – відхилення концентрації від номінальної.

$$\begin{cases} y_1(t) = F(t) - F_0 \\ y_2(t) = c(t) - c_0 \end{cases}$$

де $y_1(t)$ – зміна витрати на виході; $y_2(t)$ – зміна концентрації на виході.

Оскільки залежність $F = k \cdot \sqrt{h}$ – нелінійна, то для спрощення розрахунку бажано її лінеалізувати, розклавши, наприклад, на ряд Тейлора (розглядаючи малі відхилення x_1, x_2 від встановленого стану):

$$F(t) \approx F_0 + \frac{1}{1!} \cdot \left. \frac{df(V)}{dV} \right|_{V=V_0} \cdot x_1$$

$$F = k \cdot \sqrt{\frac{V}{S}} \approx k \cdot \sqrt{\frac{V_0}{S}} + k \cdot \left. \frac{d\sqrt{V}}{dV} \right|_{V=V_0} \cdot x_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_0}{V_0} \cdot x_1 + F_0$$

З урахуванням раніше викладеного запишемо:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dx_1}{dt} = F_{10} + u_1(t) + F_{20} + u_2(t) - F_0 - 0,5 \cdot \frac{F_0}{V_0} \cdot x_1$$

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{2 \cdot g} \cdot x_1 + u_1 + u_2; (\text{т.к. } F_{10} + F_{20} - F_0 = 0), \text{ де } g = \frac{V_0}{F_0}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(c \cdot V)}{dt} &= \frac{d(c_0 + x_2) \cdot (V_0 + x_1)}{dt} = \\ &= \frac{d(c_0 \cdot V_0 + V_0 \cdot x_2 + c_0 \cdot x_1 + x_2 \cdot x_1)}{dt} \approx V_0 \cdot x_2 + c_0 \cdot x_1, \end{aligned}$$

припустивши у випадку дрібності $x_1 \cdot x_2 = x_0$. Тоді, підставивши похідну x_1 , одержимо

$$\dot{x}_2 = \frac{c_1(u_1 + F_{10})}{V_0} + \frac{c_2(u_2 + F_{20})}{V_0} - \frac{(c_0 + x_2) \cdot F_0}{V_0} - \frac{(c_0 + x_2) \cdot x_1}{2 \cdot g \cdot V_0} + \frac{x_1 + c_0}{2 \cdot g \cdot V_0} - \frac{u_1 + c_0}{V_0} - \frac{u_2 + c_0}{V_0}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(c_1 + c_0) \cdot u_1}{V_0} + \frac{(c_2 + c_0) \cdot u_2}{V_0} + \frac{c_1 \cdot F_{10} + c_2 \cdot F_{20} - c_0 \cdot F_0}{V_0} - \frac{x_2 \cdot F_0}{V_0}$$

$$x_2 = -\frac{1}{g} \cdot x_2 + \frac{c_1 - c_0}{V_0} \cdot u_1 + \frac{c_2 + c_0}{V_0} \cdot u_2$$

$$\begin{cases} x_2 = -\frac{1}{2 \cdot g} \cdot x_1 + u_1 + u_2 \\ x_2 = -\frac{1}{g} \cdot x_2 + \frac{c_1 - c_0}{V_0} \cdot u_1 + \frac{c_2 - c_0}{V_0} \cdot u_2 \end{cases}$$

Представимо цю систему у матричній формі запису:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases}$$

Тоді матриці А і В запишуться у вигляді

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2 \cdot g} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{g} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{bmatrix}$$

Для визначення матриці С необхідно встановити зв'язок між векторами x та u. Оскільки $y_1 \approx \Delta F$, $x_1 \approx \Delta F$, то $y_1 = \frac{F_0}{2 \cdot V_0} \cdot x_1 = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot x_1$;

$$y_2 \approx \cdot C, x_2 \approx \cdot C, \text{ то } y_2 = x_2, \text{ тоді } A = \begin{bmatrix} \frac{1}{2 \cdot g} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Таким чином, система має такий вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2 \cdot g} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{g} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{bmatrix} \cdot u \\ y = \begin{bmatrix} \frac{1}{2 \cdot g} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot x \end{cases}$$

Коефіцієнти моделі:

- $V_0 = 1.5, \text{ м}^3$;
- $F_{10} = 0.015, \text{ м}^3/\text{с}$;
- $F_{20} = 0.005, \text{ м}^3/\text{с}$;
- $F_0 = F_{10} + F_{20} = 0.02, \text{ м}^3/\text{с}$;
- $c_1 = 1.5, \text{ кмоль}/\text{м}^3$;
- $c_2 = 2.5, \text{ кмоль}/\text{м}^3$;

$$c_0 = \frac{c_1 \cdot F_{10} + c_2 \cdot F_{20}}{F_0} = 1.75, \text{ кмоль} / \text{ м}^3;$$

$$g = \frac{V_0}{F_0} = 75, \text{ с}.$$

Параметри для системи, використаної у прикладах розрахунку:

$$A = \begin{bmatrix} -0.025 & 0 \\ 0 & -0.05 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -0.06 & 0.73 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0.025 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

У середовищі Simulink релізуємо схему моделі

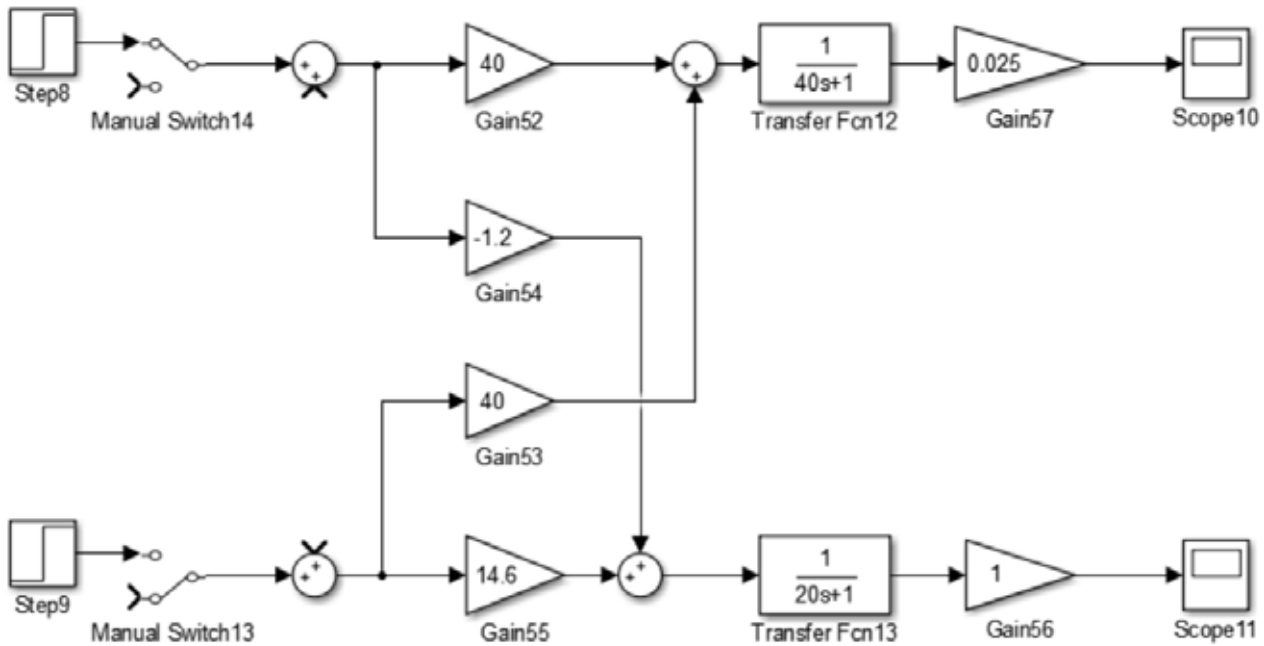


Рис. 4. Модель змішувального баку

Отримуємо криві розгону:

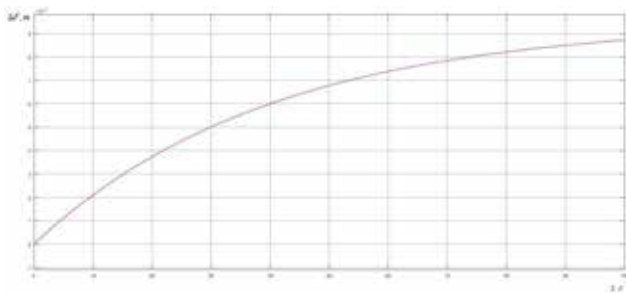


Рис. 5. Крива розгону за витратою стоків при збуренні по першому каналі

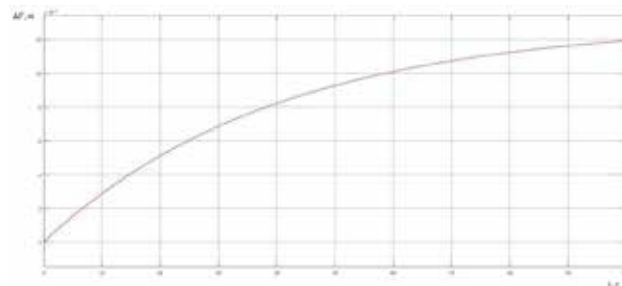


Рис. 7. Крива розгону за витратою стоків при збуренні по другому каналі

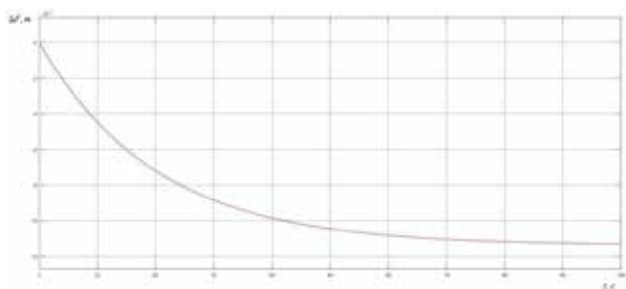


Рис. 6. Крива розгону за витратою луѓу при збуренні по першому каналі

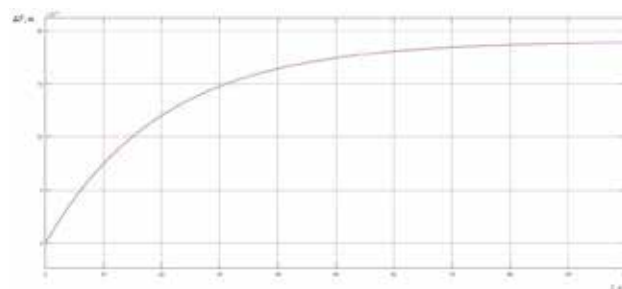


Рис. 8. Крива розгону за витратою луѓу при збуренні по другому каналі

Висновки. У роботі було розглянуто змішувальний бак хімічних речовин, що входить у систему водовідведення котлів ТЕС. Були розглянуті вимоги до очищення стічних вод та їх нейтралізації, а також принцип роботи та характеристики змішувального баку.

В результаті був проведений розрахунок та побудова математичної моделі об'єкту, знайдені оптимальні параметри налаштування регуляторів для підтримки рівня нейтралізованих стоків та концентрації солей.

Список літератури:

1. Плетнев Г.П. «Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций». Москва : Энергоиздат, 1981 р. 159 с.
2. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. Вип. 6. 19 с.
3. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000 / *Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика»*, 2008. Вип. 4. 128–139 с.
4. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2007. Вип. 2(28). 56–59 с.
5. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
6. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000 / *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 2002. Вип. 2(22). 29–56 с.
7. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС / *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*, 2015. Т. 7. Вип. 4. 18–24 с.
8. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія : *Технічні науки*, 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. 134–140 с.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СМЕСИТЕЛЬНЫМ БАКОМ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Объектом проектирования является смесительный бак химических веществ, который входит в систему водоотвода котлов ТЭС и выполняет функцию нейтрализации кислых сточных вод. Учитывая необходимость обеспечения получения большого количества продукта одинакового качества, рассматривается смесительный бак непрерывного действия. Проводится расчет и выбор регулирующего органа для поддержания уровня нейтрализованных стоков и концентрации солей. Для получения коэффициентов регуляторов автоматизированной системы управления исследуется математическая модель объекта, реализованная в среде Simulink.

Ключевые слова: смесительный бак химических веществ, нейтрализация сточных вод, автоматизированная система управления, регулирующий орган.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A CHEMICAL MIXING TANK

The design object is a chemical mixing tank, which is included in the drainage system of boilers of thermal power plants, and performs the function of neutralizing acidic wastewater. Because of need of providing large amount of product the same quality, a continuous mixing tank is considered. Calculation and selection of the regulator to maintain the level of neutralized effluent and salt concentration is performed. To obtain the coefficients of regulators of the automated control system, a mathematical model of the object, implemented in the Simulink environment, is researched.

Key words: chemical mixing tank, wastewater neutralization, automated control system, regulator.

Мартынюк Е.А.

Одесский национальный политехнический университет

Беглов К.В.

Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ПВД

Исследовано влияние нелинейности регулирующего клапана на переходный процесс регулирования. Найдено преобразование управляющего сигнала, учитывающее влияния клапана для выравнивания зависимости между управляющим сигналом и расходом пара. Проведен эксперимент на модели теплового пункта в среде Simulink. Результаты эксперимента проанализированы.

Ключевые слова: регулирующий клапан, полное внешнее влияние клапана, регулирование, преобразование управляющего сигнала, подогреватель высокого давления.

Постановка проблемы. Система регенерации высокого давления предназначена для подогрева питательной воды, подаваемой питательными насосами с деаэраторов в парогенераторы паром, частично отработанных в проточной части главной турбины. Применение ПВД повышает КПД установки и существенно влияет на безопасность и надежность АЭС. Группа ПВД подогревает воду, которая поступает в парогенератор, уменьшая подогрев питательной воды до кипения, и тем самым уменьшает количество энергии, которая передается первым контуром для подогрева воды до состояния насыщения. Для предотвращения аварийных ситуаций и для правильной работы установки необходимо регулировать уровень конденсата в ПВД путем регулирования РК.

Постановка задания. Целью данной статьи является исследование влияния нелинейности регулирующего клапана на переходный процесс регулирования. Также следует рассмотреть возможность преобразования управляющего сигнала при известном воздействии для осуществления управления с идеализированной зависимостью между управляющим сигналом и расходом пара. Смоделировать результаты исследования в среде Simulink. В качестве объекта управления рассматривается группа ПВД.

Изложение основного материала. Основным регулирующим органом в подобных системах выступает регулирующий клапан. Независимо от конструктивного исполнения, конечной целью подбора клапана является обеспечение линейной зависимости между регулирующим воздействием и изменением регулируемого параметра. Стабильное управление теплообменным прибором, например,

получают при линейной зависимости его теплового потока от хода штока регулирующего клапана. С этой целью рассматривают идеальную совместную работу теплообменного прибора и регулирующего клапана. Ее суть заключается в том, что расходная характеристика клапана должна быть зеркальным отображением характеристики теплообменного прибора (рисунок 1).

Однако изменение расхода пара клапаном зависит как от его пропускной способности, так и от участка системы, на котором клапан вызывает изменение давления пара. Линейная или логарифмические расходные характеристики справедливы при полном внешнем воздействии клапана $a_1 + =$ (все располагаемое давление регулируемого участка теряется в регулирующем отверстии). Однако данная характеристика искажается с уменьшением воздействия клапана. Чем меньше воздействие, тем больше кривизна расходной характеристики, то есть более значительным является разрегулирование системы. В системах регулирования этот параметр в проектировании систем управления не учитывают, хотя он значительно влияет на качество регулирования и поэтому должен быть учтен при расчете управляющего воздействия, чтобы приблизить переходный процесс регулирования к идеализированному.

Рассмотрим линейные и логарифмические расходные характеристики с учетом воздействия клапана: относительное положение клапана h/h_{100} является функцией управляющего сигнала $\frac{h}{h_{100}} = f(S)$ для того, чтобы добиться, чтобы относительный расход линейно зависел от управляющего сигнала (например, сигнала по напряжению).

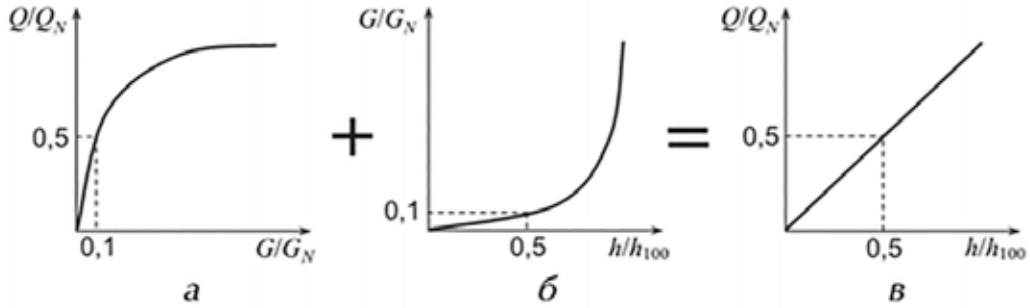


Рис. 1. Регулирование теплообменного прибора (а – характеристика теплообменного прибора; б – расходная характеристика регулирования теплообменного прибора; в – идеальная характеристика регулирования теплообменного прибора)

$$\frac{V}{V_{100}} = \sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{(h/h_{100})^2}}}$$

$$\frac{V}{V_{100}} = \sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{e^{2c(h/h_{100}-1)}}}}$$

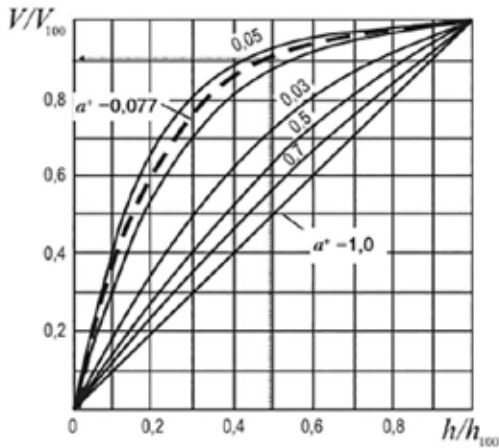


Рис. 2. Линейная расходная характеристика клапана

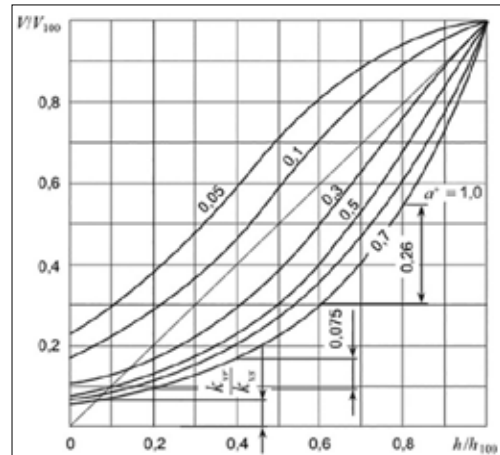


Рис. 3. Логарифмическая расходная характеристика клапана

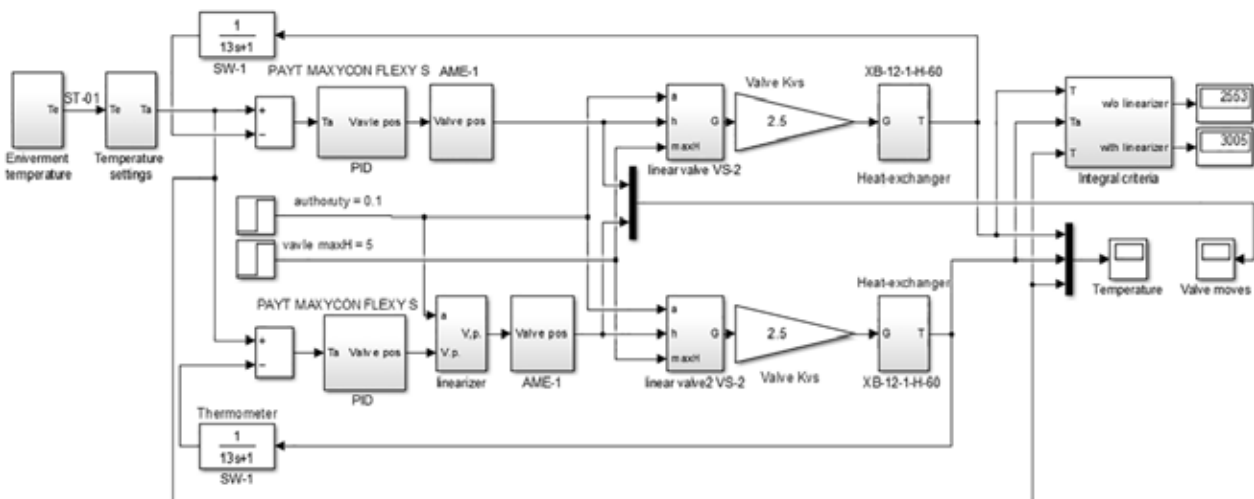


Рис. 4. Моделирование преобразования управляющего воздействия в Simulink

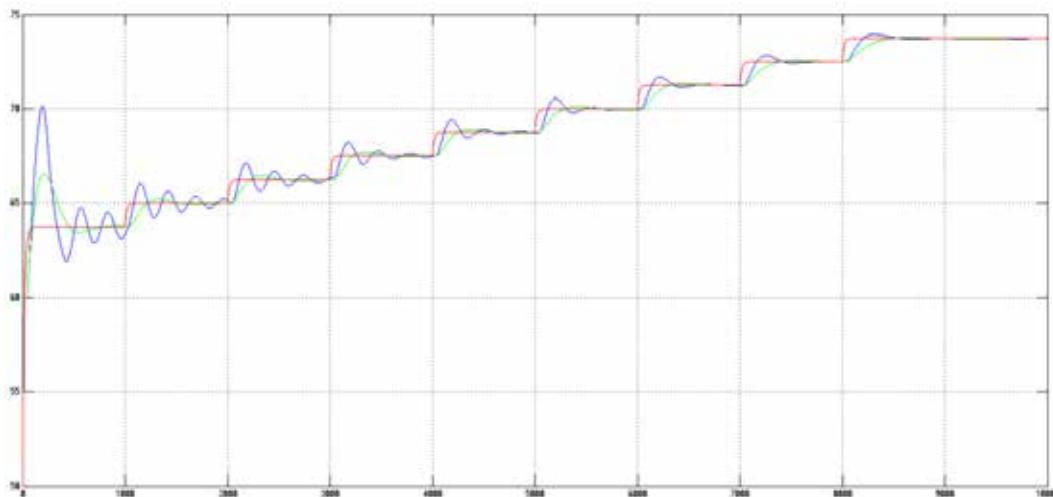


Рис. 5. Переходний процес регулювання

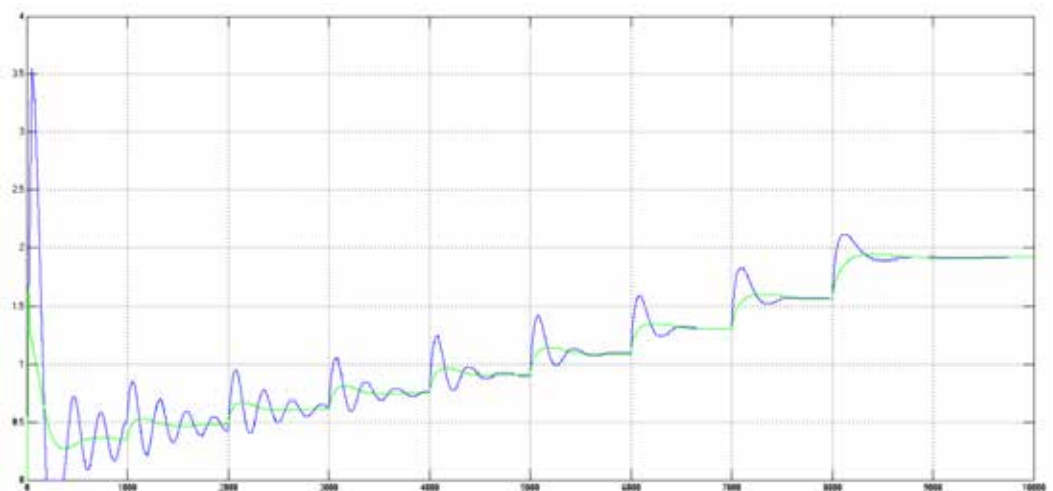


Рис. 6. Движение клапана в процессе регулювання

$$\frac{V}{V_{100}} \Rightarrow \frac{S}{S_{100}}.$$

Следует решить уравнение и найти функцию $f(S)$:

$$\sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{f(S)^2}}} = \frac{S}{S_{100}}$$

$$\sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{e^{2c(f(S)-1)}}}} = \frac{S}{S_{100}}.$$

После преобразований получаем функцию $f(S)$, которая корректирует управляющий сигнал на регулирующий клапан.

$$f(S) = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{1}{a^+} + \frac{1}{\left(\frac{S}{S_{100}}\right)^2 a^+}}}$$

$$f(S) = \frac{\ln \left(\frac{1}{\frac{1}{a^+ e^{2c\left(\frac{S}{S_{100}}-1\right)} - \frac{1}{a^+} + 1}} \right)}{2c} + 1.$$

Для проверки эффективности данного преобразования была создана модель (рисунок 4) группы подогревателей высокого давления в среде Simulink.

На основании этой модели сравнивается процесс регулирования с данным преобразованием и без него. В качестве возмущающего сигнала используется расход пара. Регулируемый параметр – уровень в ПВД. Клапан был выбран линейный.

Из графика (рисунок 5) видно, что регулирование с предложенным преобразованием происходит качественней и одинаково при всех возмущениях, поскольку зависимость остается линейной при любом положении клапана. Интегральный критерий качества

$$J_i = \int_0^{+\infty} |\varepsilon| dt$$

был равен

$$J_0 = 3005 \text{ и } J_1 = 2553$$

для модели без преобразования сигнала и с ним, соответственно, что показывает повышение качества (согласно этому критерию) на 17,7%.

Помимо этого, в процессе регулирования клапан двигается значительно меньше (рисунок 6), что повышает надежность данного элемента.

Выводы. Были получены формулы, позволяющие преобразовывать управляющий сигнал для выравнивания расходной (линейной и логарифмической) характеристики клапана. Их эффективность была проверена на модели группы подогревателей высокого давления, разработанной в среде Simulink.

Численный эксперимент показал, что данное преобразование:

- 1) может значительно повысить качество регулирования процесса, предусматривающее наличие регулирующего клапана;
- 2) понижает износ исполнительного механизма;
- 3) особенно эффективно в области работы клапана, где расходная характеристика имеет большую крутизну.

Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. 1974. Вып. 6. 19 с.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. *Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика»*, 2008. Вып. 4. С.128–139
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержке суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*, 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.
4. Современные технологии управления : монография : в 2 т. / Под общ. ред. С.В. Куприенко ; Sworld. Одесса : Куприенко С.В., 2012. 179 с.
5. Медведев Р.Б., Сангинова А.В. Оптимальное управление процессом изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС с ВВЭР-1000. *Научные вестни Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*, 2002. Вып. 2 (22). С. 29–56.
6. Волошкина А.А., Беглов К.В., Плахотнюк А.А. Исследование регулятора концентрации жидкого поглотителя энергоблока АЭС. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*, 2015. Т. 7. Вып. 4. С. 18–24.
7. Кисельова Н.И., Погребной Я. С., Беглов К. В. Исследование регулятора мощности с жидким поглотителем для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Технические науки»*, 2018. Вып. 29 (68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНОСТІ РЕГУЛЮЮЧОГО КЛАПАНА НА ЯКІСТЬ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В ПВД

Досліджено вплив нелінійності регулюючого клапана на перехідний процес регулювання. Знайдено перетворення сигналу, що управляє та враховує вплив клапана для вирівнювання залежності між керуючим сигналом і витратою пара. Проведено експеримент на моделі теплового пункту в середовищі Simulink. Результати експерименту проаналізовані.

Ключові слова: регулюючий клапан, повний зовнішній вплив клапана, регулювання, перетворення сигналу, що управляє, підігрівач високого тиску.

RESEARCH OF IMPACT OF NONLINEAR CONTROL VALVE ON THE QUALITY OF TRANSIENT REGULATION PROCESSES IN HEATER OF HP

The effect of the control valve nonlinearity in the process of regulation was investigated. Found a control signal conversion, which takes into account the nonlinearity of the valve to align the relationship between the control signal and the flow rate of heat medium. An experiment on the model of thermal point in the Simulink environment was performed. The experimental results were analyzed.

Key words: control valve, the valve full external impact, regulation, conversion of the control signal, heater of HP.

Нікулін Д.С.

Одеський національний політехнічний університет

Ложечніков В.Ф.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЖН ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000

У статті розглядається технологічна ділянка групи ТЖН, що належить до другого контуру енергоблоку АЕС. Турбоживильні насоси призначені для подачі живильної води з деаераторів через систему регенерації високого тиску в парогенератори. На АЕС з реактором ВВЕР-1000 застосовуються турбоживильні насосні агрегати ПТА 3750-75. Головним параметром, що регулюється в ТЖН, є витрата води на виході [1, с. 99-102]. Управління здійснюється за допомогою цифрових ПІ-регуляторів на базі програмно-технічного комплексу АСР турбінного відділення.

Ключові слова: АЕС, АСР, турбоживильний насос, парогенератор, тиск.

Постановка проблеми. Ділянка живлення парогенератору має важливе значення для АЕС, бо вона впливає на витрату пари на ГЦН, і, як наслідок, на потужність енергоблоку. Вона поділяється на дві частини: автоматичну систему регулювання живлення парогенератора, задачею якої є підтримка матеріального балансу між відводом пари, продувкою і подачею живильної води, і автоматичною системою регулювання продуктивності ТЖН, що змінює витрату живильної води шляхом зміни його оборотів.

Через технічну складність проведення регулярного ремонту і модернізації АЕС України часто устатковані застарілим обладнанням. Впровадження мікропроцесорної техніки на заміну аналоговій дозволить підвищити надійність та ефективність виробництва. Запропонована у даній роботі АСР продуктивності турбоживильного насосу енергоблоку АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 направлена саме на такі цілі.

Постановка завдання. Завдання, що вирішується у статті, полягає у розробці сучасної автоматизованої системи регулювання продуктивності ТЖН на основі цифрових регуляторів, що спростить експлуатацію турбоживильних насосів та забезпечить їх ефективну роботу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розроблення математичної моделі

Для синтезу дискретних оптимальних і багатомірних систем регулювання передатні функції структурних елементів схеми ділянки живлення повинні бути перетворені в диференційні системи із урахуванням зв'язків між елементами об'єднані в одне матричне диференціальне рівняння.

Отже, динамічні властивості ТЖН описуються наступними диференціальними рівняннями:

$$T_{ТЖН} \Delta \dot{n} + \Delta n = k_q \Delta \dot{u}_5 + k_{ТЖН}^n \Delta u_5; \quad (1)$$

$$\Delta W_{ТЖН} = k_w \cdot \Delta n; \quad (2)$$

$$\Delta P_{ТЖН} = k_p \cdot \Delta n; \quad (3)$$

де Δn – зміна частоти обертання приводної турбіни живильного турбонасоса, викликана змінною положення регулюючих клапанів приводної турбіни ТЖН; k_w , k_p – коефіцієнти передачі ТЖН – визначається графоаналітичним методом по напірним характеристикам живильного турбонасоса.

Динамічні властивості трубопроводів від ТЖН до РЖК і від РЖК до ПГ отримані з відповідних передатних функцій:

$$T_{ПТР} \Delta \dot{P}_{РЖК} + \Delta P_{РЖК} = (1 - \tau) \cdot (\Delta P_{ТЖН} + k_{cv} \cdot \Delta u_{1,2,3,4}); \quad (4)$$

$$T_{ТР} \Delta \dot{W} + \Delta W = \Delta W_{ТЖН} + \Delta W_{РЖК}; \quad (5)$$

$$\Delta W_{РЖК} = k_{PO} \cdot \Delta u_{1(2,3,4)} + k_{cv} \cdot \Delta u_{2,3,4(1)}; \quad (6)$$

де k_{PO} – коефіцієнт передачі регулюючого живильного клапана (визначається графічно по його видатковій характеристиці), k_{cv} , k_{cv}^p – коефіцієнти взаємного впливу регулюючих живильних клапанів на витрати живильної води в ПГ (визначаються графоаналітичним способом по гідравлічній характеристиці живильного трубопроводу від ТЖН до ПГ і напірної характеристики турбоживильного насоса) і впливу положення регулюючих живильних клапанів на тиск живильної води перед ними відповідно.

Динаміка паропроводу від парогенераторів до головного парового колектора по витраті і тискові пари, і динаміка трубопроводу першого контуру

по різниці температур теплоносія отримані по експериментальним кривим розгону.

$$T_1 \Delta \dot{D} + \Delta D = (1 - \tau) \cdot k_1 \cdot \Delta N ; \quad (7)$$

$$T_2 \Delta \dot{P}_{ГПК} + \Delta P_{ГПК} = (1 - \tau) \cdot k_2 \cdot \Delta N ; \quad (8)$$

$$T_1 \Delta \dot{T} + \Delta T = k_1 \cdot \Delta N . \quad (9)$$

Сигнал по зміні різниці температур необхідний для задаючого сигналу по тепловій потужності для регулятора продуктивності ТЖН. Транспортне запізнювання введено в регулюючі канали за рівнем пароводяної суміші в парогенераторі і тискові живильної води перед РЖК на підставі експериментальних даних, і його прояв може бути пояснено нечуттєвістю вимірювальних перетворювачів і люфтами в кінематичній схемі виконавчого механізму регулюючих органів.

Отже, описана вище технологічна ділянка живлення барабанного парогенератора як об'єкт регулювання рівня води в ПГ і продуктивності живильного насоса описується системою диференціальних рівнянь(1)-(9), і їй відповідає структурна схема математичної моделі ділянки живлення представлена на рисунку 1.

Ця система диференціальних рівнянь може бути перетворена в систему матричних різницевих рівнянь із відповідним періодом дискретності виду:

$$\begin{cases} x_{i+1} = A_i \cdot x_i + B_i \cdot u_i + F_i \cdot f_i; \\ y_i = C \cdot x_i; \end{cases}$$

де x_i – вектор внутрішнього стану, що відповідає номінальному режиму функціонування системи; y_i – вектор контрольованих параметрів (вихід системи), u_i – вектор керуючих впливів, f_i – вектор основних збурювань, A_i, B_i, F_i, C – матриці коефіцієнтів відповідних розмірностей. Для забезпечення високої якості моделювання процесів у всьому діапазоні зміни навантажень, варто думати, що матриці A_i, B_i, F_i не являються цілком визначеними, а належать підмножинам $A_i \in \bar{A}_i \pm \Delta A_i, B_i \in \bar{B}_i \pm \Delta B_i, F_i \in \bar{F}_i \pm \Delta F_i$, де $\bar{A}_i, \bar{B}_i, \bar{F}_i$ – номінальні матриці підмножин, а $\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta F_i$ – матриці відхилень, такі що $\bar{A}_{i+1} = \bar{A}_i + \Delta A_i, \bar{A}_{i-1} = \bar{A}_i - \Delta A_i, i=1..n$, де n – число розглянутих режимів функціонування, а матриці $\bar{B}_{i \pm 1}, \bar{F}_{i \pm 1}$ ^{3/4} визначаються аналогічно.

Були отримані передатні функції ділянки регулювання, а саме:

- по каналу "електрична потужність – тиск пари"

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_2 \cdot e^{-\tau S}}{T_2 S + 1}, \text{ де } k_2 = 0.00633 \frac{\text{МПа}}{\text{МВт}}, T_2 = 9 \text{ с}, \tau = 4 \text{ с} .$$

- по каналу "положення РЖК – тиск пари"

$$W_{ГПК}(S) = \frac{k_3}{T_3 S + 1}, \text{ де } k_3 = -0.025 \frac{\text{МПа}}{\%}, T_3 = 19 \text{ с} .$$

- по каналу "тиск живильної води – тиск перед РЖК":

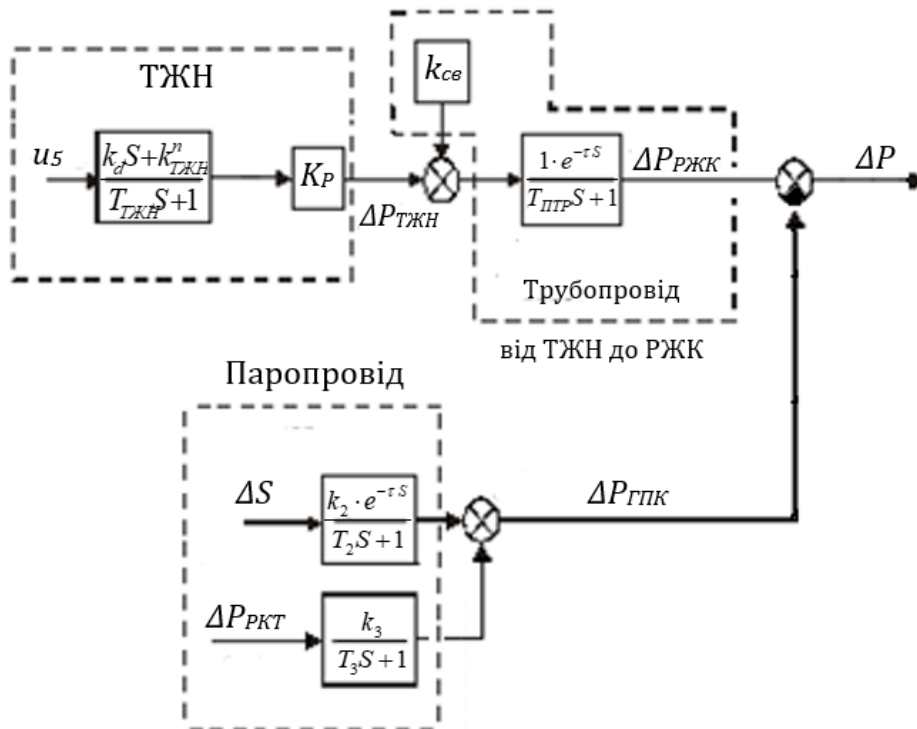


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі ділянки живлення

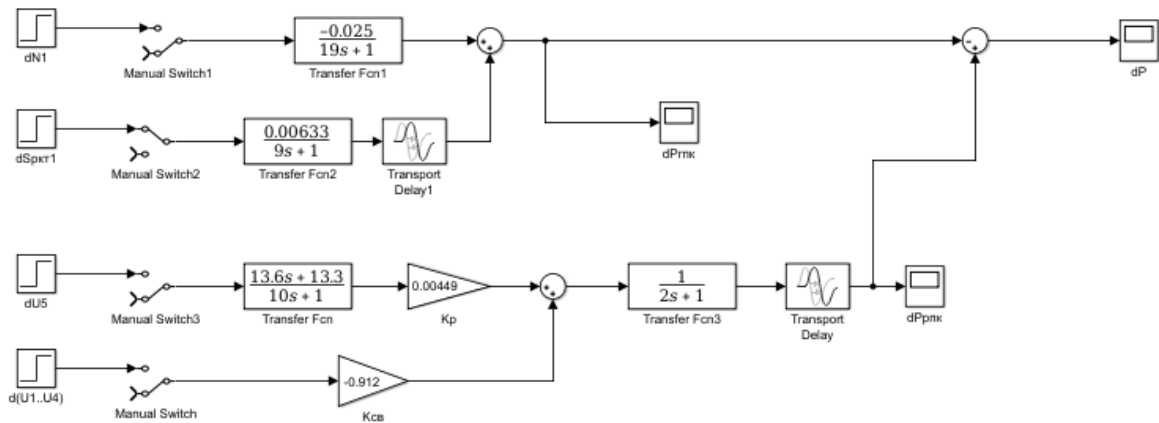


Рис. 2. Модель об'єкта регулювання

$$W_{ПТР}(S) = \frac{1 \cdot e^{-\tau} S}{T_{ПТР} S + 1}, \text{ де } T_{ПТР} = 2 \text{ с}, \tau = 2 \text{ с};$$

- по каналу "зміна положення регулюючого клапана приводної турбіни – частота обертання ТЖН "

$$W_{ПТН}(S) = \frac{k_d S + k_{ПТН}^n}{T_{ПТН} S + 1}, \text{ де}$$

$$k_d = 13.6 \frac{\text{об/хв}}{\text{с} \cdot \%}, \quad k_{ПТН} = 13.3 \frac{\text{об/хв}}{\%}, \quad T = 10 \text{ с}.$$

Чисельні значення коефіцієнтів передатних функцій математичної моделі були визначені за конструктивним і теплотехнічним параметрами енергоблоків та по експериментальним даним.

У програмному середовищі Simulink збудовано структурну схему моделі дільниці регулювання (рис. 2).

На основі розробленої моделі отримана крива розгону турбоживильного насоса (рис. 3).

Після обробки кривої розгону ТОУ отримали:

$$\tau = 2 \text{ с}; \quad T = 8 \text{ с}.$$

$$K_{об} = 0,24 \frac{\text{МПа}}{\% \times \text{РО}}$$

$$Kp = \frac{1}{K_{об} \cdot \tau / T}$$

ΔP , МПа

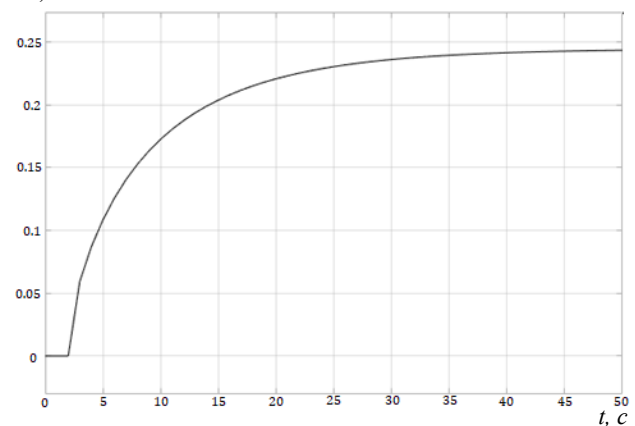


Рис. 3. Крива розгону турбоживильного насоса за каналом регулювання

$$Kp = \frac{1}{0,24 \cdot \frac{2}{8}} = 27,59 \frac{\% \times \text{РО}}{\text{МПа}}$$

$$T = Tu; \quad Tu = 8 \text{ с}.$$

Отже, передатна функція регулятора має вигляд:

$$W(p) = 27,59 + \frac{1}{8S}$$

Модель об'єкта з вбудованим та налаштованим ПІ-регулятором матиме наступний вигляд:

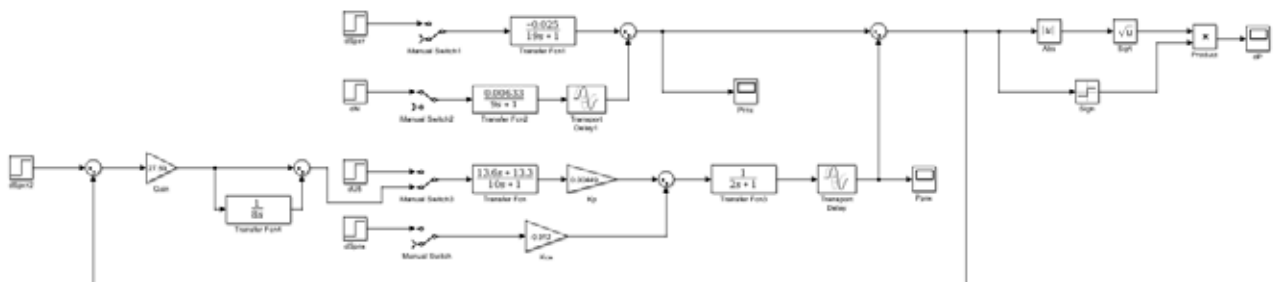


Рис. 4. Структурна схема ділянки регулювання з ПІ – регулятором

За таких налаштувань регулятора були отримані наступні перехідні процеси регулювання:

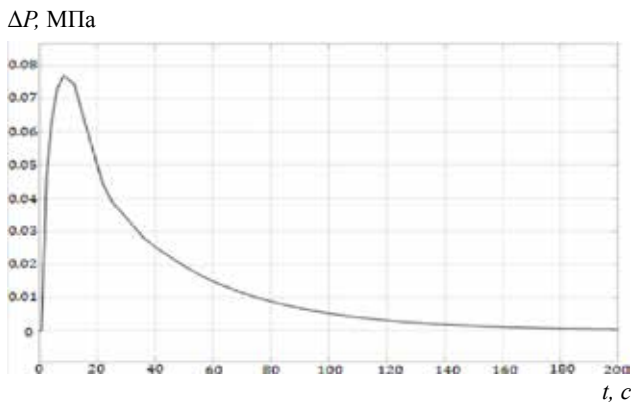


Рис. 5. Перехідний процес регулювання за каналом S_{PKT}

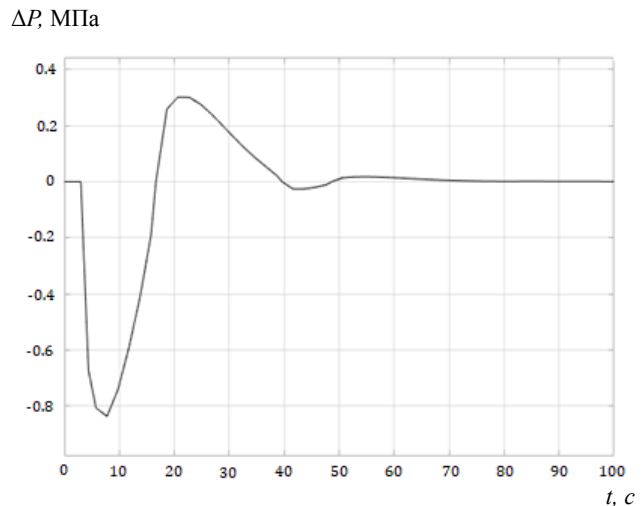


Рис. 7. Перехідний процес регулювання за каналом ΔS_{reak}

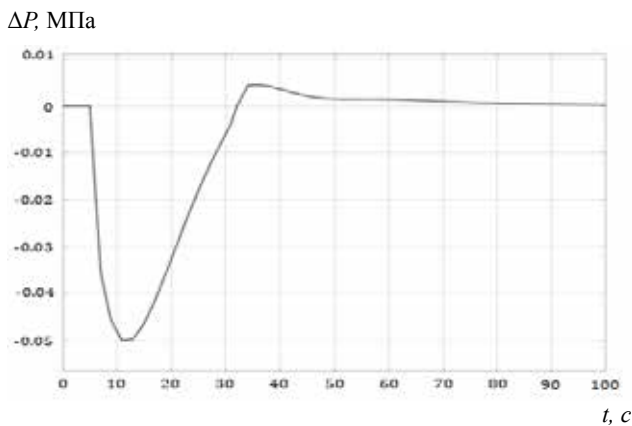


Рис. 6. Перехідний процес регулювання за каналом ΔN

Висновки. У роботі було розглянуто автоматизовану систему регулювання продуктивності турбоживильного насосу, що живить парогенератор енергоблоку АЕС.

В результаті роботи була створена математична модель ділянки живлення парогенератора, отримані оптимальні налаштування ПІ-регулятора. Перехідні процеси регулювання об'єкта управління демонструють високу якість керування регульованими параметрами.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control / *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*. 2012. № 1(38). P. 99–106
2. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241(8). P. 2956–2963.
3. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління / *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 174–179.
4. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 8–11.
5. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС / *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. № 4. С. 18–24.
6. Бундюк А.Н., Улицкая О.О. Разработка алгоритма для расчёта статика когенерационной энергетической установки / *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
7. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimization / *Праці Одеського політехнічного університету*. 2015. № 1(45). P. 134–140

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТПН ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000

В статье рассматривается технологический участок группы ТПН, что относится ко второму контуру энергоблока АЭС. Турбопитательные насосы предназначены для подачи питательной воды из деаэраторов через систему регенерации высокого давления в парогенераторы. На АЭС с реакто-

ром ВВЭР-1000 применяются турбопитательных насосные агрегаты ПТА 3750-75. Главным параметром, регулируется в ТЖН, является расход воды на выходе[1, с. 99-102]. Управление осуществляется с помощью цифровых ПИ-регуляторов на базе программно-технического комплекса АСР турбинного отделения.

Ключевые слова: АЭС, автоматическая система управления, ТПН, парогенератор, давление.

AUTOMATIC SYSTEM FOR REGULATING THE PERFORMANCE OF THE TURBINE DRIVEN PUMPS OF AN NPP POWER UNIT WITH A WWER-1000 REACTOR

This article discusses the technological section of the turbine driven pumps group belonging to the second circuit of the NPP power unit. Turbine driven pumps are designed to supply feed water from deaerators through a high-pressure regeneration system to steam generators. «ПТА 3750-75» turbine driven pumping units are used at NPPs with a VVER-1000 reactor. The main regulated parameters is the discharge water flow rate[1, p. 99-102]. The control of turbine driven pumps is carried out with the help of digital PI-regulators on the basis of the automatic control system of the turbine compartment.

Key words: NPP, automatic control system, turbine driven pump, steam generator, pressure.

Орлов А.И.

Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОЗДУХА С РАЗРАБОТКОЙ УЧЕБНОГО СТЕНДА

В статье разработан проект автоматической системы регулирования расхода воздуха путем изменения производительности нагнетающего вентилятора, математическую модель частотного регулирования учебного стенда. Техническая реализация основана на использовании микропроцессорного комплекса VIPA Micro PLC.

Ключевые слова: асп, расход воздуха, частотное регулирование, математическая модель, учебный стенд.

Постановка проблемы. Нормальная работа котла возможна лишь за условия непрерывной подачи воздуха и выведения в атмосферу продуктов сгорания после их охлаждения та очищения від твердых частинок.

В системе с природною тягою подача воздуха відбувається за рахунок використання інжекційного пального, а выведения продуктов сгорания проходит за рахунок тяги димовой трубы.

Весь газохід знаходиться під розрідженням. Ця система застосовується в котлах малої потужності при малих опорах руху потоків повітря і продуктів згорання. В системі, представленій на рис. 1, б, опори повітряного і газового трактів долаються за рахунок розрідження, створюваного димососом

і трубою. Така система застосовується в котлах малої потужності, що працюють на газі і мазуті і не мають повітропідігрівників.

В системі, представленій на рис. 1, в і г газохід знаходиться під надлишковим тиском – котли працюють “під наддувом”. На рис. 1 д подача повітря в топку здійснюється вентилятором, а продукти згорання видаляються димососом. В цьому випадку повітряний тракт знаходиться під тиском, а газовий тракт під розрідженням. За наявності різних опорів руху в системі паралельних потоків повітря використовується подача його в кожний потік індивідуальним вентилятором, що зменшує загальну витрату електроенергії на їх привід (рис. 1, е).

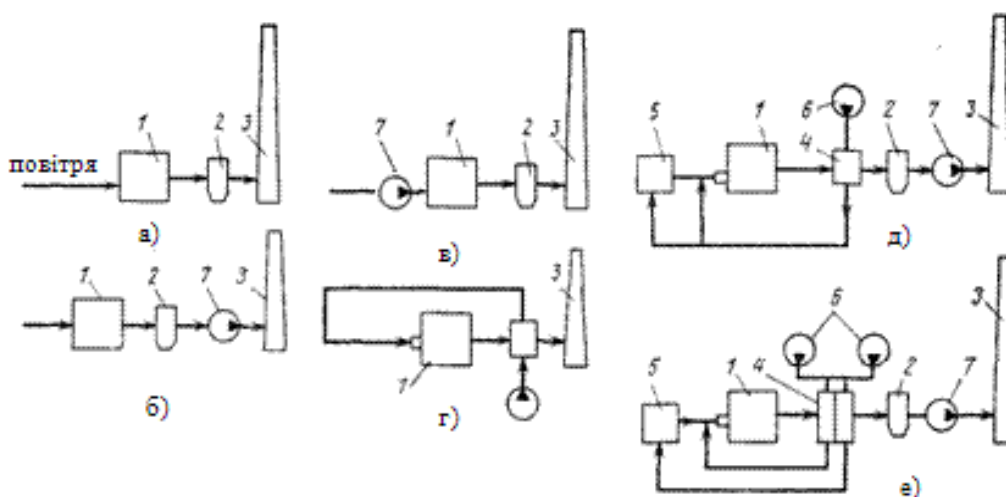


Рис. 1. Схеми газоповітряного тракту котлів: а – система з природною тягою; б – система з димососом; в – система з дуттєвим вентилятором; г – система з подачею вентилятором підігрітого повітря; д – система з вентилятором і димососом; е – система з роздільною подачею повітря на пилоприготування та на котел і димососом; 1 – котел; 2 – золовловлювач; 3 – димова труба; 4 – повітропідігрівник; 5 – система пилоприготування; 6 – вентилятор; 7 – димосос

Вентилятор і димосос повинні надійно забезпечувати подачу необхідного для горіння палива повітря в топку і видалення продуктів його згорання з котла при всіх режимах його роботи, підтримуючи задане постійне розрідження або тиск в топці. При цьому на привід вентилятора і димососа повинно витрачатися мінімально можлива кількість електроенергії.

Основними параметрами, що визначають вибір вентилятора і димососа, є необхідна їх подача і тиск при номінальному навантаженні котла.

Необхідна подача вентилятора, м³/год, визначається за формулою

$$Q_v = \beta_1 \cdot V_p \cdot V_0 \cdot (\alpha_t - \Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{повп}) \cdot 273 t_{хп} + 273 \cdot P_61 \cdot 01 \cdot 105,$$

а подача димососа, м³/год за формулою

$$Q_d = \beta_1 \cdot V_p \cdot V_r \cdot 273 t_{вг} + 273 \cdot P_6 P_0 \cdot 3600,$$

де V_p – розрахункова витрата палива, кг/с або м³/с;

V_0, V_r – теоретичний об'єм повітря і дійсний об'єм газів, м³/кг або м³/м³;

$\alpha_t, \alpha_{в}, \Delta\alpha_{повп}, \Delta\alpha_{пл}$ – коефіцієнт надлишку повітря в топці, витікання в повітропроводах, повітропідігрівнику, врахування подачі повітря з системи паливо підготовки;

$t_{хп}, t_{вг}$ – температури холодного повітря і відхідних газів, °С;

β_1 – коефіцієнт запасу, який приймають $\beta_1 = 1,05$;

$\rho_{пл}$ – частка повітря, що ре циркулює.

Необхідний повний тиск вентилятора або димососа – перепад повного тиску у вхідному і вихідному їх патрубках, Па,

$$P = \beta_2 \cdot \Delta p_p,$$

де Δp_p – розрахунковий напір по повітряному чи газовому тракту, Па;

β_2 – коефіцієнт запасу по тиску, що приймається рівним 1,1.

Потужність на валу вентилятора або димососа, кВт,

$$N = Q \cdot P \cdot 3600 \cdot \eta_n \cdot 10^{-3},$$

де η_n – КПД нагнітача (вентилятора або димососа), для сучасних машин $\eta_n = 0,7 \dots 0,75$;

Q – подача вентилятора або димососа, м³/год.

Заводами-виробниками характеристика вентилятора і димососа [1, с. 174–175], тобто зв'язок між подачею і повним тиском, дається для повітря при температурі 20°С і тиску 102–103 Па (760 мм. рт. ст.), тому при виборі машини подачу і тиск необхідно привести до заводських умов.

В процесі роботи котла виникає необхідність регулювання подачі вентилятора і димососа в

залежності від навантаження котла з метою забезпечення заданого коефіцієнта надлишку повітря. Характеристики роботи відцентрового вентилятора залежно від способу регулювання показані на рис. 2.

При зміні частоти обертання характеристика машини змінюється за такими співвідношеннями

$$Q_2 = Q_1 n_1 n_2; \quad p_2 = p_1 (n_1 n_2)^2; \quad N_2 = N_1 (n_1 n_2)^3,$$

де n_1, n_2 – частота обертання в різних режимах.

При регулюванні напрямним апаратом зміна характеристики машини супроводжується додатковими втратами в ній і зниженням її КПД. Зниження КПД залежить від конструкції машини і направляючого апарату, глибини регулювання і положення направляючих лопаток при даному режимі. Проте завдяки простоті конструкції направляючого апарату і нескладності його обслуговування при відносно високій економічності такий спосіб регулювання є найбільш розповсюдженим.

Потужність на валу машини при неномінальному режимі визначається за формулою

$$N = Q \cdot p \cdot 3600 \cdot \eta_n \cdot \eta_{пер} \cdot 10^{-3}$$

де $\eta_{пер}$ – ККД регулювання, який залежить від глибини регулювання, конструкції апарату тощо.

Постановка завдання. Розробка автоматизованої системи регулювання витрати повітря шляхом зміни продуктивності нагнітаючого вентилятора.

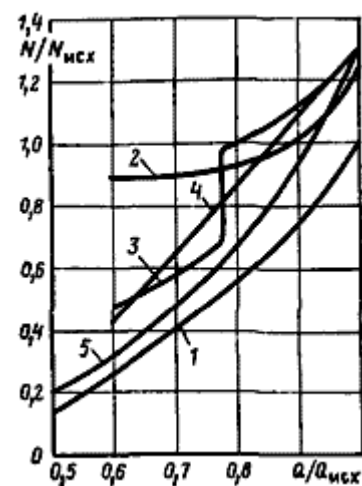


Рис. 2. Характеристика ефективності систем регулювання: 1 – корисна потужність, затрачувана на транспорт повітря і газу; 2 – регулювання напрямляючим апаратом; 3 – регулювання на-правляючим апаратом при двошвидкісному електродвигуні; 4 – регулювання гідромуфтою; 5 – регулювання при колекторному електродвигуні з фазовим ротором

У результаті розробки була одержана автоматизована система регулювання витрати повітря. Використані сучасні засоби автоматизації, а саме контролер VIPA MICRO PLC, розроблений інтерфейс для дистанційного керування процесом. Розроблена асп змонтована у вигляді навчального стенду.

Вибір даної системи призведе до підвищення продуктивності надійності та якості, та полегшення обслуговування.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Для регулювання витрати повітря шляхом зміни продуктивності нагнітаючого вентилятора використовується параметрична схема:

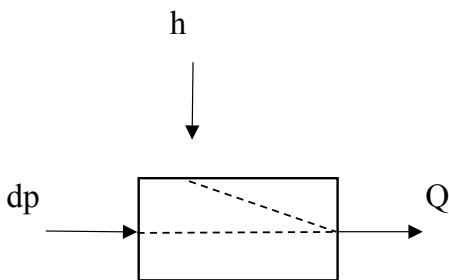


Рис. 3. Параметрична схема об'єкта регулювання

У енергетичних установках часто виникає необхідність регулювати витрату або тиск в системі, по якій протікає газ або пара. Структурна схема ділянки в цьому випадку відрізняється лише тим, що замість насоса встановлюється машина стиснення (компресор, вентилятор, димосос) або розширення (турбіна).

Варіанти схем регулювання витрати (тиску) аналогічні випадку нестискаємої рідини.

На рис. 4 показаний випадок, коли задача регулювання вирішується за допомогою машини, в якій відбувається розширення пари (парова машина або парова турбіна).

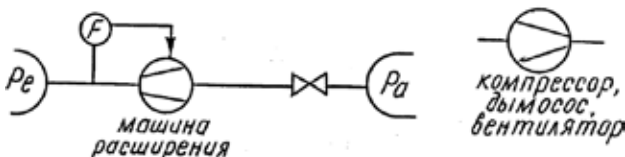


Рис. 4. Схема регулювання витрати (тиску) стискаємої середовища

На вході та виході регульованої системи можна примусово, за допомогою зовнішніх засобів підтримувати (наприклад, постійним) тиск або витрату. Можливі при цьому модифікації схем різні.

Математична модель стенду. В нашому випадку на прикладі стенду ми маємо таку схему:

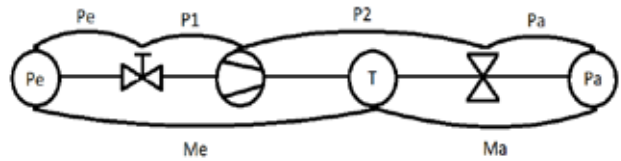


Рис. 5. Схема регулювання витрати повітря стенду

Виходячи з цього, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta P = b_v * \Delta A_v - a_v * \Delta M_e; & \Delta P_e = 0; \\ \Delta P_1 - \Delta P_2 = -a_p * \Delta M_e + b_p * \Delta n \\ \Delta P_2 - \Delta P_a = a_L * \Delta M_a; \Delta P_a = 0; \Delta P_2 = a_L * \Delta M_a; \\ \Delta M_e - \Delta M_a = T_n \frac{\bar{M}}{P_2} \Delta \dot{P}_2 \end{cases}$$

З системи рівнянь отримуємо диференціальне рівняння першого порядку:

$$\begin{aligned} & \frac{(a_p - a_L)}{a_p - a_L - a_v} a_L T_n \frac{\bar{M}}{P_2} \Delta \dot{M}_a + \Delta M_a = \\ & = \frac{b_p}{a_p - a_L - a_v} \Delta n - \frac{b_v}{a_p - a_L - a_v} \Delta A_v \end{aligned}$$

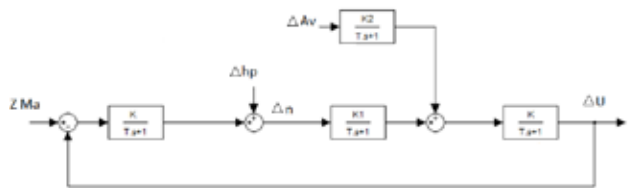


Рис. 6. Структурна схема АСР

Автоматичні регулятори класифікуються за призначенням, принципом дії, конструктивним особливостям, виду використовуваної енергії, характеру зміни регулюючого впливу і т.п.

За принципом дії вони поділяються на регулятори прямої і непрямої дії. Регулятори прямої дії не використовують зовнішню енергію для процесів управління, а використовують енергію самого об'єкта управління (регульованої середовища).

В автоматичних регуляторах непрямої дії для його роботи потрібне зовнішнє джерело енергії. За родом дії регулятори поділяються на безперервні та дискретні. Дискретні регулятори, в свою чергу, поділяються на релейні, цифрові і імпульсні.

По виду використовуваної енергії вони поділяються на електричні (електронні), пневматичні, гідравлічні, механічні та комбіновані.

Вибір регулятора по виду використовуваної енергії визначається характером об'єкта регулювання і особливостями автоматичної системи.

Згідно із законом регулювання вони поділяються на дво- і трипозиційні регулятори, типові регулятори (інтегральні, пропорційні, пропорційно-диференціальні, пропорційно-інтегральні, і пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори – скорочено І, П, ПД, ПІ і ПІД – регулятори), регулятори зі змінною структурою, адаптивні (які самостійно) і оптимальні регулятори. Двопозиційні регулятори знайшли широке поширення, завдяки своїй простоті і малій вартості.

За призначенням регулятори поділяються на спеціалізовані (наприклад, регулятори рівня, тиску, температури і т.д.) і універсальні з нормованими вхідними і вихідними сигналами і придатні для управління різними параметрами.

По виду виконуваних функцій регулятори поділяються на регулятори автоматичної стабілізації, програмні, коригувальні, регулятори співвідношення параметрів і інші.

Для керування кондиціонером найбільш доцільно використовувати типові ПІД регулятори. ПІД регулятор має бути налаштований із використанням одного із методів налаштування. Відома велика кількість методів, наприклад метод Копеловича, Кона та ін., однак оскільки моделі каналів описуються інерційною ланкою першого порядку без запізнення, то доцільно використовувати метод прямого синтезу за еталонною передатною функцією. Це метод доволі простий і дозволяє досить швидко отримати оптимальні налаштування.

Метод прямого синтезу за еталонною передатною функцією:

Для вибору методу регулювання скористаємося методом прямого синтезу за еталонною передатною функцією так як маємо об'єкт без запізнення.

Прирівняємо передатну функцію замкненої системи по завданню до деякої обраної передатної функції W_{ET} , тобто

$$W_{ET} = \frac{G_c G_p}{G_c G_p + 1},$$

де G_c – передатна функція регулятора,
 G_p – передатна функція об'єкта керування.

$$G_c = \frac{1}{G_p} \left(\frac{W_{ET}}{1 - W_{ET}} \right)$$

Таким чином, якщо задано необхідний вихід системи W_{ET} , можливо задати передатну функцію регулятора G_c для передатної функції об'єкта керування G_p .

Функція W_{ET} не може бути константою, а лише функцією від s , оскільки система не може реагувати миттєво і має мати час регулювання.

Для об'єкта першого порядку в вигляді інерційної ланки

$$G_p = \frac{k_o}{T_o s + 1}$$

представимо бажану передатну функцію у вигляді

$$W_{ET} = \frac{1}{\tau_c s + 1}.$$

Тоді регулятор має вигляд

$$G_c = \frac{T_o s + 1}{k_o} \cdot \frac{1}{\tau_c s} = \frac{T_o}{k_o \tau_c} \left(1 + \frac{1}{T_o s} \right),$$

який є ПІ регулятором з налаштуваннями

$$Kp = \frac{T_o}{k_o \tau_c}, \quad Ti = T_o.$$

Розрахуємо параметри для каналу:

$$Kp = \frac{T_{об}}{K_{об} * \tau_c} = \frac{50}{0.21 * 40} = 5.9$$

$$T_u = T_{об} = 50$$

$$Kp = \frac{T_{об}}{K_{об} * \tau_c} = \frac{38}{0.2 * 20} = 9.5$$

$$T_u = T_{об} = 38$$

Перехідні процеси по завданню і збуренню для регуляторів обох каналів обрані наведені на рисунках 7 і 8.

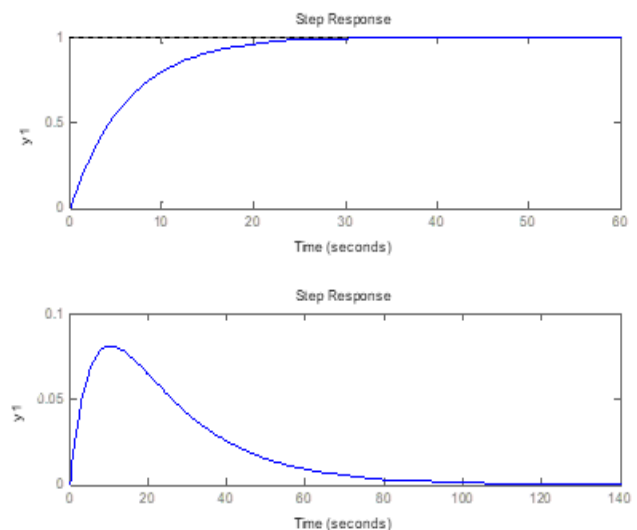


Рис. 7. Перехідні процеси в першому каналі при керуванні за збуренням

При керуванні за завданням час наростання – 14 с, час регулювання – 25 с.

При керуванні за збуренням час регулювання – 92.5 с, максимальне відхилення 0.08 .

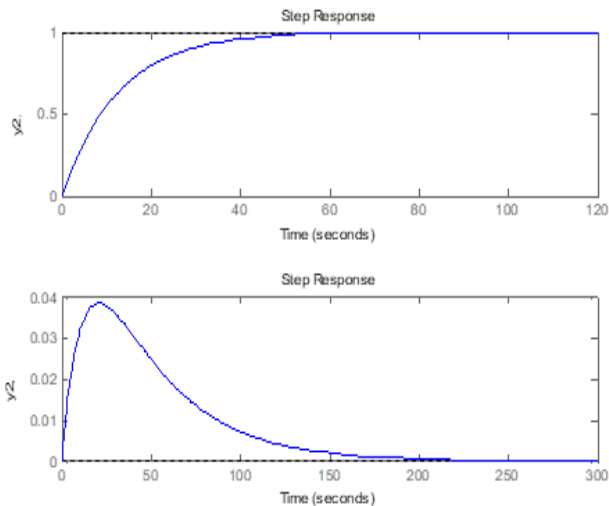


Рис. 8. Перехідні процеси в другому каналі при керуванні за завданням і збуренням

При керуванні за завданням час наростання – 28 с, час регулювання – 50 с.

При керуванні за збуренням час регулювання – 185 с, максимальне відхилення 0.0385.

Отже, синтезована децентралізована система керування на базі ПІ-регуляторів дозволяє отримати якісні перехідні процеси і може бути рекомендована для управління вентиляційною системою.

Висновки. У роботі розглянутий технологічний процес регулювання витратою повітря з розробкою навчального стенду. З'ясовано що вибір сучасної системи призведе до підвищення продуктивності надійності та якості, та полегшення обслуговування. Тому, при розробки алгоритму регулювання витратою повітря необхідно враховувати децентралізовану систему керування на базі ПІ-регуляторів.

Список літератури:

1. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління / Автоматика. Автоматизація. Електротехнические комплексы и системы. 2009. Вип. 174. – 179 с.
2. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. Теплоенергетика. Вип. 6. – 19 с.
3. Давыдов В.О., Крылов В.Н., Максимов М.В. Автоматизированная система распознавания / Искусств. интеллект. 2002. Вип. 462. – 469 с.
4. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи. 2009. Вип. 8. – 11 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВИТРАТОЮ ПОВІТРЯ З РОЗРОБКОЮ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ

У статті розроблено проект автоматичної системи регулювання витрати повітря шляхом зміни продуктивності нагнітаючого вентилятора, математичну модель частотного регулювання навчального стенду. Технічна реалізація базована на використанні мікропроцесорного комплексу VIPA Micro PLC.

Ключові слова: асп, витрата повітря, частотне регулювання, математична модель, навчальний стенд.

STUDIES OF COMPUTER-INTEGRATED AIR FLOW MANAGEMENT SYSTEM WITH THE DEVELOPMENT OF A TRAINING STAND

The article has developed a draft of an automatic air flow control system by changing the performance of an injection fan, a mathematical model of the frequency control of a training stand. The technical implementation is based on the use of the VIPA Micro PLC microprocessor complex.

Key words: automatic control system, air flow, frequency regulation, mathematical model, training stand.

Повхан І.Ф.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

ЗАДАЧА АПРОКСИМАЦІЇ ВИБІРКИ ДИСКРЕТНИХ НАБОРІВ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Робота присвячена важливому завданню розпізнавання – апроксимації дискретних наборів множиною геометричних об'єктів. Ефективна, економна апроксимація навчальної вибірки дозволяє забезпечити необхідні швидкодю, рівень складності схеми класифікації, що забезпечує просте та повне розпізнавання дискретних об'єктів.

Ключові слова: розпізнавання дискретних об'єктів, апроксимація геометричними об'єктами, функція розпізнавання, узагальнена ознака.

Актуальність. Робота пропонує розв'язок завдання розпізнавання образів у детермінованому варіанті на основі використання методології методу логічного дерева [1]. Специфіка останнього дозволяє створити на його основі програмний комплекс для автоматизації процесу конструювання нових алгоритмів та розпізнаючи систем в цілому. Таким чином, реалізована можливість ефективно використовувати весь багатолітній досвід теорії та практики розпізнавання образів, даючи вже відомим алгоритмам та програмам розпізнавання друге життя. В цьому плані метод дерева доповнює методологію підходу розгалуженого вибору ознак Ю.А. Василенка [2].

У роботі пропонується підхід апроксимації навчальної вибірки геометричними об'єктами. Ідея розробленого алгоритму генерації узагальнених ознак [3] знову ж полягає в апроксимації певного класу послідовністю певних узагальнених ознак (гіперпаралелепіпедів). Стосовно його алгоритмічної реалізації відмітимо те, що вона розвиває роботу [4] так-як хоча автор і приймав ній участь – була не позбавлена певних системних обмежень (фіксована орієнтація в просторі, неможливість адаптації та ін).

Використання множини геометричних об'єктів для апроксимації дискретних наборів дозволяє побудувати відносно просту схему класифікації, при умові сумісного використання декількох підходів (наприклад, зв'язки алгоритмів гіперкулі та гіперкуба), що дозволяє реалізувати 100% розпізнавання навіть при умові слабкої роздільності класів [5]. Тут слід зауважити, що кожна окремо з геометричних реалізацій має свою фіксовану ефективність відносно навчальної вибірки та в найгіршому випадку не зможе провести закінчену апроксимацію масиву (це не стосується алгоритму гіперкуль – який забезпе-

чує розпізнавання навіть при не виконанні гіпотези роздільності).

Стосовно алгоритмічної реалізації – апроксимації вибірки гіперпаралелепіпедами відмітимо те, що вона має певні особливості за рахунок додаткової перевірки сконструйованих гіперпаралелепіпедів на коректність (неможливості «захоплення» простору іншого класу) та загальної схеми побудови всіх можливих гіперпаралелепіпедів у фіксованому класі. В нашому випадку важливою особливістю алгоритму гіперпаралелепіпедів в порівнянні з іншими геометричними підходами буде те, що для зберігання сконструйованої узагальненої ознаки (гіперпаралелепіпеда) достатньо запам'ятати дві протилежні діагональні вершини.

Постановка завдання. Під час розпізнавання образів найважливішою, а іноді єдиною заданою інформацією є навчаюча вибірка (НВ)

$$(A_1, \Omega_i), (A_2, \Omega_i), \dots, (A_m, \Omega_m) (*)$$

Де A_j – об'єкти (вектори) деякого n – мірного простору ознак R^n , а Ω_j – номери класів, які містять в собі об'єкти A_j , тут ($j \in 1, 2, \dots, m; i \in 1, 2, \dots, k$).

Нехай Ω_0 – клас об'єктів, кожний з яких не міститься в жодному з класів $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k$, тоді справедлива рівність:

$$\Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \dots \cup \Omega_k = R^n.$$

Центральною задачею розпізнавання образів (дискретних об'єктів) є побудова такої системи, яка для кожного об'єкта, який подається на її вхід видавала б номер класу, який містить цей об'єкт [6].

Очевидно, що сама навчальна вибірка є системою переборного типу, яка здійснює розпізнавання об'єктів, але лише тих що перераховані у виборці. Чим більше об'єктів в НВ, тим більше об'єктів з R^n може розпізнати така система. В зв'язку зі скінченністю НВ та пам'яті комп'ютера яка її буде обробляти, такий підхід є не самим найкращим.

Одним із способів значного збільшення числа об'єктів з R^n які за даною скінченою НВ будуть правильно класифікуватися системою розпізнавання (СР), є геометрична апроксимація класів Ω_i . Прикладом таких методів є розділення простору R^n гіперкулями [7].

Перерахуємо принципи, яких будемо дотримуватися в наступній апроксимації НВ гіперпаралелепідами:

1) оскільки НВ зазвичай буває єдиною початковою інформацією при постановці задачі розпізнавання, то при побудові СР необхідно виходити головним чином з цієї інформації;

2) оскільки НВ скінчена, а отже є обмеженою, то елементи апроксимації, за нашою думкою мають бути обмеженими, тобто в n -мірному просторі елементи апроксимації – замкнені гіперповерхні;

3) нехай ξ – деякий окіл (гіперкуля, гіперкуб, гіпереліпс гіперпаралелепіед). Розглянемо можливі припущення:

а) в ξ – околі кожної точки A_i з НВ немає жодного об'єкту з R^n ;

б) в ξ – околі точки A_i є об'єкти з R^n , але всі вони разом з точкою A_i належать одному і тому класу;

с) в ξ – околі точки A_i є об'єкти з R^n , але вони можуть бути з різних класів.

Припущення (а) є не самим кращим, так як мала імовірність цього варіанту та відсутня апроксимація яка буде краще самою НВ. Припущення (с) найбільш реальне, але в цьому випадку з усього околу ξ – околу точки A_i нам відома інформація лише про саму точку (об'єкт) A_i . З цих міркувань формулюється принцип (б) – кожна точка A_i належить класу Ω_{j_i} разом з ξ – околком.

Загальний опис базового алгоритму. Опішемо суть алгоритму E – апроксимації НВ гіперпаралелепідами. Нехай в n -мірному просторі задана НВ виду (*).

Нехай також задано число $0 < \epsilon \leq 1$. Побудуємо таку систему гіперпаралелепіедів які не перетинаються $\{P_j\}$, кожний з яких задовольняє наступну умову:

$$\max_i \frac{M_j^i * V_\xi}{V_j} \geq \epsilon > 0, \quad (1)$$

Зауважимо, тут M_j^i – кількість векторів НВ, які попадають в гіперпаралелепіед P_j та належить класу Ω_i . Також V_j – об'єм гіперпаралелепіеда P_j , V_ξ – об'єм гіперпаралелепіеда, ребра якого задаються вектором $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, де:

$$\xi_l = \min_{i, j \in \{i_1, i_2, \dots, i_m\}} |x_i^l - x_j^l|, (l = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

Умова (1) визначає номер класу, об'єкти якого попадають в гіперпаралелепіед P_j , та сумарний об'єм ξ – околів цих об'єктів у відношенні до об'єму P_j , (не менше заданого числа ϵ).

ξ – окіл, в даному випадку гіперпаралелепіед, ребра якого найменша відстань між ортогональними проекціями об'єктів НВ на всі координатні n -мірного простору R^n – умова (2).

Дамо покроковий опис базового алгоритму.

Крок 1. Зафіксуємо деякий гіперпаралелепіед P_0^0 , який містить всі вектори НВ та грані якого є площини, які описуються наступними рівняннями:

$$\begin{cases} x_i = x_i^0 \\ x_i = x_i^1 \end{cases}, \text{ тут } (i = 1, 2, \dots, n).$$

Крок 2. Перевіримо умову (1). Якщо воно виконується, то алгоритм закінчується, інакше крок 3.

Крок 3. Ділимо P_0^0 навпіл площиною, паралельною $x_i = x_i^0$. Отримаємо два гіперпаралелепіеда P_1^1 та P_1^2 . Робимо перевірку умови (1) для кожного з них. Ті гіперпаралелепіеди, для яких умова (1) виконується, запам'ятовуємо та в наступних кроках алгоритму не враховуємо. Якщо,

$$\max_i \frac{M_j^i * V_\xi}{V_j} = 0, \quad (3)$$

то гіперпаралелепіед відсіюється, тобто рахується пустим.

На $i + 1$ -му кроці алгоритму гіперпаралелепіеди $P_{i_1}, P_{i_2}, \dots, P_{i_t}$, які отримані на попередніх кроках, ділимо гіперплощинами вигляду: $x_j = x_j^0$. Ті з гіперпаралелепіедів, які задовольняють (1) – запам'ятовуються комп'ютером та далі не враховуються, ті для яких виконується умова (3) – відсіюються. Ті що залишилися подаються на вхід наступного кроку. Останній крок. Умова (1) виконується для всіх гіперпаралелепіедів, які поступають на поточний крок.

Характеристика алгоритму. Для аналізу основних характеристик алгоритму запропонуємо ряд тверджень.

Твердження 1. Алгоритм E – апроксимації НВ гіперпаралелепідами є збіжним для довільного $\epsilon, (0 < \epsilon \leq 1)$ та закінчується за скінчену кількість кроків. Доведення очевидне.

Твердження 2. Нехай $\{P_j, j = 1, 2, \dots, t\}$ – результат алгоритму E – апроксимації гіперпаралелепідами. Тоді $\{P_j\}$ – систем розпізнавання, яка робить не більше $m(1 - \epsilon)$ помилок при надходженні НВ, де m – кількість пар НВ.

Доведення. Кожному гіперпаралелепіеду з $\{P_j\}$ поставимо у відповідність число i (номер класу, при якому реалізується нерівність (1)). Твердження доведене.

Твердження 3. Нехай алгоритм E – апроксимації НВ закінчується після t – операцій з гіперплощинами та K_i – кількість тих гіперпаралелепіпедів які відсіюються i – му кроці, як такі що не містять жодної точки з НВ. Тоді кількість гіперпаралелепіпедів на вході алгоритму E – апроксимації дорівнює числу:

$$S = 2^t \left(1 - \sum_{i=1}^t \frac{k_i}{2^i}\right).$$

Доведення. Число S отримаємо з виразу: $(\dots(((2 - k_1) * 2 - K_2) * 2 - k_3) \dots) * 2 - k_t$.

Твердження 4. Нехай \bar{p} – середня кількість об'єктів НВ, які попадають в кожний з гіперпаралелепіпедів покриття $\{P_i\}$, m – величина НВ, n – розмірність простору. Тоді маємо стиск інформації про НВ в $\frac{n+1}{2n+1} * \bar{p}$ разів.

Доведення. Любий гіперпаралелепіпед n – мірного простору однозначно визначається своєю діагоналлю. Тоді для кодування гіперпаралелепіпеда необхідно $2n$ – чисел. Водночас для кодування НВ необхідно $m(n+1)$ чисел. Після апроксимації для запам'ятовування $\frac{m}{p}$ – гіперпаралелепіпедів потрібно $\frac{m}{p}(2n+1)$ – чисел. Тоді стиск інформації характеризується співвідношенням:

$$\frac{m(n+1)}{\frac{m}{p}(2n+1)} = \frac{\bar{p}(n+1)}{2n+1}.$$

Твердження доведено.

Порівняємо запропонований нами метод з аналогічним йому методом відсікання гіперплощин.

1. Головна задача методів відсікання – побудова деяких площин, які оптимально розділяють класи один від одного. При цьому розділяються лише об'єкти НВ, але мається на увазі розділення всієї генеральної вибірки, яка нам невідома. Навпаки, в методі E – апроксимації враховується обмежений характер НВ та апроксимація здійснюється з заданою точністю E .

2. Для задачі знаходження оптимальних відсікаючих площин застосовується складний математичний апарат, що при обробці великих масивів інформації є істотним недоліком. В методі E – апроксимації математична простота: використовуються гіперпаралелепіпед, який можна описати одною його діагоналлю та його ділення на дві частини одною з площин, паралельних його граням.

3. Метод відсікаючих площин часто потребує апріорного припущення про можливість розділення об'єктів НВ. Зауважимо, що в запропонова-

ному методі об'єкти НВ можна розділити завжди.

4. Результат роботи алгоритму E – апроксимації дає можливість легко побудувати правило класифікації для об'єктів що розпізнаються.

Дійсно, застосувавши метод E – апроксимації гіперпаралелепіпедами до НВ, ми отримаємо множину гіперпаралелепіпедів $\{P_j\}$. Кожний гіперпаралелепіпед P_j містить в собі оптимальні множини об'єктів НВ, які належать класу Ω_{ij} . Тоді природно припустити таке правило класифікації для розпізнавання об'єктів: Нехай c – довільний об'єкт що подається на вхід системі розпізнавання. Якщо c – міститься в якомусь з гіперпаралелепіпедів P_r , то c розпізнається як об'єкт класу Ω_{ir} . В протилежному випадку видається відповідь – невідомо (помилка класифікації).

Можна припустити та менш жорстку умову: об'єкт c відноситься до класу Ω_{ir} , якщо $\min_j \rho(c, P_j) = \rho(c, P_{ir}) < \rho_0$, де ρ – деяка метрика в R^n та ρ_0 – задане число. Число ρ_0 можна також розраховувати як найменша відстань між об'єктами НВ. Зауважимо, що розрахунок оцінок тоді буде здійснюватися не по відношенню до об'єктів НВ, а її E – апроксимації. Це по-перше значно пришвидшить алгоритм розпізнавання, а по-друге, розвантажує оперативну пам'ять комп'ютера.

5. Зауважимо, що система розпізнавання може будуватися з попередньо відомою точністю – E .

6. За допомогою гіперпаралелепіпедів над НВ можна легко проводити різні перетворення. У випадку зображень або сцен такими перетвореннями можуть бути геометричні перетворення. При цьому для роботи алгоритмів достатньо мати лише діагоналі гіперпаралелепіпедів.

7. Алгоритм E – апроксимації гіперпаралелепіпедами враховує умови при яких можливо відрізнити два різних об'єкта при даній НВ.

Модифікація базового алгоритму. Запропонуємо модифікації алгоритму E – апроксимації, які дають можливість швидко апроксимувати НВ, отримавши меншу кількість гіперпаралелепіпедів, врахувати людський фактор і так далі.

1. Вибір найкращого напрямку. В запропонованому алгоритмі E – апроксимації гіперпаралелепіпедами НВ вибір напрямку відсікання площинами проводиться циклічно за координатами, а саме: паралельно площинам, заданим рівняннями: $x_i = 0, (i = 1, 2, \dots, n)$.

Запропонуємо тепер ділити гіперпаралелепіпед не один раз, а проводити n – можливих відсікань навпіл. Після цього треба обрати той один спосіб відсікання, при якому сума величин, які фігурують зліва у формулі для кожної з двох отри-

маних частин: $\max_i \frac{M_j^i * V_\xi}{V_j} + \max_i \frac{M_j^i * V_\xi}{V_j}$ буде найбільшою.

2. Вибір пропорції ділення. В алгоритмі E – апроксимації відсікання гіперпаралелепіедів проводиться навпіл. Це найбільш проста операція серед других відсікань, однак не враховується особливість поточної частини НВ. Тому пропонується ділити гіперпаралелепіед P на два (P_1 та P_2) так, щоби по можливості максимальна частина об'єктів НВ з одного класу об'єктів попала а один з гіперпаралелепіедів.

3. Задача нижнього порогу апроксимації. Дана модифікація полягає в тому, що поряд з умовою (1) вводиться умова з деякою величиною η :

$$\max \frac{M_j^i * V_\xi}{V_j} < \eta \quad (4)$$

Гіперпаралелепіеди які не задовольняють умові (4) слід відсіювати. Головна ідея тут полягає в наступному – поріг η визначає ту мінімальну кількість точок в даному об'єкті, по якому є сенс судити про належність об'єктів до якого-небудь класу.

4. Завдання найменшого околу об'єктів НВ. В попередньому E – апроксимації НВ істотним моментом є розрахунок найменшого E – околу, межах якого розділення двох любых об'єктів неможливе. При цьому інформація береться тільки з НВ.

Завдаючи E – окіл апріорі, модифікуємо початковий алгоритм. Виходячи зі здорового глузду, необхідно припустити, що E – окіл що задається апріорі не може бути більше того, який розраховується в алгоритмі E – апроксимації гіперпаралелепіедами, так як при цьому настає або надлишковість НВ, або протиріччя: два об'єкта з єдиного E – околу належать різним класам.

5. Обмеження кількості кроків алгоритму. В зв'язку з тим що процесорний час та пам'ять комп'ютера є обмеженими ресурсами, доречно ввести скінчену кількість кроків алгоритму, після якої процес апроксимації вважається закінченим.

6. Інтерактивний режим. З твердження (3) видно, що число кроків алгоритму E – апроксимації гіперпаралелепіедами значно залежить від перших відсікань. Однак людина на перших кроках алгоритму може виявитися більш ефективною в цьому плані (вибору відсікаючи площин), ніж жорстка комп'ютерна програма. Тому доцільно (особливо це стосується випадку двомірного та трьох-мірного простору) перші кроки алгоритму здійснювати в інтерактивному режимі.

7. Використання відомих методів розпізнавання в методі E – апроксимації гіперпаралелепі-

педами. Алгоритм E – апроксимації швидше працює на великих однорідних частинах НВ та значно довше там де об'єкти НВ досить сильно розсіяні в просторі. Тому можна запропонувати таку модифікацію. Фіксується деяка кількість алгоритмів апроксимації (розділення) НВ. Алгоритм E – апроксимації гіперпаралелепіедами є основою запропонованого алгоритму. Схема алгоритму залишається тією самою, тільки на кожному кроці застосовуються фіксовані методи. Якщо в результаті їх застосування розділення вибірки в поточному гіперпаралелепіеді пройшло з відповідною точністю, то відсікання цього гіперпаралелепіеда закінчується, інакше діє схема E – апроксимації гіперпаралелепіедами. Очевидно, що такий алгоритм більш гнучкий відносно попередньо запропонованого.

Фінальний варіант алгоритму апроксимації початкової вибірки. Ідея даної модифікації знову ж полягає в апроксимації певного класу послідовністю гіперпаралелепіедів. Стосовно його алгоритмічної реалізації відмітимо те, що вона незначно ускладнилася в порівнянні з попередніми геометричними алгоритмами за рахунок додаткової перевірки сконструйованих гіперпаралелепіедів на коректність (неможливості «захоплення» простору іншого класу) та загальної схеми побудови всіх можливих гіперпаралелепіедів у фіксованому класі.

Знову ж, для спрощення викладу кроків алгоритму припустимо, що НВ задає розбиття на два класи – H_0, H_1 , і задача буде полягати в апроксимації класу H_0 гіперпаралелепіедами, загальна схема побудови яких аналогічна і для класу H_1 .

Нагадаємо, що за визначенням, гіперпаралелепіед у n – вимірному просторі – це геометрична множина точок $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$, що задовольняє нерівності: $a_1 \leq x_1 \leq b_1, \dots, a_n \leq x_n \leq b_n$, де $a_i < b_i$ – дійсні числа. Для спрощення загальної схеми алгоритму накладемо таку важливу умову, що всі грані гіперпаралелепіедів, які будуть збудовані нами, будуть паралельні напрямним осям координат, що дозволить в значній мірі спростити загальну схему алгоритму.

В нашому випадку важливою особливістю алгоритму гіперпаралелепіедів в порівнянні з іншими геометричними алгоритмами буде те, що для зберігання сконструйованої узагальненої ознаки (гіперпаралелепіеда) достатньо запам'ятати дві протилежні діагональні вершини, що за своєю економічністю можна порівняти з алгоритмом гіперкуль (де у пам'яті зберігався центр кулі та його радіус). Тобто, зважаючи на визначення гіперпаралелепіеда, для

його зберігання достатньо запам'ятати вершини $V_1(a_1, a_2, \dots, a_n)$ та $V_2(b_1, b_2, \dots, b_n)$, а отже довільний гіперпаралелепіпед в n -вимірному просторі однозначно визначається своєю діагоналлю і для його кодування (запам'ятовування) достатньо $2n$ змінних, що безпосередньо впливає на складність та ефективність схеми даного алгоритму.

Опишемо алгоритм апроксимації НВ послідовністю гіперпаралелепіпедів та розберемо основні його реалізаційні елементи.

Крок 1. Головною принциповою проблемою, яку необхідно вирішити при реалізації даного алгоритму є проблема побудови всі можливих гіперпаралелепіпедів на фіксованій множині точок з метою її ефективної апроксимації. Самим простим, але і самим поганим шляхом вирішення даної проблеми є прямий перебір усіх можливих комбінації точок (з метою побудови гіперпаралелепіпедів). Другий варіант – початкова обробка множини точок заради виділення групи так званих «граничних» точок, для яких одна з n координат буде найбільшою або найменшою в порівнянні з такою ж самою координатою всіх інших точок. Зрозуміло, що для будь-якої множини кількість таких точок буде рівна $2n$, тобто це будуть точки, які фактично лежать зверху цієї множини (тобто фактично її охоплюють).

На основі знайденої групи точок («граничних» точок) можна і будувати послідовність гіперпаралелепіпедів, які апроксимують дану множину точок найефективнішим способом. Зрозуміло, що все, що було сказано вище, буде знову ж справедливо при компактному розташуванні областей класів у просторі, інакше простий перебір може виявитися значно ефективнішим.

В даному алгоритмі гіперпаралелепіпедів, етап виділення «граничних» точок проводиться в два кроки, тобто після побудови першої групи і конструювання всіх можливих гіперпаралелепіпедів процес виділення «граничних» точок повторюється з залишеними точками в початковій множині. Фактично це нагадує процес подвійного чищення яблука, коли після зрізу кожухи ми знову ж умовно повторюємо весь процес чищення.

Така подвійна обробка НВ з метою побудови послідовності гіперпаралелепіпедів в деяких випадках дозволяє подолати проблему «невдалого» розташування областей класів в просторі та значно скоротити час роботи в порівнянні з повним перебором точок у множині.

Множину всіх сконструйованих гіперпаралелепіпедів на фіксованій множині точок (об'єктів) НВ позначимо через E .

Крок 2. Розрахунок потужностей знайдених гіперпаралелепіпедів повністю повторює подібний етап в алгоритмах гіперкуль та гіпереліпсів з визначенням потужності як кількості входжень об'єктів НВ в область відповідного гіперпаралелепіпеда. Виділивши з множини E гіперпаралелепіпед, який має найбільшу потужність, необхідно його перевірити на коректність – мається на увазі невходження точок іншого класу в його область. Якщо даний етап закінчиться успішно, то це буде означати, що перший елемент послідовності апроксимуючих гіперпаралелепіпедів (узагальнених ознак) нами знайдений. В такому випадку, по-перше, в НВ необхідно внести зміни: виключити з неї всі точки (об'єкти), які поглинаються знайденим гіперпаралелепіпедом, – по-друге, те ж саме зробити з ним і в множині E . Далі необхідно циклічно повернутися до другого етапу з метою побудови наступної узагальненої ознаки і продовжувати цей процес, доки не буде вичерпана множина E або всі об'єкти w_i НВ, для яких $f_r(w_i) = 0$.

У разі, коли гіперпаралелепіпед найбільшої потужності з множини E буде поглинати об'єкти класу H_1 (тобто буде відбракованим), то після виключення його з E знову ж необхідно повернутися до другого етапу.

Висновки. Зафіксуємо основні переваги запропонованих в роботі алгоритмічних реалізацій в порівнянні з іншими геометричними підходами:

- результат роботи алгоритму гіперпаралелепіпедів дозволяє легко побудувати ефективне та економічне правило класифікації для розпізнавання об'єктів;
- у викладеній схемі опису НВ враховується її обмежений характер, а точність результуючої схеми апроксимації можна регулювати в процесі її побудови;
- сама схема побудови послідовності гіперпаралелепіпедів не потребує складного математичного апарату, а сама модель алгоритму є водночас простою та ефективною;
- за допомогою послідовності гіперпаралелепіпедів над НВ легко проводити різні перетворення. У випадку зображень або сцен такими перетвореннями можуть бути геометричні перетворення; при цьому для роботи алгоритму достатньо мати лише діагоналі гіперпаралелепіпедів;
- викладена схема апроксимації НВ за допомогою гіперпаралелепіпедів в деяких випадках буде значно ефективнішою та економічнішою, ніж інші алгоритми (гіперкуль, гіпереліпсів).

Список літератури:

1. Повхан І.Ф. Метод розгалуженого вибору ознак в математичному конструюванні багаторівневих систем розпізнавання образів. *Науково технічний журнал "Штучний Інтелект"*. 2003. №7. С. 246-249.
2. Повхан І.Ф., Василенко Ю.А., Василенко Е.Ю. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі метода розгалуженого вибору ознак. *Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies"*. 2004. №7[1]. С. 13-15.
3. Повхан І.Ф. Визначення поняття ознаки в теорії розпізнавання образів. *Науково технічний журнал "Штучний Інтелект"*. 2002. №4. С. 512-517.
4. Василенко Ю.А., Ващук Ф.Г., Папп І.А. Апроксимація навчаючої виборки гіперпараллелепіпедами. *Науковий вісник УжДІЕП*. 1998. №2. С. 9-17.
5. Повхан І.Ф., Василенко Ю.А. Групова та індивідуальна оцінка важливості бульових аргументів. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. 2011. №53. С. 57-64.
6. Povhan I. General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects. *Збірник наукових праць «Електроніка та інформаційні технології»*. 2019. Випуск 11. С. 112-117.
7. Повхан І.Ф. Проблема функціональної оцінки навчальної вибірки в задачах розпізнавання дискретних об'єктів. *Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). № 6. С. 217–222.

**ЗАДАЧА АППРОКСИМАЦИИ ВЫБОРКИ ДИСКРЕТНЫХ НАБОРОВ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Работа посвящена важной задаче распознавания – аппроксимации дискретных наборов множеством геометрических объектов. Эффективная, экономная аппроксимация обучающей выборки позволяет обеспечить необходимые быстродействия, уровень сложности схемы классификации, что обеспечивает простое и полное распознавание дискретных объектов.

***Ключевые слова:** распознавание дискретных объектов, аппроксимация геометрическими объектами, функция распознавания, обобщенный признак.*

**THE PROBLEM OF APPROXIMATING A SAMPLE OF DISCRETE SETS
BY GEOMETRIC OBJECTS**

The work is devoted to the important problem of recognition – approximation of discrete sets by a set of geometric objects. Effective, economical approximation of the training sample allows providing the necessary speed, the level of complexity of the classification scheme, which provides a simple and complete recognition of discrete objects.

***Key words:** recognition of the discrete approximation of geometric objects, detection function, generalized basis.*

Полушкін Є.М.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ДЕАЕРАТОРІ

Деаераційна установка є частиною другого контуру енергоблоку АЕС. Одним з основних регульованих параметрів в деаeratorі є тиск в колонці деаератора. Управління деаератором здійснюється за допомогою цифрових ПІ-регуляторів на базі програмно-технічного комплексу АСР турбінного відділення. У статті досліджується автоматична система регулювання тиску в деаeratorі.

Ключові слова: АЕС, Деаератор, АСР, ПІ-регулятор, тиск.

Постановка проблеми. Деаераційна установка є одним з основних компонентів системи живильної води. Деаераційна установка призначена для деаерації основного конденсату, який надходить від регенеративних підігрівачів низького тиску (ПНТ), шляхом нагріву його до температури насичення за допомогою пару з нерегульованого відбору турбіни, також деаератор використовується для підігріву живильної води. Принцип деаерації полягає в тому, що з підвищенням температури води при постійному тиску розчинність газів зменшується і при температурі кипіння стає рівною нулю.

Деаераційна установка відноситься до систем важливих для безпеки.

У воді конденсатно-живильного тракту присутні різні газоподібні домішки (кисень, вуглекислота, азот, аміак), які поступають в основному за рахунок присосів повітря в конденсаторі і в перших ПНТ, що працюють при тиску нижче атмосферного. Найбільшу небезпеку представляють кисень і вуглекислота, що є корозійно-агресивними агентами. Присутність у воді домішок викликає ряд фізико-хімічних процесів, перш за все взаємодію їх із конструкційними матеріалами і посилення протікання корозійних процесів із винесенням продуктів корозії у воду. Це знижує економічність, надійність і безпеку роботи АЕС. Тому використання термічної деаерації є обов'язковим в схемі АЕС. Деаератори дозволяють видаляти з води будь-які розчинені в ній гази і не вносять жодних додаткових домішок до води. Деаератор є важливим елементом теплової схеми і окрім функції видалення з води агресивних газів, забезпечує також підігрівши води, виконує функції демпфуючої ємкості і надійної подачі живильної води до живильної установки блоку.

Робота деаератора заснована на принципі термічної деаерації, що полягає в тому, що при температурі рідини, рівній температурі насичення при заданому тиску, розчинність газів в рідині стає рівною нулю.

За термічної деаерації відношення температури води до температури насичення має бути витримане з високою точністю, так як при недогріванні усього на 1°C градус вода може містити кисень в кількостях, перевищуючих допустимі норми.

Необхідний нагрів води до температури насичення при тиску в деаeratorі не контролюється, він забезпечується за рахунок розпилювання та змішування деаерованого конденсату з гріючим паром за умови збереження в деаeratorі постійного тиску.

У режимі номінальної потужності основний конденсат поступає у верхню частину деаераційних колонок в камеру змішувача. Далі конденсат розподіляється по дірчастих тарілках і водоспрямовуючих листах, проходить через барботажний пристрій і прямує в бак акумулятор.

Гріюча пара заводиться колектором в нижню частину деаераційної колонки. Усередині деаератора паровий колектор перфорований і паровий потік прямує з нижньої частини деаераційної колонки у верхню.

Основний конденсат поступає з верхньої частини деаераційної колонки в нижню. Контактуючи напряму з паровим потоком конденсат нагрівається і досягаючи температури насичення виділяє розчинені у воді гази.

Гази разом із паровим потоком через відвідний колектор як робоче тіло прямують у ежекторні групи турбоустановки і потім видаляються в атмосферу.

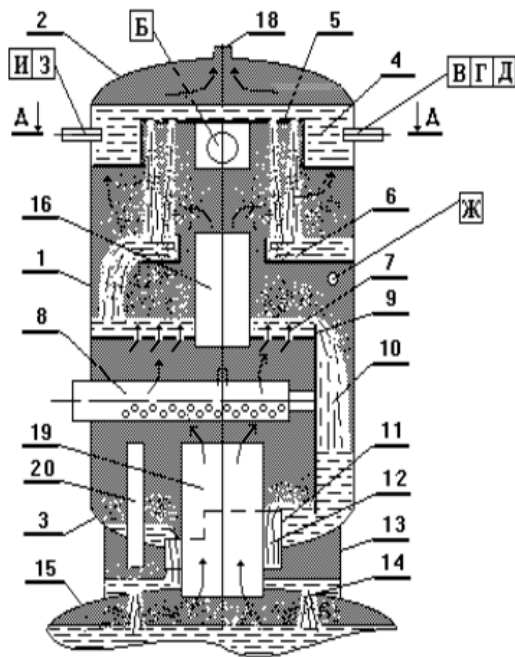


Рис. 1. Деаераційна колонка

Деаераційна колонка (рисунок 1) – струменево-барботажного типу, складається з циліндричного корпусу 1 з привареними до нього верхнім 2 і нижнім 3 днищами, чотирьох водоприймальних камер 4, струменевої тарілки 5, переливної тарілки 6 барботажного листа 7 і перфорованого колектора підведення пари, що гріє 8.

У верхню частину Деаераційної колонки заведені такі «холодні» потоки:

- «Б» – основний конденсат після ПНД, сепаратор СПП, конденсат ТК (Загальним трубопроводом)

- «Г» – хімобезсолена вода з БЗК

У нижню частину Деаераційної колонки підводиться гріючий пар. У колектор гріючого пара деаератору підводиться випар з розширювача продування ПГ.

У верхній частині Деаераційної колонки через штуцер 18 проводиться відведення випару деаератору з видаленням корозійно активних газів в атмосферу, РДМЗ або ПНД-2.

Термічна деаерація води в колоні здійснюється наступним чином.

Основний конденсат та інші «холодні» потоки надходять у водоприймальні камери 4, що утворюють гідро затвори для запобігання потрапляння пара у підвідні трубопроводи, і звідти на перфоровану струйну тарілку 5. Вода через перфорацію тарілки стікає на переливну тарілку 6. З переливної тарілки потік води направляється на початок барботажного листа 7, проходить по ньому і зливається в канал 10. Далі вода через

гідрозатвор, утворений стінкою каналу 10, зливається через кільцевої зазор 12 в перехідній штуцер 13, а потім через отвір 14 потрапляє в бак 15.

Гріючий пар подається по перфорованому колектору 8 під барботажний лист, проходить через отвори барботажного листа і крім нього через пароперепускную трубу 16 і потрапляє в струменевий відсік. Потім потік пара проходить струї води, конденсуючись в них.

Виділені з води гази і несконденсований пар в відсіках пар через канали 17, утворені бортами струменевої тарілки і корпусом колонки, потрапляють у верхню частину колонки, і відводяться у вигляді випару через штуцер 18. У струменевому відсіку здійснюється підігрів води паром до температури, близької до температури насичення, що відповідає тиску в колонці, і часткова дегазація води. На барботажному листі відбувається інтенсивна обробка води паром і її глибока дегазація.

У баку відбувається залишкова деаерація води, а саме: виділяється дисперсний кисень і відбувається розкладання бікарбонатів. Вентиляція парового простору бака відбувається в колонки через патрубков 19. Вентиляція перехідного штуцера 13 відбувається в колонку через сім спеціальних вентиляційних труб 20.

Виділені з води гази і несконденсований пар безперервно відводяться у вигляді випару з верхніх частин деаераційних колонок.

Постановка завдання. Забезпечення без кавітаційної роботи турбо-живильного насоса за рахунок забезпечення якості регулювання параметрів в деаераторі.

Для досягнення цілі були вирішені наступні завдання:

При автоматичному регулюванні деаератора виникають дві задачі: стабілізація стану насичення в головці і рівня води в баку. Таким чином, деаератор як об'єкт управління має дві регульовані величини: тиск і рівень. Збурюючими діями на тиск є тиск гріючої пари, витрата і температура конденсату. Збурюючими діями на рівень є витрата пари, конденсату і живильної води. Регулюючим чинником для стабілізації тиску є витрата гріючого пару (рис. 2).

Регулювання тиску в колонці деаератора здійснюється зміною витрати гріючої пари шляхом дії на РК подачі гріючої пари в деаератор.

Сигнал від датчика вимірювання тиску, дифманометра, поступає на регулятор тиску в деаераторі і порівнюється із завданням. Регулятор формує сигнал непогодження і команду виконавчому механізму на зміну витрати гріючої пари.

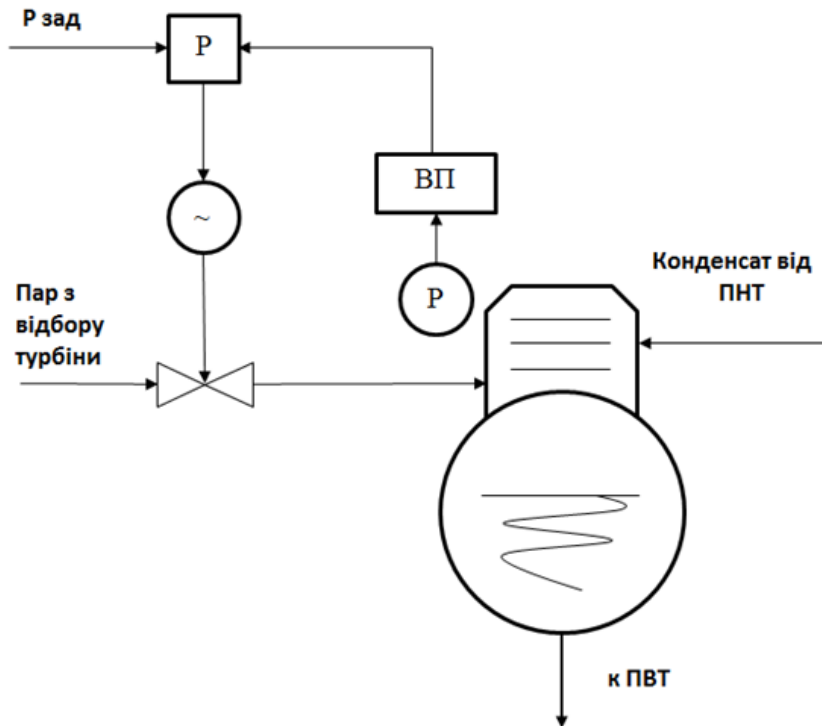


Рис. 2. Принципова схема регулювання тиску в деаераторі

Виклад основного матеріалу. Математична модель системи регулювання.

Параметрична схема технологічного об'єкту управління приведена на рисунку 3.

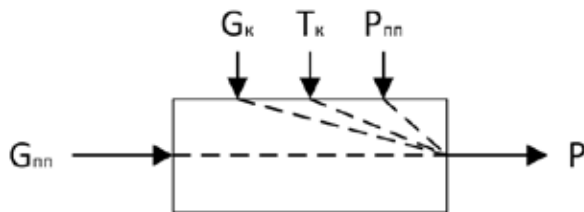


Рис. 3. Параметрична схема ТОУ

До об'єкту управління входять ділянки паропроводу від регулюючого клапана до деаератора і паровий об'єм деаератора.

Збурюючими впливами на тиск пари у голівці деаератора є такі:

- зміна витрати конденсату ΔG_k ;
- зміна температури конденсату ΔT_k ;
- зміна тиску пари $\Delta P_{пн}$ у відборі турбіни перед клапаном.

Регулюючим впливом є зміна витрати пари $\Delta G_{пн}$.

Для виведення рівняння динаміки деаератора по тиску пари запишемо рівняння збереження енергії для парового простору:

$$d[(V_n - V_k) \cdot \rho'' \cdot i''] / dt = M_n \cdot (i_n - i') + Q_u - M_c \cdot i'' - M_k \cdot (i' - i_k),$$

де V_n, V_k – об'єм парового простору і водяних крапель в ньому відповідно ;

M_n, M_k, M_c – масова витрата пари, конденсату і пароводяної суміші;

Q_u – кількість теплоти, що поступає в паровий простір за рахунок самовипаровування конденсату;

i'', i', i_n, i_k – ентальпія сухої насиченої пари, води на лінії насичення, пари і конденсату;

ρ'' – густина насиченої пари.

При цьому акумуляцією теплоти в металі нехтуємо. Оскільки рівень живильної води в баку, як правило, стабілізується автоматичним регулятором, то впливом рівня води на об'єм V_p також нехтуємо.

Запишемо рівняння у відхиленнях:

$$(V_n - V_k) \cdot d(\rho'' \cdot i'') / dt + \rho'' \cdot i'' \cdot (dV_n / dt) = (i_n - i') \cdot \Delta M_n - i'' \cdot \Delta M_c - (i' - i_k) \cdot \Delta M_k + M_n \cdot \Delta i_n + (M_n + M_k) \cdot \Delta i' - M_c \cdot \Delta i'' + M_k \cdot \Delta i_k + Q_u$$

У цьому рівнянні густина і ентальпія насиченої пари визначаються тиском пари P_d в деаераторі. Ентальпія пари визначається тиском в камері відбору турбіни. Ентальпія конденсату $i_k = c \cdot t_k$, де c – питома теплоємність конденсату.

Витрата теплоти за рахунок самовипаровування конденсату змінює свою величину і знак залежно від напрямку зміни тиску dP_d/dt . При під-

вищенні тиску в деаераторі частина закумульованої пари в ньому конденсується, відносячи в одиницю часу з парового простору у водяне кількість теплоти

$$\Delta Q_u = (V_g * \rho' * i' / r) * (di' / dP_\partial) * dP_\partial / dt$$

де r – питома теплота паротворення;

V_g – об'єм перегрітої води.

Отже, можна записати:

$$Q_u = -A * dP_\partial / dt,$$

де $A = (V_n - V_k) * \rho'' * di'' / dP_\partial$ при $dP_\partial / dt > 0$;

$A = (V_g * \rho' * i' / r) * (di' / dP_\partial)$ при $dP_\partial / dt < 0$.

Таким чином, деаератор є нелінійним об'єктом регулювання. Витрата пароводяної суміші в атмосферу залежить від тиску в деаераторі.

З урахуванням того, що в рівноважних режимах $(i' - i_k) * M_k = (i_n - i'') * \overline{M}_n$, одержимо:

$$T * \Delta P' + \Delta P = K_n * \Delta M_n - K_k * \Delta M_k + K_p * \Delta P_n + K_t * \Delta t_k,$$

де $T = T_\partial / Z_\partial$;

$$T_\partial = [(V_n - V_k) * \partial(\rho'' * i'') / \partial P + Ai] * \overline{P} / [(i' - i_k) * M_k];$$

$$Z_\partial = [(M_n + M_k) * di' / dP + \partial(M_c * i'') / \partial P] * \overline{P} / [(i' - i_k) * M_k];$$

$$K_n = \overline{P} / Z_\partial * \overline{M}_n;$$

$$K_k = \overline{P} / Z_\partial * \overline{M}_k;$$

$$K_p = (di_{omb} / dP_{omb}) * \overline{P}_{omb} * \overline{M}_n / [(i' - i_k) * M_k * Z_\partial];$$

$$K_t = i_k * \overline{P} / [(i' - i_k) * Z_\partial * t_k];$$

де i_{omb} , P_{omb} – ентальпія і тиск пари у відборі турбіни.

Отже, динаміка деаератора по всіх чотирьох каналах описується диференційним рівнянням 1-го порядку.

Оскільки регулюючий клапан встановлюється на паропроводі на деякій відстані від колонки деаератора, то ділянка паропроводу від РК до деаератора є динамічною ланкою з передавальною функцією $W_m(S)$.

$$W_m(S) = \frac{1}{Ts + 1},$$

де $T = T_n * \alpha_n * \overline{D} / P_e$;

$$\alpha_n = 2 * Kl * D.$$

Побудуємо модель автоматичної системи регулювання тиску (рисунок 4).

Передавальна функція РК визначається по витратній характеристиці клапана. Виведемо передавальну функцію клапана по каналу тиску пари.

Витрата пари через РК визначається виразом:

$$D = \alpha_{кл} * S_{кл} * \sqrt{2 * pn(Pn - P\partial)}.$$

Залежність витрати пари від тиску нелінійна. Після лінеаризації одержимо:

$$Kp = \frac{\alpha_{кл} * S_{кл} * \sqrt{pn}}{\sqrt{2 * (Pn - P\partial)}},$$

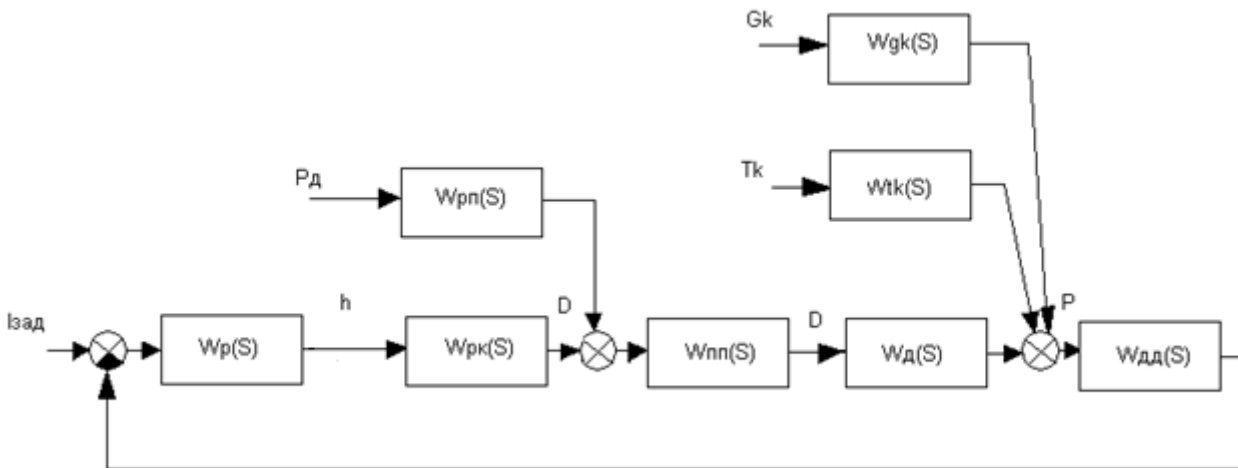


Рис. 4. Структурна схема АСР тиску в деаераторі

- де $W_p(S)$ – передавальна функція регулятора;
- h – переміщення клапану
- $W_{pk}(S)$ – передавальна функція Регулюючого клапану;
- $W_{pn}(S)$ – передавальна функція Регулюючого клапану по тиску пари;
- $W_{pp}(S)$ – передавальна функція паропроводу;
- $W_d(S)$ – передавальна функція деаератора по витраті пари;
- $W_{dd}(S)$ – передавальна функція вимірювального перетворювача;
- $W_{gk}(S)$ – передавальна функція деаератора по витраті конденсату;
- $W_{tk}(S)$ – передавальна функція по температурі конденсату.

Передавальна функція вимірювального перетворювача:

$$W_{BM}(S) = K_{BM} = \frac{\Delta I}{\Delta P_{max}}$$

Побудуємо структурну схему АСР з урахуванням коефіцієнтів в середовищі Matlab Simulink.

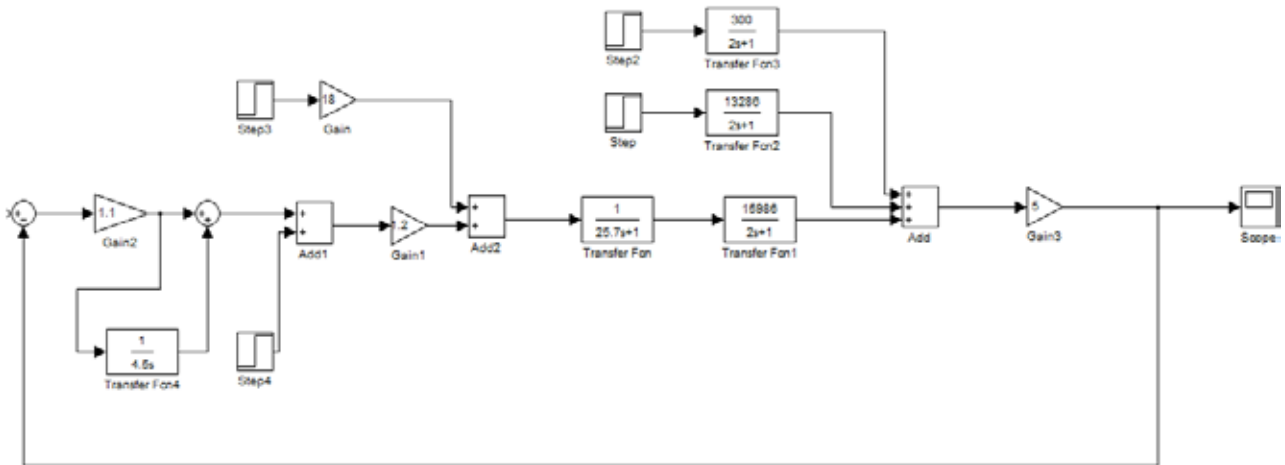


Рис. 5. Структурна схема замкнutoї АСР тиску в деаераторі з ПІ-регулятором

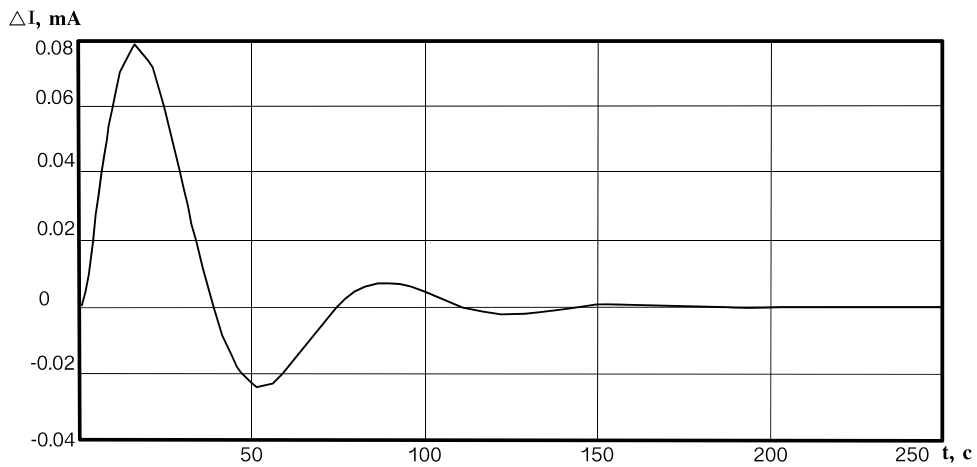


Рис. 6. Графік перехідного процесу регулювання при збуренні по каналу G_p

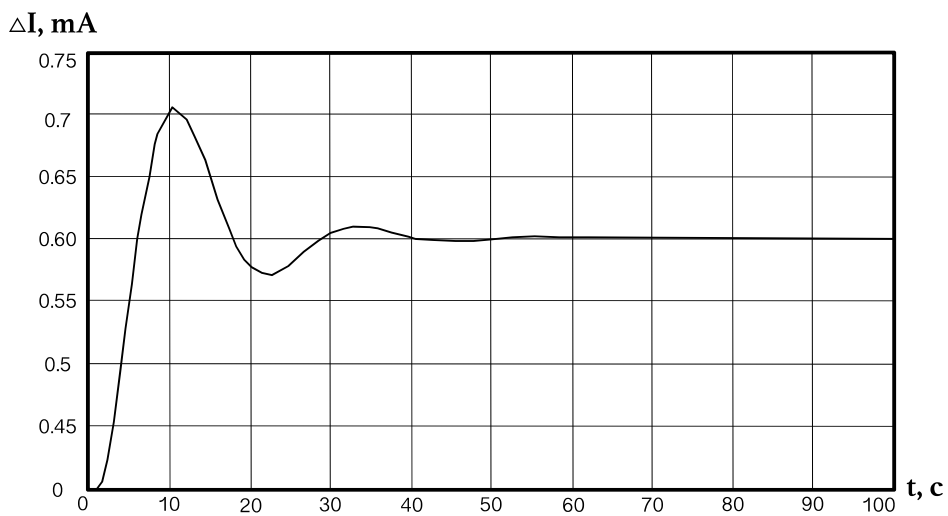


Рис. 7. Графік перехідного процесу регулювання тиску по каналу G_p

Висновки. У роботі було розглянуто технологічний об'єкт регулювання, такий як деаераційна установка, яка є частиною другого контура енергоблоку АЕС. Було розглянуто принцип роботи деаераційної установки та технологічні параметри деаератора які регулюються. Також була розглянута параметрична схема технологічного об'єкту управління.

В результаті роботи була забезпечена без кавітаційна робота турбо-живильного насоса за рахунок забезпечення якості регулювання параметрів в деаераторі, та розроблена автоматизована система регулювання тиску в деаераційній установці в якій управління деаератором здійснюється за допомогою цифрового ПІ-регулятора.

Список літератури:

1. Плетньов Г.П. Автоматизоване управління об'єктами теплових електростанцій. Москва : Енергоіздат, 1981. 159 с.
2. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. Вип. 6. 19 с.
3. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Вісник вишів. Серія: Ядерна енергетика*. 2008. Вип. 4. С. 128–139.
4. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2007. Вип. 2 (28). С. 56–59.
5. Сучасні технології управління: монографія: в 2 т. / за заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
6. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2002. Вип. 2(22). С. 29–56.
7. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18–24.
8. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія: Технічні науки. 2018. Вип. 29 (68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ДЕАЭРАТОРЕ

Деаэрационная установка является частью второго контура энергоблока АЭС. Одним из основных регулируемых параметров в деаэраторе является давление в колонке деаэратора. Управление деаэратором осуществляется с помощью цифровых ПИ-регуляторов на базе программно-технического комплекса АСР турбинного отделения. В статье исследуется автоматическая система регулирования давления в деаэраторе.

Ключевые слова: АЭС, Деаэратор, АСР, ПИ-регулятор, давление.

THE AUTOMATIC SYSTEM OF ADJUSTING OF PRESSURE IN A DEAERATOR

A deaerating plant is part of the second contour of power unit of nuclear power plant. One of the basics managed parameter in a deaerator is pressure in the column of deaerator. Deaerator management is carried out by digital pi-regulators on the base of software-hardware complex of automated control system of the turbine department. The automated control system of pressure in a deaerator is explored in the article.

Key words: nuclear power plant, deaerator, automated control system, pi-regulator, pressure.

Приходько Н.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Макарова Л.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кудін О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ РОБІТ У СУДНОБУДІВНИХ ПРОЕКТАХ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНОГО НОРМАЛІЗУЮЧОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЖОНСОНА

У статті вперше побудовано нелінійну регресійну модель для оцінювання трудомісткості робіт з розробки конструкторської документації суден на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB. Двовимірне нормалізуюче перетворення Джонсона враховує кореляцію між випадковими змінними двовимірного негаусівського вектору трудомісткості робіт. Використання двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB дозволяє зменшити довірчі інтервали і інтервали передбачення нелінійної регресії у порівнянні з одновимірним нормалізуючим перетворенням Джонсона сімейства SB та одновимірним нормалізуючим перетворенням на основі десятичного логарифму. Це дає змогу підвищити достовірність оцінювання трудомісткості робіт в проектах розроблення конструкторської документації суден.

Ключові слова: нелінійна регресійна модель, інтервал передбачення нелінійної регресії, двовимірні негаусівські дані, двовимірне нормалізуюче перетворення Джонсона, конструкторська документація судна.

Постановка проблеми. Під час управління часом проектів розроблення конструкторської документації (далі – КД) суден трапляються випадки низької достовірності оцінювання трудомісткості проектно-конструкторських робіт і проектів загалом. Низька достовірність оцінювання трудомісткості робіт обумовлена впливом випадкових зовнішніх факторів та використанням для оцінювання експертного методу, оснований на власному досвіді менеджера проектів. Наприклад, при розробці КД для однієї з секцій судна планова трудомісткість дорівнювала 32 годинам, а фактична трудомісткість склала 98 годин. Враховуючи наявність випадкових впливів та помилок в оцінюванні трудомісткості, виникає потреба у розробці математичних моделей, які б дозволили підвищити достовірність оцінювання трудомісткості робіт з розробки конструкторської документації (КД) суден. Однієї з таких математичних моделей, яка дозволить це зробити, є нелінійна регресійна модель, що містить випадкову складову.

Отже підвищення достовірності оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД суден на основі побудови нелінійних регресійних моделей є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Під час побудови нелінійних регресійних моделей використовуються два підходи. Або методом перебору знаходять нелінійну функцію регресії та на її основі будують нелінійну регресійну модель, або знаходять такі попередні перетворення випадкових змінних регресії (нормалізуючі перетворення), які дозволяють отримати близький до лінійного зв'язок між нормалізованими змінними [1–3].

Під час створення нелінійних регресійних моделей для двовимірних негаусівських даних (наприклад, COCOMO, ISBSG) використовуються відомі нормалізуючі перетворення на основі десятичного логарифму [5–8] або нормалізуючі перетворення Джонсона [9]. Але ці методи базуються на одновимірних нормалізуючих перетвореннях, які не враховують кореляції між двовимірними випадковими величинами [1].

Використання багатовимірних нормалізуючих перетворень з урахуванням кореляції між негаусівськими випадковими величинами для побудови нелінійних регресійних моделей, як правило, приводить до зменшення ширин довірчих інтервалів і інтервалів передбачення нелінійної регресії [4].

Враховуючи те, що дані по трудомісткості робіт з розробки КД суден є негаусівськими, виникає необхідність у побудові відповідної нелінійної регресійної моделі для оцінювання трудомісткості робіт на основі багатовимірних нормалізуючих перетворень.

Нині розроблено метод [4, с. 101] для побудови нелінійних регресійних моделей на основі багатовимірних нормалізуючих перетворень. Цей метод в загальному випадку вимагає використання обернених матриць. Для двовимірних негаусівських даних побудову нелінійних регресійних моделей можна спростити так же само, як це було зроблено при побудові нелінійних регресійних рівнянь [2].

Постановка завдання. Метою роботи є побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден на основі двовимірного перетворення Джонсона сімейства SB з урахуванням кореляції між трудомісткістю робіт і масою секцій корпусів суден, що дозволить зменшити ширину довірчих інтервалів та інтервалів передбачення нелінійної регресії у порівнянні з існуючими моделями на основі одно-вимірних нормалізуючих перетворень і підвищити достовірність оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден при управлінні часом в проектах розробки КД суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден складається з трьох етапів. На першому етапі виконується нормалізація вектора $\mathbf{P} = \{X, Y\}^T$ до гаусівського випадкового вектора $\mathbf{T} = \{Z_X, Z_Y\}^T$ на основі нормалізуючого перетворення

$$\mathbf{T} = \Psi(\mathbf{P}), \quad (1)$$

яке має зворотне перетворення

$$\mathbf{P} = \Psi^{-1}(\mathbf{T}). \quad (2)$$

На другому етапі виконується побудову лінійної регресійної моделі, яку можна представити у вигляді:

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_X + \varepsilon, \quad (3)$$

де \hat{Z}_Y – результат передбачення лінійної регресії для Z_X ; \hat{b}_0, \hat{b}_1 є оцінками для параметрів лінійної регресії b_0, b_1 ; ε – випадкова складова або похибка з нормальним законом розподілу.

На цьому етапі будують також інтервали передбачення лінійної регресії на основі рівняння [6]:

$$Z_{Y_{in}} = \hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, N-2} S_{Z_Y} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(Z_{X_i} - \bar{Z}_X)^2}{S_{Z_X Z_X}}}, \quad (4)$$

де $t_{\alpha/2, N-2}$ – квантиль t-розподілу Стюдента з $\frac{\alpha}{2}$ рівнем значимості і $N-2$ ступенями сво-

$$\text{боди; } S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_{Y_i} - \bar{Z}_Y)^2; \quad \bar{Z}_Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{Z}_{Y_i};$$

$$S_{Z_X Z_X} = \sum_{i=1}^N (Z_{X_i} - \bar{Z}_X)^2.$$

На третьому етапі виконується побудова нелінійної регресійної моделі трудо+місткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден та її інтервалів передбачення Y_{in} на основі зворотного перетворення (2):

$$Y = \psi^{-1} \left[\hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_X + \varepsilon \right]; \quad (5)$$

$$Y_{in} = \psi^{-1} \left[\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, N-2} S_{Z_Y} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(Z_{X_i} - \bar{Z}_X)^2}{S_{Z_X Z_X}}} \right]. \quad (6)$$

У якості двовимірного нормалізуючого перетворення (1) використано перетворення Джонсона, яке має вигляд:

$$\mathbf{T} = \gamma + \eta \mathbf{h}[\lambda^{-1}(\mathbf{P} - \phi)] \sim N_m(0_m, \mathbf{S}), \quad (7)$$

де $\gamma, \eta, \phi, \lambda$ – параметри перетворення Джонсона; $\gamma = (\gamma_X, \gamma_Y)^T$; $\eta = \text{diag}(\eta_X, \eta_Y)$; $\phi = (\phi_X, \phi_Y)^T$; $\lambda = \text{diag}(\lambda_X, \lambda_Y)$; $\mathbf{h}[(g_X, g_Y)] = \{h_1(g_X), h_2(g_Y)\}^T$, а $h_i(\cdot)$ – одна з функцій перетворення:

$$h(g) = \begin{cases} \ln(g), & \text{для сімейства } S_L; \\ \ln[g/(1-g)], & \text{для сімейства } S_B; \\ \text{Arsh}(g), & \text{для сімейства } S_U; \\ g, & \text{для сімейства } S_N; \end{cases}$$

\mathbf{S} – коваріаційна матриця

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{Z_X}^2 & S_{Z_X Z_Y} \\ S_{Z_X Z_Y} & S_{Z_Y}^2 \end{pmatrix}.$$

$$\text{В (7) } g = (x - \phi)/\lambda; \quad \text{Arsh}(g) = \ln(g + \sqrt{g^2 + 1}).$$

Побудова нелінійної регресійної моделі. При побудові нелінійної регресійної моделі для оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB використано дані з табл. 1.

Оцінки параметрів перетворення Джонсона здійснено методом максимальної правдоподібності з використанням логарифмічної функції максимальної правдоподібності, яка отримана на основі щільності двовимірного розподілу Джонсона сімейства SB.

Щільність двовимірного розподілу Джонсона сімейства SB з урахуванням кореляції має вигляд:

$$F_B(Y, X) = \frac{\eta_X \eta_Y \lambda_X \lambda_Y}{2\pi (X - \phi_X)(Y - \phi_Y)(\lambda_X + \phi_X - X)(\lambda_Y + \phi_Y - Y) \sqrt{1 - S_{Z_Y}^2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 - S_{Z_X Z_Y}^2} [Z_X^2 + Z_Y^2 - 2S_{Z_X Z_Y} Z_X Z_Y] \right] \right\}. \quad (8)$$

Таблиця 1

Вхідні дані для побудови нелінійної регресії

Маса секцій (т)	Тривалість робіт (години)	Маса секцій (т)	Тривалість робіт (години)	Маса секцій (т)	Тривалість робіт (години)
6,15	20	64,58	49	144,78	124
13,08	34	67,24	65	145,69	112
24,83	31	86,64	98	148,06	84
33,97	16	90,32	21	159,06	103
34,15	24	90,43	50	163,5	36
35,07	69	91,25	64	164,27	71
37,07	17	95,31	44	166,01	121
37,14	17	96,54	48	168,53	52
37,15	12	98,35	55	168,68	82
37,22	18	101,06	44	174,14	53
37,25	13	102,35	53	179,03	17
37,65	12	103,14	58	180,14	95
39,81	31	105,19	42	180,94	111
44,15	26	107,37	93	187,88	79
44,36	34	110,69	107	196,15	62
52,39	74	112,36	43	206,16	79
53,91	48	125,43	78	216,81	30
61,13	54	140,51	70	217,82	38

На основі (8) отримано логарифмічну функцію правдоподібності у вигляді:

$$L_B(\theta) = n \ln \eta_X + n \ln \eta_Y + n \ln \lambda_X + n \ln \lambda_Y - n \ln 2\pi - \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \phi_X) - \sum_{i=1}^n \ln(y_i - \phi_Y) - \sum_{i=1}^n \ln(\lambda_X + \phi_X - x_i) - \sum_{i=1}^n \ln(\lambda_Y + \phi_Y - y_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \ln(1 - S_{Z_X Z_Y}^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{1 - S_{Z_X Z_Y}^2} [Z_{X_i}^2 + Z_{Y_i}^2 - 2S_{Z_X Z_Y} Z_{X_i} Z_{Y_i}] \right\}. \quad (9)$$

Після нормалізації двовимірного негаусівського вектора на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB і побудови лінійної регресійної моделі виконано побудову нелінійної регресійної моделі для оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден, яка має вигляд:

$$Y = \hat{\phi}_Y + \hat{\lambda}_Y \left[1 + e^{-\frac{(\hat{h}_0 + \hat{h}_X Z_X + \varepsilon - \hat{\gamma}_Y)}{\hat{h}_Y}} \right]^{-1}, \quad (10)$$

де ε – гаусівська випадкова величина з математичним сподіванням 0 і дисперсією 1.

За методом максимальної правдоподібності з використанням функції (9) для двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB отримано наступні оцінки параметрів: $\hat{\gamma}_X = 0,2651$; $\hat{\eta}_X = 0,7792$; $\hat{\phi}_X = 6,209$; $\hat{\lambda}_X = 230,728$; $\hat{\gamma}_Y = 0,0446$; $\hat{\eta}_Y = 0,3808$; $\hat{\phi}_Y = 30,9$; $\hat{\lambda}_E = 48,2$. Оцінки

параметрів лінійної регресії для нормалізованих даних за цим перетворенням знайдено за методом найменших квадратів: $\hat{b}_0 = 0$; $\hat{b}_1 = 0,5055$.

Результати побудови нелінійної регресії за моделлю (10) наведено на рис. 1.

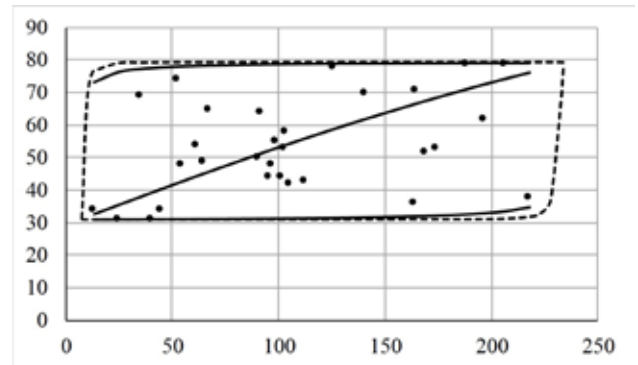


Рис. 1. Нелінійна регресія, побудована з використанням двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB

На рис. 1 по осі абсцис відкладено масу секцій корпусів суден (тони), а по осі ординат – трудомісткість робіт з розробки КД цих секцій (години). Колами позначено вхідні данні. Суцільними лініями зображено відповідну нелінійну регресію і інтервали передбачення цієї регресії, пунктиром – трансформований еліпс передбачення.

Для порівняння отриманих результатів були побудовані відповідні нелінійні регресійні моделі на основі одновимірних нормалізуючих перетворень: у вигляді десяткового логарифму та Джонсона сімейства SB та нормалізуючого перетворення з використанням десяткового логарифму. Результати побудови нелінійних регресій за моделями, що побудовані на основі зазначених одновимірних нормалізуючих перетворень, наведено на рис. 2 і рис. 3.

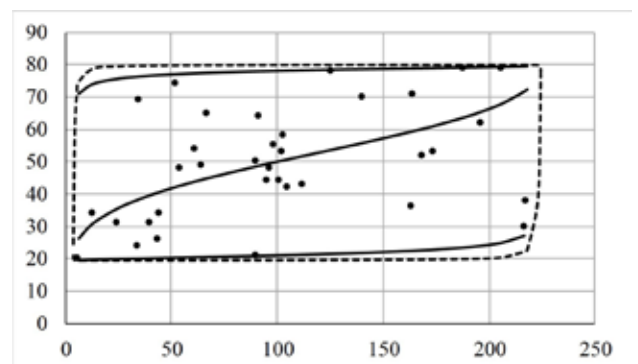


Рис. 2. Нелінійна регресія, побудована з використанням одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB

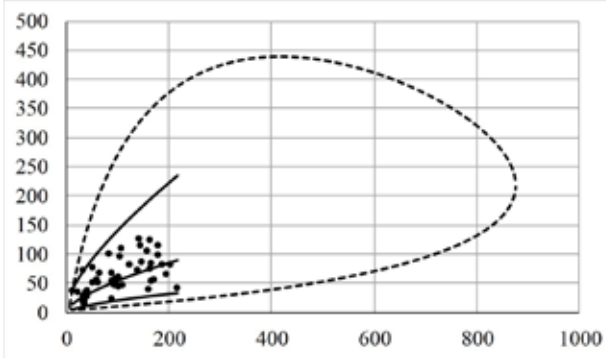


Рис. 3. Нелінійна регресія, побудована з використанням нормалізуючого перетворення на основі десяткового логарифму

На рис. 2, 3, як і на рис. 1, по осі абсцис відкладено масу секцій корпусів суден (тони), а по осі ординат – трудомісткість робіт з розробки КД цих секцій (години). Колами позначено вхідні данні. Суцільними лініями зображено відповідну нелінійну регресію і інтервали передбачення цієї регресії, пунктиром – трансформований еліпс передбачення.

За методом максимальної правдоподібності для одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB отримано такі оцінки параметрів: $\hat{\gamma}_X = 0,1554$; $\hat{\eta}_X = 0,626$; $\hat{\phi}_X = 3,0683$; $\hat{\lambda}_X = 221,9643$; $\hat{\gamma}_Y = -0,0105$; $\hat{\eta}_Y = 0,5302$; $\hat{\phi}_Y = 0,19,4724$; $\hat{\lambda}_Y = 60,3176$. Оцінки параметрів лінійної регресії для нормалізованих даних за цим перетворенням знайдено за методом найменших квадратів: $\hat{b}_0 = 0$; $\hat{b}_1 = 0,4467$.

Як можна побачити з рис. 1-3 Найменша ширина інтервалу передбачення нелінійної регресії є у випадку використання двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства S_B (рис. 1). На початку нелінійної регресії ширина інтервалів передбачення, побудованих на основі двовимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , менше на 17,79% відносно ширини інтервалів передбачення, побудованих на основі одно-

вимірного перетворення Джонсона сімейства S_B , в середині нелінійної регресії – менше на 16,82%, в кінці нелінійної регресії – менше на 14,72%. Приблизно такі ж результати отримано для ширин довірчих інтервалів регресії. Нелінійна регресійна модель на основі двовимірного перетворення Джонсона сімейства S_B виявилась кращою у порівнянні з моделями на основі одновимірних перетворень також за середньою відносною похибкою MMRE і процентом передбачених значень $\text{Pred}(0,25)$. Для двовимірного перетворення Джонсона $\text{MMRE} = 0,2266$ і $\text{Pred}(0,25) = 0,6667$. Для одновимірного перетворення Джонсона $\text{MMRE} = 0,3028$ і $\text{Pred}(0,25) = 0,6571$. Для перетворення на основі десяткового логарифму $\text{MMRE} = 0,4016$; $\text{Pred}(0,25) = 0,4118$.

У випадку двовимірного нормалізуючого перетворення розмір трансформованого еліпсу передбачення менше трансформованих еліпсів передбачення, побудованих на основі одновимірних нормалізуючих перетворень. Найбільший трансформований еліпс передбачення отримано для перетворення на основі десяткового логарифму. Отримані результати пояснюються кращою нормалізацією і врахуванням кореляції між випадковими величинами при використанні двовимірного нормалізуючого перетворення.

Висновки. *Вперше* побудовано нелінійну регресійну модель для оцінювання трудомісткості робіт з розробки КД секцій корпусів суден на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сімейства SB, що дозволяє зменшити ширину інтервалів передбачення нелінійної регресії і підвищити достовірність оцінювання трудомісткості робіт при управлінні часом проєктів розробки КД суден у порівнянні з моделями, що отримані за одновимірними нормалізуючими. В подальшому планується побудова відповідних нелінійних регресійних моделей за іншими наборами даних.

Список літератури:

1. Гур'янова Л.С., Клебанова Т.С., Сергієнко О.А., Прокопович С.В. Економетрика : навчальний посібник. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. 384 с.
2. Prykhodko S.B., Prykhodko N.V., Makarova L.M., Kudin O.O., Smykodub T.G. Constructing non-linear regression equations on the basis of bivariate normalizing transformations. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон: ХНТУ, 2017. Вип. 3(62). Т. 1. С. 333–337.
3. Pardoe Iain. *Applied regression modelling*. Wiley, 2012. 325 p.
4. Prykhodko N.V., Prykhodko S.B. Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations. *Electronic modeling*. 2018. Т. 40. № 6. С. 99–108.
5. Oligny S, Bourque P, Abran A., Fournier B. Exploring the relation between effort and duration in software engineering projects. *In proc. of the World Computer Congress*, Aug. 2000. P. 175–178.
6. Bates D.M., Watts D.G. *Nonlinear regression analysis and its applications*. Wiley, 1988. 384 p.
7. Ryan T.P. *Modern regression methods*. Wiley, 1997. 529 p.

8. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear regression. John Wiley & Sons, Inc., 2003. 792 p.
9. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied multivariate statistical analysis. Pearson Prentice Hall, 2007. 800 p.
10. Приходько С.Б., Пухалевич А.В. Confidence interval estimation of PC software project duration regression based on Johnson transformation. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. Харків : Харківський авіаційний інститут, 2014. № 2 (66). С. 104–107.

НЕЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ РАБОТ В СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО НОРМАЛИЗИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЖОНСОНА

В статье впервые построена нелинейная регрессионная модель для оценивания трудоемкости работ по разработке конструкторской документации судов на основе двумерного нормализующего преобразования Джонсона семейства SB. Двумерное нормализующее преобразование Джонсона семейства SB учитывает корреляцию между случайными переменными двумерного негауссовского вектора трудоемкости работ. Использование двумерного нормализующего преобразования Джонсона семьи SB позволяет уменьшить доверительные интервалы и интервалы предсказания нелинейной регрессии по сравнению с одномерным нормализующим преобразованием Джонсона семейства SB и одномерным нормализующим преобразованием на основе десятичного логарифма. Это дает возможность увеличить достоверность оценивания трудоемкости работ в проектах разработки конструкторской документации судов.

Ключевые слова: нелинейная регрессионная модель, интервал предсказания нелинейной регрессии, двумерные негауссовские данные, двумерное нормализующее преобразование Джонсона, конструкторская документация судна.

NON-LINEAR REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING THE EFFORT OF WORKS IN SHIPBUILDING PROJECTS BASED ON THE JONSON BIVARIATE NORMALIZING TRANSFORMATION

Non-linear regression model for estimating the effort of works of the ship design documentation development based on the Johnson bivariate normalizing transformation of SB family is firstly built. The Johnson bivariate normalizing transformation of SB family takes into account the correlation between the random variables of the bivariate non-Gaussian vector of the effort of works. Using the Johnson bivariate normalizing transformation of the SB family allows to reduce the confidence and prediction intervals of the non-linear regression compared to the Johnson univariate normalizing transformation of the SB family and the univariate normalizing transformations based on the decimal logarithm. This makes it possible to increase the reliability of estimating the effort of works in projects of the ship design documentation development.

Key words: non-linear regressions model, non-linear regression prediction interval, bivariate non-Gaussian data, Johnson's bivariate normalizing transformation, ship design documentation.

Романюк О.Н.

Вінницький національний технічний університет

Абрамчук І.В.

Вінницький національний технічний університет

Кирилащук С.А.

Вінницький національний технічний університет

Романюк С.О.

Вінницький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКУЛЯРНОГО СКЛАДНИКА КОЛЬОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНО-КОРЕКТНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДБИВНИХ ЗДАТНОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ

У статті розроблено нові моделі відбивної здатності поверхонь. Запропоновані моделі задовольняють принципи симетричності Гельмгольца та закону збереження енергії. Це забезпечує реалістичніше відтворення спекулярного складника кольору під час відтворення тривимірних об'єктів. Отримано аналітичні залежності для нормалізуючих коефіцієнтів. Розроблені моделі мають просту апаратну реалізацію і можуть бути використані в комп'ютерних системах фотореалістичної графіки.

Ключові слова: рендеринг, модель освітлення, зафарбовування, дистрибутивна функція відбивної здатності поверхні, модель Фонга, модель Блінна.

Постановка проблеми. Роль комп'ютерної графіки як однієї з основних забезпечуючих підсистем обчислювальної техніки постійно зростає, оскільки вона дає змогу в умовах сучасного рівня розвитку комп'ютерної техніки реалізувати найбільш прийнятну й звичну для користувача технологію подання інформації. Основним завданням комп'ютерної графіки є синтез зображень із високим ступенем реалістичності. Для цього необхідно достовірно відтворити кольори об'єктів з урахуванням його освітлення від джерел світла. Тому розроблення нових моделей відбивних здатностей поверхонь є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За оптичні властивості поверхні відповідає двопробенева дистрибутивна функція відбивної здатності ДФВЗ (BRDF – Bidirectional Reflectance Distributive Function) [1–5]. Вона є моделлю освітлення та визначає, яку частку випромінювання, що надійшло в точку з напрямку \vec{L} , буде відбито в напрямку \vec{V} (рис. 1). ДФВЗ є функцією кількох змінних

$$BRDF = f_{\lambda}(\alpha, \mu_1, \varphi, \mu_2, x) = f(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}),$$

де λ – довжина хвилі, (α, μ_1) , (φ, μ_2) – параметри, що визначають, відповідно, напрямки падаючого світла і напрямки спостереження.

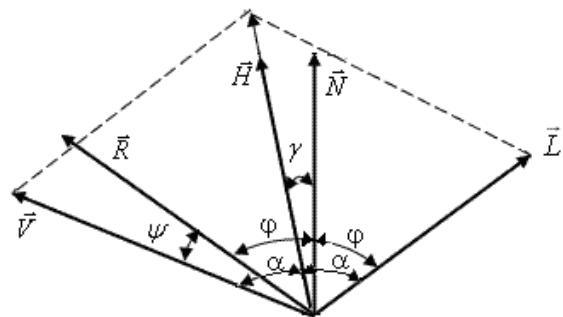


Рис. 1. Вектори нормалей до точки поверхні

Інтенсивність випромінювання I [1] в заданому напрямку визначається як величина променевого потоку через ділянку ds_{\perp} (рис. 2), перпендикулярну променю, в межах диференціального тілесного кута $d\omega$, який дорівнює площі нескінченно малого елемента на поверхні одиничної сфери:

$$I = \frac{d\Phi}{ds_{\perp} d\omega} = \frac{d\Phi}{ds \cos \alpha d\omega}.$$

ДФВЗ може бути розрахована за формулою [1]

$$BRDF = dI(\vec{V}_i) / I(L_i) \cos \alpha_i d\omega_i.$$

Відбите світло у своєму складі має дві компоненти: дифузну та спекулярну [1–4].

У сучасних засобах тривимірної графіки широкого поширення отримала дистрибу-

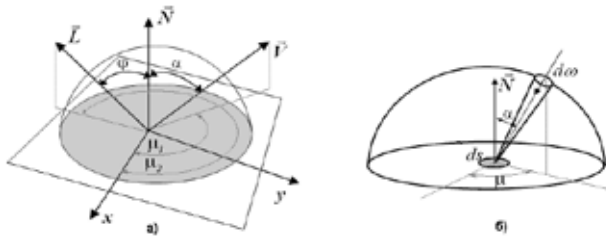


Рис. 2. Вихідні дані для розрахунку ДФВЗ

тивна функція Шліка [1], яка має такий вигляд: $\cos \gamma / (n - n \cos \gamma + \cos \gamma)$. Ця ДФВЗ має значно меншу обчислювальну складність порівняно з функціями Фонга та Бліна. На жаль, наявність операції ділення значно ускладнює апаратну реалізацію функції. Аналіз показав [1], що дистрибутивна функція Шліка відтворює епіцентр відблиску з максимальною відносною похибкою, що не перевищує 10%. За цією ділянкою спостерігається суттєве розходження з результатами, отриманими за моделлю освітлення Бліна. Недоліком ДФВЗ Шліка є те, що дистрибутивна функція в зоні формування блюмінга падає до нульового рівня надзвичайно повільно, що обумовлює неприродне освітлення графічного об'єкта та додаткові обчислення за рахунок збільшення інтервалу зміни аргументу.

ДФВЗ Гаусса [1] виду $e^{-\frac{n(\angle(\vec{H}, \vec{L}))^2}{2}}$ є достатньо точною, реалістично відтворює як зону епіцентра відблиску, так і його затухання (блюмінгу), однак не отримала широкого поширення, оскільки передбачає використання обернених функцій для обчислення кута між векторами нормалей.

У комп'ютерній графіці найчастіше використовують модель визначення спекулярного складника кольору Б. Фонга [1-4], що має вигляд

$$I_s = I \cdot \varpi(\varphi, \lambda) \cdot \cos^n \psi,$$

де $\varpi(\varphi, \lambda)$ – крива відбиття, що визначає відношення дзеркально відбитого світла до падаючого як функцію кута падіння θ і довжини хвилі λ , n – коефіцієнт спекулярності поверхні.

Функція $\varpi(\varphi, \lambda)$ складна, тому її у більшості випадків заміняють константою k_s , яку визначають експериментально або вибирають з естетичних міркувань. У ДФВЗ Фонга [1-5] $\cos \psi = \vec{V} \cdot \vec{R}$, де $\vec{R} = 2 \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} - \vec{L}$. Вектор \vec{R} називають вектором дзеркального відбиття [1]. У дистрибутивній функції Бліна [1-4], яка історично з'явилася пізніше ДФВЗ Фонга, замість $\cos \psi$ використовують $\cos \gamma = \vec{N} \cdot \vec{H}$, де $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$.

Серед розглянутих ДФВЗ найбільшого поширення отримали моделі освітлення Фонга та Бліна. Це пояснюється їх простотою, достатньо високою

точністю та використанням як аргументу – косинуса кута між векторами, який легко знайти через їх скалярний добуток. Саме ці моделі доцільно використовувати в системах динамічної графіки. ДФВЗ повинні задовольняти принципи симетричності Гельмгольца та збереження енергії. Принцип симетричності передбачає незмінність значення функції за умови зміни місцями вхідного й вихідного напрямку. Закон збереження енергії [5] стосовно ДФВЗ передбачає, що світлова енергія, яка розсіюється поверхнею, не може бути більшою за енергію, яка потрапила на поверхню.

Мета статті – розроблення енергетично-коректних моделей ДФВЗ для систем високореалістичної комп'ютерної графіки.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі [2] запропоновано апроксимувати ДФВЗ Фонга та Бліна $\cos^n \theta$, $\theta \in [0; \pi/2]$ функцією $\left(\frac{n}{16}(\cos \theta - 1) + 1\right)$. Така функція при $n = 16..1024$ добре наближає (рис. 3) оригінальну функцію $\cos^n \theta$ на деякому проміжку $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, де $\theta_{cr}(n)$ – нуль відповідної функції, проте за межами цього проміжку швидко зростає. Тому при $n = 16..1024$ необхідно розглядати модифіковану функцію [2]

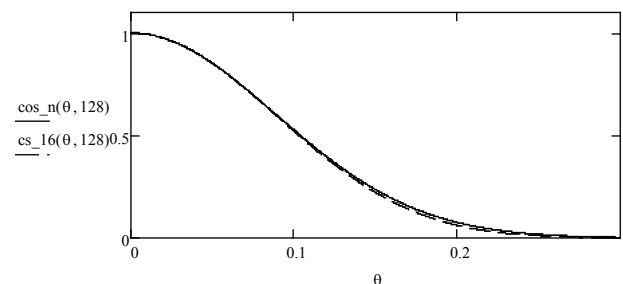


Рис. 3. Графіки функцій: $\cos^n \theta$, та $cs_{16}(\theta, n)$ при $n = 128$.

$$cs_{16}(\theta, n) = \begin{cases} \left(\frac{n}{16}(\cos \theta - 1) + 1\right)^{16}, & \theta \in [0; \theta_{cr}(n)], \\ 0, & \theta \in (\theta_{cr}(n); \pi/2]. \end{cases} \quad (1)$$

Точне значення $\theta_{cr}(n) = \arccos((n-16)/n)$, апроксимуємо більш простим: $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$. Підтверджено, що при $n = 16..1024$ ця апроксимація викликає незначні збурення похибки $\Delta(\theta, n) = \cos^n \theta - cs_{16}(\theta, n)$, які є меншими по порядку ніж сама похибка, обчислена при точному значенні $\theta_{cr}(n)$. Так, для функції (1) $\max_{n=16..1024} (\Delta(\theta, n)) = 1.7 \cdot 10^{-2}$, $\min_{n=16..1024} (\Delta(\theta, n)) = -9.7 \cdot 10^{-3}$; графік зміни похибки $\Delta(\theta, n)$ проілюстровано на рис. 4.

Для того, щоб ДФВЗ була енергетично коректною (закон збереження енергії), величина напів-

сферичної інтегральної відбивальної здатності поверхні повинна задовольняти умові [2, 4]:

$$\int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) \cdot \cos \theta \cdot d\omega \leq 1.$$

Відповідно до закону збереження енергії, будемо шукати нормуючі коефіцієнти $coef$ для функції ДФВЗ виду (1) з умови максимізації енергії віддзеркаленого світла.

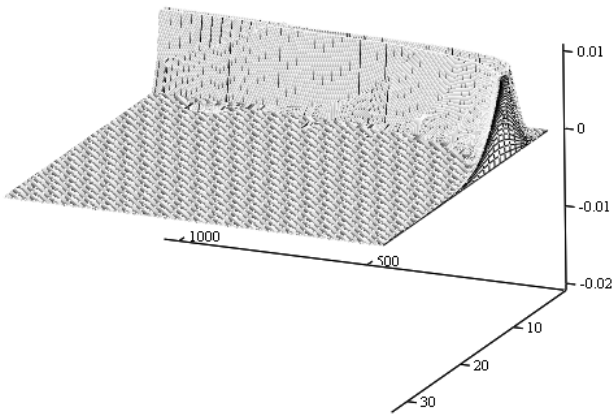


Рис. 4. Графік похибка $\Delta(\theta, n)$; осі: $n = 16..1024$, $20 \cdot \theta \in [0; 30]$

Введемо позначення. Нехай L, R, N, H – одиничні вектори: L – вектор падаючого світла, R – вектор дзеркального відбиття, N – вектор нормалі, H – halfway vector, $\cos \theta = N \cdot L = R \cdot L$, $\cos \theta/2 = N \cdot H = \cos \alpha$. При переході до сферичних координат отримаємо $d\omega = \sin \theta \cdot d\varphi \cdot d\theta$.

Розглянемо модель Фонга [1; 5] У цьому випадку енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (R \cdot L)^n \cdot d\omega = 1.$$

Замінімо у останньому інтегралі $(R \cdot L)^n = \cos^n \theta$ модельною ДФВЗ $cs_{16}(\theta, n)$ (1) і перейдемо до сферичних координат.

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} cs_{16}(\theta, n) \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = 1,$$

врахувавши, що функція (1) відмінна від нуля лише при $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$, отримаємо:

$$\begin{aligned} coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16} \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = \\ = coef(n) \cdot 2\pi \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16} \sin \theta \cdot d\theta = coef(n) \cdot 2\pi \cdot Int(n). \end{aligned}$$

Отже, рівняння для визначення нормуючого коефіцієнта:

$$coef(n) \cdot 2\pi \cdot Int(n) = 1, \quad (3)$$

де множник

$$Int(n) = \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16} \sin \theta \cdot d\theta$$

нелінійно залежить від n . Для визначення $coef(n)$, обчислимо $Int(n)$ при $n = 16..1024$ (чисельно) і знайдемо за методом найменших квадратів такий $coef(n)$, що добре наближає рівняння (3) і легко обчислюється. В результаті оптимізації отримано $coef(n) = 1.063n/(2\pi)$. Графік зміни похибки $res(n) = |2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n) - 1|$, $\max_{n=16..1024} res(n) = 4.7 \cdot 10^{-4}$ зображена на рис. 5.

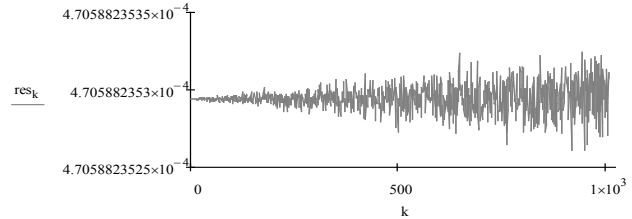


Рис. 5. Графік зміни похибки

$$res(k) = |2\pi \cdot coef(k) \cdot Int(k) - 1|, \quad k = 16..1024$$

Розглянемо модифіковану модель Фонга. У цьому випадку енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови консервації енергії [7]:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (R \cdot L)^n (N \cdot L) \cdot d\omega = 1.$$

Замінивши у останньому інтегралі ДФВЗ $(R \cdot L)^n = \cos^n \theta$ модельною ДФВЗ (1), і враховуючи, що $(N \cdot L) = \cos \theta$, перейдемо до сферичних координат

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} cs_{16}(\theta, n) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = 1,$$

так як функція (1) відмінна від нуля лише при $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$, то:

$$\begin{aligned} coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = \\ = coef(n) \cdot 2\pi \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n). \end{aligned}$$

Рівнянням для визначення нормуючого коефіцієнта є рівняння (3). За методикою, розглянутою раніше, знаходимо $coef(n) = (1.063n + 1)/(2\pi)$, $n = 16..1024$. Похибка $res(n) = |2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n) - 1|$, $\max_{n=16..1024} res(n) = 1.3 \cdot 10^{-3}$.

Розглянемо модель Блінна-Фонга. Енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови [6]:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (N \cdot H)^n \cdot d\omega = 1.$$

Замінімо $(N \cdot H)^n = \cos^n(\theta/2)$ модельною ДФВЗ (1): $\left(\frac{n}{16} (\cos(\theta/2) - 1) + 1 \right)^{16}$ і перейдемо до сферичних координат

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} cs_{-16}(\theta/2, n) \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = 1,$$

врахувавши, що функція (1) відмінна від нуля лише при $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$, отримаємо:

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta/2 - 1) + 1 \right)^{16} \sin \theta \cdot d\theta d\varphi =$$

$$= coef(n) \cdot 2\pi \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta/2 - 1) + 1 \right)^{16} \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n).$$

Рівнянням для визначення нормуючого коефіцієнта є рівняння (3). За методикою, розглянутою раніше, знаходимо $coef(n) = (1.068n + 0.96)/(8\pi)$, $n = 16..1024$. Похибка $res(n) = |2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n) - 1|$, $\max_{n=16..1024} res(n) = 1.5 \cdot 10^{-3}$.

Розглянемо модифіковану модель Блінна-Фонга Енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови [4]:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (N \cdot H)^n (N \cdot L) \cdot d\omega = 1.$$

Замінімо у останньому інтегралі $(N \cdot H)^n = \cos^n(\theta/2)$ модельною ДФВЗ (1): $\left(\frac{n}{16} (\cos(\theta/2) - 1) + 1 \right)^{16}$, $(N \cdot L) = \cos \theta$ і перейдемо до сферичних координат.

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} cs_{-16}(\theta/2, n) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi = 1,$$

врахувавши, що функція (1) відмінна від нуля лише при $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$, отримаємо:

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta/2 - 1) + 1 \right)^{16} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\varphi =$$

$$= coef(n) \cdot 2\pi \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \theta/2 - 1) + 1 \right)^{16} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n).$$

Рівнянням для визначення нормуючого коефіцієнта є рівняння (3). За методикою, розглянутою раніше, знаходимо $coef(n) = (1.027n + 4.8)/(8\pi)$, $n = 16..1024$. Похибка $res(n) = |2\pi \cdot coef(n) \cdot Int(n) - 1|$, $\max_{n=16..1024} res(n) = 9.5 \cdot 10^{-3}$.

Розглянемо модель Блінна-Фонга (NDF). У цьому випадку енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови [4, 5]:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (N \cdot H)^n \cdot d\omega = 1.$$

Замінімо $(\vec{N} \cdot \vec{H}) = \cos^n \alpha$ модельною ДФВЗ (1): $\left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1 \right)^{16}$ і перейдемо до сферичних координат: $d\omega = \sin \beta \cdot d\varphi \cdot d\alpha$.

$$coef(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16} (\cos \alpha - 1) + 1 \right)^{16} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha d\varphi = 1.$$

Ця задача цілком аналогічна задачі визначення нормуючого множника у моделі Фонга, тому $coef_1(n) = 1.063n/(2\pi)$, $n = 16..1024$.

Розглянемо модель Блінна-Фонга з розподілом по висоті (heightfield). У цьому випадку енергетична коректність ДФВЗ вимагає виконання умови [8]:

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} \cos^n \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\omega = 1.$$

Ця умова нормалізації повторює модифіковану нормалізацію Фонга (RDF), а отже, нормалізуючі множники ті самі $coef(n) = (1.063n + 1)/(2\pi)$, $n = 16..1024$.

Зведемо отримані нормуючі коефіцієнти у таблицю.

Висновки. Розроблені моделі відбивної здатності поверхні є точнішими порівняно з класичними за рахунок фізичної коректності. Вони можуть бути використані в системах високореалістичної комп'ютерної графіки.

Модель/підінтегральний вираз	Нормалізуючий коефіцієнт $coef(n)$	
	на основі ДФВЗ Фонга $\cos^n \theta$	на основі ДФВЗ (1)
Phong (RDF)/ $\cos^n \theta \cdot \sin \theta$	$\frac{n+1}{2\pi}$	$\frac{1.063n}{2\pi}$
Phong (modified) (RDF)/ $\cos^n \theta \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$	$\frac{n+2}{2\pi}$	$\frac{1.063n+1}{2\pi}$
Blinn-Phong (RDF)/ $\cos^n \theta/2 \cdot \sin \theta$	$\frac{n+2}{8\pi} < \frac{n+2}{4\pi(2-2^{-n/2})} < \frac{n+4}{8\pi}$	$\frac{1.068n+0.96}{8\pi}$
Blinn-Phong (modified) (RDF)/ $\cos^n \theta/2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$	$\frac{n+6}{8\pi} < \frac{(n+2)(n+4)}{4\pi(2^{-n/2}+n)} < \frac{n+8}{8\pi}$	$\frac{1.027n+4.8}{8\pi}$
Blinn-Phong (NDF)/ $\cos^n \alpha \cdot \sin \alpha$	$\frac{n+1}{2\pi}$	$\frac{1.063n}{2\pi}$
Blinn-Phong (heightfield)/ $\cos^n \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$	$\frac{n+2}{2\pi}$	$\frac{1.063n+1}{2\pi}$

Список літератури:

1. Романюк О.Н., Чорний А.В. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів : монографія. Вінниця : УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. 190 с.
2. Romanyuk A.N., Lyashenko Y.L., Melnik A.V., Goncharuk A.P. Effective Models for the Specular Color Constituent. *Journal Of Computer Science And Engineering*. 2010. Vol. 2. Issue 2. P. 25–29.
3. Романюк С.О., Павлов С.В., Довгалюк Р.Ю. Підвищення фізичної коректності дистрибутивної функції відбивної здатності поверхні. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2014. № 4. С. 201–204.
4. Akenine-Moller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. CRC Press, 2018. 1196 p.
5. Херн Д., Бейкер М. Компьютерная графика и стандарт OpenGL. Москва : Издательский дом «Вильямс», 2005. 1168 с.
6. Kelemen and Szirmay-Kalos. A Microfacet Based Coupled Specular-Matte BRDF Model with Importance Sampling. *Eurographics*. 2001. URL: <http://www.fsz.bme.hu/~szirmay/scook.pdf> (дата звернення: 19.03.2019).
7. Lafortune E.P and Willems Y.D. Using the modified Phong reflectance model for physically based rendering. *Technical Report CW 197*. 1994. 18 p.
8. Yoshiharu Gotanda. Practical Implementation of Physically-Based Shading Models at tri-Ace. SIGGRAPH. 2010. URL: <http://renderwonk.com/publications/s2010-shading-course> (дата звернення: 19.03.2019).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКУЛЯРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЦВЕТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧНО-КОРРЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

В статье разработаны новые модели отражательной способности поверхностей. Предложенные модели соответствуют принципу симметричности Гельмгольца и закону сохранения энергии. Это обеспечивает реалистичнее воспроизведение specularной составляющей цвета при воспроизведении трехмерных объектов. Получены аналитические зависимости для нормализующих коэффициентов. Разработанные модели имеют простую аппаратную реализацию и могут быть использованы в компьютерных системах фотореалистичной графики.

Ключевые слова: рендеринг, модель освещения, закраска, дистрибутивная функция отражательной способности поверхности, модель Фонга, модель Блина.

**MODELING OF A SPECULAR COMPOSITE COLOR BY USING
ENERGY-CORRECT MODELS OF REFLECTIVE SURFACTIVENESS PROPERTIES**

The article develops new models of reflectivity of surfaces. The proposed models satisfy the Helmholtz symmetry principle and the conservation law of energy. This provides a more realistic reproduction of the specular component of color when reproducing three-dimensional objects. Analytical dependences for normalizing coefficients are obtained. The developed models have a simple hardware implementation and can be used in computer systems of photorealistic graphics.

Key words: rendering, model of illumination, shading, distributive function of surface reflectivity, Fong model, Blinn model.

Сичило А.А.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ АСР ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Т»

Сьогодні в Україні велика частина електроенергії виробляється на атомних електростанціях (52%). Внесок теплових електростанцій становить близько 45%. Виробництво енергії з екологічно чистих джерел електроенергії становить близько 7% усієї виробленої в країні енергії. Основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої та споживаної енергії. Невідповідність між виробляючою енергією в реакторі та споживаною в турбіні проявляється (для двоконтурних АЕС) зі зміною тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари в 2-му контурі. Вказана невідповідність має усуватися автоматичним регулятором потужності енергоблоку, який надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну залежно від режиму роботи енергоблоку з вимогою, щоб надійність і безпека енергоблоку були знижені, а також щоб економічна ефективність енергоблоку зберігалася на необхідному рівні. Вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України.

Ключові слова: АЕС, енергія, компромісна програма, синтез регулювання, математична модель, SCADA Trace Mode.

Постановка проблеми. У багатьох роботах, присвячених проблемі покриття змінної частини графіків навантажень [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], вказується, що підвищення частки атомних електростанцій (далі – АЕС) в загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС в змінному режимі. В [3, с. 56–59] був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблоку. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУТП енергоблоку була розроблена математична модель [4, с. 108–122], за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблоку за різних програм регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий регулятор потужності енергоблоку. Отже, стаття присвячена дослідженню властивостей регулятора потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття на тему «Аналіз впливу методів управління потужності енергоблоку з водо-водяним реактором аксіальний офсет» [1, с. 58–63] присвячена аналізу впливу методів управління потужності енергоблоку ВВЕР-1000 в маневреному режимі

на кількісну міру стійкості, а саме – на величину аксіального офсету реактора.

Постановка завдання. Метою статті є вивчення автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС в режимі «Т», який дасть змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах добового циклу для підтримки балансу потужності в енергосистемі України. Досягнення мети здійснюється вирішенням таких завдань: розроблення математичної моделі енергоблоку в режимі «Т»; синтез системи регулювання з обліком сучасних технологічних засобів контролю та управління; моделювання та реалізація на розробленій моделі автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку.

Виклад основного матеріалу дослідження. АРПР (АРП) – призначений для приведення потужності реактора відповідно до потужності турбіни за одночасної підтримки заданого тиску пари, підтримки заданого значення нейтронної потужності реактора і обмеження збільшення тиску пари.

Для виконання цього завдання АРПР забезпечує відповідно до заданих алгоритмів форму-

вання і видачу команд «БІЛЬШЕ» (вгору) або «МЕНШЕ» (вниз) в СГІУ для управління робочою групою. Як робоча група використовується одна з регулюючих груп ОР СУЗ.

Регулювання потужності реактора здійснюється в таких режимах:

- режим «Т» – підтримання постійного тиску пари в головному паровому колекторі в діапазоні від 20 до 102 % номінальної потужності реактора із зоною нечутливості $\pm 0,05$ МПа;

- режим «Н» – підтримання постійного значення щільності нейтронного потоку в діапазоні від 3 до 100 % номінальної потужності реактора із зоною нечутливості $\pm 1\%$ від номінальної потужності реактора;

- режим «С» – сторожам режим, за якого регулятор видає команду на переміщення ЗР вниз у разі перевищення тиском пари в ЦПК номінального на 0,19 МПа.

Призначення АРП.

Автоматичний регулятор потужності АРП є складовою частиною системи регулювання потужності енергоблоку і призначений для:

- стабілізації потужності реактора на заданому рівні (режим «Н»);

- підтримання потужності реактора відповідно до навантаження ТГ (підтримка тиску в ЦПК) (режим «Т»);

- обмеження тиску в ЦПК на заданому рівні (режим «С»).

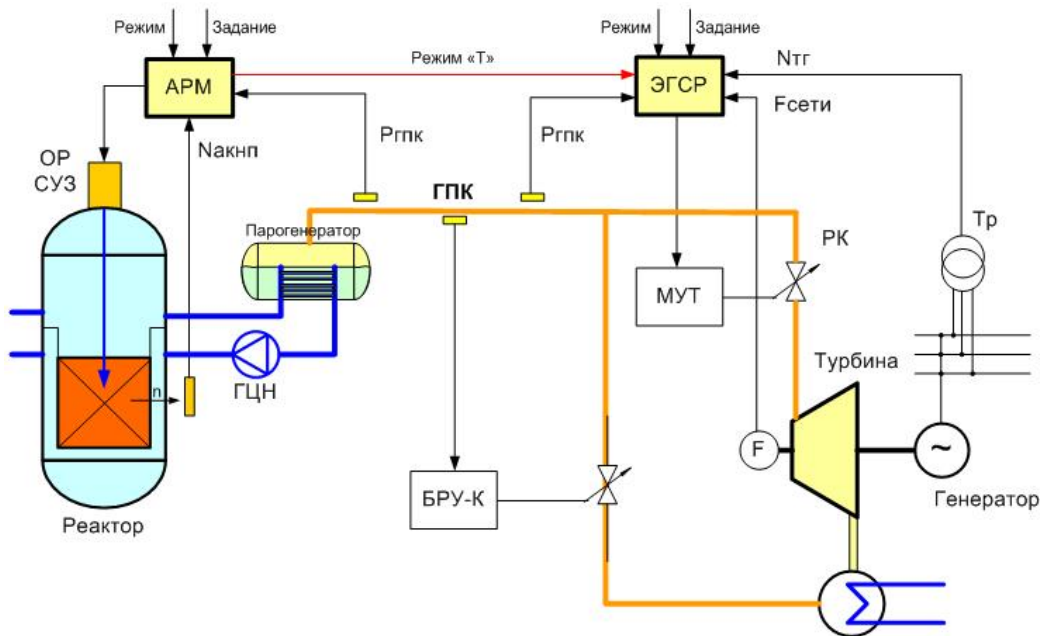


Рис. 1. АРП в системі регулювання енергоблоку АЕС з ВВЕР

Витрата теплоносія 1-го контуру в енергоблоці з реактором ВВЕР постійна, тому потужність реактора $N = k(t_{вих} - t_{вх})$. Крім того, в барабанному ПГ в 2-ому контурі отримують насичений пар, для якого температура і тиск пов'язані одночасно.

Розрізняють такі програми регулювання: з постійною середньою температурою t_{cp} теплоносія 1-ого контуру; з постійним тиском пара в 2-ому контурі $P_s = \text{const}$; компромісні програми.

Розглянемо переваги та недоліки програми:

З постійним тиском пара в 2-ому контурі $P_s = \text{const}$ (рис. 2).

Переваги: полегшення температурних умов 2-ого контуру за знижених навантажень; використання ПГ мінімальної вартості.

Недоліки: зміна реактивності внаслідок зміни середньої температури теплоносія; значні зміни температурного стану компонентів АЗ під час переходу на новий рівень потужності; мінливість об'єму теплоносія.

Під час розроблення і дослідження систем автоматичного управління ядерними енергетичними установками (далі – ЯЕУ) користуються математичними моделюваннями. Для сучасних 2-контурних ЯЕУ з реактором типу ВВЕР математична модель (далі – ММ), що враховує всі складні динамічні процеси, описується системою багатьох нелінійних диференціальних рівнянь. Рішення і дослідження такої системи ускладнено. Водночас для деяких інженерних і учбових

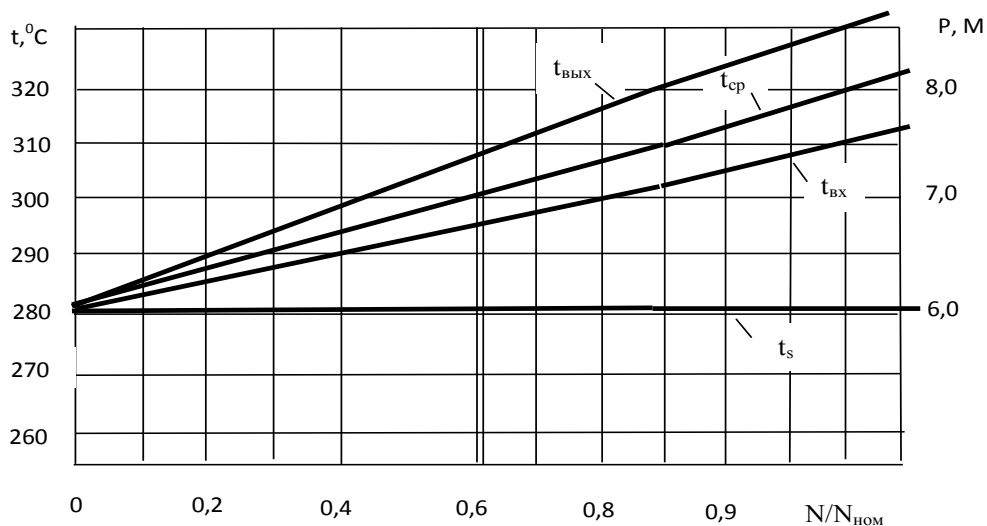


Рис. 2. Статична програма $P_s = \text{const}$

завдань можливе використання спрощених ММ, які забезпечують достатню точність.

У цьому проекті ставиться завдання розроблення спрощеної ММ ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР з дослідженням такої ММ на ЕОМ.

На рисунку 3 зображена принципова схема 2-контурної АЕС з реактором, парогенератором, турбіною і циркуляційними насосами з позначеннями фізичних величин.

Ядерний реактор описується рівняннями кінетики, що пов'язує реактивність ρ з відносною густиною нейтронів n , і рівнянням температурного ефекту реактивності з теплоносієм і паливом. Крім того, в ЯЕУ включено такі структурні елементи (рисунк 4): ядерне паливо – 2; оболонка теплоділяючого елемента – 3; теплоносій у реакторі – 4; трубопроводи від реактора до ПГ – 5 і назад – 6; ПГ з теплоносієм першого контуру – 7; ПГ з теплоносієм другого контуру – 8.

Перехідні процеси з вищеназаних каналів є в середовищі Simulink. На рисунках 3, 4 представлена структурна схема в середовищі Simulink.

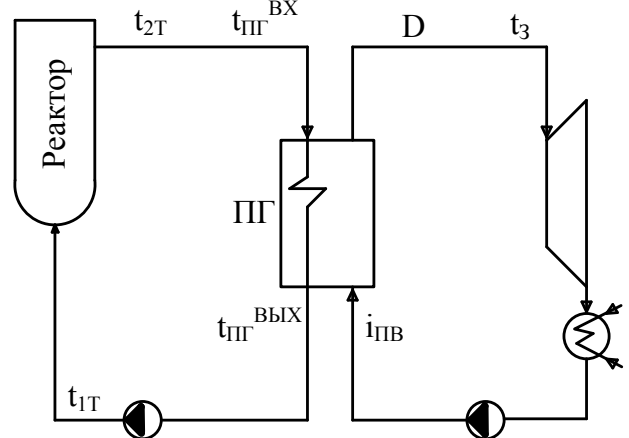


Рис. 3. Технологічна схема 2-контурної АЕС

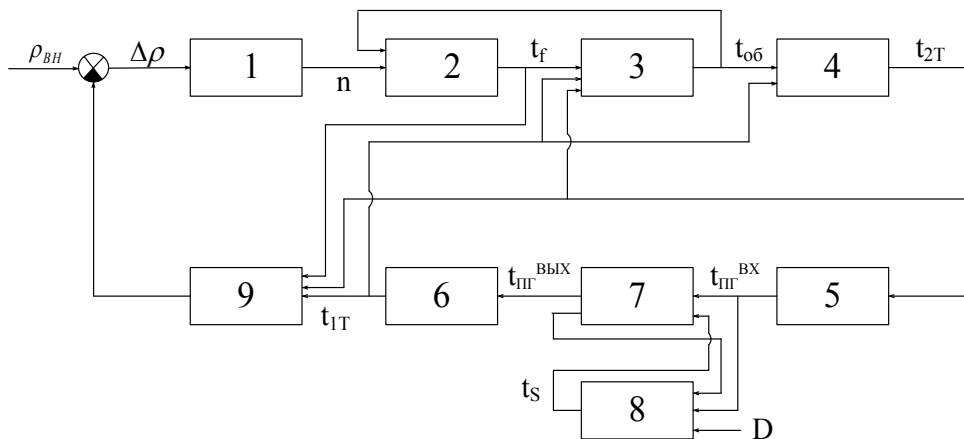


Рис. 4. Структурна схема енергоблоку

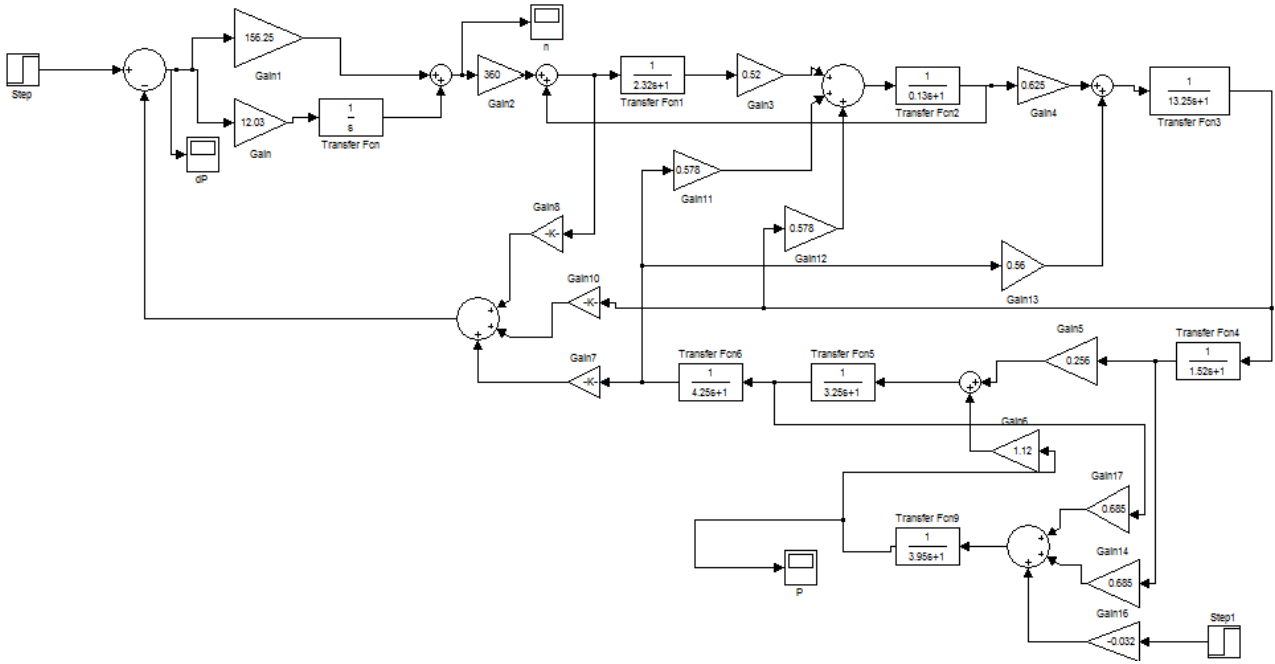


Рис. 5. Структурна схема ММ у середовищі Simulink

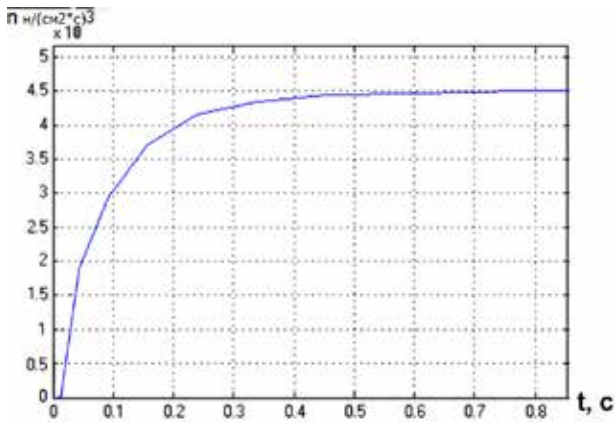


Рис. 6. Крива розгону по каналу зовнішня реактивність – відносна потужність реактора ($\rho_{en} \rightarrow n$)

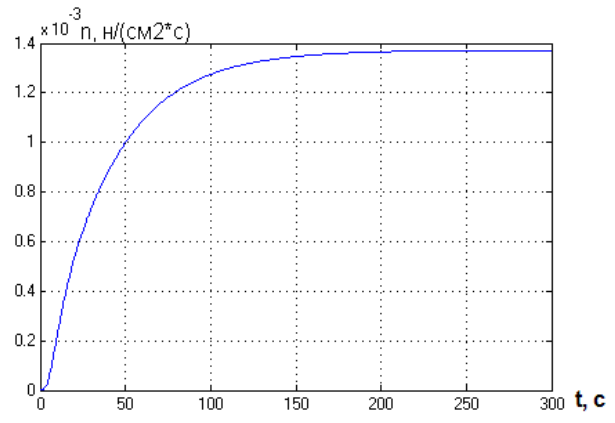


Рис. 8. Крива розгону по каналу частота обертання – відносна потужність реактора ($n_{\omega o} \rightarrow n$)

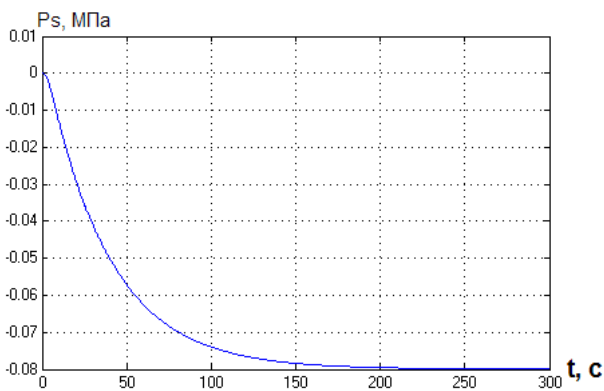


Рис. 7. Крива розгону по каналу зовнішня реактивність – тиск пари перед ГПК ($\rho_{en} \rightarrow P_S$)

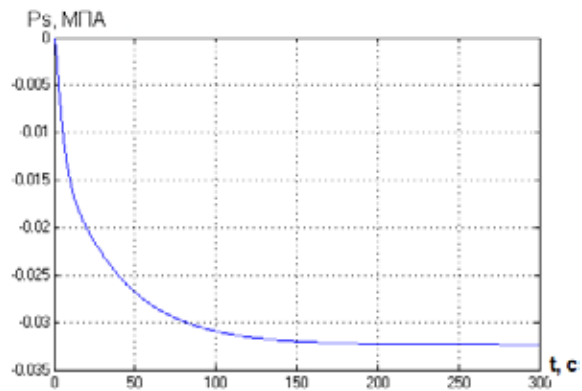


Рис. 9. Крива розгону по каналу частота обертання – тиск пари перед ГПК ($n_{\omega o} \rightarrow P_S$)

Апроксимуємо криву й знайдемо налагодження за методикою Л.І. Кона:

$$K_M = 4.5 \cdot 10^{-3}; T_a = 0.12 \text{с}; \tau = 0.02 \text{с}; q = \tau/T_a = 0.02/0.12 = 0.17 \approx 3 \text{шт}$$

$$\alpha = 0.17; m = 0.37; K = 1.28; C = 2.61; K = K_p \cdot K_M = 1.28;$$

$$K_p = K/K_M = 1.28/0.0045 = 0.0035; T_i = C \cdot \tau = 2.61 \cdot 0.02 = 0.05 \text{с}$$

Апроксимуємо криву й знайдемо налагодження за методикою Л.І. Кона:

$$K_M = -0.32; T_a = 16 \text{с}; \tau = 3 \text{с};$$

$$q = \tau/T_a = 3/16 = 0.18 \approx 3 \text{шт}$$

$$\alpha = 0.17; m = 0.37; K = 1.39; C = 3;$$

$$K = K_p \cdot K_M = 1.39;$$

$$K_p = K/K_M = 1.39/-0.32 = -4.34; T_i = C \cdot \tau = 3 \cdot 3 = 9 \text{с}.$$

У структурній схемі моделі АСР в прикладному пакеті Simulink підставимо знайдені настройки регулятора і скоригуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів.

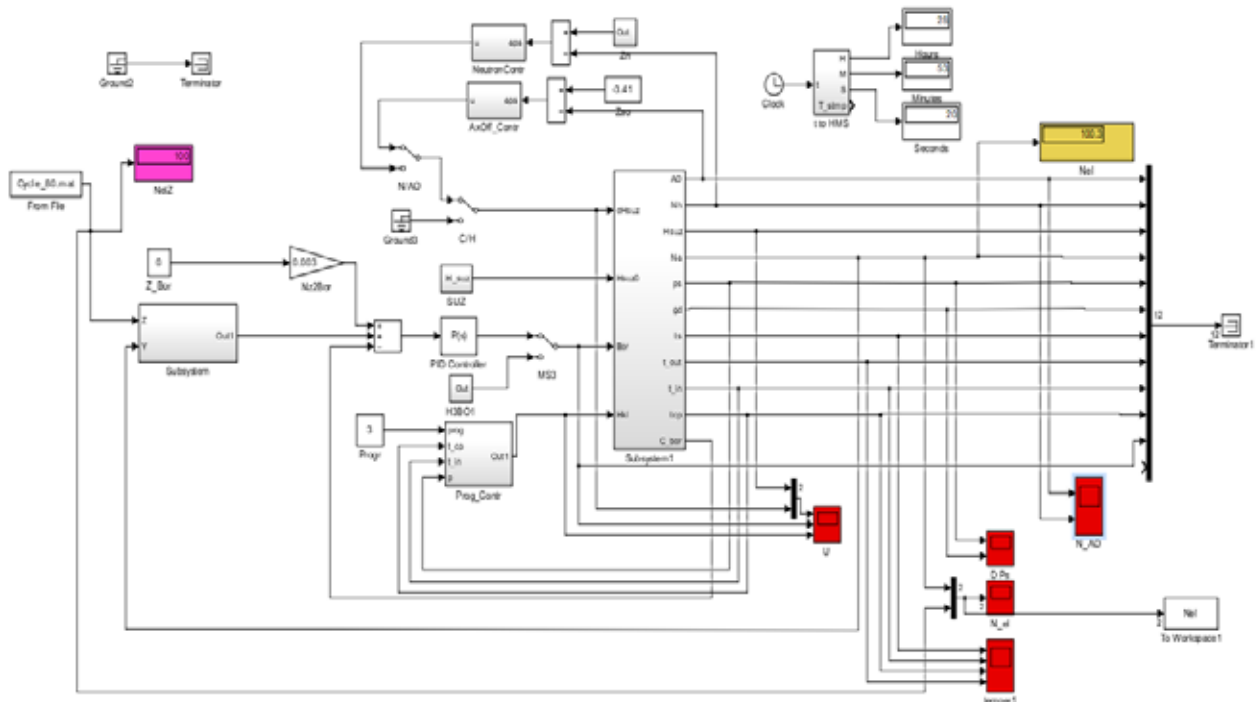


Рис. 10. Структурна схема АСР з регулятором тиску

Приводи СУЗ спільно з органами регулювання є виконавчими механізмами системи регулювання та захисту реактора ВВЕР-1000, за допомогою яких здійснюються регулювання потужності, компенсація надлишкової реактивності і зупинка реактора шляхом введення і виведення ОР з активної зони реактора, а також аварійної зупинки реактора шляхом скидання ОР за знеструмлення приводів.

За даними випробувань, час падіння ОР СУЗ в активній зоні становить від 2 до 4 с і не перевищує допустимого за проектом часу падіння ОР СУЗ в режимі АЗ. Швидкість руху груп ОР СУЗ в режимі скидання після сходу з ВКВ постійна по всій висоті активної зони.

Як програмне забезпечення було використано програмний комплекс класу SCADA-системи TRACE MODE. SCADA-система призначена для

диспетчерського управління та збору даних. Для програмування алгоритмів керування технологічними процесами в SCADA-системі TRACE MODE 6, в якій було створено дві екранні форми (мнемосхеми). Принципова схема енергоблоку підтримки тиску та тренд ОР СУЗ, яким буде показувати зміну параметра тиску.

Висновки. Отримано результати, які полягають у створенні автоматизованої системи керування потужністю енергоблоку з ВВЕР-1000 у режимі «Т», що дає змогу підтримувати потужність енергоблоку у базовому режимі. Під час розроблення математичної моделі енергоблоку в режимі потужності енергоблоку в режимі «Т» можливо зробити висновок, що органом регулювання є регулюючі стрижні 10-ї групи. Режим «Т» благополучний для обладнання другого контуру.

Список літератури:

1. Теплотехнічний довідник : у 2-х томах. Т. 2. / Ред. В. Юрнев, П. Лебедев. Видавництво «Енергія», 1976.
2. Демченко В.А. Автоматичні системи регулювання технологічними процесами АЕС. ОНПУ, 1994.
3. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988.
4. Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС, Регулювання енергоблоків». Одеса : ОНПУ, 1994.
5. Довідкові таблиці: Тиск насиченої пари води. URL: <http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html> (дата звернення: 01.05.2019).
6. Методи регулювання температури перегрітої пари. URL: <http://msd.com.ua/parovye-kotly-tes/metody-regulirovaniya-temperatury-peregretogo-para/> (дата звернення: 01.05.2019).
7. Системи турбінного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.
8. Основне обладнання реакторного відділення (частина 1). Центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000.

ИЗУЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС В РЕЖИМЕ «Т»

В настоящее время в Украине большая часть электроэнергии производится на атомных электростанциях (52%). Вклад тепловых электростанций составляет около 45%. Производство энергии из экологически чистых источников электроэнергии составляет около 7% всей производимой в стране энергии. Основной задачей регулирования паросиловой установки является поддержка равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между производимой энергией в реакторе и потребляемой в турбине проявляется (для двухконтурной АЭС) с изменением давления и температуры теплоносителя в 1-м контуре и давления (температуры) насыщенного пара во 2-м контуре. Указанное несоответствие должно устраняться автоматическим регулятором мощности энергоблока, который придает управляющее влияние или на реактор, или на турбину в зависимости от режима работы энергоблока с требованием, чтобы надежность и безопасность энергоблока не были понижены, а также чтобы экономическая эффективность энергоблока сохранялась на необходимом уровне. Изучение автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС в режиме «Т» позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины.

Ключевые слова: АЭС, энергия, компромиссная программа, синтез регулирования, математическая модель, SCADA Trace Mode.

THE STUDYING OF THE AUTOMATED SYSTEM OF THE OUTPUT REGULATION OF THE POWER UNIT OF THE NPP IN THE “T” MODE

Nowadays the most part of the electric power in Ukraine is manufactured at the nuclear power plants (52%). The contribution of thermal power plants is about 45%. The energy production from environmentally friendly power sources is about 7% of all produced energy in the country. The main objective of regulation of the steam power installation is supporting the equality between amounts of the produced end consumed energy. The discrepancy between the produced energy in the reactor and consumed energy in the turbine comes out (for dual circuit NPP) with the pressure and temperature change of the heat carries in the 1st circuit and pressure (temperature) of the saturated steam in the 2nd circuit. The specified discrepancy eliminate with the automatic output regulator of the power unit. The last one provides managing influence either on the reactor, or on the turbine depending on an operation mode of the power unit with the requirement that the reliability and safety of the power unit were not reduced and also that the economic efficiency of the power unit remained at the necessary level. The studying of the automated system of the output regulation of the power unit of the NPP in the “T” mode, will allow operating the power unit in the maneuverable modes of a daily cycle to maintenance the balance of power in Ukrainian power supply system.

Key words: NPP, energy, compromise program, regulation synthesis, mathematical model, SCADA Trace Mode.

Терещенко Д.О.

Одеський національний політехнічний університет

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ТРАКТУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА

Об'єктом дослідження є регулювання газоповітряного тракту енергетичного котла, синтез математичної моделі динаміки газоповітряного тракту. Методом удосконалення системи управління газоповітряним трактом, покращуються якість та критерії перехідних процесів, підвищується надійність, зменшується втручання людини в процес регулювання. У результаті розробки була одержана сучасна автоматична система регулювання розрідження в топці котла та концентрації кисню у відхідних газах. Вибір цієї системи призведе до підвищення продуктивності, надійності, якості та легшення обслуговування.

Ключові слова: автоматична система регулювання (АСР), газоповітряний тракт, розрідження, концентрація кисню, закон регулювання, математична модель, перехідний процес регулювання.

Постановка проблеми. Підвищення економічності роботи тепло-енергетичного обладнання шляхом підвищення технічного рівня систем автоматичного управління можливе по двох основних напрямках: використання сучасного комплексу технічних засобів (комп'ютеризовані керуючі комплекси) і удосконалення структурних схем систем автоматичного регулювання (як правило, за рахунок введення в контур контролю додаткових інформаційних сигналів про зміну технологічних параметрів або використання складнішого алгоритму управління).

На енергетичних і промислових підприємствах України нині завершується процес заміни аналогових систем управління на цифрові. Проте можливості сучасних мікропроцесорних технічних засобів автоматизації використовуються не повністю. Зокрема, на новій техніці реалізуються типові схеми і алгоритми управління, розроблені понад півстоліття назад з урахуванням обмежених можливостей аналогових систем управління.

Нині на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельних для управління газоповітряним трактом використовуються локальні автоматичні системи управління (АСУ) загального повітря і розрідження. Завдання АСУ загального повітря полягає в синхронній зміні витрати повітря на пристрої пальників при зміні витрати палива. Як правило, в типовій АСУ загального повітря (економічності процесу горіння) на вхід регулюючого пристрою надходить коригуючий сигнал по витраті палива (рідкого або газоподібного) і сигнал негативного зворотного зв'язку по витраті. Точний вимір масової витрати повітря, на відміну від виміру витрати

палива, ускладнено, оскільки для його визначення використовують сигнал змінного перепаду тиску повітря на повітропідігрівник.

Оскільки по перепаду тиску на повітропідігрівнику складно точно визначити масову витрату повітря по всьому діапазоні робочих навантажень котлоагрегата, точність підтримки матеріального балансу між витратою палива і повітря перевіряється по газоаналізатору, який вимірює вміст кисню O_2 або оксиду вуглецю CO в газах, що відходять. На підставі свідчень газоаналізатора оператор вручну змінює завдання регулятора загального повітря. Задля зменшення динамічного відхилення розрідження в топковій камері при зміні теплового навантаження котлом для регулювання застосовують комбіновану АСР із пристроєм введення основної збурюючої дії витрати повітря. Як сигнал по витраті повітря використовують або перепад тиску повітря на повітропідігрівнику, або положення направляючого апарата дутцевого вентилятора, яке в результаті великої нелінійності не дозволяє точно визначити витрату повітря [3, с. 133–136; 5, с. 99–101]

Постановка задачі. Таким чином, виникає науково-технічна задача – дослідити зможу застосувати оптимальні регулятори для керування типовими технологічними процесами та створення на їх основі сучасної АСР, яка позбавлена недоліків типових систем регулювання і максимально реалізує потенціал цифрових керуючих комплексів.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для вирішення завдання оптимального управління необхідна математична модель, яка адекватно описує поведінку об'єкта управління в усьому діапазоні його робочих навантажень.

При сучасному підході до концепції автоматичного управління об'єкт управління розглядається як складна динамічна система з певним числом взаємозалежних входів і виходів. У багатовимірній концепції управління при розрахунку керуючого впливу враховуються прямі і перехресні зв'язки між вектором управління і вектором контрольованих технологічних параметрів [4, с. 134–135].

Газоповітряний тракт складається з послідовно розташованих повітряного і газового трактів. Повітряний тракт – комплекс елементів обладнання для приймання атмосферного (холодного) повітря, його підігріву, транспортування і подачі в топку. Повітряний тракт включає в себе: короб холодного повітря, дуттьовий вентилятор, повітропідігрівник (повітряна сторона), короб гарячого повітря і горючі пристрої. Повітряний тракт (крім забірної повітропроводу), як правило, працює під надлишковим тиском, що розвивається дуттьовим вентилятором [7, с. 34]. Газовий тракт – комплекс елементів обладнання, по якому здійснюється рух продуктів згоряння до виходу в атмосферу. Газовий тракт починається в топковій камері, димові гази послідовно проходять через пароперегрівач (при його наявності), економайзер, підігрівач повітря (газова сторона), золоуловлювач (встановлюється при спалюванні твердого палива) і потім димососом подаються через димову трубу в атмосферу.

При виведенні диференціальних рівнянь газоходу і повітропроводу як ділянок регулювання розрідження в топці, з метою спрощення розрахунків прийняті такі допущення: газохід після димососа і повітропровід після дуттьового вентилятора дуже короткий, і зворотна реакція тиску в топці на витрату палива і повітря на вході в топку можна знехтувати; акумулююча ємність топки і газоходів зосереджена в одному обсязі, а дроселююча здатність газоходів і поверхонь нагріву зосереджені в одній точці. При управлінні технологічним ділянкою змінюється положення направляючого апарату димососа і дуттьового вентилятора з метою зміни масової витрати димових газів і повітря відповідно [1, с. 174–176; 2, с. 9–10]. З урахуванням перерахованих припущень регульовані ділянки можуть бути замінені спрощеною системою, що складається з ємності, дроселя і димососа (дуттьового вентилятора). Оскільки динамічні і статичні властивості барабанного котла в нестационарних режимах роботи нелінійні, для отримання математичної моделі нелінійна модель може бути замінена спектром моделей, лінеаризованих щодо кількох типових режимів.

Регульованою величиною є відхилення розрідження в топці ΔP_P від заданого значення, входною величиною (регулюючим впливом) – зміна положення направляючого апарату димососа $\Delta \phi_G$. В якості зовнішнього обурення приймемо зміну витрати газів, що відходять на притоці ΔM . Таким чином, диференціальне рівняння ділянки регулювання розрідження димових газів має вигляд:

$$T_2 \Delta \ddot{P}_P + T_1 \Delta \dot{P}_P + \Delta P_P = k_4 \Delta \dot{\phi}_G + k_3 \Delta \phi_G + k_2 \Delta \dot{M} + k_1 \Delta M. \quad (1)$$

Динамічні властивості повітропроводу, що визначають залежність між зміною подачі повітря в топку котла і положенням направляючого апарату дуттьового вентилятора $\Delta \phi_B$, описуються диференціальним рівнянням:

$$T_4 \Delta \ddot{M}_L + T_3 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_6 \Delta \dot{\phi}_B + k_5 \Delta \phi_B. \quad (2)$$

Коефіцієнт надлишку повітря λ , який не можна безпосередньо виміряти, можна визначити за концентрацією кисню в димових газах CO_2 практично незалежно від складу палива. Однак на практиці CO_2 не вдається виміряти в точці, розташованій безпосередньо за зоною закінчення процесу горіння. Здебільшого точка відбору проби знаходиться в конвективній частині котла. При цьому гази спочатку перемішуються в зоні горіння, потім транспортуються через радіаційні поверхні і додатково перемішуються в зоні конвективних поверхонь нагріву. У багатьох випадках цю складну схему можна апроксимувати рівнянням:

$$T_6 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_5 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_8 \Delta M_L(t - \tau) + k_7 \Delta M_B(t - \tau), \quad (3)$$

де τ – час транспортного запізнювання (приймається рівним величині інерційності самого газоаналізатора – 15 с).

Таким чином, регульованими параметрами газоповітряного тракту барабанного котла є відхилення від номінального значення концентрації кисню в газах ΔCO_2 і відхилення розрідження в топковій камері, а керуючими впливами – зміна положення напрямних апаратів дуттьового вентилятора $\Delta \phi_B$ і димососа $\Delta \phi_G$, основним зовнішнім збурюючим впливом виступає зміна витрати палива ΔM_B . (рис. 1)



Рис. 1. Параметрична схема об'єкта регулювання

З диференціальних рівнянь (1) – (3) можна отримати передатні функції для окремих ділянок газоповітряного тракту:

$$W_{\Delta M \rightarrow \Delta P_p}(s) = \frac{K_2 \cdot S + K_1}{T_2 \cdot S^2 + T_2 \cdot S + 1}, \quad (4)$$

$$W_{\Delta \phi_r \rightarrow \Delta P_p}(s) = \frac{K_4 \cdot S + K_3}{T_2 \cdot S^2 + T_2 \cdot S + 1}, \quad (5)$$

$$W_{\Delta \phi_B \rightarrow \Delta M_L}(s) = \frac{K_6 \cdot S + K_5}{T_4 \cdot S^2 + T_3 \cdot S + 1}, \quad (6)$$

$$W_{\Delta M_L \rightarrow \Delta C_{O_2}}(s) = \frac{K_7 \cdot e^{-\tau s}}{T_6 \cdot S^2 + T_5 \cdot S + 1}, \quad (7)$$

$$W_{\Delta M_B \rightarrow \Delta C_{O_2}}(s) = \frac{K_7 \cdot e^{-\tau s}}{T_6 \cdot S^2 + T_5 \cdot S + 1}. \quad (8)$$

Виходячи з передатних функцій (4) – (8), будемо структуру схему математичної моделі АСР

газоповітряного тракту (рисунок 2), яку будемо використовувати для моделювання.

Чисельні значення коефіцієнтів диференціальних рівнянь (1) – (3) та передатних функцій (4) – (7) для подальшого чисельного моделювання системи управління визначенні за конструктивними і теплотехнічними параметрами газомазутного барабанного котла ГМ-50 для трьох номінальних режимів, відповідних 50, 75 і 100%, потужності наведені в таблиці 1.

Основним способом регулювання надлишку повітря за пароперегрівником служить зміна кількості повітря, поданого в топку за допомогою дуттєвих вентиляторів. Регулювання економічності по співвідношенню завдання – повітря з додатковим сигналом по вмісту O_2 у димових газах.

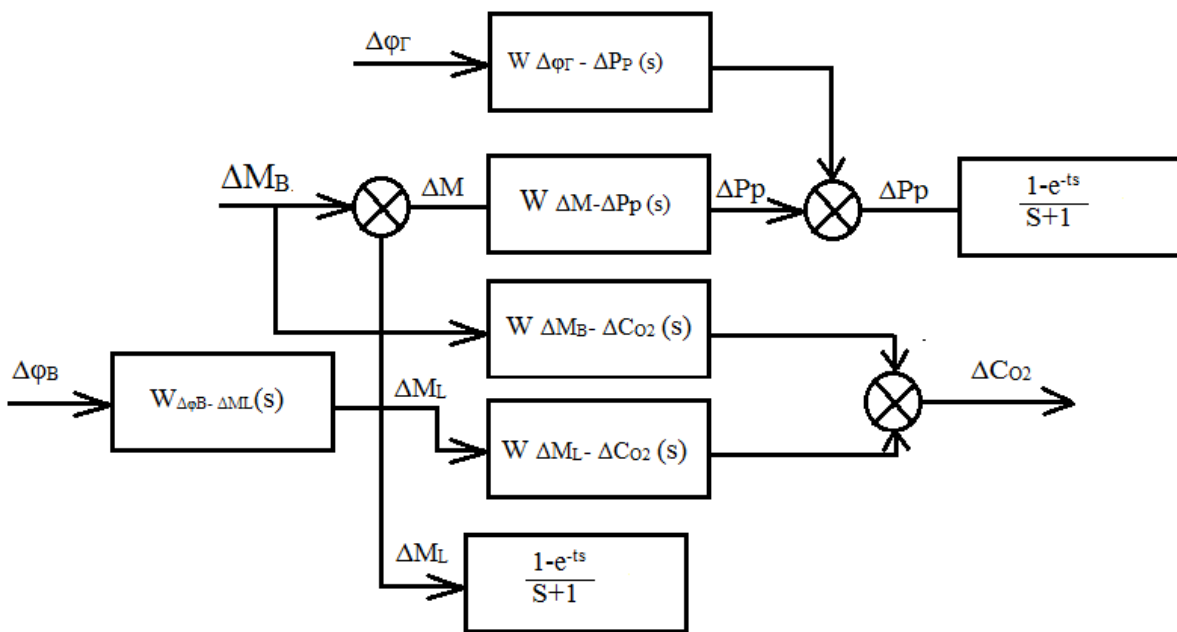


Рис. 2. Структурна схема моделі АСР газоповітряного тракту

Таблиця 1

Паропро- дуктивність, т/Г	T_1, c	T_2, c^2	T_3, c	T_4, c	T_5, c	T_6, c^2	$\frac{k1, Pa \cdot c}{kg}$
25	1,67	0,0566	0,0748	$3,47 \cdot 10^{-4}$	16	56	1080
37,5	1,33	0,0574	0,112	$8,16 \cdot 10^{-4}$	16	56	861
50	1,04	0,0572	0,152	$7,22 \cdot 10^{-4}$	16	56	673
Паропро- дуктивність, т/Г	$\frac{k2, Pa \cdot c^2}{kg}$	$\frac{k3, Pa}{\%}$	$\frac{k4, Pa \cdot c}{\%}$	$\frac{k5, kg \cdot c}{\%}$	$\frac{k6, kg \cdot c^2}{kg}$	$\frac{k7, \% \cdot c}{kg}$	$\frac{k8, \% \cdot c}{kg}$
25	80,3	-278	-20,6	0,224	$4,55 \cdot 10^{-3}$	-39,8	2,74
37,5	87,6	-254	-25,8	0,178	$6,73 \cdot 10^{-3}$	-26,5	1,82
50	106	-125	-19,7	0,147	$6,71 \cdot 10^{-3}$	-19,9	1,37

Вміст O_2 у продуктах горіння палива характеризує надлишок повітря та слабо залежить від складу палива [8, с. 21–22].

Отже, використання O_2 як вхідного сигналу автоматичного регулятора, що впливає на витрату повітря, цілком доцільно. Однак реалізація цього способу ускладнена через відсутність надійних і швидкодіючих газоаналізаторів кисню. Тому в промислових умовах одержали поширення схеми регулювання подачі повітря не з прямим, а з коригувальним впливом по O_2 .

Підтримка надлишку повітря по співвідношенню сигналів теплота–повітря й особливо пар–повітря відрізняється простотою й надійністю, але не є точним. Цього недоліку позбавлена, наприклад, система регулювання економічності, що діє за схемою завдання – повітря з додатковою корекцією по O_2 . У системі загалом сполучають принципи регулювання по збурюванню й відхиленню. Регулятор подачі повітря змінює його витрату по сигналу від головного або коригувального регулятора тиску, що є автоматичним задаючим приладом регулятора з навантаження котла. Сигнал, пропорційний витраті повітря, діє і в інших схемах:

по-перше, усуває збурювання по витраті повітря, не пов'язані з регулюванням економічності (включення або відключення систем пиле-приготування й т.п.);

по-друге, сприяє стабілізації самого процесу регулювання подачі повітря, тому що служить одночасно сигналом твердого негативного зворотного зв'язку.

Введення додаткового коригувального сигналу по змісту O_2 підвищує точність підтримки оптимального надлишку повітря будь-якій системі регулювання економічності. Додатковий коригувальний регулятор по O_2 у схемі регулювання завдання – повітря керує подачею повітря при топкових збуреннях і безпосередньо забезпечує підтримку заданого надлишку повітря в топці.

Регулювання розрідження звичайно здійснюють за допомогою зміни кількості газів, що відходять та відсмоктуються димососами. При цьому їхню подачу можна регулювати поворотними дросельними заслінками, напрямними апаратами.

Найбільше поширення одержала схема регулювання розрідження з одноімпульсним ПІ-регулятором, що реалізує принцип регулювання по відхиленню.

Необхідне значення регульованої величини встановлюють за допомогою ручного задатчика ЗРП регулятора розрідження. При роботі котла в

регулюючому режимі часто відбуваються зміни теплового навантаження й, отже, зміни витрати повітря. Робота регулятора повітря приводить до тимчасового порушення матеріального балансу між вступником повітрям і газами, що відходять. Задля попередження цього порушення й збільшення швидкодії регулятора розрідження рекомендують увести на його вхід додатковий зникаючий вплив від регулятора повітря через пристрій динамічного зв'язку.

Як пристрій динамічного зв'язку використовують аперіодичну ланку, вихідний сигнал якої надходить на вхід регулятора розрідження лише в моменти переміщення виконавчого механізму регулятора повітря.

На рисунку 3 представлена структурна схема математичної моделі АСР газоповітряного тракту в Simulink MathLab. Подаючи на вхід ступінчаті сигнали, будуть промодельовані перехідні процеси регулювання витрати повітря, концентрації кисню в відхідних газах та розрідження в топці котла. Також знайдемо коефіцієнти для двох оптимальних ПІ-регуляторів.

Графічно обробляючи рисунок 4, за методикою Кона знаходимо:

$$\tau_0 = 1,5 \text{ с}; \tau_c = 0,25 \text{ с}; T_a = 3,25 \text{ с}.$$

Для пошуку коефіцієнтів потрібно знайти

$$\alpha = \frac{\tau}{T_a} = \frac{1,75}{3,25} = 0,55.$$

З таблиці Кона виберемо K та C для $q = 2$, $m = 0,48$ та мінімального значення лінійного критерію якості ПІ.

$$K = 0,62; C = 1,16.$$

Підставивши знайдені значення у вираження, знайдемо:

$$K_p = \frac{K}{K_M}; T_u = C \cdot \tau$$

$$K_p = 0,0025 \text{ од.}; T_i = 2,03 \text{ с}.$$

Передатна функція для ПІ-регулятора матиме вид:

$$W(s) = \frac{K_p}{T_i \cdot S + 1} = \frac{0,0025}{2,03 \cdot S + 1}$$

Графічно обробляючи рисунок 5, за методикою Кона знаходимо:

$$\tau_0 = 1,5 \text{ с}; \tau_c = 0,25 \text{ с}; T_a = 3,25 \text{ с};$$

Для пошуку коефіцієнтів потрібно знайти

$$\alpha = \frac{\tau}{T_a} = \frac{1,75}{3,25} = 0,55.$$

З таблиці Кона виберемо K та C для $q = 2$, $m = 0,48$ та мінімального значення лінійного критерію якості ПІ.

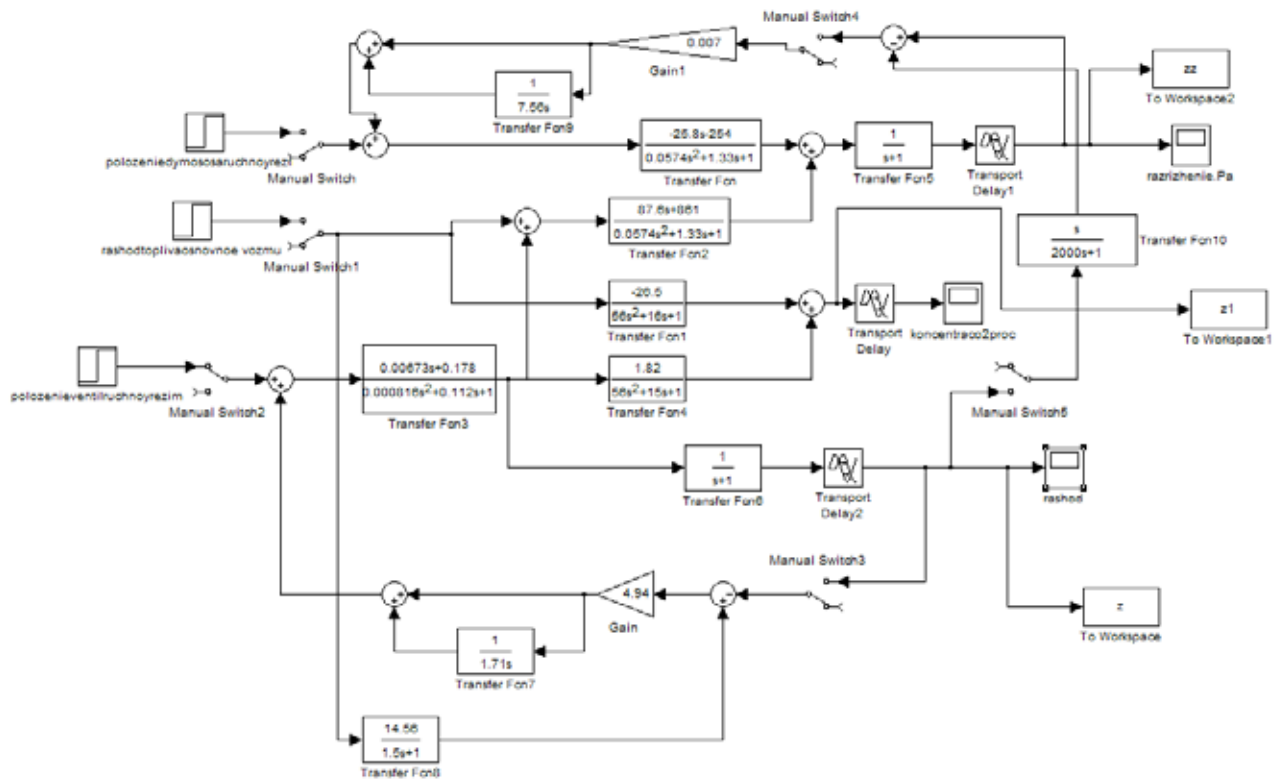


Рис. 3. Структурна схема математичної моделі АСР газоповітряного тракту в Simulink

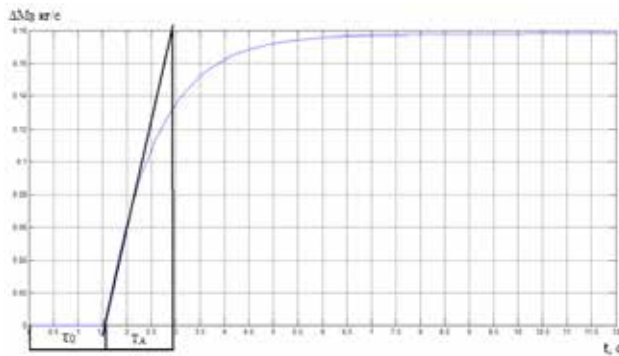


Рис. 4. Крива розгону витрати повітря при відкритому вентиляторі

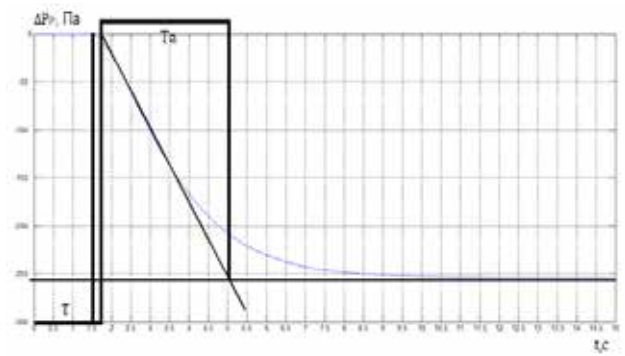


Рис. 5. Крива розгону розрідження в топковій камері (без регулятора)

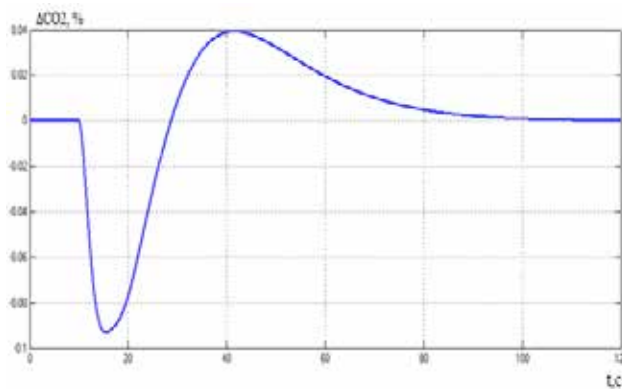


Рис. 6. Перехідний процес регулювання концентрації кисню у відхідних димових газах (ПІ-регуляторі)

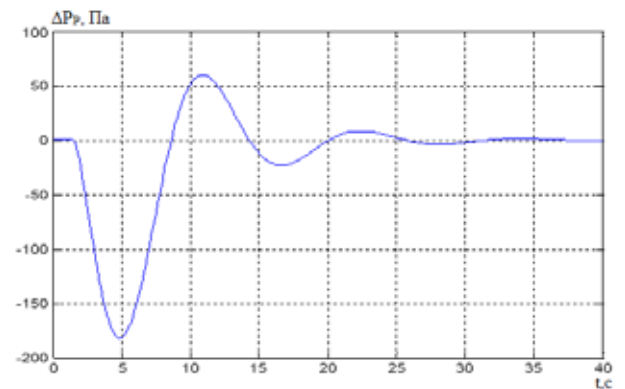


Рис. 7. Перехідний процес регулювання розрідження в топці котла (ПІ-регуляторі)

$$K = 0,62; C = 1,16.$$

Підставивши знайдені значення у вираження, знайдемо:

$$K_p = \frac{K}{K_M}; T_i = C \cdot \tau$$

$$K_p = 0,0025 \text{ од.}; T_i = 2,03 \text{ с.}$$

Передатна функція для ПІ-регулятора матиме вид:

$$W(s) = \frac{K_p}{T_i \cdot s + 1} = \frac{0,0025}{2,03 \cdot s + 1}$$

Висновки. В цій роботі було розглянуто АСР газоповітряного тракту енергетичного котла. Була спроектована математична модель газоповітряного тракту, в якій використовується 2 оптимальних ПІ-регулятори. Математичне моделювання показало, що при подачі основного збурення (витрата палива), регульовані параметри – концентрація кисню в відхідних газах та розрідження в топці – не перевищують гранично допустимих значень, не мають статичної помилки при регулюванні та мають мінімальний час регулювання.

Список літератури:

1. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління. Автоматика. Автоматизація. *Электротехнические комплексы и системы*. 2009. № 2. С. 174–179.
2. Тодорцев Ю.К., Бундук А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки. *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 8–11.
3. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 12. С. 131–141.
4. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimization. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2015. № 1(45). Р. 134–140
5. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. *Odes'ki Politechnichniy Universytet. Pratsi*. 2012. № 1(38). Р. 99–106.
6. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WVER-1000 nuclear unit. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241(8). Р. 2956–2963.
7. Бундук А.Н., Улицкая Е.О. Разработка алгоритма для расчёта статики когенерационной энергетической установки. *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
8. Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А., Беглов К.В. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Вип. 7. № 4. С. 18–24.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

Объектом исследования является регулирование газозвоздушного тракта энергетического котла, синтез математической модели динамики газозвоздушного тракта. Методом совершенствования системы управления газозвоздушного тракта, улучшаются качество и критерии переходных процессов, повышается надежность, уменьшается вмешательство человека в процесс регулирования. В результате разработки была получена современная автоматическая система регулирования разрежения в топке котла и концентрации кислорода в отходящих газах. Выбор данной системы приведет к повышению производительности, надежности, качества и облегчения обслуживания.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования (АСР), газозвоздушный тракт, разрежение, концентрация кислорода, закон регулирования, математическая модель, переходный процесс регулирования.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE GAS-AIR TRACT OF DRUM-TYPE BOILER

The object of research is adjustment of the gas-air of drum-type boiler. Synthesis of mathematical model of dynamics of gas-air tract. By the method of perfection of control system gas-air tract, quality and criteria of transients get better, reliability rises, diminishes interferences of man with the process of adjusting. As a result of development the modern automatic control system of rarefaction in heating of drum-type boiler and concentration of oxygen was got in outgoing gas. The choice of this system will result in the increase of the productivity, reliability of both quality and facilitation of service.

Key words: automatic control system (ACS), gas-air tract, rarefaction, concentration of oxygen, закон регулирования, mathematical model, переходный процесс регулирования.

Терлецький В.О.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ АСР ТЕМПЕРАТУРИ ПАРУ ЗА РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ВВЕР 1000 МВТ

Об'єктом проектування є технологічна ділянка редуційно-охолоджувальної установки, що входить у другий контур енергоблоку АЕС. Регулювання температури пару за РОУ енергоблоку 1000 МВт Південно-Української АЕС. У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується РОУ 14/6, яка призначена для зниження тиску і температури пару до заданих параметрів. Застосування РОУ підвищує ефективність роботи парової турбіни і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.

Ключові слова: АЕС, енергоблок, редуційно-охолоджувальна установка, температура.

Постановка проблеми. Редуційно-охолоджувальна установка призначена для зниження тиску і температури пару до заданих параметрів. Застосування РОУ підвищує ефективність роботи парової турбіни і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.

Зниження тиску здійснюється за допомогою дросельного регулюючого клапана, а температури – уприскуванням охолоджуючої води. Ефективне управління редуційно – охолоджувальною установкою АЕС із ВВЕР у номінальних і аварійних режимах роботи значною мірою забезпечує динамічну стійкість системи регулювання як окремого об'єкта, так і всього енергоблоку. Дуже важливий параметр, від якого залежить виконання цих функцій, – тиск і температура пари за редуційно-охолоджувальною установкою, які мають підтримуватися на певному нормованому значенні.

При автоматизації процесу регулювання температури пару за РОУ найважливішими параметрами є температура та тиск редукованої пари. Якщо РОУ з будь-яких причин не функціонує належним чином, у паропровід може потрапляти велика кількість води, частина якої буде випаровуватися, охолоджуючи пар, а частина буде накопичуватися в нижній частині паропроводу, що неминуче призведе до зниження його пропускної здатності і ризику виникнення гідроудару.

Постановка завдання. Моделювання АСР температури пару за редуційно-охолоджувальною установкою АЕС ВВЕР 1000 МВт для запобігання аварійного стану по температурі.

Для досягнення мети потрібно було вирішити такі завдання:

- розробити математичну модель РОУ як об'єкта керування;
- на базі отриманої моделі провести розрахунки сталої часу та коефіцієнту регулювання;
- провести аналіз отриманих результатів із метою виявлення граничних характеристик регулювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. На АЕС редуційно-охолоджувальна установка (РОУ) застосовується для подачі пари на ущільнення турбіни, до ежекторів і пароежекторним машинам.

Точність підтримки тиску і температури редукованої пари диктується споживачем. Зазвичай точність підтримки тиску пара становить $\pm 2\%$, температури – $1,5\%$.

Свіжий пар надходить до дросельного клапана **2** через вхідну засувку **1**, дроселюється спочатку в дросельному клапані, а потім в шумоглушнику **3**. Останні застосовуються при навколосвукових або надзвуковому перепаді тиску.

Охолоджуюча вода надходить через водяну засувку **4** і регулюючий клапан **6** на форсунку **8**. Часто перед дросельним клапаном **6** встановлюється дросельний пристрій у вигляді дросельної шайби **5** або групи шайб. Це робиться в тих випадках, коли охолоджуюча вода подається до РОУ від джерела з високим тиском (наприклад, від живильного насоса), що значно перевищує тиск, необхідний для упорскування води.

Дросельний пристрій розраховується на пропуск такої кількості води, яка необхідна для охо-

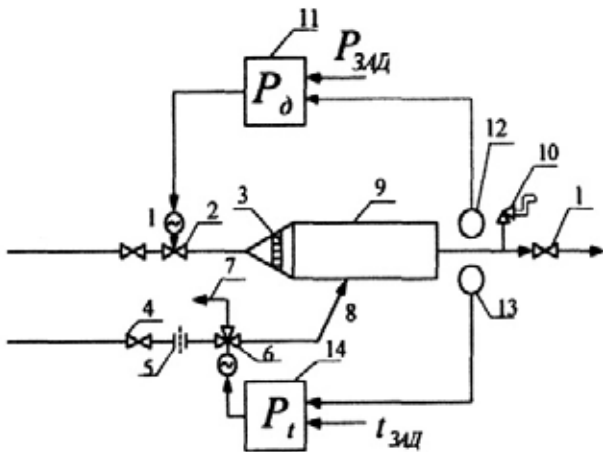


Рис. 1. Принципова схема включення і регулювання РОУ

лодження максимально можливої витрати пари. Для запобігання небезпечному підвищенню тиску дросельючого пару на вихідному паропроводі встановлюється запобіжний пристрій 10. На охолоджувачі пара 9 співвісно з його корпусом зазвичай встановлюється захисна труба, призначена для зменшення шкідливого впливу води на стінку охолоджувача пари.

Як об'єкт регулювання РОУ має дві регульовані величини: тиск і температура пари за РОУ.

Основним збурюючим впливом на тиск пари є зміна його споживання або тиску свіжої пари. Збурюючим впливом на температуру пари є зміна споживання пари, витрати і тиск свіжої пари.

Регулюючим впливом на тиск пари є зміна витрати свіжої пари, а на температуру – зміна витрати охолоджуючої води. Як об'єкт регулювання тиску РОУ володіє самовирівнюванням, і її динаміку можна описати рівнянням інерційної ланки першого порядку. Як об'єкт регулювання температури РОУ можна вважати безінерційним об'єктом, однак оскільки температура вимірюється інерційним датчиком, інерційність РОУ визначається інерційністю датчика.

Регулювання тиску здійснюється регулятором 11, які отримує імпульс від манометра 12 і впливає на клапан 2.

Температура дросельованого пара регулюється регулятором 14, який отримує імпульс від термоперетворювача 13 і впливає на клапан 6. Задля підвищення точності вимірювання температури термоперетворювач має встановлюватися на відстані 8–10 м після впорскування, щоб волога встигла повністю випаруватися. Іноді для збереження постійного перепаду тиску на клапані 6 в широкому діапазоні зміни витрат впорскування в

якості клапана 6 трьох ходовий клапан постійної витрати. Такий клапан забезпечує зміну подачі води в парохолоджувач шляхом скидання її в зливну лінію 7 при незмінній витраті води через дросель 5.

Як об'єкт управління РОУ представляє динамічну систему з двома керуєчими впливами: витрати перегрітої пари, охолоджувальної води і двома керованими параметрами (тиск і температура редукованої пари).

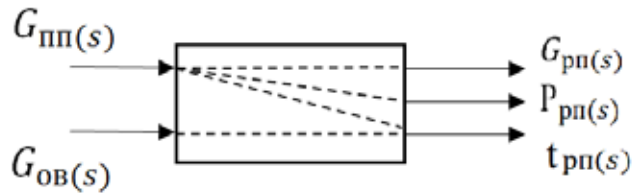


Рис. 2. Параметрична схема об'єкта регулювання

Для регулювання температури та тиску після редуційно-охолоджувальної установки використовується схем, зображена на рисунку 2, керуючою дією є зміна витрата охолоджувальної води $G_{ОВ}$ та витрата перегрітого пару $G_{ПП}$.

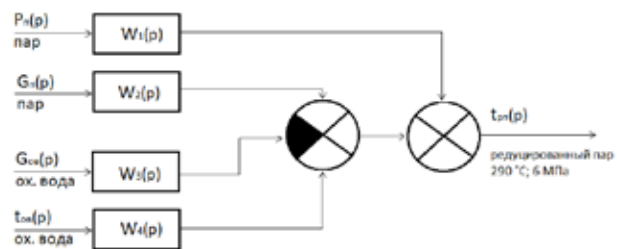


Рис. 3. Структурна схема АСР РОУ

Для цього об'єкта управління застосовується пропорційно-інтегральний закон регулювання, адже він забезпечує оптимальний час регулювання.

Об'єкт регулювання – одноємнісний; регульована величина – температура. Необхідні показники якості регулювання:

- максимальне динамічне відхилення регульованої величини $t, ^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$;
- час регулювання $t_p = 10 \text{ с}$;
- система регулювання має забезпечити апериодичний перехідний процес;

$$\tau = 1 \text{ с,}$$

$$\tau/T = 1/2,6 = 0,38$$

$$K_{об} = \Delta P / \Delta M = 2/5 = 0,4$$

На підставі відхилення $\tau/T = 0,38$ приймається регулятор безперервної дії.

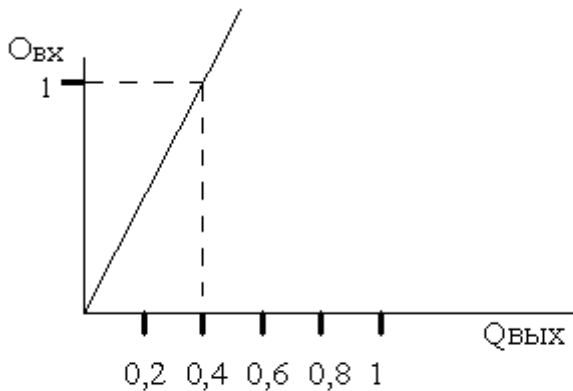


Рис. 4. Статична характеристика

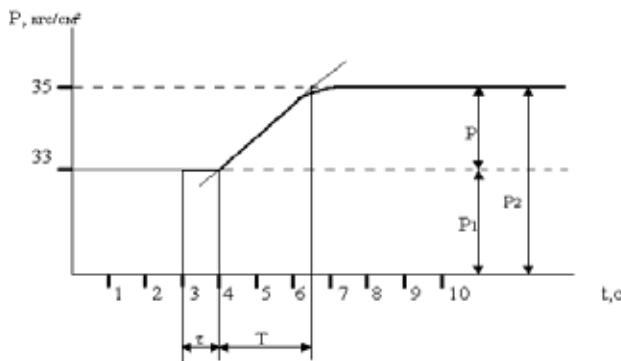


Рис. 5. Статична характеристика

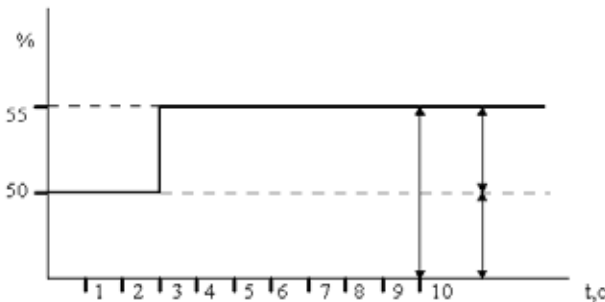


Рис. 6. Статична характеристика

За графіками характеристики процесу вибору закону управління з динамічними параметрами визначаємо динамічний коефіцієнт R_d , який характеризує ступінь впливу регулятора на стабілізацію технологічного параметра.

При $\tau/T = 0,38$ за таблицями визначаємо R_d і розраховуємо розрахунковий час регулювання.

Розрахунковий час регулювання не перевищує необхідного часу, отже, для цього об'єкта управління застосовується пропорційно-інтегральний закон управління, який має $R_d = 0,54$ і $tp/\tau = 8$ (с), бо він забезпечує оптимальний час 10 с.

Розрахунок параметрів настроювання K_p , T_i за наближеними формулами:

$$K_p = 0,6 \cdot T / K_{об} \cdot \tau = 0,6 \cdot 2,6 / 0,4 \cdot 1 = 3,9,$$

$$T_i = 0,8 \cdot \tau + 0,5 \cdot T = 0,8 \cdot 1 + 0,5 \cdot 2,6 = 2,1$$

K_p , T_i перевіряється за графічними залежностями

$$K_p = K_c / K_{об} = 1,4 / 0,4 = 3,5,$$

$$T_i = (T_i / \tau) \cdot \tau = 2,3 \cdot 1 = 2,3$$

За допомогою рівняння перевіряється стійкість системи управління з використанням критеріїв Гурвіца і Михайлова.

Система автоматичного управління описана диференціальним рівнянням.

Критерій стійкості Михайлова:

$$3,5p^3 + 5,5p^2 + 17,6p + 7 = 0,$$

$$p = i\omega,$$

$$3,5i\omega + 5,5i\omega^2 + 17,6i\omega + 7 = 0,$$

$$-3,5i\omega^3 - 5,5i\omega^2 + 17,6i\omega + 7 = 0$$

Початкове рівняння ділиться на дві рівності дійсне і уявне.

$$U(\omega) = -5,5i\omega^2 + 7 = 0,$$

$$V(\omega) = -3,5i\omega^3 - 17,6i\omega = 0$$

Надаючи ω значення $\omega = 0; 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; 3$, результати розрахунку дійсної і уявної частин зводимо в таблицю 2.

Таблиця 1

Таблиця дійсних і уявних значень

ω	0	0,25	0,5	1	1,5	2	3
$U(\omega)$	7	6,65	5,62	1,5	-5,37	-15	-42,5
$V(\omega)$	0	4,35	8,37	14,1	14,59	7,2	-41,7

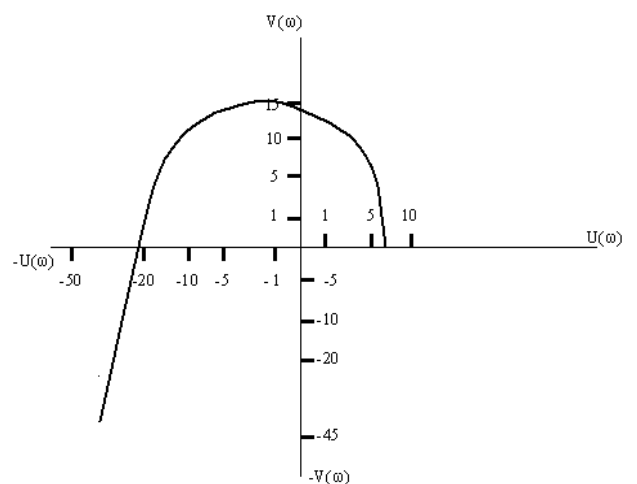


Рис. 7. Годограф

Згідно з умовою Михайлова система стійка.

Математична модель створена за допомогою програми Matlab.

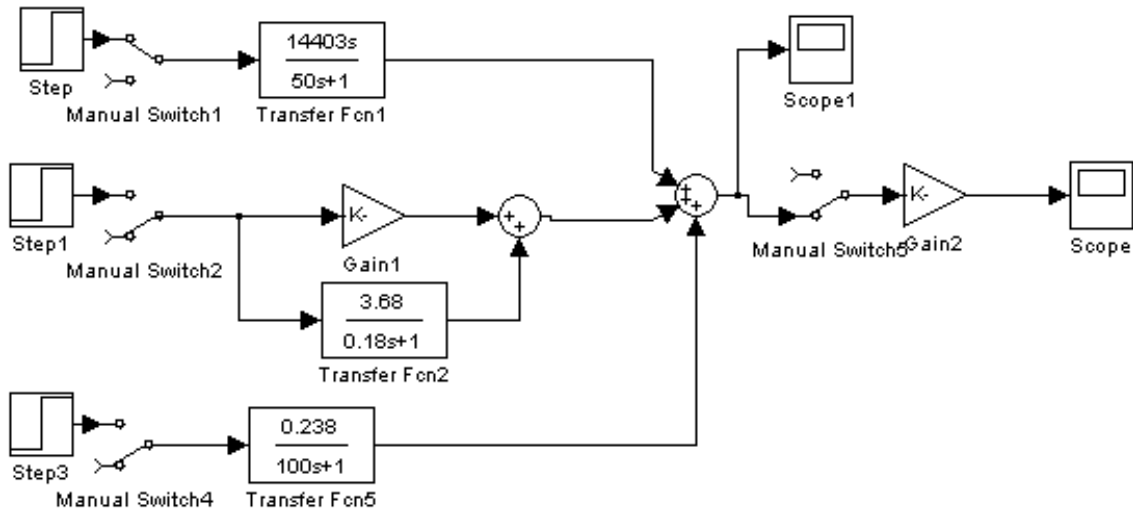


Рис. 8. Структурна схема РОУ в Simulink

Графіки перехідних процесів

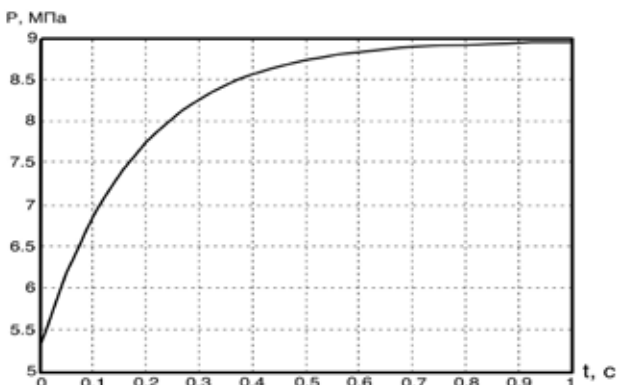


Рис. 9. Залежність тиску від часу у вигляді передаточної характеристики

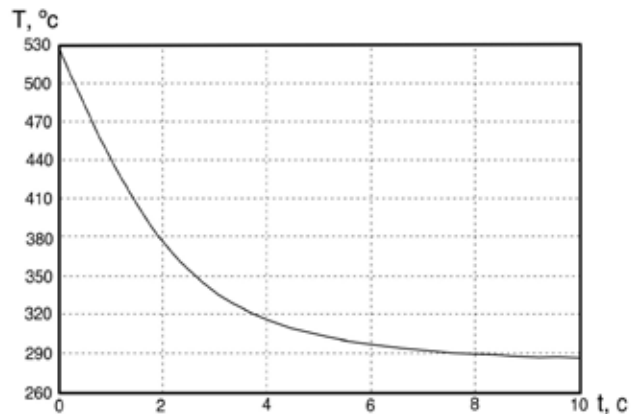


Рис. 10. Графік перехідного процесу регулювання при збуренні по каналу G_{OB}

Висновки. Було розглянуто такий технологічний об'єкт регулювання, як редукційно-охолоджувальна установка, яка є частиною другого контуру енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000. Було розглянуто принцип роботи редукційно-охолоджувальної установки. Також була розглянута параметрична схема технологічного об'єкту управління.

В результаті роботи була розроблена математична модель редукційно-охолоджувальної уста-

новки для регулювання температури пару шляхом забезпечення якості регулювання параметрів за РОУ. На базі отриманої моделі провели розрахунки сталої часу та коефіцієнту регулювання. Провели аналіз отриманих результатів і на підставі отриманих даних була розроблена автоматизована система регулювання температури за редукційно-охолоджувальною установкою, в якій управління РОУ здійснюється за допомогою цифрового ПІ-регулятора.

Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарніков В.П. Про можливість регулювання потужності енергосистеми за допомогою атомних електростанцій. *Теплоенергетика*. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Известия вузів. Серія «Ядерна енергетика»*. 2008. Вип. 4. С. 128–139.
3. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2007. Вип. 2(28). С. 56–59.

4. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.

5. Медведев Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2002. Вип. 2(22). С. 29–56.

6. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18–24.

7. Кисельова Н.І., Погрібний Я. С., Беглов К. В. Дослідження регулятора потужності з рідким поглиначем для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. *Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. Серія: Технічні науки. 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 134–140.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА ПО РЕДУКЦИОННО–ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС ВВЕР 1000 МВт.

Объектом проектирования является технологический участок редуционно-охладительной установки, которая входит во второй контур энергоблока АЭС. Регулирование температуры пара за РОУ энергоблока 1000 МВт Южно-Украинской АЭС. В тепловой схеме атомной электростанции с реактором типа ВВЕР-1000 применяется РОУ 14/6, которая предназначена для снижения давления и температуры пара до заданных параметров. Применение РОУ повышает эффективность работы паровой турбины и существенно влияет на безопасность и надежность АЭС.

Ключевые слова: АЭС, энергоблок, редуционно-охладительная установка, температура.

SIMULATION ASR OF THE TEMPERATURE OF THE STEAM AFTER THE REDUCTION COOLING INSTALLATION OF THE POWER UNIT NNP OF THE WWER 1000 MW

The object of the design is the technological part of the reduction and cooling unit, which is included in the second circuit of the NPP power unit. Regulation of the steam temperature for the RWU of the 1000 MW unit of the Ukrainian NPP. In the thermal scheme of a nuclear power plant with a WWER-1000 reactor, RCU 14/6 is used, which is designed to reduce the pressure and temperature of steam to the given parameters. Application of RCU improves the efficiency of the steam turbine and significantly affects the safety and reliability of the NPP.

Key words: nuclear power plant, power unit, reduction and cooling plant, temperature.

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

Лысюк А.П.

Одесский национальный политехнический университет

Костюкова О.Н.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ С РАЗРАБОТКОЙ УЧЕБНОГО СТЕНДА

Статья посвящена разработке АСР уровня воды в емкости с возможностью изменения законов регулирования, задания, а также нагрузки в режиме реального времени на базе платформы Arduino с визуализацией регулируемой величины и управляющего воздействия.

Ключевые слова: *уровнемер, управляющее воздействие, возмущающее воздействие, закон регулирования.*

Постановка проблемы. Развитие учебно-лабораторной базы для подготовки специалистов по компьютерным технологиям и автоматизации, оперативная адаптация лабораторных и практических занятий для изучения наиболее актуальных вопросов автоматизации являются задачами совершенствования системы подготовки кадров. Поиск путей совершенствования методических подходов в образовательной деятельности, как в целом, так и в практической составляющей обучения, является одной из важнейших задач высшей школы на современном этапе [3, с. 7]. Модернизация лабораторной базы для подготовки специалистов по автоматизации предполагает создание новых учебных лабораторий для исследования компьютерно-интегрированных систем управления уровнем, что позволит сформировать необходимые практические навыки и выработать требуемые компетенции для будущей профессиональной деятельности студентов.

Анализ последних исследований и публикаций. Появление первых микропроцессоров ознаменовало начало новой эры в развитии микропроцессорной техники. Наличие в одном корпусе большинства системных устройств сделало микроконтроллер подобным обычному компьютеру. Раньше они назывались однокристальными микроЭВМ. Чтобы собрать устройство и микроконтроллер, необходимо знать основы схемотехники, устройство и работу конкретного процессора, уметь программировать на ассемблере и изготавливать электронную технику. В настоящее время все

изменилось. Сейчас существует такое устройство, как проект Arduino [5, с. 55]. В одной из последних статей Р.А. Аджиева («Микроконтроллеры. Arduino и IDE среда разработки») описано начало создания Arduino, историческая справка и все положительные стороны данной платформы.

Сегодня существует множество микроконтроллеров и платформ для осуществления управления физическими процессами применительно к микропроцессорным комплексам. Большинство этих устройств объединяют разрозненную информацию о программировании и заключают ее в простую в использовании сборку. Фирма Arduino, в свою очередь, тоже упрощает процесс работы с микроконтроллерами, однако обеспечивает ряд преимуществ перед другими устройствами из-за простой и понятной среды программирования, низкой цены и множеством плат расширения. В статье В.С. Лободина, С.Р. Пана, И.В. Пугачева, В.Н. Трофименкова, Я.Н. Тузка «Применение Arduino в учебном процессе» показано, что для преподавателей, студентов и любителей платформа Arduino стала основным элементом для исследования и решения задач в областях мехатроники, робототехники и автоматизации [5, с. 51].

Постановка задачи. Цель статьи – разработать учебно-лабораторный стенд исследования компьютерно-интегрированной системы управления уровнем воды в емкости для возможности использования в учебном процессе на практических занятиях на базе платформы Arduino, разра-

ботать программное обеспечение для визуализации переходных процессов регулирования.

Изложение основного материала исследования. Принципиальная схема разрабатываемого стенда изображена на рис. 1. Установка состоит из двух емкостей, наполненных жидкостью, в каждой из которых установлен насос (управляющий 5 и возмущающий 4). Ток зависит от напряжения питания (2,5–6 В), мощности 0.4–1.5 Вт, скорость перекачивания жидкости составляет до 2 л/мин, или 120 л/час. Материал корпуса – пластик, загерметизирован. Максимальная высота водяного столба – 0,4–1,1 м.

В емкости 1 поддерживается уровень жидкости с помощью насоса 5, который приводит к перекачиванию воды из емкости 2 в емкость 1. Установка может работать в двух режимах – авто и ручной, которые выбираются с помощью ИК –

пульта управления 10. ИК-приемник и инфракрасный пульт дистанционного управления – самый распространенный и простой способ управления электронной аппаратурой. С помощью ИК-пульта также меняем задание, коэффициенты регулятора и осуществляем выбор закона регулирования. Устройство работает на расстоянии 40 м.

Насос 5 управляется с помощью MOSFET – транзистора в ШИМ-режиме. Модуль (драйвер) силового MOSFET-транзистора используется для подключения мощной нагрузки на выход контроллера, работающей на постоянном токе. Отличие этого модуля от модуля реле в его высоком быстродействии и долговечности. Отсутствие механических контактов в данном модуле управления нагрузкой, по сравнению с электромагнитным реле, дает на несколько порядков большую надежность и долговечность. Модуль имеет

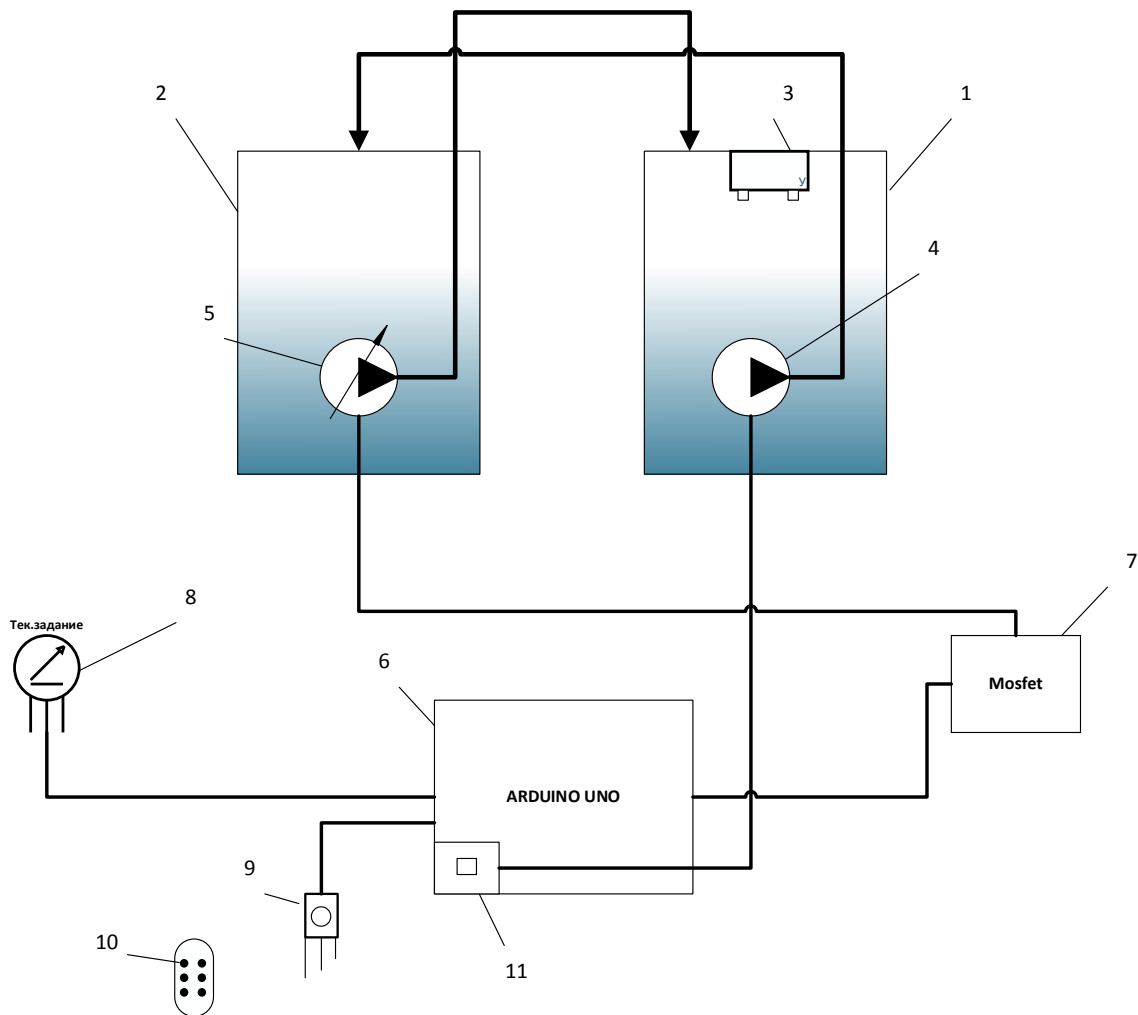


Рис. 1. Принципиальная схема установки:

- 1 – емкость с регулируемым уровнем; 2 – емкость слива лишней жидкости;
 3 – ультразвуковой модуль HC-SR04; 4 – возмущающий насос, имитирующий потребление воды; 5 – управляющий насос; 6 – плата Ардуино UNO; 7 – транзистор; 8 – сервопривод;
 9 – ИК-приемник; 10 – пульт управления; 11 – кнопка для изменения расхода воды в емкости 1.

управляющее напряжение 3,3–5 В, напряжение на выходе 0–24 В и ток нагрузки до 5 А.

Измерение уровня в емкости 1 проводится с помощью ультразвукового модуля HC-SR04. Устройство посылает 8 импульсов звуковых волн с частотой 40 кГц и принимает отраженную волну. Далее измеряется временная задержка между отправленным и принятым сигналом и происходит вычисление расстояния по формуле $D=TS/2$, где D – это расстояние, T – временная задержка и S – скорость звукового сигнала.

Датчик имеет разрешение 0,3 см, а диапазон измерения от 2 до 500 см.

Поддержание уровня в резервуаре 1 может осуществляться одним из трех законов регулирования – П, ПИ и релейным. Весь процесс реализован на платформе Arduino Uno. Arduino Uno – этот контроллер построен на платформе ATmega328, имеющей 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки [6, с. 152].

С помощью разработанного стенда получены экспериментальные кривые разгона (рис. 2) по каналу управления и по каналу возмущения.

Передаточные функции объекта по каналу управления и возмущения являются интегрирующими звеньями. А коэффициенты передаточных функций, определенные по кривым разгона имеют вид:

$$W_{упр} = \frac{k}{p} = \frac{0,004}{p}$$

$$W_{возм} = \frac{k}{p} = \frac{-0,004}{p}$$

После получения передаточных функций объекта были синтезированы цифровые П и ПИ законы регулирования, а также реализован релейный регулятор [9, с. 40].

Разработанный стенд (рис. 3) функционирует согласно следующему алгоритму:

При нажатии кнопки 11 изменяется расход воды из емкости 1, в которой поддерживается уровень жидкости, происходит включение насоса 4, который приводит к перекачиванию воды из емкости 1 в емкость 2. Результат представлен на рис. 5, где показано изменение уровня, в соответствии с включенным регулятором – П, ПИ и релейный, в емкости 1 при удержании кнопки 11 в течении 10 с. На рис. 4 мы можем наблюдать, что при действии возмущения регулятор выводит значение уровня на заданное.

Разработанный стенд позволяет получать графики переходных процессов регулирования, демонстрирует отличие действия П, ПИ и релейного закона управления [7, с. 179], в составе АСР уровня (рис. 4, 5).

При увеличении задания с помощью ИК-пульта 10 регулятор выводит уровень на заданный (14 см), что показано на рис. 4.

При работе с платой Arduino результат вычисления выводится на Serial Monitor. Но это не единственная возможность для получения данных на экране. Приложение Processing имеет очень много возможностей, в том числе и библиотеку Serial,

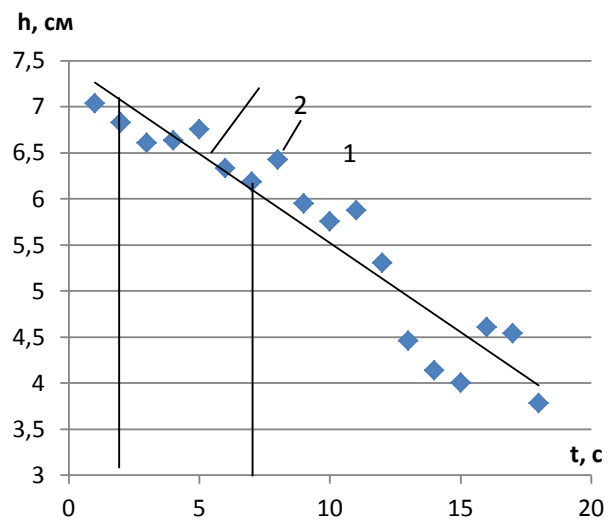
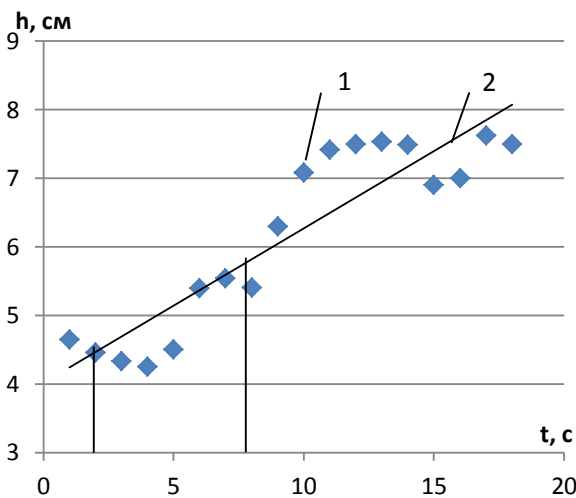


Рис. 2. Кривая разгона объекта при изменении управляющего воздействия (а) и возмущающего воздействия (б): 1 – экспериментальные точки; 2 – аппроксимирование точки (точки сглаживания)

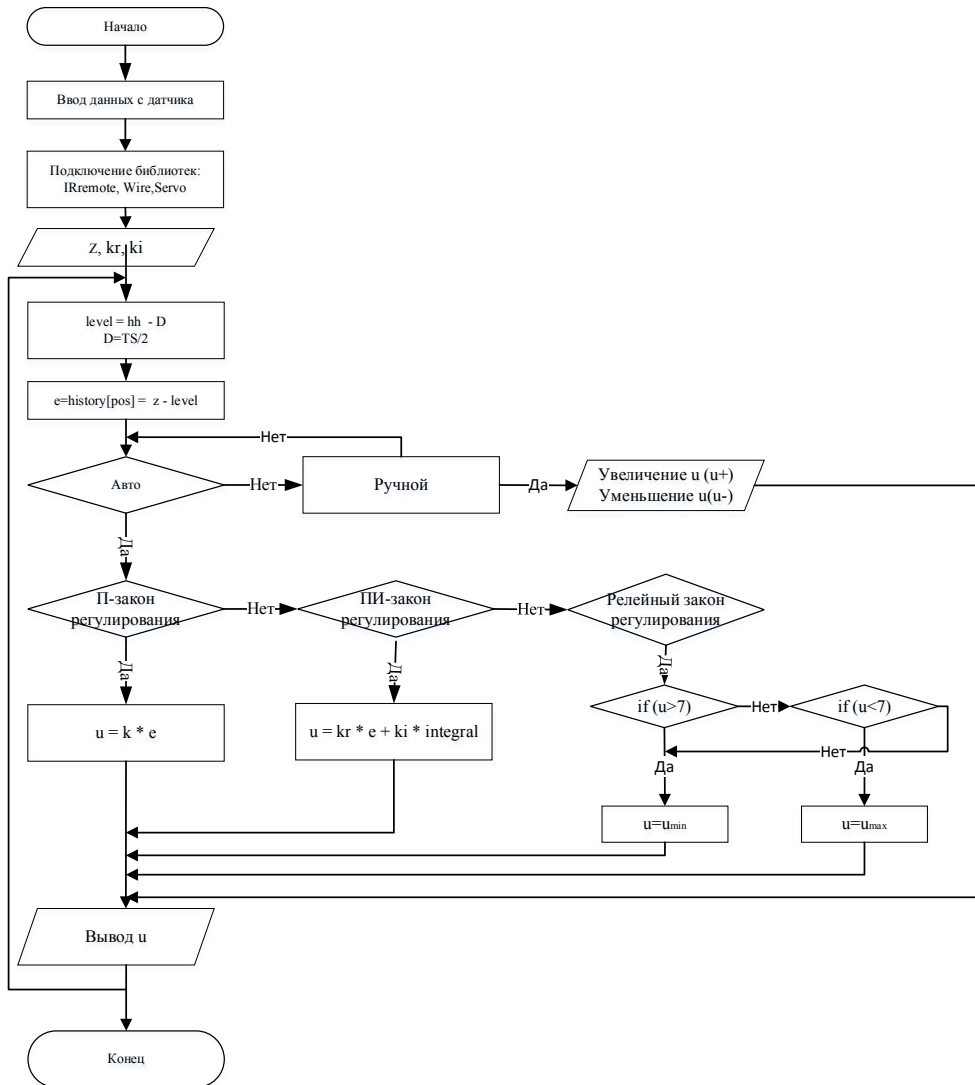


Рис. 3. Структурна схема установки

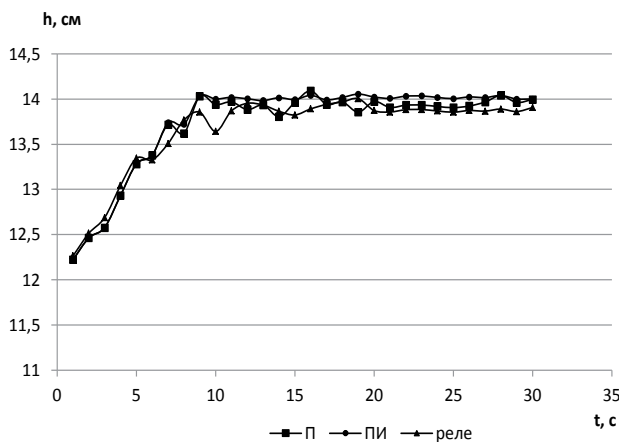


Рис. 4. Переходной процесс регулирования уровня при изменении задания с использованием разных видов регулятора

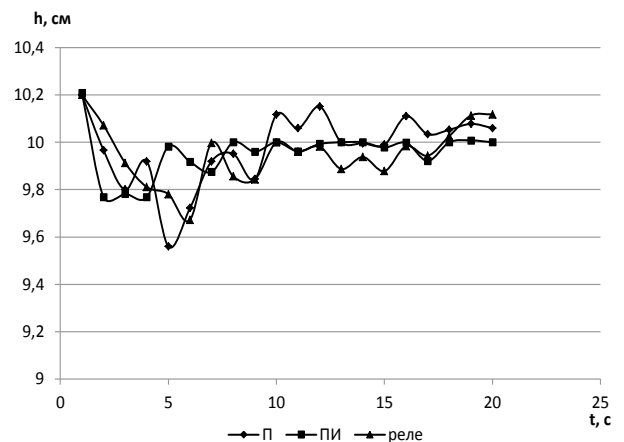


Рис. 5. Переходной процесс регулирования уровня с разными регуляторами при действии возмущения

поэтому возможна передача данных между платой и Processing. Processing – это язык программирования для создания интерактивных визуальных эффектов, базируется на графических возможностях языка Java и использует его упрощённый синтаксис, лёгкий и быстрый инструментарий.

Для разработанного учебного стенда была написана программа в Processing, с помощью которой мы можем наблюдать изменение уровня и возмущения в режиме реального времени, также выводим значения заданного и текущего уровня.

На рис. 6 мы можем наблюдать процесс регулирования уровня.

С помощью приложения Processing реализовано графическое представление данных с датчика уровня, а также управляющего воздействия и задания регулятора.

Выводы. Таким образом, платформу Arduino можно использовать в учебном процессе для создания лабораторных установок. Была разработана АСР уровня воды в емкости с возможностью изменения законов регулирования, задания, а также нагрузки в режиме реального времени, а также разработано программное обеспечение

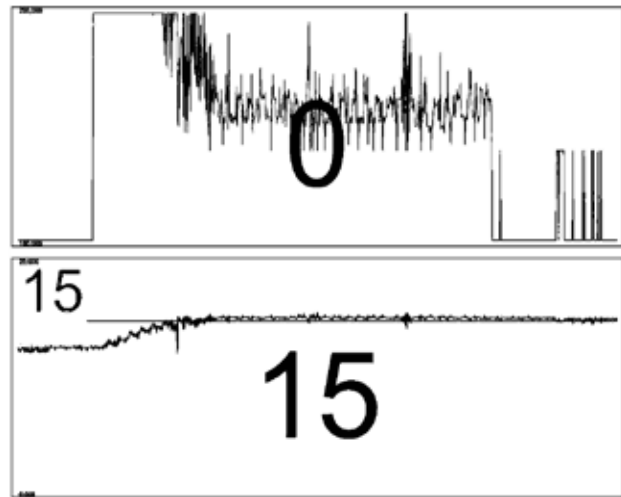


Рис. 6. Вывод в Processing

для визуализации переходных процессов регулирования.

Обучение студентов с использованием данной лабораторной установки позволит сформировать необходимые практические навыки и выработать требуемые компетенции для будущей профессиональной деятельности студентов.

Список литературы:

1. Улицкая Е.О., Бундюк А.Н. Разработка алгоритма для расчёта статики когенерационной энергетической установки. *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
2. Лисюк А.П., Белова Н.А. Genetic algorithms application to decide the issue of single-dimensional cutting optimization. *Automation of technological and business processes*. 2016. № 2. Т. 8. Р. 4–8.
3. Данилов А.Н., Кон Е.Л., Кон Е.М., Южаков А.А. Модель многоканального управления учебным процессом высшей школы. *Открытое образование*. 2012. № 2. С. 7–11.
4. Онлайн курс по Ардуино на базе простого стартового набора. Geektimes. URL: <https://geektimes.ru/post/279860/> (дата обращения: 28.04.2019)
5. Лободинов В.С., Пан С.Р., Пугачев И.В., Трофименко В.Н., Тузко Я.Н. Применение Arduino в учебном процессе. *Молодой исследователь Дона*. 2019. № 1(16). С. 51–55.
6. Байда А.С. Использование платформы Arduino при подготовке специалистов автомобильной отрасли. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2016. № 5 (май). С. 150–156.
7. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методы побудови адаптивних систем управління. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси і системи*. 2009. № 2. С. 174–179.

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ ВОДИ З РОЗРОБКОЮ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ

Стаття присвячена розробці АСР рівня води в ємності з можливістю зміни законів регулювання, завдання, а також навантаження в режимі реального часу на базі платформи Arduino з візуалізацією регульованої величини і дії, що управляє.

Ключові слова: рівнемір, управляюча дія, збурюючий вплив, закон регулювання.

THE COMPUTER INTEGRATED CONTROL SYSTEM OF WATER LEVEL WITH DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL STAND

Article is devoted to development of ASR of water level in capacity with a possibility of change of laws of regulation, a task and also loading in real time on the basis of the Arduino platform with visualization of adjustable size and the operating influence.

Key words: level gauge, operating influence, revolting influence, law of regulation.

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

Широкова А.Н.

Одесский национальный политехнический университет

НАСТРОЙКИ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИМЕРЕ КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ АЭС: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КД

Особенность процессов управления в системе компенсации давления АЭС с ВВЭР-1000 состоит в том, что некоторые из регуляторов воздействуют на одни и те же исполнительные механизмы, только в различных режимах работы. В стационарном состоянии мощность ТЭНов (трубчатый электронагреватель) компенсирует потери теплоты в окружающую среду. При понижении температуры теплоносителя часть этого теплоносителя переходит в первый контур. Пар в компенсаторе давления (КД) расширяется и давление его падает. Для его восстановления необходимо увеличить мощность ТЭНов. При увеличении мощности реактора процессы происходят в обратном направлении. При больших и быстрых повышениях давления используется впрыск воды с холодной нити циркуляционного контура. Если после открытия клапанов впрыска давление в компенсаторе продолжает расти, то пар сбрасывается в барботер. Если это не помогает, то в атмосферу. Таким образом, одной из регулируемых величин является давление теплоносителя. Проанализирован вопрос о создании имитационной модели КД с использованием релейного регулятора.

Ключевые слова: релейный регулятор, давление, АЭС, исполнительные механизмы, компенсатор давления, система управления.

Постановка проблемы. Компенсатор давления является важным объектом, работающим на поддержание давления в первом контуре при проектных нарушениях условий нормальной эксплуатации и проектных аварийных ситуациях. Повышение или снижение давления в первом контуре может привести к аварии на атомной электростанции, поэтому целью данной статьи является управление КД с помощью релейного регулятора.

Постановка задания. Целью статьи является создать имитационную модель компенсатора давления, показать обзор настройки релейного регулятора на примере компенсатора давления АЭС с дальнейшей настройкой релейных регуляторов, управляющих работой группы ТЭНов и группы клапанов впрыска воды.

Изложение основного материала исследования. Система компенсации давления необходима для реакторов, охлаждаемых водой под давлением, и предназначена для компенсации температурных изменений объема воды, заполняющей контур. Она используется также для создания давления при пуске, поддержания давления в эксплуатации и ограничения отклонений давления в аварийных режимах.

Система компенсации давления теплоносителя – автономная система ядерного реактора, подключае-

мая к контуру теплоносителя с целью выравнивания колебаний давления в контуре во время работы реактора, возникающих за счет теплового расширения.

Основным элементом системы является паровой компенсатор давления, состоящий из вертикального цилиндрического сосуда, нижняя часть которого заполнена водой и соединена с «горячей» ниткой главного циркуляционного трубопровода первого контура. Давление в компенсаторе создается паровой «подушкой» за счет кипения теплоносителя, нагреваемого электронагревателями, размещенными под свободным уровнем. В переходных режимах при колебаниях средней температуры теплоносителя, связанных с изменением нагрузки или нарушениями в работе оборудования реакторной установки, в первом контуре меняется давление. При этом часть теплоносителя перетекает в контур или из контура в компенсатор давления по соединительным трубопроводам.

В системе компенсации давления реализовано несколько технических решений, которые, последовательно вступая в работу, позволяют решить задачу поддержания давления теплоносителя в реакторном контуре в проектных пределах:

– изменение объема паровой части компенсатора давления при фазовых переходах (уменьшение объема при росте давления в реакторном

контуре и его увеличение при снижении этого давления);

- включение электронагревателей при некомпенсированном за счет фазового перехода снижении давления в реакторном контуре;

- включение впрыска в компенсатор давления воды из «холодного» трубопровода реакторного контура при некомпенсированном повышении давления в нем;

- сброс через предохранительные клапаны (три уровня по давлению) паровой фазы из компенсатора давления в барботер, где пар конденсируется при охлаждении объема барботера водой промежуточного контура и давление в баке-барботере снижается;

- при чрезмерном росте давления в баке-барботере открываются разрывные мембраны на корпусе бака, за счет чего давление снижается.

Единственным входным воздействием КД является средняя температура теплоносителя первого контура. Однако в реальной энергетической установке возмущающими воздействиями на давление являются изменение реактивности (ρ) реактора на турбину. Аналитический вывод уравнений динамики по указанным каналам довольно громоздок, поэтому в работе были использованы экспериментальные кривые разгона КД для энергоблока с ВВЭР-1000. Известно, что динамические свойства КД при возмущении реактивностью являются нелинейными.

Такие нелинейные свойства при структурном моделировании с помощью типовых звеньев можно приближенно описать с помощью инерционных звеньев первого порядка и звена чистого запаздывания, как показано на рис. 1.

В приведенных коэффициентах передачи давление выражено в МПа, реактивность – в относительных единицах. Использование данной экспериментальной математической модели позволило

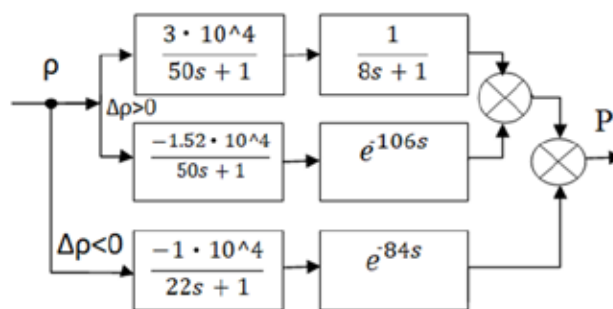


Рис. 1. Структурная схема модели КД по давлению по каналам реактивности [1]

получить кривые разгона по каналу давления при изменении реактивности (рис. 2).

В табл. 1 представлены номинальные значения параметров, при которых срабатывают датчики включения ТЭНов либо впрыска.

Таблица 1

Настройки включения регулирующего воздействия

Значение параметра, кгс/см ²	Регулирующее воздействие	Зона нечувствительности соотв. релейных элементов
164,0	Вкл. впрыск	0,5
160,0	Вкл. впрыск	0,2
159,9	Вкл. ТЭН	0,2
158,5	Вкл. ТЭН	2
157,0	Вкл. ТЭН	3
155,0	Вкл. ТЭН	5

Для последующего синтеза релейной АСР компенсатора давления была создана структурная схема имитационной модели, изображенной на рис. 3.

Системы с релейными регуляторами относятся к классу нелинейных АСР. Характерной особенностью АСР с релейными регуляторами является

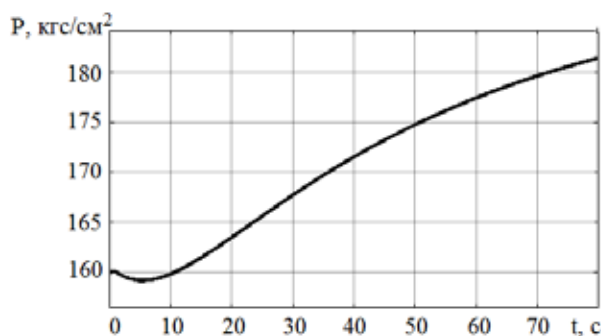
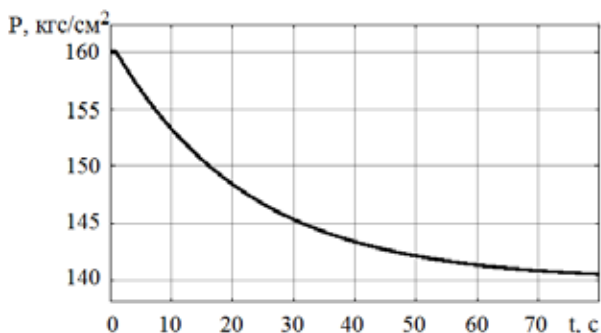


Рис. 2. Кривые разгона компенсатора давления при уменьшении (а) и увеличении (б) реактивности

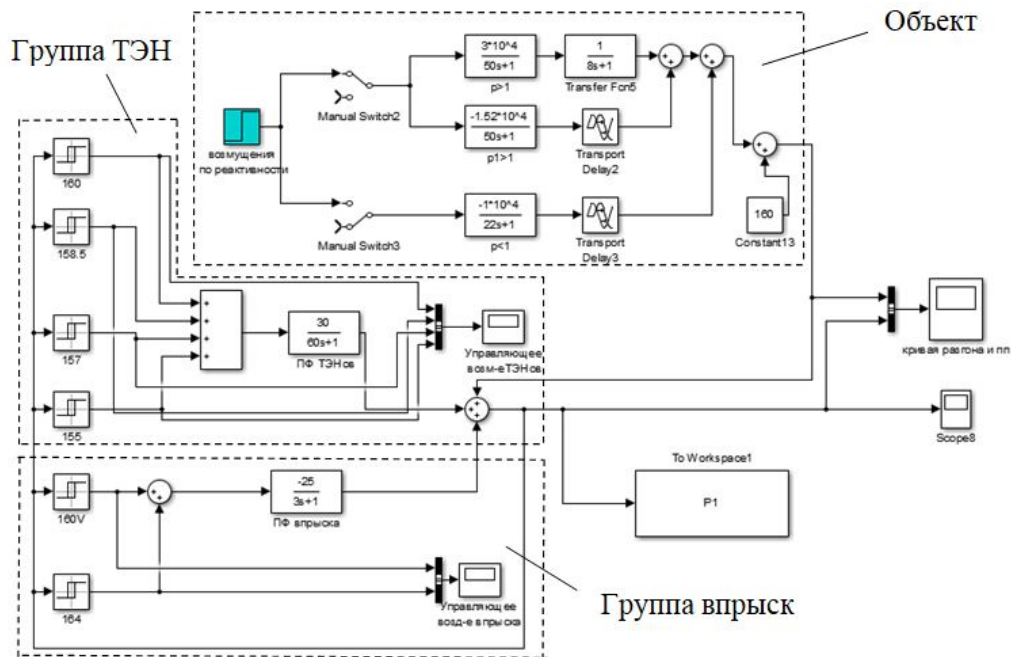


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели

наличие автоколебаний. На рис. 4 изображены типовые графики автоколебаний и изменения регулирующего воздействия в релейной системе регулирования.

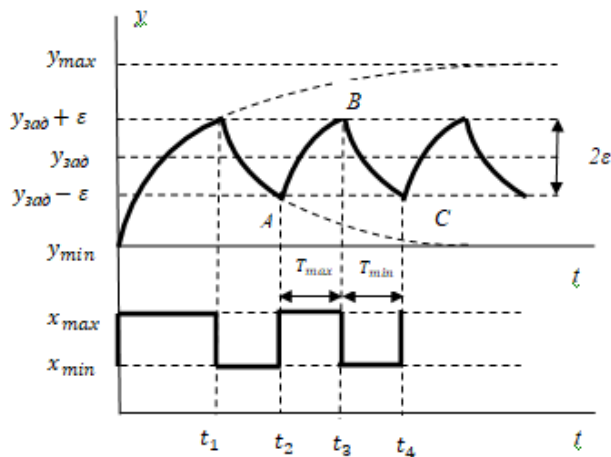


Рис. 4. Автоколебательный переходный процесс и изменение регулирующего воздействия

Здесь y_{max} и y_{min} – максимальное и минимальное установившееся значение регулируемой переменной, соответствующие максимальному x_{max} и минимальному x_{min} значениям регулирующего воздействия и связанные с ним через коэффициент передачи объекта регулирования:

$$y_{max} = Kx_{max}$$

$$y_{min} = Kx_{min}$$

Наличие запаздывания в передаточной функции объекта приводит к отставанию регулируемой переменной на величину τ (штриховая и сплошная линии на рис. 5). Вследствие этого моменты переключения регулирующего воздействия также сдвигаются на τ , что приводит к возрастанию амплитуды и периода автоколебаний.

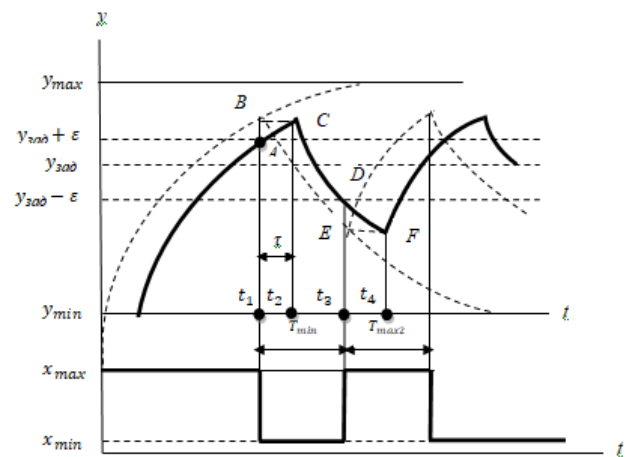


Рис. 5. Графики автоколебаний и регулирующего воздействия

При нанесении возмущения по реактивности $\Delta p = +0.004$ средняя температура теплоносителя первого контура понижается и давление падает (рис. 6), что приводит к включению одного ТЭНа на 4 с, тем самым давление стабилизируется. Далее давление повышается и переходит за гра-

ниці допустимых значений, что приводит к включению клапанов впрыска (на 8 с), таким образом устанавливается устойчивый автоколебательный процесс.

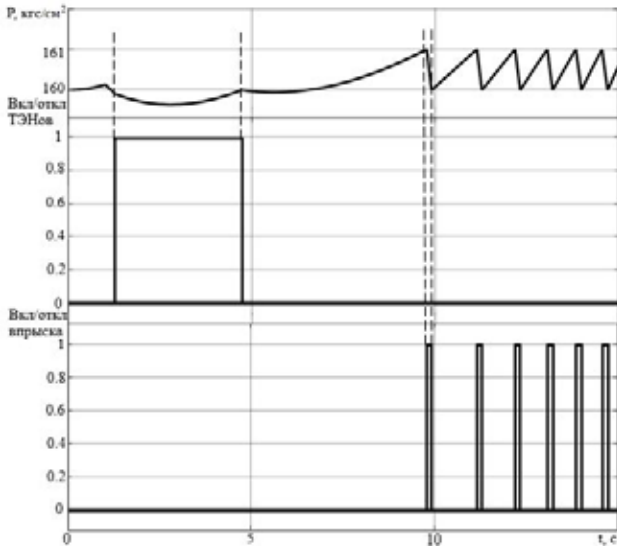


Рис. 6. Переходной процесс регулирования давления и вызвавшее его управляющее воздействие

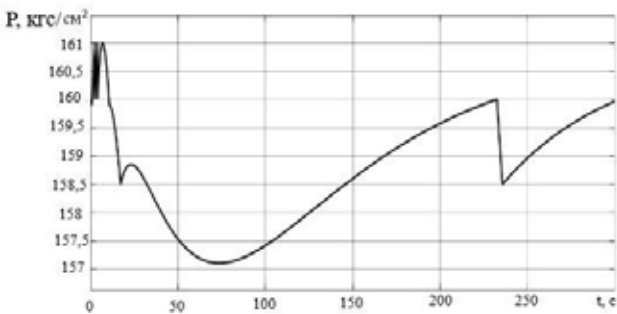


Рис. 7. Переходной процесс регулирования

При нанесении возмущения по реактивности $\Delta\rho = -0.004$ давление падает до 157 кг/см^2 (рис. 7), что приводит к включению одного ТЭНа. Так как его мощности недостаточно, подключается второй нагреватель, что можно наблюдать на рис. 8, и на 225 с давление ста-

билизируется и поддерживается в допустимом диапазоне.

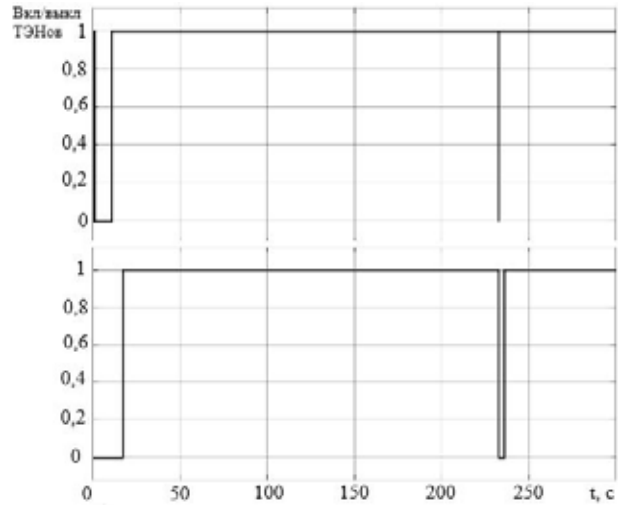


Рис. 8. Управляющее воздействие

Выводы. Создана имитационная модель компенсатора давления с использованием релейного регулятора. Компенсатор давления вызывает интерес в качестве объекта управления, так как обладает двумя видами управляющих воздействий для точного поддержания заданного давления. Таким образом, использование релейных законов управления является единственным возможным решением, так как позволяет настроить работу группы нагревателей, состоящих из 4 ТЭНов, а также группу впрыска, состоящей из двух клапанов. Система управления настроена таким образом, что в случае нехватки управляющего воздействия одного из клапанов впрыска параллельно включается второй клапан. Аналогично, при падении давления и недостаточности мощности трубчатого нагревателя последовательно подключаются незадействованные ТЭНы. Анализ качества полученных переходных процессов свидетельствует об их соответствии требованиям технологического регламента, ошибка регулирования давления не превышает $\pm 5 \text{ кг/см}^2$.

Список литературы:

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов процессов АЭС и ТЭС / КБ «Теплоэнерго», 2001. Вып. 102 с.
2. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. Вып. 6. 19 с.
3. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. *Известия вузов. Серия «Ядерная энергетика»*. 2008. Вып. 4. С. 128–139.
4. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержке суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.

5. Современные технологии управления : монография: в 2 т. / Под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса : Куприенко С.В., 2012. 179 с.

6. Медведев Р.Б., Сангинова А.В. Оптимальное управление процессом изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС с ВВЭР-1000. *Научные вестники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. 2002. Вып. 2 (22). С. 29–56.

7. Волошкина А.А., Беглов К.В., Плахотнюк А.А. Исследование регулятора концентрации жидкого поглотителя энергоблока АЭС. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. 2015. Т. 7. Вып. 4. С. 18–24.

8. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. Москва : Энергоиздат, 1981. 159 с.

НАЛАШТУВАННЯ РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИКЛАДІ КОМПЕНСАТОРА ТИСКУ АЕС: ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ КТ

Особливість процесів управління в системі компенсації тиску АЕС із ВВЕР-1000 полягає в тому, що деякі з регуляторів впливають на одні і ті самі виконавчі механізми, тільки в різних режимах роботи. У стаціонарному стані потужність ТЕНів (трубчастий електронагрівач) компенсує втрати теплоти в навколишнє середовище. При зниженні температури теплоносія частина цього теплоносія переходить у перший контур. Пар у компенсаторі тиску (КТ) розширюється і тиск його падає. Задля його відновлення необхідно збільшити потужність ТЕНів. При збільшенні потужності реактора процеси відбуваються в зворотному напрямі. При великих і швидких підвищеннях тиску використовується вприскування води з холодної нитки циркуляційного контуру. Якщо після відкриття клапанів уприскування тиск у компенсаторі продовжує зростати, то пар скидається в барботер. Якщо це не допомагає, то в атмосферу. Таким чином, однією з регульованих величин є тиск теплоносія. Проаналізовано питання про створення імітаційної моделі КТ із використанням релейного регулятора.

Ключові слова: релейний регулятор, тиск, АЕС, виконавчі механізми, компенсатор тиску, система управління.

RELAY REGULATOR SETTINGS ON THE EXAMPLE OF NPP PRESSURE COMPENSATOR: PC SIMULATION MODEL

The peculiarity of control processes in the pressure compensation system of NPPs with VVER-1000 is that some of the regulators act on the same actuators, only in different operating modes. In steady state, the power of the heating element (tubular electric heater) compensates for the loss of heat into the environment. When the temperature of the coolant decreases, a part of this coolant passes to the first circuit. The vapor in the pressure compensator (PC) expands and its pressure drops. To restore it, it is necessary to increase the power of heating elements. With increasing reactor power, the processes occur in the opposite direction. With large and rapid increases in pressure, water is injected from the cold filament of the circulation circuit. If, after opening the injection valves, the pressure in the compensator continues to increase, the steam is discharged into the bubbler. If this does not help, then the atmosphere. Thus, one of the regulated values is the pressure of the coolant. Analyzed the issue of creating a simulation model of the PC with the use of a relay controller.

Key words: relay controller, pressure, nuclear power plant, actuator, pressure compensator, control system.

Furtat I.E.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Furtat Yu.O.

Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, NASU

METHOD OF INCREASING AUTOMATED SYSTEMS' RELIABILITY AND EFFICIENCY USING ADAPTIVE USER INTERFACES AND DOMAIN MODELS BASED ON THE USERS' COGNITIVE CHARACTERISTICS AND WORK PROCESS' SPECIFICS

In modern automated systems users are often facing the information overload problem because of ever increasing volumes of information requiring treatment in short time. Working in these conditions affects the system operator's work quality and the systems' reliability. One possible approach to solving the information overload problem is to create personalized interfaces that take into account the user's information management particularities. System operator's features, which determine their preferred information representation shape and pace, form the user's cognitive portrait. Cognitive portrait is built as a result of user interaction with the software diagnostic tools that are based on the cognitive psychology methods. The principles of construction and management of the automated systems' UI (responsible for a form of presenting information to the user) and domain (responsible for a structure of presenting information to the user) models are considered as components of the complex of means for managing user's informational interaction with the automated system management means, adapting this interaction to the user's individual characteristics and work process specifics.

Key words: automated system, informational interaction, user interface, interface adaptation, cognitive portrait, domain model.

Introduction. User interaction with information in the automated system is conducted through system generating an information flow [3–5] that the user perceives and processes (fig. 1).

Based on received information users make some decisions using their own skills and knowledge in long-term memory (LTM), that are transmitted via the user interface to the system, changing its state. Set of UI management elements is determined by the specific workflow tasks and user's characteristics. The flow of information from the system is formed with

regard to the user's requests to the system, current workflow step and user interface's output elements through which data will be displayed for the perception and processing of the user. Each of the participants and the elements of information exchange has a number of features, by managing which the process can be adapted to the specific user and the specific situation in the workflow.

Information flow parameters and adaptation. Information flow I from the system can be described as a set of parameters:

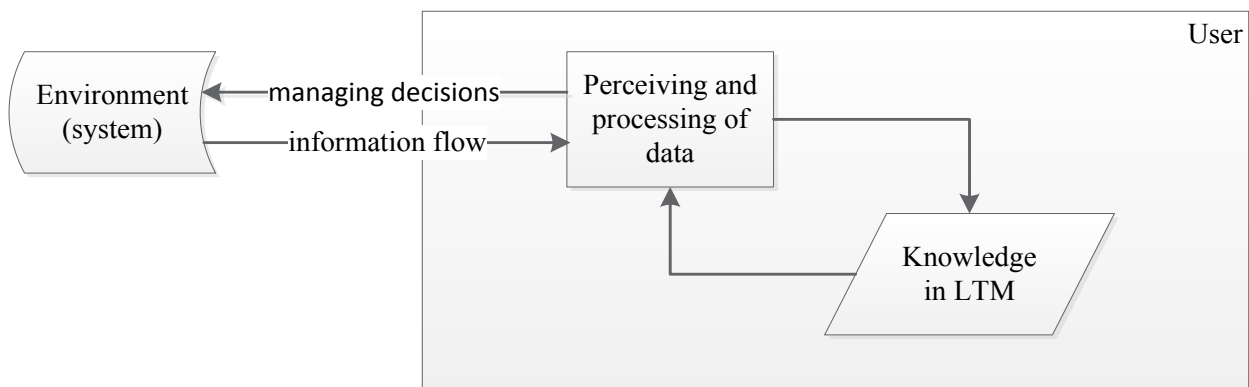


Fig. 1. User-system informational interaction scheme

$$I = \langle T, F, C, D \rangle, \quad (1)$$

T – pace of presentation, F – data format, C – information complexity, its connectivity to other blocks of data, D – transmitted data.

Pace of presentation is a qualitative characteristic that can be set to $T = \langle \text{“low”}, \text{“medium”}, \text{“high”} \rangle$. The pace of presenting information in automated systems can be managed in non-critical situations by changing the flow intensity depending on the acceptable level of information load. The users’ optimal rate is determined by their ability to respond quickly to data from the system, and the current level of fatigue and concentration.

Data format F can be “text”, “graphic”, “spreadsheet”, “audio”, “mixed”. In general, data format is defined by the user interface’s output elements, yet if there is a possibility of changing this set according to users’ needs and demands presentation format can also be adapted to the users’ characteristics (their cognitive portraits).

The complexity of information – a complex value, which takes into account the links between data blocks in the domain model, the data links amount involved in presenting current portion of data, its overlapping with the user’s knowledge model

$$KM = \langle K_i, \langle c^j \rangle_i \rangle, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$K_i, i = \overline{1, n}$ – domain data blocks, $\langle c^j \rangle_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, j \neq i$ – i^{th} data block’s connection vector.

Parameter D is a portion of data transferred to the user in the particular workflow episode. This portion may correspond to one domain data block or it may consist of a set of blocks or a part of a single block, depending on the user-system interaction script.

In most modern automated systems user-system interaction is defined by the following algorithm (fig. 2).

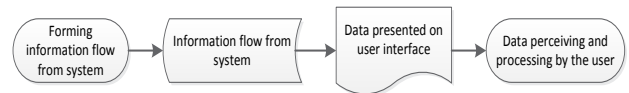


Fig. 2. User-system information interaction

To perform information exchange adaptation the algorithm in fig. 1 should be modified to allow consideration of specific users’ and workflows’ characteristics.

As adaptation criterion the users’ cognitive portraits are considered, as adaptation object – data presentation form and pace (information flow characteristics).

If the user-system informational interaction process’s adaptation and personalization is considered as controlling parameters of an information flow (1), we obtain a modified information exchange, shown in fig. 3.

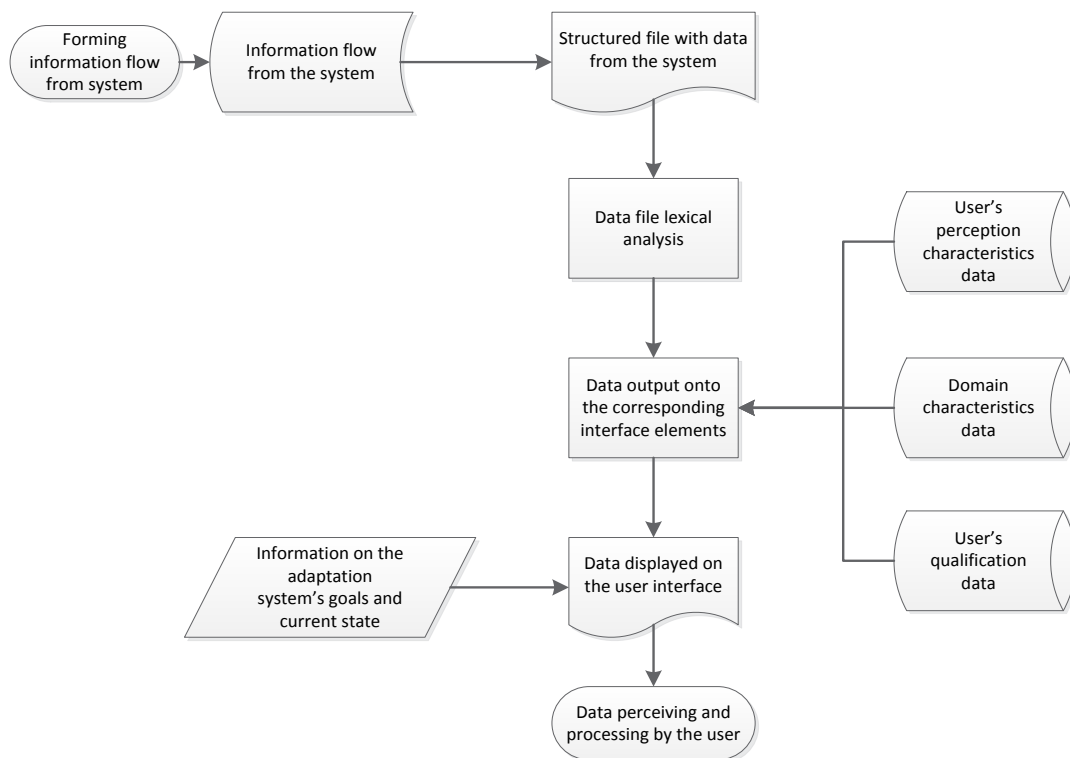


Fig. 3. Adapted user-system information interaction

Information exchange adaptation and personalizing is performed at the stage of information flow's forming (managing parameters T and C of model (1)) and at the stage of data output through user interface (managing parameter F). Information flow's parameter D depends on the specifics of the overall workflow, and on the current users' specific goals.

Managing data output through personalized user interface. User interface in automated systems is considered as a set of elements $UI = \langle E_i \rangle, i = \overline{1, n}$, each output element

$$E_i = \langle \langle x, y \rangle_i^j, T_i, c_i \rangle, j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$\langle x, y \rangle_i^j$ – output element's corner coordinates; T_i – i^{th} element's output type; c_i – i^{th} element's weight (importance) for the user.

The set of values of T_i in model (3) coincides with the set of values of parameter F in model (1), and it is the type of available output elements which determines the preferred output data format on the information flow's formation stage.

Output element's weight is defined by the workflow's specifics. Critical elements display information, loss of which to disruption of the workflow or inability for the user to correctly process information from the system.

Managing output elements' position and type allows creating personalized user interface for adapting the user-system information interaction. Critical output elements output must be present in the user interface, regardless of its adaptation.

Desired output element types are defined by the users' cognitive portraits' characteristics.

Cognitive portrait is a set of user characteristics.

$$CP = \langle \langle Cogn_i \rangle, \langle PP_j \rangle, \langle Int_k \rangle \rangle, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, p}, \quad (4)$$

$Cogn_i$ – cognitive users' characteristics; PP_j – physiological characteristics; Int_k – intellectual characteristics.

Cognitive portrait's characteristics define optimal for on-screen data presentation number, type and relative position of user interface output elements.

These characteristics are divided into cognitive, physiological and intellectual.

Cognitive characteristics largely determine the speed at which the user is guided in the new information and switch between different types of activities. They are field dependence, equivalence range, impulsiveness and intellectual lability.

For each of these characteristics within cognitive psychology have been developed appropriate diagnostic techniques, many of which are sufficiently formalized to be implemented as a part of the automated characteristics diagnostic subsystem.

To assess the psychophysiological state of the user often are used options such as his attitude to risk, quality of memory and attention. In this case, the testing impact reaction time and the responses errors should allow to evaluate concentration and coordination of user actions, because these depend on personal characteristics [1].

Intelligent features include the level of IQ and EQ (intelligence and emotional intelligence quotient, respectively) [2]. Although the coefficient of emotional intelligence is associated with the value of IQ, there is no direct relationship, namely the value of EQ determines predisposition to creativity when working with information. This characteristic is very important for users of design and training systems.

Nowadays cognitive portraits of the automated systems users are created based on professional psychological testing. But this method has two major drawbacks. First, it requires the participation of a professional psychologist, and the number of automated systems and their operators is growing faster than in an equal number of professional psychologists can be prepared. Secondly, this testing is not operational, it is separated from the user's work process and workplace.

Both of these drawbacks can be eliminated by introducing an automatic testing subsystem into the interface adaptation system. Scheme of a possible implementation of this subsystem is shown in Fig. 4.

User testing is conducted both explicitly (during performing of tests) and in the background when on the computer workstations are monitored indicators such as speed of action or response to the changing situation. In both cases, user characteristics information is treated by a separate testing system module and supplements or modifies an initial cognitive profile that is used for further user interface management system work. This way – through modifying user interface and observing the performance changes with it (which is reflected in increasing responsiveness and reducing the number of errors when dealing with information) can the finite number of steps of the iterative process be taken to optimize the form of the interface for a particular user (in the case of interfaces with automatic adjustment).

Using domain knowledge model to manage information storage form. To enable further flexible information interaction adaptation it is advisable to manage not only presentation form, but the pace and intensity of information flow. This requires the ability to manage blocks of information, knowledge system organization, personalized learning programs.

Existing knowledge communications systems can be characterized by four basic components: expert

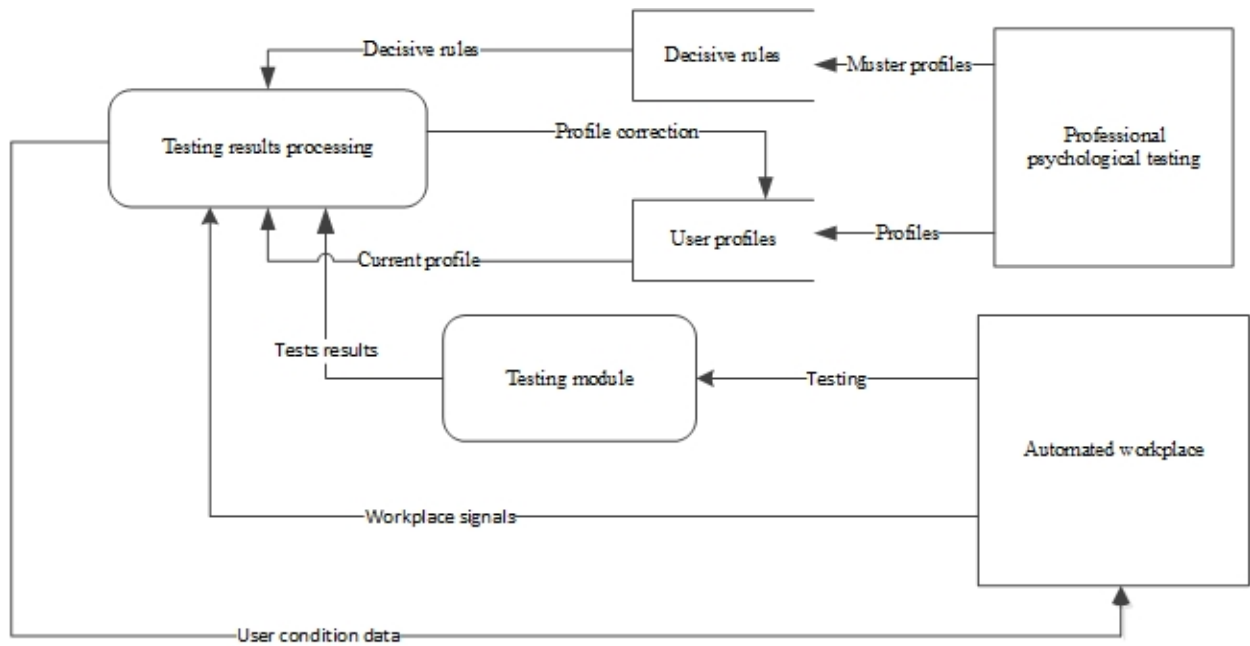


Fig. 4. Users' characteristics' diagnostics system

domain knowledge (domain model); user model; expert knowledge of teaching method (interaction script); user-system interface.

Knowledge model (2) performs a dual function. On the one hand it is a source of domain knowledge that is provided to the user in portions, on the other – it sets the desired standard for the users' current knowledge level evaluation. Domain model has an important place in the process of scripting user interaction with the information and in the management of information flow characteristics within decision-making metascript in automated systems. In automated learning systems knowledge models are connected to the discipline's lesson plan, which provides both the knowledge blocks' contents and the order in which the users access these blocks.

User model is generally an incomplete modified model domain knowledge model (2) and is designed mainly to anticipate users' behavior for its interpretation. The ideal user model must make accurate predictions of the behavior of any user in any domain context. For example, a set of possible responses to a block of data from the system.

With the user model's concept a diagnostic process is often associated – adapting the user model based on the data obtained through user-system dialog. In automated learning systems prior progress checks' results for particular students can be used – providing information regarding learning course segments work should be currently focused on.

Interaction script determines which piece of data and at what time will be transmitted to the user. In

the most general case the interaction script is not hard coded and is derived based on the current situation and the deduction method, stored as a set of principles or rules. The adaptation is based on predicting users' responses, generated by user models, users' real reaction and relations between the workflow episodes stored in the domain model.

Interaction scripts may vary in relation to the degree of "freedom" given to the user, and can range between two extremities: full control of all user actions and guiding users through workflow episodes workflow – or complete freedom of user's navigational activity and giving requests-based recommendations.

Fig. 5 illustrates relationship between these four basic concepts of knowledge communication.

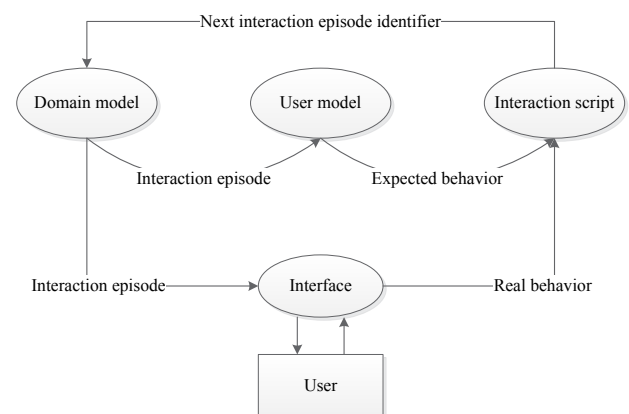


Fig. 5. Basic concepts of knowledge communication systems

User system interaction's script construction and modification takes into account the interaction script, based on the users' model and their actual behavior when processing previous information blocks taken from the domain model.

Conclusion. By using models of user interface, users' cognitive portraits, domain and users' knowledge is it possible to perform flexible adaptation and personalization of user-systems interface. Such adap-

tation involves modifying not only data presentation, but also data storage and the script of the interaction itself based on the workflow specifics and the users' preferences. This results in fewer mistakes when perceiving and processing information and lower stress levels for the users. When used in the learning process, such adaptation and personalization allow to improve both testing and studying efficiency for each particular student.

References:

1. Верлань А.Ф. Особенности оперативного тестирования на рабочем месте операторов систем поддержки принятия решений (СППР) / Верлань А.Ф., Сопель М.Ф., Фуртат Ю.О. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : Збірник наукових праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України та Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка. 2010. Вип. 3. С. 37–45.
2. Немов Р.С. Психология : Учебник для студ. высш. пед. учеб. Заведений : В 3 кн. Изд. 4-ое Москва: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2003. Кн. 1 : Общие основы психологии. 688 с.
3. Furtat Yu.O. Functional basis of means of the automated systems' user interfaces' adaptation to the user's cognitive characteristics / Furtat Yu.O. Mathematical and computer modelling. Series: *Technical sciences. Scientific digest of V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine and Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohiienko University*. Kamianets-Podilskyi : Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohiienko University. 2013. Iss. 8. P. 120–131.
4. Gadezka Z.M. Development of object-oriented models of visual attention / Gadezka Z.M., Nagornii V.A., Zhiriakova I.A. *Proceedings of International Scientific Conference "Modern management in production and humanitarian activity"*, 5–6th of April, 2005. Cherkassy : East-European University of Economics and Management; 2005. P. 39.
5. Us M.F. Ontological approaches to evaluation of the listener's cognitive level in conditions of "electronic" education / Us M.F., Gadezka Z.M., El-Murr P.A. Modeling and informational technologies. *Scientific digest of Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering*. Kyiv, 2006. Iss. 38. P. 150–155.

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ КОРИСТУВАЧА ТА МОДЕЛЕЙ ДОМЕНІВ, ЗАСНОВАНИХ НА ОСОБЛИВОСТЯХ ПІЗНАННЯ КОРИСТУВАЧІВ ТА СПЕЦИФІЦІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

В сучасних автоматизованих системах користувачі часто стикаються з проблемою інформаційних перевантажень через постійно зростаючі обсяги інформації, що потребують обробки в короткий термін. Робота в цих умовах впливає на якість роботи оператора системи та надійність систем. Одним із можливих підходів до вирішення проблеми перевантаження інформації є створення персоналізованих інтерфейсів, які враховують особливості роботи користувача з інформацією. Особливості оператора системи, які визначають форму подання інформації та її темп, визначають когнітивний портрет користувача. Когнітивний портрет будується в результаті взаємодії користувача з програмними засобами діагностики, що ґрунтуються на методах когнітивної психології. Принципи побудови та управління інтерфейсом автоматизованих систем (відповідає за форму представлення інформації користувачеві) та доменної моделі (відповідає за структуру подання інформації користувачу) розглядаються як компоненти комплексу засобів управління інформаційною взаємодією користувача з засобами автоматизованої системи управління, адаптуючи цю взаємодію до індивідуальних особливостей користувача та специфіки робочого процесу.

Ключові слова: автоматизована система, інформаційна взаємодія, користувацький інтерфейс, адаптація інтерфейсу, когнітивний портрет, доменна модель.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ И МОДЕЛЕЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ, ОСНОВАННЫХ НА КОГНИТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ И ОСОБЕННОСТЯХ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

В современных автоматизированных системах пользователи часто сталкиваются с проблемой информационной перегрузки из-за постоянно растущих объемов информации, требующих обработки в короткие сроки. Работа в этих условиях влияет на качество работы оператора системы и надежность системы. Одним из возможных подходов к решению проблемы информационной перегрузки является создание персонализированных интерфейсов, учитывающих особенности пользователя по работе с информацией. Особенности оператора системы, которые определяют предпочтительную форму и темп представления информации, формируют когнитивный портрет пользователя. Когнитивный портрет строится в результате взаимодействия пользователя с программными средствами диагностики, основанными на методах когнитивной психологии. Принципы построения и управления моделями пользовательского интерфейса автоматизированных систем (ответственных за форму представления информации пользователю) и доменных моделей (отвечающих за структуру представления информации пользователю) рассматриваются как компоненты комплекса средств управления информационным взаимодействием пользователя со средствами управления автоматизированной системой, адаптирующие это взаимодействие к индивидуальным характеристикам пользователя и особенностям рабочего процесса.

Ключевые слова: *автоматизированная система, информационное взаимодействие, пользовательский интерфейс, адаптация интерфейса, когнитивный портрет, доменная модель.*

Chernetchenko D. V.

Oles Honchar Dnipro National University

A NOVEL METHOD OF PREPROCESSING AND SPIKE ENCODING OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL FOR MULTI-STABLE SPIKING NEURONAL NETWORKS APPLICATION

Recent works in artificial intelligence propose that hardware and software solutions can be trained and taught instead of hard-coded algorithms. A key challenge for neural modeling is to explain how a continuous stream of multi-modal input from a rapidly changing sensory environment can be processed by artificial neuronal networks (ANN) in real-time. Our approach is based on a robust computational model of the spiking neuronal network (SNN) with multi-stable internal neurons. Investigated the applicability of the SNN model for the recognition of physiological signal patterns on noisy continuous input stream to extract common signal features of electrocardiographic signal (ECG). Number of detecting features was limited in this work only with QRS complex extraction and exactly R-peaks time position. One of the important challenge in signal data recognition relate to the quality of preprocessing and encoding method of input ANN's data. The novelty of our approach lies in using robust and effective raw-data preprocessing and encoding spatial-temporal properties of ECG signals directly into spike train and using this to excite recurrently connected spiking neurons in a SNN computation model; approach was developed, implemented and validated on real signals from MITDB and in-house ECG records. Also, efficiency of encoding input data stage was shown.

Key words: electrocardiogram, artificial neuronal models, QRS detection, heart rate estimation, spiking neuronal networks, SNN.

Introduction. Novel ways of programming by training, teaching, imitation and reward are already being demonstrated in portable devices with the help of in-silico chips behaving like neurons, i.e. neuro-morphic chips [1; 2]. A central problem of such systems is the training of biological neural structures for a particular task and the implementation of the neural structure to the hardware system [3]. For the past decades, Artificial Neural Networks (ANN) have evolved to the point of being currently very close in behavior to biological neural structures [4–6]. In this paper, studied basic training problem of biological neural networks using a biologically realistic model of spiking neurons. A simple pattern recognition problem is applied to this model. Physiological pattern was chosen for recognition solution, this is electrocardiographic signal (ECG). Detection of ECG QRS complex provides fundamental feature for further detection of other waveforms and subsequent automatic analysis [7–9]. However, characteristics of ECG increase the difficulty of automatic ECG waveform detection [10]. Firstly, the morphology of ECG waveforms alters from person to person. Secondly, ECG signal frequently presents noise components of various origins. For example, the movement of patients' muscle can generate high-frequency noises and respiration may provoke baseline wander. Other noise components have electrical or mechanical origins. The recorded electrical data are often post-pro-

cessed, either locally on the sensor [6] or on a device [7] attached to the sensor to estimate R-to-R peaks time intervals and heart rate. QRS pattern identification from ECG signal is fundamental approach to heart-rate estimation and heart rate variability (HRV) analysis [10]. Although QRS detection has achieved significant maturity over time [8], recent advances in wearable healthcare [5; 9] have motivated researchers to research QRS detection again. This is due to following facts: a) ECG readings from wearable sensors are contaminated with motion artifacts and baseline drifts; b) devices integrating wearable sensors are constrained in terms of area, power consumption and computational capabilities. In this work, spiking neuronal network (SNN) [11] with internal neurons multi-stability [19] for QRS complex detection and further R-to-R peaks intervals calculation was applied. Internal neurons multi-stability leads to capability of diverse spike regimes generation [13], such as spiking, bursting, oscillations, etc. Last works shows great efficiency of SNN. In [14], Maass draws a retrospective of the techniques used for modeling neural networks and presents the *third generation* of neural networks are spiking neuronal networks. Additionally, previous experience shows very good perspective for implementation of such neuronal system to the hardware architecture. But SNN's are still very sensitive to data representation form and quality of input signal. In this work we propose universal, easy to calculate and

integrate into hardware ECG raw-data preprocessing methodology and spike encoder for SNN implementation. To validate efficiency of proposed algorithms the recurrent SNN was built and results of detecting standard ECG signal QRS feature compared for cases with and without preprocessing stage. Also, system energy consumption of encoding and data processing method need to explore.

Methods. *Raw-data preprocessing.* The initial step of the ECG raw-data features extraction relates to the of noise removal from the signal. Noises from different origin always mix with ECG signal and cause baseline drifts, artifacts and small-scale oscillations. In this work, a cascaded digital filters configuration is used for removal of three major noises of baseline drift, power line interference and EMG noise [8–10]. Schematic diagram of preprocessing tract shows on Figure 1.

Each stage of filtration implemented with MATLAB environment. After common noise filtering, signal squared and processed with smoothing moving average filter (see Fig. 1). The squared and smoothed signal is good enough for accurate detection of peaks in ECG signal as well for deterministic methods and SNN approach. Firstly, low-pass filter designed with transfer function:

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-6})^2}{(1 - z^{-1})^2}, \quad (1)$$

The cutoff frequency is about 15 Hz, the delay is five samples, and the gain is 36. Figure 2a show the magnitude and phase responses of the corresponding low-pass filter. This filter can effectively decrease the noise which origin from the power supply interference (50/60 Hz noise), assume that the sampling frequency of ECG signals equal to 250 Hz. Also, high-pass filtering applied to the signal to decrease influence of noise with low frequencies components, such as baseline wondering or drift. High-pass filter designed with transfer function:

$$H(z) = \frac{(-1 + 32z^{-16} + z^{-32})}{(1 + z^{-1})}, \quad (2)$$

The cutoff frequency of high-pass filter is 5 Hz. Figure 2b show the magnitude and phase responses of the corresponding high-pass filter. After high-pass filtration, raw-data processed with derivative filter with transfer function:

$$H(z) = \frac{1}{8T}(-z^{-2} - 2z^{-1} + 2z + z^2), \quad (3)$$

By next step, signal squaring for nonlinearity enhance the dominance peaks and increase of signal to noise relation. Figure 3a shows example of squared ECG signal. At the last stage of data filtration squared signal is processed with moving average filter (MWI). A weighted moving average filter was used for the output signal smoothing [10].



Fig. 1. Common block-diagram of ECG-signal filtration tract. Consist of: low-pass filter, high-pass filter, derivative filter, signal squaring, moving average filtration stage

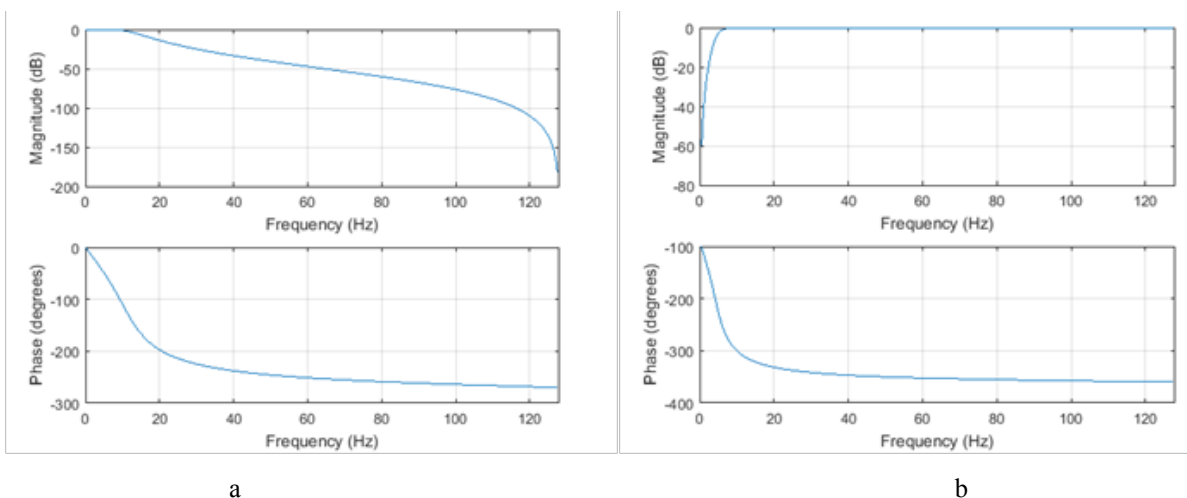


Fig. 2. a – magnitude (top) and phase (bottom) responses of ECG low-pass (LP) filter; b – for high-pass (HP) filter; x-axis frequency of signal in Hz; y-axis magnitude of signal in dB for magnitude response and Phase in degrees for phase response, respectively

Signal is averaged to remove high frequency noise (0.150 seconds length):

$$Y(nT) = \frac{1}{N} [x(nT - (N-1)T) + x(nT - (N-2)T) + \dots + x(nT)], \quad (4)$$

Result signal after MWI filtration of previously squared signal shown on Figure 3b.

QRS features extraction. Universal robust algorithm of QRS complex detection method was discovered. Method can be easily ported on hardware architecture. To solve this problem, robust modification of Pan-Tompkins [15, 16] QRS detection algorithm was proposed. At this point in the algorithm, previous steps have generated a roughly pulse-shaped waveform at the output of the signal, which shown on Fig.3b. The decision as to whether a pulse corresponds to a QRS complex is performed with an *adaptive thresholding* operation. When analyzing the amplitude of the MWI output, the algorithm uses two threshold values (THR_{SIG} and THR_{NOISE} , appropriately initialized during a brief 2 second trainings phase) that continuously adapt to changing ECG signal quality. The first pass uses these thresholds to classify each non-zero sample ($CURRENT_PEAK$) as either signal or noise:

- If $CURRENT_PEAK > THR_{SIG}$, that location is identified as a QRS complex candidate and the signal level (SIG_{LEV}) is updated: $SIG_{LEV} = 0.125 * CURRENT_PEAK + 0.875 * SIG_{LEV}$.

- If $THR_{NOISE} < CURRENT_PEAK < THR_{SIG}$, then that location is identified as a noise peak and the noise level ($NOISE_{LEV}$) is updated: $NOISE_{LEV} = 0.125 * CURRENT_PEAK + 0.875 * NOISE_{LEV}$.

Based on new estimates of the signal and noise levels (SIG_{LEV} and $NOISE_{LEV}$, respectively) at that point in the ECG, the thresholds are adjusted as follows: $THR_{SIG} = NOISE_{LEV} + 0.25 * (SIG_{LEV} - NOISE_{LEV})$. $THR_{NOISE} = 0.5 * THR_{SIG}$. These adjustments lower the threshold gradually in signal segments that are deemed to be of poorer quality. In the thresholding step above, if $CURRENT_PEAK < THR_{SIG}$, the peak is deemed not to have resulted from a QRS complex. However, an unreasonably long period has expired without an abovethreshold peak, the algorithm will assume a QRS has been missed and perform a search back. The minimum time used to trigger a search back is 1.66 times the current R-to-R peak time period. Also, it's impossible for a detect QRS complex if it lies within 200ms after a previously detected one with due to physiological refractory period. Example of detection processing show on Figure 4.

Spike encoder. Next important task is to create robust and efficient mechanism to encoding input analog signal to spiking sequence, which conduct directly to SNN inputs. Moreover, this implementation need to be very robust and easily to implement on hardware structures.

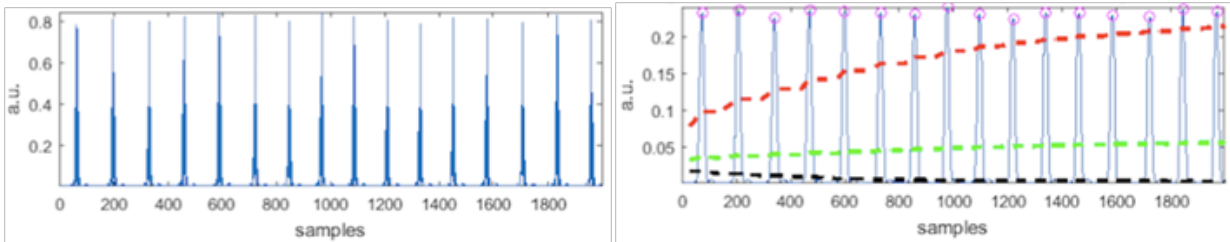


Fig. 3. a – squared normalized ECG signal after filtration stage; b – moving average filtration effect with detected R-peaks (circles) and detector levels (signal level – red dashed line; noise level – black dashed line; adaptive threshold – green dashed line). x-axis – samples number of signal; y-axis – amplitude of normalized signal in arbitrary units (a. u.)

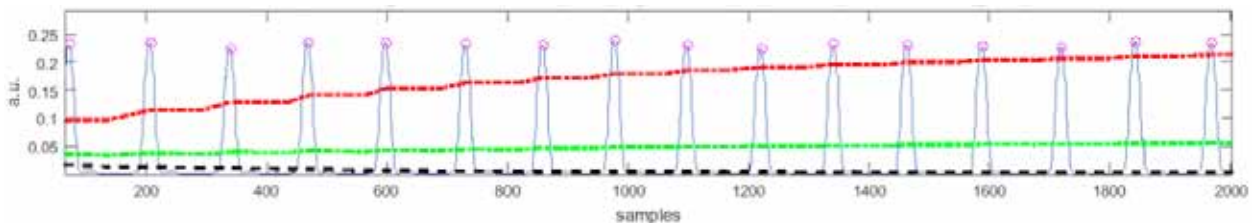


Fig. 4. Detection of ECG QRS complexes and R-peaks timestamps with proposed deterministic reference algorithm. Circles highlight detected R-peaks timestamps, red dashed line – signal level; green dashed line – adaptive threshold; black dashed line – noise level. x-axis – signal sample number; y-axis – normalized signal amplitude in arbitrary units

Temporal coding [17] encodes information as inter-spike intervals, capturing the spatio-temporal structure of the input signal. For ECG QRS detection, temporal characteristics around QRS complexes need to be encoded as inter-spike intervals and therefore, temporal coding is adopted in this work [17]. The spike encoder encodes input ECG signal to inter-spike intervals using a combination of threshold modulators, voltage comparator, spike generator and a timer. To prevent aliasing effect, method of adapting the timer interval in response to the input waveform was realized. This will allow our SNN to better distinguish the two spike trains, further improving accuracy. One approach to adapt timer intervals is by setting its clock frequency to be proportional to the highest Fourier component extracted from the waveform. Clock frequency F_{CLK} depends on the signal slope as piece-wise function with two saturation levels:

$$F_{CLK}(A_{f_0}) = \begin{cases} F_{CLK_{min}}, & F_{CLK} \leq F_{CLK_{min}} \\ \frac{(F_{CLK_{max}} - F_{CLK_{min}})}{k} * (A_{f_0} - a) + F_{CLK_{min}}, & F_{CLK_{min}} < F_{CLK} < F_{CLK_{max}}, \\ F_{CLK_{max}}, & F_{CLK} \geq F_{CLK_{max}} \end{cases} \quad (8)$$

where $F_{CLK_{max}}$ maximum of timer clock frequency of timer, $F_{CLK_{min}}$ minimum of timer clock frequency, A_{f_0} frequency of the input's signal most significant frequency harmonica (highest amplitude of non-DC peak of Discrete Fourier Transformation). Parameters k and a were constants during all simulations, relate to the certain frequency parameters of input ECG signals and let $k=14.0$ and $a=1.0$ Hz, respectively. Minimum timer clock frequency also constant and equal $F_{CLK_{min}}=5$ Hz, maximum frequency $F_{CLK_{max}}$ varied from 100 to 1000 Hz for power consumption exploration.

The working principle of the spike encoder is described by following scenarios: a) ECG signal is rising; b) ECG signal is falling and c) ECG signal is stable within a time window Δ . The encoding is based on two thresholds L_{thr} and U_{thr} ($U_{thr} > L_{thr}$). Voltage comparisons are performed at a fixed interval controlled using the timer. At every interval, the comparator is enabled to compare the ECG voltage and the threshold U_{thr} . For simplicity, assume that the ECG signal is rising. The voltage comparison is positive, triggering the following sequence of events:

- threshold update: $L_{thr} = U_{thr}$ and $U_{thr} = U_{thr} + \Delta$;
- enable spike generator to emit one spike;
- restart timer and return to wait.

If the result of the comparison is negative (meaning the ECG signal is either falling or stable within Δ),

a second comparison is performed, where the ECG voltage is compared with the threshold L_{thr} . If this comparison is positive and ECG signal is falling, the following sequence of events are triggered:

- threshold update: $U_{thr} = L_{thr}$ and $L_{thr} = L_{thr} - \Delta$;
- restart timer and return to wait.

If the result of the second comparison is also negative, when the ECG signal is stable within Δ , thresholds are not updated and timer is restarted. Following are the specific basicrules of this approach. a) Threshold updates are performed to track the ECG signal in the upward or downward directions. b) No spikes are generated when the ECG signal is falling. This is a design choice used in this work as the spatio-temporal characteristics of the QRS can be captured using the rising part of the voltage waveform. c) No spikes are generated if the ECG signal is stable.

Spiking neuronal network. The proposed neural network is a simulation of spiking neuronal network [18] based on multi-stable neurons, which occurs due to metrical asymmetry of active dendritic structure as shown before at [19]. Active spiking functionality of each neuron described by differential equations:

$$\begin{cases} v' = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I_0, \\ u' = a(bv - u) \end{cases} \quad (9)$$

system reset to the initial state after spike generation:

$$\text{if } v \geq 30 \text{ mV, then } \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d, \end{cases} \quad (10)$$

Each neuron has three-stable states due to their dendritic metrical asymmetry [19]. Stable states of internal neurons defined by the internal structure current distribution I_0 over the whole structure. Neuronal structure consists of three layers: input, recurrent and output. The first layer is the input layer, which generates spikes (encoded directly from the input ECG). The second layer is the recurrent layer and consists of $N = N_E + N_I$ recurrently connected neurons, where N_E is the number of excitatory neurons and N_I is the number of inhibitory neurons. Current framework consists of 1000 internal neurons with proportion $N_I = 0.25 N_E$. Connections between two particular cells are arranged with probability calculated according to the rule:

$$P(D) = C * \exp\left(\frac{-D(A, B)}{\lambda}\right), \quad (7)$$

where $D(A, B)$ stands for the Euclidean distance between two cells A and B , and λ is the density of connections. Parameter C depends on the type of pre-synaptic and postsynaptic neurons, that is, whether they are the excitatory (Ex) or inhibi-

tory (Inh) cells. In our simulations, the parameter C is set as: $C_{Ex-Ex} = 0.3$ (for connections between two excitatory neurons), $C_{Ex-Inh} = 0.2$ (for connections between excitatory and inhibitory neurons), $C_{Inh-Inh} = 0.1$ (for connections between two inhibitory neurons), $C_{Inh-Ex} = 0.4$ (for connections between inhibitory and excitatory neurons). Initial synaptic strengths $W_0 = 0.0045 \mu\text{Sim}/\text{cm}^2$. Changes in synaptic strength are bounded between 0 and $10 * W_0$. Synaptic connection delays are selected randomly between 1ms and 2ms. The output level represented by two simple bi-stable neurons with active dendritic structure enhanced, which gather synaptic inputs from neurons of second layer and is able to generate single spikes in response to a large number of simultaneous spikes from recurrent neurons of second layer. One neuron which reacting when R-peak of QRS complex detected and second test neuron for comparison between learning and no stimulation. Output neuron work in following manner: generation of spike occurs only when R-peak of QRS complex was detected and no generate spike, when no QRS complex was detected. Synaptic weight updates are disabled after a time interval T_i . The time interval 0 (start of ECG sample) to T_i is training phase of the spiking neural network. In this phase, weights are updated using spike timing dependent plasticity (STDP). STDP is a rule for neurons to strengthen or weaken their connections according to their degree of synchronous firing [20, 21, 22, 23, 24]. With the function $W(x)$ defining the order of decrease or increase of strength depending on the synchrony of spiking between pre- and post-synaptic neurons, expressed in the following manner:

$$\Delta W = \begin{cases} A_1 \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_s}\right), & \text{for } \Delta t > 0 \\ A_1 \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_s}\right), & \text{other wise} \end{cases}, \quad (8)$$

All input ECG raw-data for network learning and QRS detection algorithm testing divide on two categories by the source: ECG signal database MITDB, and ECG signals which registered in-house in our laboratory with certified 12-lead ECG machine (CE, FDA). All samples from database was chosen randomly. Sampling frequency of input data was 250 Hz. Absolute values of amplitudes measure in μV . All simulations discussed in this paper were processed in the MATLAB environment.

Results. All results of the work can be separated on three main series of experiments. In first series, presented efficiency of QRS detection using signal pre-processing and deterministic algorithm, which was describe above. In second part, stability and effi-

ciency of ECG signal encoder with help of proposed algorithm was estimated, third part connected to efficiency estimation of proposed SNN under presence of input preprocessing filtration and without.

To estimate an accuracy of proposed system for each RR interval extraction used Mean Average Percent Error (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{|a_i - p_i|}{a_i} \right) * 100, \quad (11)$$

where MAPE calculated as absolute difference between the actual RR interval a_i and estimated RR interval p_i and N is the number of one-minute segments in the given ECG sample.

a) *Software signal features extractor validation.* Algorithm was successfully tested on 10 different ECG records with duration trimmed by 300 seconds. Signal necessary preprocessed with proposed above digital filtration (see Figure 1). Accuracy report and results of validation shown in Table 1. In our case, best case MAPE was 0.32% and worst case - 5.0%, respectively.

Table 1

Accuracy results of reference method

# Record	Total beats	False Positive, # R-peaks	False Negative, # R-peaks	MAPE, %
1	321	0	0	0.0
2	425	0	6	1.4
3	375	0	0	0.0
4	272	0	5	1.8
5	290	1	3	1.3
6	285	2	2	1.4
7	304	1	0	0.32
8	398	4	2	1.5
9	361	0	4	1.1
10	326	13	1	5.0

b) *QRS extraction with SNN.* Example of input-output time dependent relation for the output neuronal layer shown in Figure 6a. Need to add, that shown example could be named as case of well-trained network and results can be easily explained. Increasing of input spikes concentration on dendritic structure of output neuron leads to generation output spike, which explained as presence of R-peak at certain moment of time in input signal. SNN's activity with time shown on Figure 6b. Extracted R-to-R intervals sequence shown on Figure 6c.

Figure 7 plots the comparative relation of average RR intervals estimation accuracy using SNN approach for five MITDB records and five internal

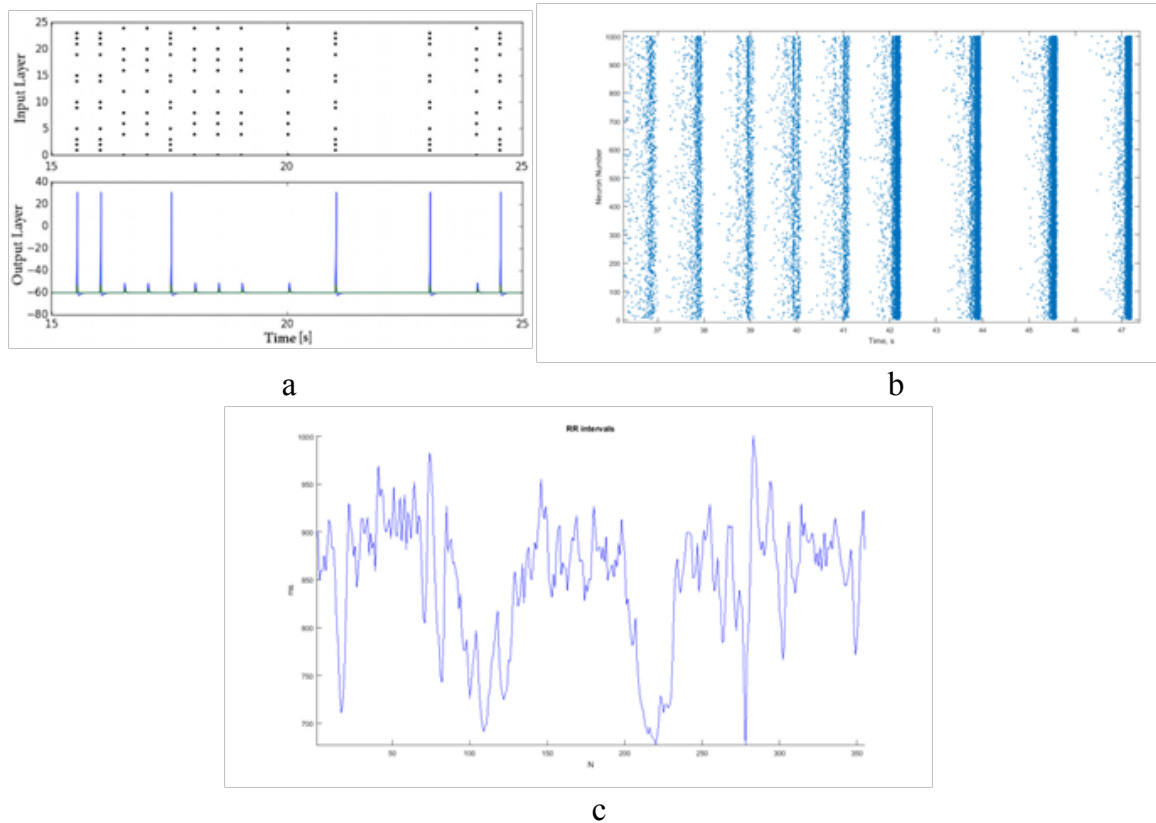


Fig. 6. a – output neuron’s activity registered from dendritic inputs (top), and output spike activity (bottom); b – general SNN neurons activity during 10 seconds time interval; c – R-to-R intervals sequence on SNN output

records with presence of preprocessing stage and raw-data filtration, without filtration stage and estimation results with deterministic reference method. MAPE using our approach is less than 2% across all subjects. For our internal database, the MAPE varies between 0.5% and 2.1%, with an average of 1.2%. For MITDB database, the MAPE varies between 0.53% and 5.3%, with an average of 2.32%. Without

filtration stage separation capability of SNN critically decrease, and MAPE varies between 2% and 12.2% with an average of 5%. The higher noises and artifacts level in input signal leads to higher increasing of MAPE for SNN.

c) *Spike encoder*. Figure 8 shows a zoomed part of the ECG signal and respective generated spike trains. The spike generation process from a segment of the ECG sample shown on bottom plot. Also highlighted in this figure are the regions of interest i.e., the QRS peaks. As discussed before and this can be seen quite well from this figure, spike temporal coding captures important spatio-temporal characteristics from the input signal in the form of inter-spike intervals.

Data density and energy consumption summary for six subjects from database shown in Table 2. Maximum clock timer of encoder varied 100, 500 and 1000 Hz, respectively. For each row item in the table, registered average spike firing rate (in Hz), the data density (bits per spike) and the energy consumption (in μW). The average spike firing rate is the total number of spikes generated in the SNN averaged over the ECG sample with duration 300 seconds. Data density measures efficiency of the spike encoder and is defined as:

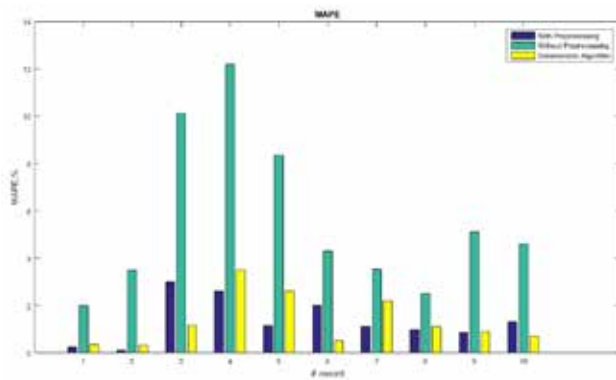


Fig 7. MAPE values calculated for three main cases: purple bars – SNN results after learning stage and without any filtration; green bars – SNN results with preprocessing stage for input data; yellow bars – deterministic algorithm results

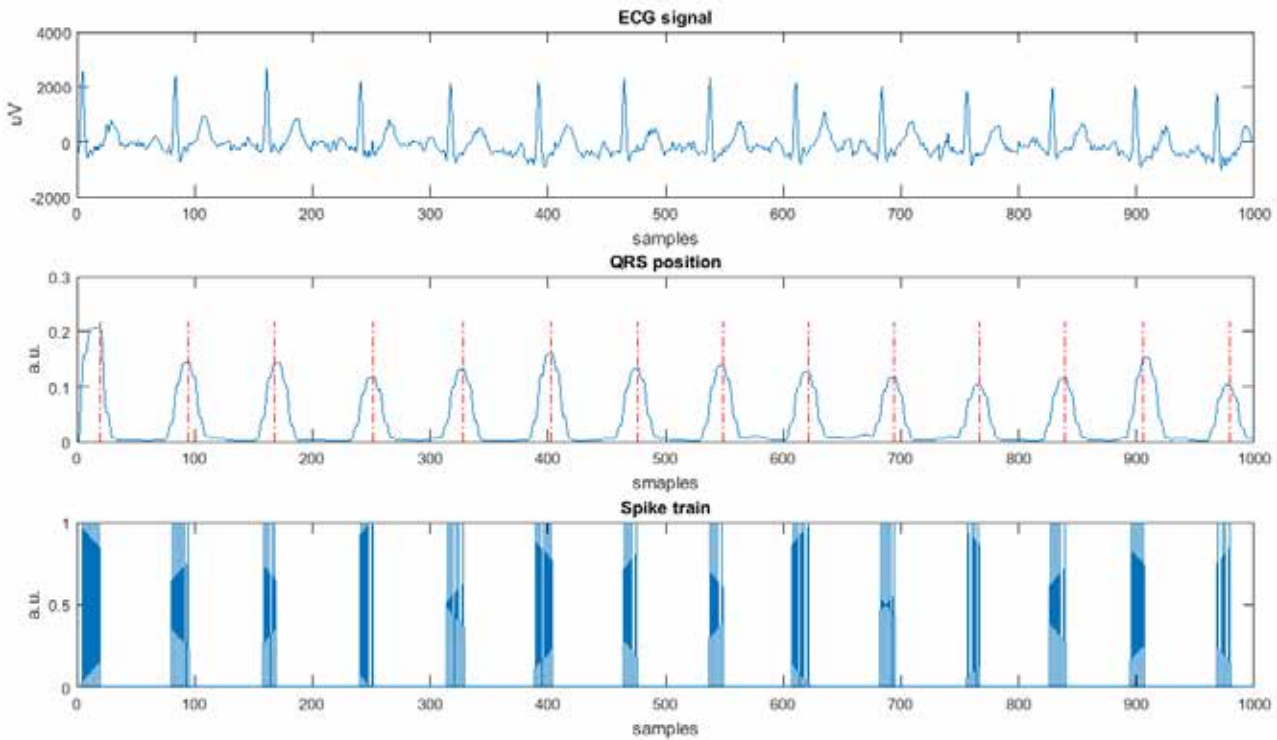


Fig. 8. Zoomed part of the ECG signal and respective generated spike trains. Input signal shown on top plot; filtered and squared signal with R-peaks moments shown on middle plot; respective spike train generation with time shown on bottom plot. x-axis – sample number of signal; y-axis – input signal amplitude in uV (top), filtered signal and spikes normalized signals in arbitrary units (a. u.)

$$Data\ density = \frac{ADC\ bits}{input\ spikes}, \quad (12)$$

where input spikes parameter is the number of spikes generated at the output of our spike encoder (and input to the SNN) and ADC bits is the number of bits per ECG sample transmitted post analog to digital conversion (ADC).

The energy consumption of our approaches-estimating using methodology for FPGA structure generalpower consumption described in [21], at the constant normal ambient conditions and normal temperature. For fairness of comparison, the energy consumption using [25] excludes the ADC energy, while the energy consumption using ours exclude the spike encoder energy.

As seen from the table, the average data density (averaged over all subjects) for MITDB is 52.0 for $F_{CLK_MAX}=100$ Hz. This result can be interpreted as follows: on average for every 52.0 bits of raw ECG data transmitted from the sensor for RR intervals detection using standard QRS-detection techniques, our spike encoder transmits one spike for the same purpose.

Table 2

Total energy consumption of system

# Record	F_{CLK_MAX} , Hz	Average spike firing rate, Hz	Data density, bits/spikes	Energy consumption, μW
1	100	5.3	53.6	1.09
2	100	5.9	50.4	1.11
3	500	7.5	37.2	1.24
4	500	7.2	40.3	1.27
5	1000	10.4	25.53	1.41
6	1000	9.8	27.3	1.39

For the three cases, the average energy consumption of the subjects is 1.1 μW (1.09 – 1.11 μW), 1.25 μW (1.24 – 1.27 μW) and 1.40 μW (1.39 – 1.41 μW), respectively. This compression saves energy and data-bandwidth. The higher the density, the higher the savings. Need to say, the average energy consumption using our approach (averaged over all subjects) for MIT database is 1.25 μW lower than [25], signifying the importance of our approach for power constrained portable devices.

Conclusions. The proposed SNN computational model offers flexibility by allowing implementation of clinically significant use-cases (as readouts) from the spatio-temporal properties of ECG integrated inside a network of spiking neurons. Solution of the QRS detection use-case was demonstrated. In future, we will investigate more ECG signal feature extraction. Additionally, the unsupervised readout is conducive to personalized healthcare, by allowing learning from subjects directly, without requiring costly data annotations to train the network. This allows future devices to be used seamlessly for subjects with and without cardiac irregularities. Our approach presents three novel contributions: (a) the technique to encode spikes from ECG directly, without requiring to digitize the analog ECG signal and thus achieving

great reduction in data density; (b) preprocessed and filtered data at input increase SNN learning quality in a computation model and decrease output recognition error more than 4x times. Moreover, this can be efficiently implemented on FPGA hardware, with decreased energy consumption over existing hardware approaches; and (c) an unsupervised readout for RR intervals estimation case, where system have stable state as the whole when next R-peak occur. Additionally, the approach can be readily deployed to subjects with rare cardiac conditions, where ECG data is not always available to train a supervised classifier. These results suggest that our approach can be very well integrated in future hardware portable and wearable devices, providing significant battery life and improving user experience.

References:

1. Helleputte N. Van, Konijnenburg M., Pettine J., Jee D.-W., Kim H., Morgado A., Wegberg R. Van, Torfs T., Mohan R., Breeschoten A., et al., A 345 μw multi-sensor biomedical soc with bio-impedance, 3-channel eeg, motion artifact reduction, and integrated dsp. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2015. 50 (1). 230–244.
2. Krasauskas Z., Telksnys L. Ubiquitous personal heart rate long distance transmission to the treatment centers based on smart mobile phone application. *2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. 2015. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/AIEEE.2015.7367297.
3. Ravanshad N., Rezaee-Dehsorkh H., Lotfi R., Lian Y. A level-crossing based qrs-detection algorithm for wearable eeg sensors. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2014. №18 (1). 183–192.
4. Karimipour A., Homaeinezhad M.R. Real-time electrocardiogram p-qrs-t detection/delineation algorithm based on quality-supported analysis of characteristic templates, *Computers in Biology and Medicine*. 2014. № 52. 153–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2014.07.002>.
5. Jain S., Ahirwal M., Kumar A., Bajaj V., Singh G. QRS detection using adaptive filters: A comparative study. *ISA Transactions*. 2017. № 66. PP. 362–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.09.023>.
6. Tekeste T., Saleh H., Mohammad B., Khandoker A., Elnaggar M. A nano-watt eeg feature extraction engine in 65nm technology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs PP*. 2017. (99). 1–1. DOI: 10.1109/TCSII.2017.2658670.
7. Arbateni K., Bennia A. Sigmoidal radial basis function ANN for QRS complex detection. *Neurocomputing*. 2014. № 145. PP. 438–450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.05.009>.
8. Colgin L.L. Rhythms of the hippocampal network. *Nat. Rev. Neurosci*. 2016. V. 17. № 4. P. 239–249. DOI: 10.1038/nrn.2016.21.
9. Mizuseki K., Buzsaki G. Theta oscillations decrease spike synchrony in the hippocampus and entorhinal cortex. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci*. 2014. V. 369. № 1635. P. 20120530. DOI: 10.1098/rstb.2012.0530.
10. Schaffer J.D. Evolving spiking neural networks: A novel growth algorithm corrects the teacher. *Proc. of 2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA)*. May 26–28 2015. Pp. 1–8.
11. Yongqiang Cao, Yang Chen, Deepak Khosla. Spiking Deep Convolutional Neural Networks for Energy-Efficient Object Recognition. *Proc. of International Journal of Computer Vision*. May 2015. Volume 113. Issue 1. PP. 54–66.
12. Hunsberger E., Eliasmith C. Spiking Deep Networks with LIF Neurons. - arXiv: 1510.08829, 2015.
13. Diehl P.U., Neil D., Binas, J., Cook, M., Liu, S.C., Pfeiffer, M. Fast-Classifying, High-Accuracy Spiking Deep Networks Through Weight and Threshold Balancing. *Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2015.
14. Kappel D., Nessler B., Maass W. STDP Installs in Winner-Take-All Circuits an Online Approximation to Hidden Markov Model Learning. *PLoS Comput. Biol*. 2014. Vol. 10. № 3. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003511
15. Pan J. and Tompkins W. J. A Real-Time QRS Detection Algorithm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1985. Vol. BME-32. No. 3. Pp. 230–236.
16. Hamilton P.S. and Tompkins W.J. Quantitative Investigation of QRS Detection Rules Using the MIT/BIH Arrhythmia Database. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1986. Vol. BME-33. No. 12. Pp. 1157–1165.
17. Du D., Odame K. A bio-inspired ultra-low-power spike encoding circuit for speech edge detection. *Bio-medical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, 2011 IEEE, IEEE. 2011. Pp. 289–292.

18. Izhikevich E.M. Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on neural networks*. 2003. № 14 (6). PP. 1569–1572.
19. Snezhko E.M., Chernetchenko D.V. Dynamics of electrical potentials of neuron networks models with non-linear activation functions. *Vestnik DNU*. 2012.
20. Nam P., G.J. et al. “TrueNorth: Design and Tool Flow of a 65 mW 1 Million Neuron Programmable Neuro-synaptic Chip”. *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 2015. № 34. PP. 1537–1557. DOI: 10.1109/TCAD.2015.2474396.
21. Henderson J.A., Gibson T.A., Wiles J. Spike Event Based Learning in Neural Networks. – arXiv:1502.05777, 2015.
22. Kasabov N., Dhoble K., Nuntalid N., Indiveri G. Dynamic evolving spiking neural networks for on-line spatio- and spectro-temporal pattern recognition. *Neural Networks*. 2013. № 41. PP. 188–201.
23. Diehl P.U., Cook M. Unsupervised learning of digit recognition using spike timing-dependent plasticity. *Frontiers in computational neuroscience*. 2015. № 9 (0). 0–0.
24. Tavanaei A., Maida A.S. A spiking network that learns to extract spike signatures from speech signals. *Neuro computing*. 2017. № 240. PP. 191–199.

НОВИЙ МЕТОД ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ТА ІМПУЛЬСНОГО КОДУВАННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИСТАБІЛЬНИХ СПАЙКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Нещодавні роботи з штучного інтелекту пропонують, щоб апаратні та програмні рішення можна було навчати і навчати замість жорстко закодованих алгоритмів. Ключовим викликом для нейронного моделювання є пояснення того, як безперервний потік мультимодальних входів із швидко мінливого сенсорного середовища може бути оброблений штучними нейронними мережами (ШНМ) в режимі реального часу. Наш підхід ґрунтується на надійній обчислювальній моделі спіної нейронної мережі (SNN) із мультистабільними внутрішніми нейронами. Досліджено застосовність моделі SNN для розпізнавання фізіологічних закономірностей сигналу на шумному безперервному входному потоці для вилучення загальних сигнальних особливостей електрокардіографічного сигналу (ЕКГ). Кількість виявлених ознак була обмежена в цій роботі тільки з екстракцією комплексу QRS і рівномірним положенням R-піків. Одним із важливих завдань у розпізнаванні даних сигналу є якість попередньої обробки та способу кодування входних даних ANN. Новизна нашого підходу полягає у використанні надійної та ефективної попередньої обробки сировинних даних та кодування просторово-часових властивостей сигналів ЕКГ безпосередньо в спайкових процесах і використання цього для збудження повторно пов'язаних спайкових нейронів в обчислювальній моделі SNN; був розроблений, впроваджений і перевірений на реальних сигналах із MITDB та внутрішніх записах ЕКГ. Також було показано ефективність етапу кодування входних даних.

Ключові слова: електрокардіограма, штучні нейрональні моделі, детектування QRS, оцінка частоти серцевих скорочень, пікові нейронні мережі, SNN.

НОВЫЙ МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И ИМПУЛЬСНОГО КОДИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫХ СПАЕЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Последние работы по искусственному интеллекту предлагают, чтобы аппаратные и программные решения можно было обучать и обучать вместо жестко закодированных алгоритмов. Ключевым вызовом для нейронного моделирования является объяснение того, как непрерывный поток мультимодальных входов из быстро меняющейся сенсорной среды может быть обработан искусственными нейронными сетями (ИНС) в режиме реального времени. Наш подход основывается на надежной вычислительной модели спинной нейронной сети (SNN) с мультистабильными внутренними нейронами. Исследована применимость модели SNN для распознавания физиологических закономерностей сигнала на шумном непрерывном входном потоке для извлечения общих сигнальных особенностей электрокардиографического сигнала (ЭКГ). Количество выявленных признаков была ограничена в этой работе только с экстракцией комплекса QRS и равномерным положением R-пику. Одной из важных задач в распознавании данных сигнала является качество предварительной обработки и способа кодирования входных данных ANN. Новизна нашего подхода заключается в использовании надежной и эффективной предварительной обработки сырьевых данных и кодирования пространственно-временных свойств сигналов ЭКГ непосредственно в спаечных процессах и использовании этого для возбуждения повторно связанных спаечных нейронов в вычислительной модели SNN, был разработан, внедрен и проверен на реальных сигналах с MITDB и внутренних записей ЭКГ. Также была показана эффективность этапа кодирования входных данных.

Ключевые слова: электрокардиограмма, искусственные нейрональные модели, детектирования QRS, оценка частоты сердечных сокращений, пиковые нейронные сети, SNN.

Чорнофостова К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Лисюк Г.П.

Одеський національний політехнічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В БАЦІ ДЕАЕРАТОРА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ІЗ ВВЕР-1000

У статті розглянуто II- та III-регулятори для регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000. Отримано графіки перехідних процесів. Зроблено висновки про доречність використання II- та III-регулятора. В тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується деаератор типу ДП-3200/185А. Як відомо, вакуум у конденсаторі сприяє проникненню в його паровий обсяг деякої кількості повітря. Відомий вплив кисню на протікання корозійних процесів. Також наявність перепаду тисків у конденсаторі між середовищами викликає незначний перетік охолоджуючої води в конденсуючий пар при дефектах трубок. З цим пов'язана поява в конденсатному тракті хлоридів, бікарбонатів, карбонатів і кремнієвої кислоти, які збільшують електропровідність і сприяють утворенню вільної вуглекислоти, що є корозійно-активним агентом. З цих причин на енергоблоках застосовується термічна деаерація.

Ключові слова: деаератор, термічна деаерація, корозія, конденсат, математична модель, перехідний процес, показники якості, структурна схема.

Постановка проблеми. Принцип роботи деаератора заснований на залежності розчинності газів від температури води. У разі підвищення температури води вміст розчинених у ній газів зменшується, а в разі досягнення водою температури насичення дорівнює нулю [1, с. 103].

Термічна деаерація (дегазація) в деаераторі відбувається таким чином: основний конденсат надходить у верхню частину деаераційної колонки і зливається вниз на горизонтально-розташоване сито, а потім проходить водонаправляючий лист і барботажний пристрій. За час руху вниз основний конденсат нагрівається паром, що надходить у нижню частину колонки, до температури насичення при цьому тиску. Основна частина гріючої пари конденсується під час нагрівання води, а надлишок його разом із виділеними з води газами відводиться з верхньої частини колонки в атмосферу або на ежектори турбіни. Деаерована вода надходить у бак-акумулятор, де відбувається додаткове виділення газів, що не встигли виділитися в деаераційній колонці або були захоплені струменями води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що автоматичне регулювання деаератора здійснюється за рахунок управління витратою гріючої пари, яка подається в деаераційну колонку, а вже управління рівнем деаерованого конденсату, який надходить у бак-акумулятор, здійснюється за допомогою добавки хімічищеної води.

В реальних умовах не завжди вдається досягти необхідної якості деаерації води, і кількість газу в деаерованій воді, яка отримується на виході з деаератора, значно більше необхідних значень. І саме це призводить до збільшення корозії всередині обладнання.

Тому підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора є необхідною мірою задля попередження корозійних процесів, які знижують термін роботи обладнання та призводять до великих витрат на заміну його компонентів.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000 за рахунок заміни II-регулятора на III-регулятор.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Виконати синтез математичної моделі АСР.

Виведемо рівняння динаміки рівня в деаераторі з витрати конденсату.

Початкові дані:

$F_3 = 9,3 \text{ м}^2$ – площа дзеркала конденсату;

$A = 915,2 \text{ кг/м}^3$ – щільність конденсату;

$L = 2200 \text{ м}$ – номінальний рівень;

$\Delta P = 0,69 \text{ Мпа}$ – перепад тиску на теплообміннику;

$\frac{1}{4} = 0,62$ – коефіцієнт витрати клапана;

$S_{\text{кл}} = 0,033 \text{ м}^2$ – прохідний перетин клапана;

$m_{\text{п}} = 68 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ – витрата гріючого пару.

Скористаємося рівнянням збереження маси конденсату:

$$dm/dt = m_n - m_k, \quad (1)$$

где m – маса конденсату в підігрівачі;
 m_n, m_k – масова витрата пари і конденсату.

Уявімо масу конденсату через обсяг і щільність:

$$m = V * \rho. \quad (2)$$

Своєю чергою:

$$V = F_3 * L, \quad (3)$$

где F_3 – площа дзеркала конденсату;
 L – висота рівня конденсату.

Будемо вважати, що площа дзеркала конденсату незмінна по висоті:

$$F_3 = \text{const.}$$

Перепишемо (1) з урахуванням (2) і (3):

$$\frac{dF_3 \rho L}{dt} = m_n - m_k$$

або

$$\frac{F_3 \rho dL}{dt} = m_n - m_k, \quad (4)$$

Для усталеного режиму, коли $dL/dt = 0$, маємо:

$$0 = m_{n0} - m_{k0}, \quad (5)$$

Уявімо змінні L, m_n, m_k у вигляді суми сталих значень і відхилень:

$$L = L_0 + \Delta L, \quad (6)$$

$$m_n = m_{n0} + \Delta m_n, \quad (7)$$

$$m_k = m_{k0} + \Delta m_k, \quad (8)$$

Підставив (6)–(8) в (4) і віднявши (5), маємо:

$$F_3 \rho \frac{d \cdot L}{dt} = \Delta m_n - \Delta m_k, \quad (9)$$

Перепишемо отримане рівняння у вигляді:

$$\frac{d\Delta L}{dt} = \left(\frac{1}{F_3 \rho} \right) \Delta m_n - \left(\frac{1}{F_3 \rho} \right) \Delta m_k, \quad (10)$$

Інтегруючи (10) з урахуванням нульових початкових умов, отримаємо інтегральне рівняння:

$$\Delta L = \frac{1}{F_3 \rho} \int_0^t \Delta m_n dt - \frac{1}{F_3 \rho} \int_0^t \Delta m_k dt$$

або

$$\Delta L = k_1 \int_0^t \Delta m_n dt - k_1 \int_0^t \Delta m_k dt, \quad (11)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{1}{F_3 \rho}, \quad (12)$$

Передатна функція теплообмінника по каналах витрати пари:

$$W(s) = k/s, \quad (13)$$

Таким чином, теплообмінник за рівнем конденсату за наявності насоса на стоці за допомо-

гою одного з каналів впливів (m_n або Δm_k) є астатичною, інтегральною ланкою.

Для інтегральної ланки вираз для кривої розгону за рівнем L має вигляд:

$$\Delta L = k_1 \Delta m_n \Delta t, \quad (15)$$

де Δm_n – обурення по витраті пари;
 t – час (незалежна змінна).

Розрахунок:

$$W(s) = k/s;$$

$$W(s) = -k/s;$$

$$k_1 = \frac{1}{F_3 \rho} = \frac{1}{9,3 * 934} = 11,5 * 10^{-5}$$

$$W(s) = 11,5 * 10^{-5} / s - \text{для пари};$$

$$\Delta m_n = 6,8 \text{ кг/с.}$$

Під час проектування системи автоматичного регулювання в рівній мірі використовуються як теоретичні, так і експериментальні методи дослідження. Застосування теоретичних методів аналізу і синтезу вимагає попереднього математичного опису системи автоматичного регулювання. Система рівнянь, що описують роботу системи регулювання, називається математичною моделлю АСР [12, с. 56].

Розглянемо властивості деаератора за рівнем води. Власне об'єкт-деаератор є астатичним об'єктом із передавальною функцією $W(s) = K / S$. Як відомо, в енергоблоках АЕС додаткову воду в контур енергоблоку подають не в деаератор, а в конденсатор. Конденсатор також є астатичним об'єктом, в якому рівень стабілізується за допомогою П-регулятора шляхом зміни зливу конденсату з конденсатора. Цей конденсат проходить через систему регенеративних підігрівачів і після цього надходить у деаератор. Таким чином, в об'єкт регулювання рівня в деаераторі входять 3 послідовно з'єднані елемента (рис. 1): замкнута АСР рівня в конденсаторі, конденсатопровод із ПНД і власне об'єкт-деаератор.

Оскільки робота АСР рівня в деаераторі розглядається у відхиленнях від сталих значень, приріст витрати конденсату на виході з конденсатора і на вході в деаератор однакові. АСР рівня по каналу «витрата хімічованої води в конденсатор–витрата конденсату з конденсатора» разом із конденсатопроводом із ПНД по каналу «витрата на вході–витрата на виході» описується рівнянням інерційної ланки першого порядку, і деаератор описується рівнянням інтегральної ланки. Таким чином, передавальна функція об'єкта управління описується передавальною функцією виду:

$$W(S) = \frac{K_1}{TS+1} * \frac{K_2}{S},$$

де коефіцієнт K_2 характеризує астатичні властивості деаератора.

2. Проаналізувати перехідні процеси та дослідити показники якості перехідних процесів регулювання.

Побудуємо графіки перехідного процесу регулювання рівня в деаераторі з використанням П- та ПІ-регуляторів.

Структурна схема АСР рівня в деаераторі зображена на рис. 2, де:

$W_{rd}(S)$ – передатна функція регулятора рівня в деаераторі;

$W_{po}(S)$ – передатна функція РО;

$W_{tr}(S)$ – передатна функція трубопроводу;

$W_d(S)$ – передатна функція деаератора;

$W_{vp}(S)$ – передатна функція вимірювального перетворювача.

Передатна функція РО:

$$W_{po}(S) = K_{po}$$

Коефіцієнт передачі регулюючого органу знайдемо з витратної характеристики РО:

$$K_{po} = \Delta G_k * \frac{1,2}{100} = 150 * \frac{1,2}{100} = 9,76 \frac{\text{кг}}{\text{с} * \% \text{хро}}$$

Передатна функція ВП:

$$W_{vp}(S) = K_{vp}.$$

Як вимірювальний перетворювач використовується Метран-43Ф-ДД-3494-03 із вихідним сигналом 0-5 мА.

Максимальний вимірюваний діапазон зміни рівня живильної води – 1,4 м. Тоді

$$K_{ин} = \frac{\Delta I}{\Delta H_{max}} = \frac{5}{1,4} = 3,6 \text{ мА/м}.$$

Для регулятора рівня в деаераторі об'єкт по каналу «витрата на вході в конденсатор–рівень на виході з деаератора» описується передатною функцією:

$$k_d = \frac{1}{F_3 \rho} = \frac{1}{9,3 * 934} = 11,5 * 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{мм}^2 * \text{кг}}$$

$$W(s) = \frac{K_d}{[(T_{gm} * s) * s]}$$

Оскільки регулюючий клапан встановлюється на паропроводі на деякій відстані від колонки деаератора, ділянка паропроводу від РО до деа-

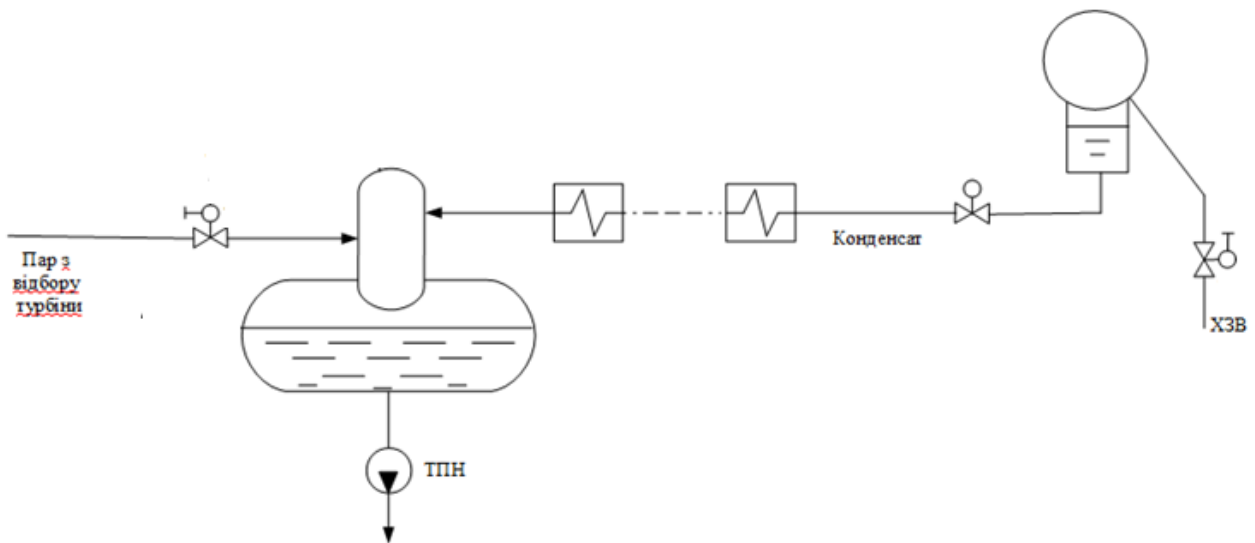


Рис. 1. Принципова схема АСР рівня в деаераторі



Рис. 2. Структурна схема АСР рівня в деаераторі

ератора є динамічною ланкою з передавальною функцією $W_m(s)$.

$$W_m(s) = \frac{1}{Ts + 1},$$

де $T = \frac{l_{тр}}{v_k}$.

Відомо, що конденсат у трубопроводі рухається зі швидкістю 0,3 м/с, а довжина встановлення регулюючого РО від клапана дорівнює 10 м. Отже, отримаємо:

$$T_{mp} = \frac{10}{0,3} = 33,3$$



Рисунок 3. Структурна схема об'єкта по каналу Гк-Нд

Побудуємо криву розгону деаератора за рівнем.

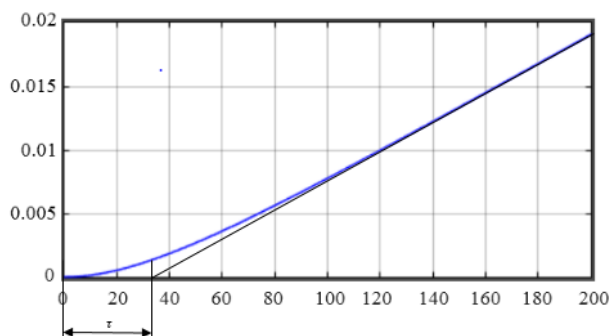


Рис. 4. Крива розгону об'єкта по каналу Гк-Нд

Крива розгону являє собою пряму похилу лінію з емнісним запізненням, тобто деаератор за рівнем є нестійким об'єктом.

За кривою розгону визначимо загальний час запізнення (τ):

$$\tau = 35 \text{ c.}$$

Наступним етапом буде знаходження налаштувань регулятора по каналу Гк-Нд.

Підставимо значення у формули Копеловіча для знаходження настройок регулятора:

- для П-регулятора:

$$k_p = \frac{0,7}{\tau / T} = \frac{0,7}{\frac{35}{33,3}} = 0,7$$

- для ПІ-регулятора $W_{тр}(s)$

$$k_p = \frac{0,7}{\tau / T} = \frac{0,7}{\frac{35}{33,3}} = 0,7$$

$$T_d = 3\tau = 3 \cdot 35 = 105 \text{ c}$$

Але для досягнення системою статичного стану оберемо коефіцієнт, що дорівнює 7.

Структурна схема замкнутої АСР рівня в деаераторі з ПІ-регулятором показана на Рисунку 4, а з П-регулятором – на Рисунку 5.

Типовий перехідний процес регулювання може бути зображений у вигляді графіка, де регульована змінна X після кількох згасаючих коливань приходить до нового збалансованого стану, тобто сталості [12, с. 11].

Перехідні процеси показані на рисунку 7 та рисунку 8.

На рисунку 7 визначені характерні показники якості регулювання:

- $\Delta X1(t) = 0.17$ – перший максимум відхилення керованої змінної;
- $\Delta X3(t) = 0.015$ – третій максимум відхилення керованої змінної;
- $t_p = 600 \text{ c}$ – час регулювання.

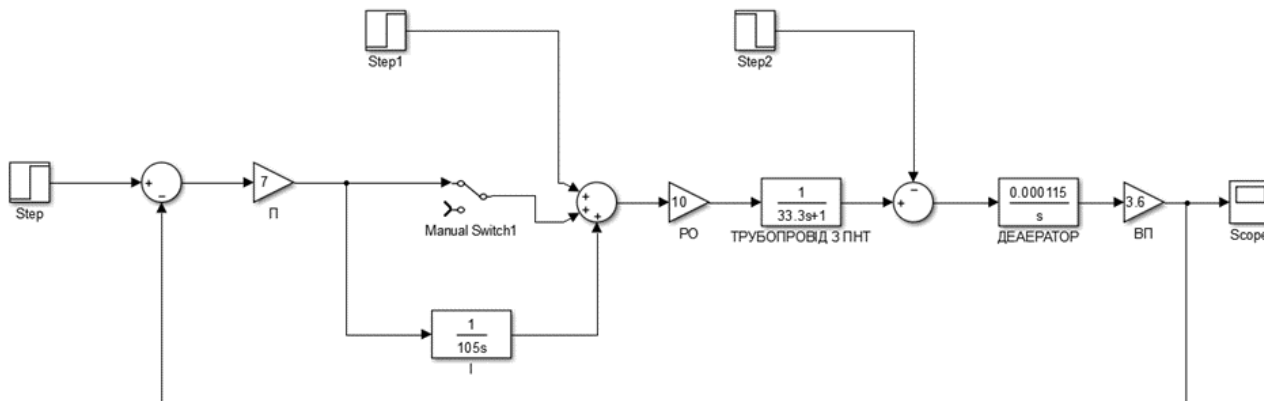


Рис. 5. Структурна схема замкнутої АСР рівня в деаераторі з ПІ-регулятором

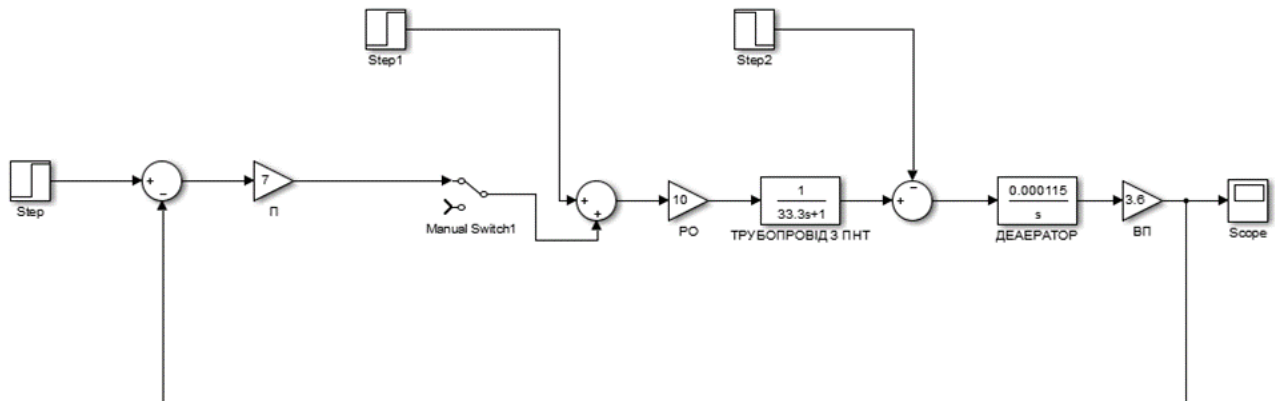


Рис. 6. Структурна схема замкнутої АСР рівня в деаераторі з П-регулятором

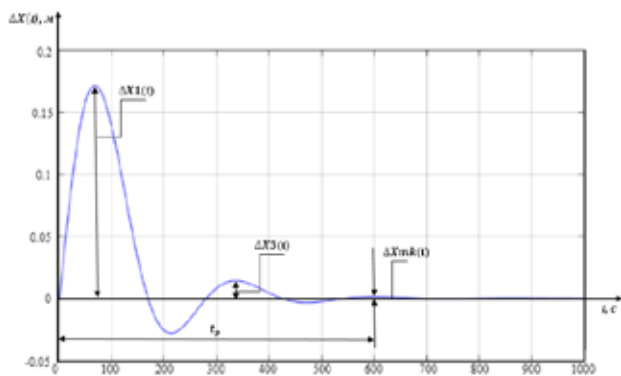


Рис. 7. Графік перехідного процесу регулювання

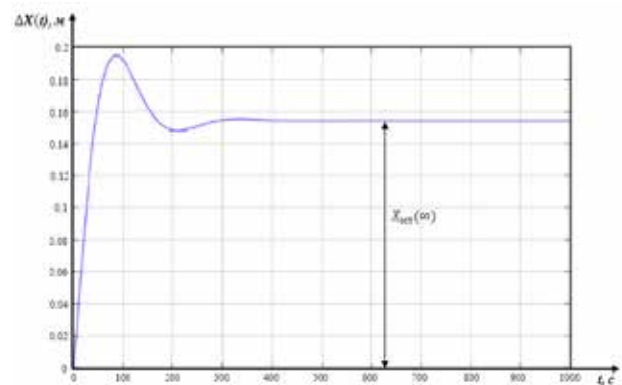


Рис. 8. Графік перехідного процесу регулювання

Крім цих показників, є також показник, який вимагають обчислення:

– показник загасання коливаль:

$$\Psi = (\Delta X1(t) - \Delta X3(t)) / \Delta X1(t)$$

$$\Psi = (0.17 - 0.015) / 0.17 = 0.91$$

За графіком, зображеним на рисунку 8, можемо знайти кінцеву похибку регулювання $X_{ост}(\infty)$ при використанні П-регулятора задля регулювання рівня в деаераторі:

$$X_{ост}(\infty) = 0.155 \text{ (м)}$$

За графіками перехідних процесів видно, що у разі застосування П-регулятора процес регулювання рівня в деаераторі матиме статичну помилку, а при застосуванні ПІ-регулятора її

немає. Відсутність статичної помилки дає змогу отримати кращу якість регулювання.

Висновки. В роботі було виконано синтез математичної моделі АСР рівня в деаераторі. Також було проаналізовано перехідні процеси та досліджено показники якості перехідних процесів регулювання рівня в деаераторі із застосуванням П- та ПІ-регуляторів. Можна зробити висновок, що з метою підвищення якості регулювання рівня в баці деаератора енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000 краще застосовувати ПІ-регулятор, адже у цьому разі відсутня статична помилка. Це дає змогу отримати кращу якість регулювання.

Список літератури:

1. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*. 2012. № 1(38). P. 99–106.
2. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. № 241(8). P. 2956–2963.
3. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply systems structural optimization. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2015. № 1(45). P. 134–140.
4. Давыдов В.О., Крылов В.Н., Максимов М.В. Автоматизированная система распознавания. *Искусств. интеллект*. 2002. № 4. С. 462–469.

5. Ложечников В.Ф., Михайленко В.С. Методи побудови адаптивних систем управління. *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. 2009. № 2. С. 174–179.
6. Тодорцев Ю.К., Бундюк А.М., Ларіонова О.С. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки. *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи*. 2009. № 2. С. 8–11.
7. Брунеткин А.И., Максимов М.В., Бондаренко А.В. Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 12. С. 131–141.
8. Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А., Беглов К.В. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Вып. 7. № 4. С. 18–24.
9. Бундюк А.Н., Улицкая Е.О. Разработка алгоритма для расчёта статики когенерационной энергетической установки. *Холодильная техника и технология*. 2013. № 3. С. 34–40.
10. Belova N.A., GP Lisiuk Genetic algorithms application to decide the issue of single-dimensional cutting optimization. *Automation of technological and business processes*. 2016. № 2. Т. 8. Р. 4–8.
11. Belova N.A., Lisiuk G.P. Genetic algorithms application to decide the issue of single-dimensional cutting optimization. *Automation of technological and business processes*. 2016. № 2. Т. 8. Р. 4–8.
12. Харабет О.М. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера : навч. посібник. Одеса : Бахва, 2014. 188 с.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В БАКЕ ДЕАЭРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000

В статье рассмотрены П- и ПИ-регуляторы для регулирования уровня в баке деаэраатора энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. Получены графики переходных процессов. Сделаны выводы об уместности использования П- и ПИ-регулятора. В тепловой схеме атомной электростанции с реактором типа ВВЭР-1000 применяется деаэраатор типа ДП-3200/185А. Как известно, вакуум в конденсаторе способствует проникновению в его паровой объем некоторого количества воздуха. Известно влияние кислорода на протекание коррозионных процессов. Также наличие перепада давлений в конденсаторе между средами вызывает незначительный переток охлаждающей воды в конденсирующий пар при дефектах трубок. С этим связано появление в конденсатном тракте хлоридов, бикарбонатов, карбонатов и кремниевой кислоты, которые увеличивают электропроводность и способствуют образованию свободной углекислоты, что является коррозионно-активным агентом. По этим причинам на энергоблоках применяется термическая деаэрация.

Ключевые слова: деаэраатор, термическая деаэрация, коррозия, конденсат, математическая модель, переходный процесс, показатели качества, структурная схема.

INCREASING THE QUALITY OF REGULATION OF THE LEVEL IN THE BATTERY OF THE DEAERATOR OF NUCLEAR POWER PLANT WITH WWER-1000

In the article P- and PI-regulators are considered for adjusting the level in the deaerator tank of the NPP with the WWER-1000. Graphs of transient processes are obtained. Conclusions about the appropriateness of the use of P- and PI-regulators are made. In the thermal scheme of a nuclear power plant with a reactor type WWER-1000 deaerator type DP-3200 / 185A is used. As is known, the vacuum in the condenser helps to penetrate into its steam volume of some air. The influence of oxygen on the occurrence of corrosion processes is known. Also, the presence of a pressure drop in the condenser between the medium causes a slight flow of cooling water into the condensing steam at the defects of the tubes. This is due to the appearance in the condensate tract of chlorides, bicarbonates, carbonates and silicic acid, which increase the electrical conductivity and contribute to the formation of free carbon dioxide, which is a corrosive active agent. For these reasons, thermal deaeration is used on power units.

Key words: deaerator, thermal deaeration, corrosion, condensate, mathematical model, transient process, quality indicators, block diagram.

Шадура О.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАКЕТУ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ GEANTV ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

У статті за допомогою генетичних алгоритмів та еволюційних стратегій досліджуються методи оптимізації продуктивності програмного пакету GeantV, який є прототипом програмного забезпечення наступного покоління для моделювання транспорту частинок у фізиці високих енергій. Основним підходом для оптимізації є використання модифікації генетичного алгоритму NSGA-II шляхом включення в нього додаткового генетичного оператора (НГК-оператора), що побудований на основі методу нецентрованих головних компонент. Показано, що включення такого оператора надає змогу прискорити збіжність генетичного алгоритму до оптимального фронту Парето для задач багатокритеріальної оптимізації. На прикладі оптимізації продуктивності симуляцій GeantV для транспорту частинок через простий калориметр та через детектор експерименту CMS (LHC, CERN) отримано, що за допомогою застосування НГК-оператора в генетичному алгоритмі вдалося збільшити ефективність використання обчислювальних ресурсів для аналізу даних.

Ключові слова: задача оптимізації «чорної скриньки», оптимізація складних систем, симуляція транспорту частинок, генетичний алгоритм, генетичний оператор.

Постановка завдання. Дослідження в області фізики високих енергій (ФВЕ) та ядерної фізики неможливі без використання великих обчислювальних потужностей і спеціального програмного забезпечення для обробки, моделювання та аналізу даних. Така ситуація зумовлена як великою кількістю даних, що генерується в експериментах на сучасних прискорювачах, так і статистичною природою аналізу даних і складністю алгоритмів обробки даних, які використовуються. Крім того, під час комп'ютерної обробки даних необхідно моделювати умови роботи прискорювача, детекторів та фізичних процесів у детекторі одночасно з генерацією наборів даних та їх обробкою.

Експлуатація детекторів в експериментах ATLAS, CMS, ALICE на Великому адронному колайдері (ВАК) у ЦЕРНі (м. Женева, Швейцарія) показала, що статистика, набрана за час роботи ВАК в 2010–2017 рр., становить понад 60 Пбайт «сирих» (необроблених) даних. Такий великий обсяг інформації, що надходить вже зараз, і очікуване зростання обсягу даних на наступних етапах роботи колайдера потребують розробки нових комп'ютерних моделей, методик та методів управління роботи з даними, створення нових підходів для оптимізації роботи програмних систем для обробки даних.

У статті ми фокусуємося на дослідженні оптимізації продуктивності програмного пакету GeantV, який є прототипом програмного забезпечення наступного покоління для моделювання

транспорту частинок через різні типи матеріалів. Він має увібрати в себе та розвинути всі позитивні сторони пакету Geant4, який є стандартом для оброблення даних у ФВЕ, і є одним із головних програмних пакетів, що використовують для аналізу даних експериментів на ВАК.

З метою оптимізації продуктивності пакету GeantV ми використовуємо модифікацію генетичного алгоритму NSGA-II [9, с. 182] шляхом включення в нього, розробленого нами в статті [11, с. 126], додаткового генетичного оператора (НГК-оператора), що побудований на основі методу нецентрованих головних компонент і який надає змогу прискорити збіжність генетичного алгоритму до оптимального фронту Парето для задач багатокритеріальної оптимізації. Для технічної реалізації цього підходу було розроблено комплекс програмних модулів на основі НГК-оператора та виконано його інтеграцію в бібліотеку генетичних алгоритмів у пакеті симуляцій транспорту частинок GeantV. В результаті оптимізації продуктивності симуляцій транспорту частинок через простий калориметр та детектор експерименту CMS отримано, що за допомогою застосування НГК-оператора в генетичному алгоритмі вдалося збільшити ефективність використання обчислювальних ресурсів для аналізу даних.

Програмні пакети Geant4 та GeantV. Geant4 – це програмний пакет для моделювання проходження частинок через речовину. Сфери його застосування включають фізику та астро-

фізику високих енергій, фізику прискорювачів елементарних частинок та ядерну фізику, а також дослідження в медичній та космічній науці. Основні довідкові документи для Geant4 були опубліковані в [1, с. 250].

Симуляції на основі Geant4 є дуже складними і одними з найбільш ємних обчислювальних завдань в експериментальній фізиці високих енергій. Протягом всього першого етапу роботи ВАК (Run-I), більше половини WLCG (Всесвітня обчислювальна мережа ВАК – Worldwide LHC Computing Grid) було задіяно в моделюванні 10^{10} високоенергетичних подій, що еквівалентно 10^{12} сек CPU часу.

Введення в 2013 р. в Geant4 можливостей багатопотоковості для обробки подій принесло значну економію пам'яті для експерименту CMS. Незважаючи на те, що продуктивність роботи пакету Geant4 не поліпшилася в значній мірі з введенням багатопотоковості (відхилення від ідеального масштабування було приблизно на 10% при виконанні на 30 ядрах), використання пам'яті для програм CMS-моделювання було значно зменшено, так було використано 170 Мб для першої події і лише 30 Мб на подію для кожного додаткового потоку.

Через оптимізацію коду та вдосконалення програмної платформи Geant4 і алгоритмів обробки подій, середнє підвищення продуктивності Geant4 протягом проведення експериментів на ВАК (2010–2015) було порядку 35%. Завдяки зусиллям команди Geant4 цей програмний пакет вже має високий рівень оптимізації, що ускладнює отримання додаткового підвищення продуктивності в майбутньому.

Проект GeantV вважається програмним забезпеченням наступного покоління для симуляцій транспорту частинок для обробки експериментів із фізики високих енергій в експериментах на Великому адронному колайдері. GeantV, у порівнянні з Geant4, має більш гнучку структуру, що призводить до кращих можливостей широкої підтримки ним різних обчислювальних архітектур і кращої масштабованості для складних обчислень. Тоді як Geant4 є програмним додатком, що використовує найбільше процесорного часу для розрахунків у ФВЕ і був розроблений переважно понад 10 років тому та не демонструє жодної гнучкості для оптимізації часу обчислення для стандартних задач моделювання.

Визначення багатокритеріальної задачі для симуляцій з використанням GeantV. Дослідження в статті сфокусовано на застосуванні

алгоритмів стохастичної оптимізації та методів машинного навчання без учителя, включаючи багатовимірний статистичний аналіз, використовуваний для оптимізації налаштування симуляцій Монте-Карло у ФВЕ в програмному пакеті GeantV.

Як базовий метод оптимізації симуляцій у GeantV використовувалися генетичні алгоритми. Основною конструкцією в цих алгоритмах є спеціальні генетичні оператори [8, с. 57] – селекція, кросовер та мутація, що діють у лінійному просторі: $\Lambda = (p_1, p_2, \dots, p_m)^t$ – векторів популяції, де компоненти p_α є ймовірністю знайти α -ту особину в генетичній популяції, яка складається з N різних особин. Генетичний оператор $G_\alpha(\vec{p})$ визначається ймовірністю появи особини α в наступній генерації нащадків, якщо попередня популяція була \vec{p} . Тоді повний генетичний оператор задається відображенням $G: \Lambda \rightarrow \Lambda$ і є композицією трьох відображень: селекції F , мутації U та кросоверу C :

$$G: \Lambda \rightarrow \Lambda, G(\vec{p}) = C \cdot U \cdot F(\vec{p}).$$

Додавання спеціальних операторів до генетичного алгоритму може привести до зменшення шуму та більш швидкого наближення до істинного фронту Парето для задач багатокритеріальної оптимізації. Цей фронт визначає набір оптимальних розв'язків, що не домінують щодо один одного, та при переміщенні від однієї точки фронту Парето до іншої досягається певний програв в одній фітнес-функції та виграв – в іншій. Парето фронт складається з ідеальних осіб популяції в генетичному алгоритмі (ГА), вибраних на основі відповідного набору параметрів оптимізації, і при його знаходженні зручно застосувати ортогональні перетворення та розглядати властивості варіації даних, щоб виявити специфічні структури в даних. Збіжність генетичних алгоритмів досліджувалась у роботах [7, с. 126]. Для процедури оптимізації GeantV запропоновано набір параметрів, які вважають найважливішими для налаштування продуктивності програмних додатків. Це – явний час роботи додатку, споживання пам'яті та інші специфічні модельно залежні регулятори для налаштування проведення обчислень при роботі GeantV.

Однією з головних особливостей GeantV є застосування методу векторизації для обробки даних експериментів. Ідея використання векторизації стає дуже популярною в фізиці високих енергій. Невекторизований код використовує близько 25% потужності сьогоденного обладнання. Він виконує інструкції за кожним набором даних для вхідних даних, замість виконання інструкції на

векторі набору даних для вхідних даних, але у тій самій кількості циклів. Оскільки векторизований код загалом більш компактний (через операції над векторами), він зазвичай також покращує продуктивність кешу.

Векторизація підвищує ефективність (і, зокрема, пропускну спроможність) програмного забезпечення ФВЕ, використовуючи векторну частину центрального процесору. Покращення продуктивності можливо легко помітити, коли всі дані зберігаються в кешах. Якщо дані потрібно часто переміщати з пам'яті в кеш-пам'ять, то підвищення продуктивності стає непомітним, як це можна побачити у випадках обробки великого розміру масиву даних. Тут витрати пов'язані з переміщенням даних, домінують настільки, що ефект векторизації практично не спостерігається, або векторизація має несприятливий ефект для обчислень.

Симуляції за допомогою GeantV являють собою складну систему взаємодії різних програмних модулів, необхідних для забезпечення симуляції транспорту частинок, яка включає транспортування через евристично керований механізм із використанням різного набору навігаторів, політику планування, фізичні моделі з таблицями поперечних перерізів взаємодій частинок у різних реакціях, а також модельні бібліотеки з геометричними алгоритмами [4, с. 012023].

Для ефективної роботи великих програмних додатків, таких як GeantV, що налаштовані на використання обчислювальних стратегій SIMD/MIMD (single instruction, multiple data – одиночний потік команд, множинний потік даних та multiple instruction, multiple data – множинний потік команд, множинний потік даних), та паралельного моделювання також необхідно враховувати складність процесорів та архітектур, що використовуються для моделювання.

Ці завдання класифікуються як задача оптимізації «чорної скриньки» за допомогою пошуку екстремального набору точок та локальних оцінок для визначення функцій. Завданням оптимізації для «чорного ящика» є мінімізувати векторну функцію $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, для якої аналітична форма невідома [7, с. 126]. Оптимізацію «чорної скриньки» можна провести на двох рівнях, отримавши:

1) оцінку значень функції без похідних і градієнтів, коли градієнтні методи є недоступними;

2) за допомогою приблизних значень градієнтів функції, що взагалі потребує великої кількості оцінок.



Рис. 1. Проблема оптимізації «чорної скриньки»

У статті ми розглядаємо оптимізацію симуляції за допомогою GeantV як оптимізацію задачі «чорної скриньки» з набором фітнес-функцій. Для оптимізації симуляції GeantV нам треба узагальнити набір цілей, які ми хотіли б досягти за допомогою цієї процедури, та врахувати їхню залежність від великої кількості векторних параметрів. Із цією метою ми використовуємо такі процедури:

1) оптимізація загального часу виконання прикладів симуляції та середнього часу для створення однієї популяції;

2) зменшення використання пам'яті додатків;

3) оптимізація кількості викликів інструкцій для всього моделювання, специфічного для поточної архітектури;

4) зниження спорідненості пам'яті (оптимізація NUMA і т. д.), споживаної мікропроцесором, що використовується для моделювання;

5) підвищення ефективності та завантаження, специфічного для поточної архітектури;

6) максимізування операційної інтенсивності моделювання.

Паралельне моделювання за допомогою GeantV. Протягом останнього десятиліття розвиток Geant4 [3, с. 667] був спрямований на його застосування для повного моделювання детекторів в експериментах на БАК. Основними його недоліками є складний дизайн, що містить глибокі ієрархії різних структур даних, та складна система функціональних викликів, які важко експлуатувати на найкращих сучасних архітектурах, через низькі значення показників ефективності інструкцій та неефективне використання цим додатком кеш-пам'яті.

Проект GeantV [2, с. 012019] розпочався в 2013 р. В рамках проекту було здійснене ретельне R&D в кількох напрямках, включаючи паралелізм, і збільшення пропускну спроможності, включивши SIMD у код та вдосконаливши код, щоб уникнути непотрібних навантажень та інструкцій. Це дало змогу ефективно виконувати програми GeantV на багатоядерних векторних архітектурах, таких як Xeon Phi 7120X (Knights Landing), і оптимізувати використання кеш-пам'яті системи. Очікується, що покращена пропускну спроможність для подій, компенсує зростаючу потребу в моделюванні даних для режиму роботи з HL-LHC,

який буде генерувати величезну кількість подій. Зазначимо, що GeantV має значні переваги через використання оптимізованих компонентів, таких як нова бібліотека моделювання геометрії VecGeom, яка забезпечує кілька нових функцій, включаючи векторизацію та прозорий доступ до новітніх комп'ютерних архітектур. Бібліотека VecGeom [4, с. 012023] здатна обробляти вектори треків частинок, що чудово адаптуються до багатопоточних завдань. Однією з переваг VecGeom порівняно з подібними бібліотеками є висока портативність для використання на прискорювачах (графічних процесорах та для Xeon Phi 7120X (Knights Landing) та ін.).

Обговорюючи оптимізацію моделі GeantV, ми можемо виділити вісім рівнів паралелізму роботи GeantV, причому тонкодисперсний паралелізм є єдиним засобом, який дає змогу отримувати додаткові ефекти як у пропускій здатності, так і у часі для отримання рішення задачі оптимізації. Інші методи мають свої сильні та слабкі сторони: паралелізм на рівні апаратної системи дає дуже мало користі, тоді як багатоядерний паралелізм дає змогу зменшити об'єм використаної пам'яті та час для рішення, але не вирішує проблему скорочення пропускну спроможності. З іншого боку, високопродуктивні обчислення дають змогу запускати багато паралельні обчислювальні завдання з високою пропускну спроможністю. Ці різні параметри паралелізму можуть бути включені в GeantV і збільшують розмірність простору оптимізованих параметрів. Наша ідея полягає в тому, щоб спробувати оптимізувати моделювання, використовуючи спеціальний набір інструментів для машинного навчання, намагаючись збільшувати обсяг завдань для обробки даних.

Основними характеристиками функціональності ядра GeantV додатку є надання оптимізованих структур даних та паралельних служб для керування паралельними робочими потоками, забезпечення когерентності роботи шляхом «пакування» частинок у вектори та використання цих векторів в алгоритмах геометрії та фізики. Менеджер запуску – це програмний модуль, що дає змогу застосувати задану конфігурацію при моделюванні та використовувати відповідні параметри моделювання. Диспетчер керування також контролює цикл події, керування системи подій та такі параметри паралельності, як завершення роботи.

Як передумова для запуску симуляції GeantV [3, с. 072006], користувачеві потрібно буде створити об'єкт конфігурації, який може бути налаштований за допомогою різних наборів параметрів,

таких як розмір буфера подій, розмір вектора або кілька варіантів налаштування паралельної роботи GeantV. Наші інструменти для налаштування симуляції GeantV [6, с. 042026] – це конфігурації набору параметрів, що працюють на вузлах та входять у матрицю параметрів, що сформована на результатах спостереження за планувальником та характеристиками вузлів, і які можна оцінити за допомогою матриці функцій фітнесу [6, с. 042026].

Подальше вдосконалення ефективного управління симуляціями можна було б запровадити з точки зору управління подіями, виходячи з параметричної настройки еволюційного алгоритму для багато завантажених моделювань та введення в дію сервера диспетчеризації подій. Важливим для використання є застосування нової політики балансування подій у середовищі, що складається з кількох вузлів та може бути вирішена за допомогою стратегії, яка допомагає зменшити час під час виконання завдань на менш ефективних вузлах обробки.

Налаштування параметрів настройки для багатокритеріальної задачі (MOP). Як вхідний вектор або генетичний індивідуум для генетичного алгоритму ми використовуємо набір параметрів, що використовується у GeantV:

- 1) параметри обробки подій: загальна кількість подій, кількість подій у буфері, поріг для визначення пріоритету подій;
- 2) параметри паралельності: кількість потоків паралельності процесора, політика планування для оптимізації локальності;
- 3) розмір вектору: вихідний розмір вектора, максимальний дозволений розмір вектора;
- 4) специфічні параметри настройки: кількість кроків для алгоритму визначення важливих фігур у геометрії детектору, порогове значення між перемиканням між скалярним та векторним режимами додатку, спеціальний поріг під час активації диспетчеру завдань, поріг для пам'яті, поріг для знищення подій.

У дослідженнях GeantV [3, с. 072006]] виконувалися тести для перевірки парадигм паралельного програмування – MPI в гетерогенному кластері з загальним числом подій, розділених між всіма процесами. Попередні результати показали хороше масштабування, еквівалентне масштабуванню для одиночного вузла, що підтверджує можливість ефективної обробки завдань у багато-серверному середовищі.

Багатосмні паралельні обчислення і очікувані результати продуктивності. Концепція

грід для ВАК, що дала змогу запустити мільйони завдань реконструкції подій у детекторах паралельно, базується на ідеї про те, що фізичні події загалом не корелюються. Попередні оцінки в процесі нашого дослідження вказують, що ми можемо сподіватися на прискорення до 5% при використанні сучасних процесорів для моделювання методом Монте-Карло для експериментів у ФВЕ. Це дасть змогу звільнити ресурси, що використовуються для задач із високопродуктивними обчисленнями, та забезпечити більш ефективні обчислення.

Загальна ідея оптимізації полягає в тому, що наш алгоритм може працювати в режимі налаштування, лише використовуючи отримані в процесі оптимізації значення параметрів для аналізу Парето фронту. Це дає змогу отримати максимальну користь від оптимізації процесу симуляцій.

Стохастична оптимізація базується на налаштуванні параметрів генетичного алгоритму, щоб мати змогу оптимізувати параметри у середовищі для «ідеальних» високопродуктивних обчислень, де всі обчислювальні процеси є «ідеальними» та мають однакову конфігурацію апаратного забезпечення. У генетичному алгоритмі ми використовуємо ідею попередньої обробки даних (параметрів), використовуючи метод головних компонент для очищення зашумленого набору даних, за допомогою введеного нами нового генетичного оператора, що допомагає підвищити конвергенцію генетичного алгоритму.

Основні підходи, що використані в дослідженні оптимізації програмного пакету GeantV:

1) з точки зору генетичного алгоритму генерація нашого генетичного алгоритму становить N завдань;

2) генетичний індивідуум є вектором вхідних параметрів (у випадку першого покоління це випадково згенеровані обмежені значення);

3) функція оцінки функції фітнесу – це вектор значень заданих функцій.

Повторне надсилання нових N завдань із попередньо визначеними генетичними індивідуумами (векторами параметрів), які були отримані за допомогою генетичних еволюційних операторів, продовжується доти, поки ми не згенеруємо нове покоління. Процес буде знову повторений, поки не буде знайдено «ідеального» налаштування параметрів або ідеальну Парето точку на фронті Парето. Переваги цієї схеми полягають в тому, що вихідні дані для фізики насправді не змінюється при зміні налаштувань, але ми можемо збирати дані про продуктивність системи та спробувати

налаштувати її під час роботи величезної кількості завдань при аналізі даних.

Недолік полягає в тому, що насправді обчислювальні ресурси не настільки ідеальні та при появі нових архітектур, процесорів, графічних процесорів тощо нам потрібно застосовувати наш метод також для негетерогенних ресурсів. Ми можемо намагатися бути «експертами» і розподілити ресурси вручну (кажучи, що ми очікуємо, що у нас є « N -груп» та організуємо для кожної групи окрему процедуру налаштування через « N » генетичних алгоритмів). Це може бути легко виконано в сучасних кластерах, де організовано різні черги, спираючись на «експертні» знання. Або ми можемо спробувати організувати таку складну систему разом, намагаючись зібрати та реорганізувати процес збору та аналізу даних. Цю задачу можна визначити як задачу балансування системи завантаження з урахуванням продуктивності для високопродуктивних обчислень за допомогою зв'язкових наборів даних.

Тестові налаштування GeantV. Важливою частиною визначення правильної процедури для оптимізації є наявність тестового набору, що охоплює різні випадки використання GeantV, забезпечуючи належне охоплення функціональності та взаємодії між ядром GeantV та іншими його підмодулями: фізику, геометрію тощо.

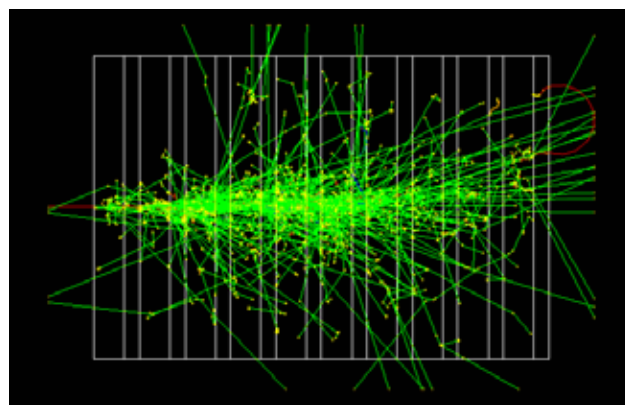


Рис. 2. Моделювання ExN03 – розробка електромагнітного душу частинок в «сандвіч»-калориметру

Для тестових налаштувань алгоритму оптимізації ми використовували код Run.C, який ще називається прикладом ExN03 і є прикладом на основі вибірки калориметра з шарами поглиначів Pb та розчинів рідини Ag. Всі електромагнітні процеси та розпади моделюються окремими процесами для генерації γ -випромінювання, e^+ , e^- частинок (використовується для вивчення лівня частинок). Як результат симуляції ми збираємо дані,

зв'язані з відповіддю детектора: зіткнення включають у себе дані про депозит енергії, довжину траєкторії в поглиначі та депозит енергії. Перші результати для прикладу ExampleN03 показують

дуже оптимістичний ефект використання нашого підходу для оптимізації з точки зору поліпшення обчислювальної продуктивності моделювання GeantV.

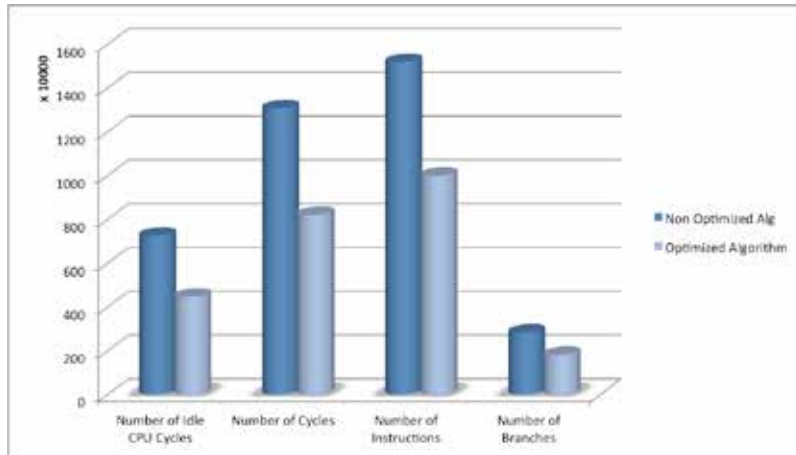


Рис. 3. Моделювання ExN03 – перші результати оптимізації

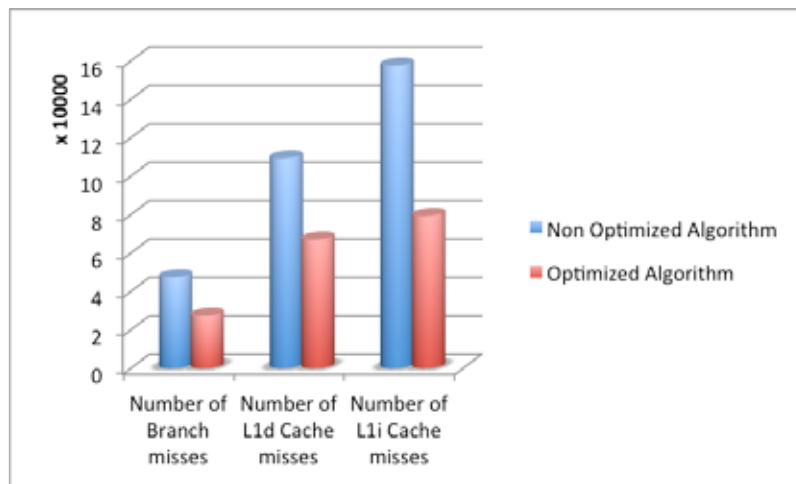


Рис. 4. Моделювання ExN03 – перші результати оптимізації

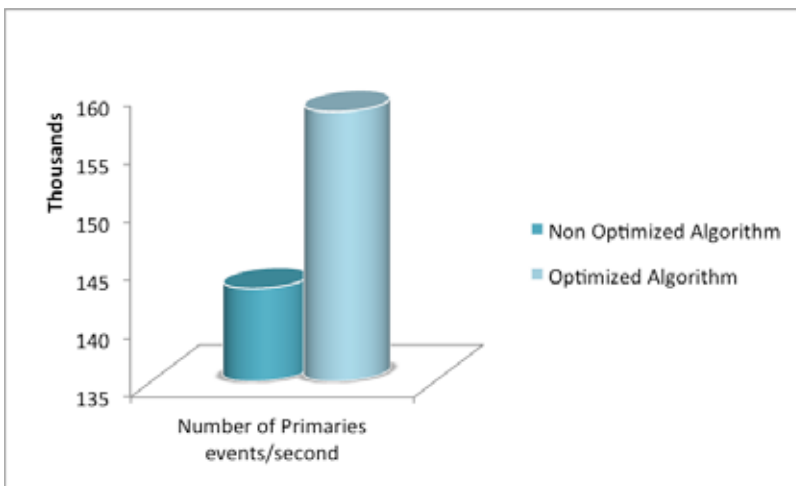


Рис. 5. Моделювання ExN03 – перші результати оптимізації

Попередні результати показують, що стохастично налаштовані параметри для паралельних додатків GeantV на обчислювальних процесорах Intel® Core™ i7-8700K змогли отримати перевагу від 18% прискорення роботи порівняно з початковим набором. Тим часом результати, отримані для процесора Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2695, показують, що, налаштувавши ці параметри, ми змогли досягти зниження частки використання ЦП до 34%, що забезпечує стабільне використання пам'яті та зменшення пробігу час роботи пакетної роботи до 27%.

Висновки. У статті представлені результати застосування модифікованого генетичного алгоритму NSGA-II для оптимізації продуктивності програмного пакету GeantV. В генетичний алгоритм був включений запропонований у роботі [8, с. 57] новий генетичний оператор (НГК-оператор), який побудовано на основі методу нецентрованих головних компонент, і показано, що його застосування в тестових багатоцільових задачах оптимізації забезпечує прискорення збіжності генетичного алгоритму до оптималь-

ного Парето фронту. Результати впровадження генетичного оператора дають змогу прискорити конвергенцію у два рази, що дозволяє швидше отримати доступ до раннього Парето фронту.

Виконана в статті інтеграція НГК-оператора в типовий генетичний алгоритм була використана задля оптимізації програмного пакету GeantV, і було проведено дослідження його продуктивності порівняно з застосуванням не модифікованого генетичного алгоритму [8, с. 57].

Результати, отримані в процесі цього дослідження, показують ефективність концепції оптимізації продуктивності GeantV з використанням еволюційних налаштувань для обчислень. Цей метод може бути застосований для встановлення оптимально GeantV додатків на суперкомп'ютерах і кластерах для високопродуктивних обчислень, одночасно з можливістю налаштування масово паралельних наборів задач, оброблених у неоднорідному середовищі, і задля досягнення масштабованості в середовищах для високопродуктивних обчислень.

Список літератури:

1. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., and others. GEANT4 – a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2003. V. 506. № 3. P. 250–303.
2. Amadio G., Ananya A., Apostolakis J., Arora A., Bandieramonte M., Bhattacharyya A., Bianchini C., Brun R., Canal P., Carminati F., Duhem L., Elvira D., Gheata A., Goulas I., Jun S., Lima G., Mohanty A., Nikitina T., Novak M., Pokorski W., Ribon A., Sehgal R., Shadura O., and others. GeantV: from CPU to accelerators. *Journal of Physics: Conf. Ser. “Computing Technology for Physics Research”*. 2016. V. 762, № 1. P. 012019.
3. Amadio G., Apostolakis J., Bandieramonte M., Bhattacharyya A., Bianchini C., Brun R., Carminati F., Duhem L., Gheata A., Gheata A., Goulas I., Jun S., Lima G., Mohanty A., Novak M., Pokorski W., Ribon A., Sehgal R., Shadura O., and others. The GeantV project: preparing the future of simulation. *Journal of Physics: Conf. Ser. “Offline software”*. 2015. V. 664. № 7. P. 072006.
4. Apostolakis J., Bandieramonte M., Bitzes G., Brun R., Carminati F., Cosmo G., De Fine Licht J., Duhem L., Gheata A., Goulas I., Jun S., Lima G., Nikitina T., Novak M., Pokorski W., Sehgal R., Shadura O., Wenzel S.. Towards a high performance geometry library for particle-detector simulations. *Journal of Physics: Conf. Ser. “Computing Technology for Physics Research”*. 2015. V. 608. № 1. P. 012023.
5. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. V. 6. P. 182–197.
6. Amadio G., Apostolakis J., Bandieramonte M., Bhattacharyya A., Behera A., Brun R., Canal P., Carminati F., Cosmo G., Duhem L., Folger G., Elvira D., Gheata A., Gheata A., Goulas I., Jun S., Hariri F., Konstantinov D., Kumawat H., Ivantchenko V., Lima G., Nikitina T., Novak M., Pokorski W., Ribon A., Sehgal R., Shadura O., and others. Stochastic optimization of GeantV code by use of genetic algorithms. *Journal of Physics: Conf. Ser. “Offline Computing”*. 2017. V. 898. № 4. P. 042026.
7. Shadura O., Petrenko A., Svistunov S. Multivariate convergence-targeted operator for the genetic algorithm. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2017. № 1. С. 126–140.
8. Shadura O., Carminati F., Petrenko A. Performance Optimization of Physics Simulations Through Genetic Algorithms. *Journal of Computer Science*. V. 15. № 1. P. 57–66.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАКЕТА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ GEANTV С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

В статье с помощью генетических алгоритмов и эволюционных стратегий исследуются методы оптимизации производительности программного пакета GeantV, который является прототипом программного обеспечения следующего поколения для моделирования транспорта частиц в физике высоких энергий. Основным подходом к оптимизации является использование модификации генетического алгоритма NSGA-II за счет включения в него дополнительного генетического оператора (НГК-оператора), построенного на основе метода нецентрированных главных компонент. Показано, что включение такого оператора дает возможность ускорить сходимость генетического алгоритма к оптимальному фронту Парето для задач многокритериальной оптимизации. На примере оптимизации производительности симуляций GeantV для транспорта частиц через простой калориметр и через детектор эксперимента CMS (LHC, CERN) выяснено, что с помощью применения НГК-оператора в генетическом алгоритме удалось повысить эффективность использования вычислительных ресурсов для анализа данных.

Ключевые слова: задача оптимизации «черного ящика», оптимизация сложных систем, симуляция транспорта частиц, генетический алгоритм, генетический оператор.

PERFORMANCE OPTIMIZATION OF THE PHYSICS SIMULATION PACKAGE GEANTV BY THE USE OF THE GENETIC ALGORITHMS

This article describes an investigation of genetic algorithms and evolutionary strategies methods used for the optimization of the performance of the GeantV software package, the next generation software for modeling transport particle in high-energy physics (HEP). The primary approach for optimization is a modification of the NSGA-II genetic algorithm with the additional genetic operator (UPCA operator), based on the method of non-centered principal components. It is shown this operator accelerates the convergence of the genetic algorithm to the optimal Pareto front for multi-objective optimization tasks. Optimizing, as an example, the performance of GeantV particle transport simulations through a simplified calorimeter and the CMS experiment detector (LHC, CERN), it was found that using the UPCA operator for a genetic algorithm improved the efficiency of utilization of computational resources for data analysis.

Key words: “black box” optimization, complex systems optimization, transport particles simulation, genetic algorithm, genetic operator.

Яременко В.С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тарасенко М.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ БІБЛІОТЕК ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТОВИХ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У цій роботі розглянуті бібліотеки для вирішення задач машинного навчання. Виконано порівняльний аналіз даних бібліотек. Для порівняння було обрано задачу класифікації текстових даних. Навчання моделі відбувалось методами навчання з вчителем. Для навчання були використані штучні нейронні мережі з нейронами, що мають довгу короткочасну пам'ять. Оцінка бібліотек відбувається за точністю класифікації, швидкістю навчання моделі в однакових середовищах та наявністю засобів, що полегшують побудову та апробацію цієї моделі.

Ключові слова: штучні нейронні мережі, глибоке навчання, інтелектуальний аналіз текстових даних, класифікація текстів, навчання з вчителем.

Постановка проблеми. Задача класифікації текстових даних є однією з багатьох актуальних задач науки про машинне навчання. За останні роки було розроблено велику кількість методів для вирішення цієї задачі. При цьому залишається відкритим питання, які саме підходи мають перевагу і за яких обставин, а також – які програмні реалізації (бібліотеки) для машинного навчання є кращими для вирішення таких задач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці “Sentiment Analysis using LSTM” [1], пропонується скористатись моделлю, що має архітектуру рекурентної нейронної мережі, побудованої на блоках довгої короткочасної пам'яті. При цьому автор пропонує як вхідні дані використовувати векторні представлення слів.

Іншим підходом, який розглядається в статті Д. Браунлі [2], є використання згорткових нейронних мереж і обчислення «мішка слів». Він має недоліки, адже не здатен врахувати порядок слів.

Одним з інструментів для вирішення задачі класифікації текстів є векторне представлення слів (word embedding). На практиці часто вживаними є такі моделі векторного представлення слів, як word2vec і GloVe. Обидві моделі вивчають представлення слів у вигляді векторів, базуючись на тому, як часто і в яких комбінаціях слова з'являються разом у великих текстових корпусах. Моделі відрізняються тим, що word2vec є прогнозуючою моделлю, тоді як GloVe – це частотна модель.

У прогнозуючих моделях вектори слів обробляються таким чином, щоб зменшити похибку між цільовими та контекстними словами. У word2vec це реалізовано як нейронна мережа прямого поширення.

Прогнозуючі моделі економно використовують пам'ять, але необхідність зменшення похибки для кожної одиниці даних робить паралелізацією досить складною, що робить обробку великих текстових корпусів довгою [3].

Частотні моделі працюють із матрицями одночасної появи слів. Над матрицями здійснюється операція зменшення вимірності, залишаються лише найголовніші ознаки, шум відсікається. Після цієї операції кожен рядок отриманої матриці позначає вектор для кожного слова.

Частотні моделі вимагають великих обчислювальних потужностей та велику кількість пам'яті, але при цьому такі моделі легко розпаралелюються, що в теорії дає змогу проводити навчання на текстах розмірами в сотні гігабайтів, що має збільшити точність моделі [3].

Моделлю навчання з учителем, що добре підходить для класифікації текстових даних, є рекурентна нейронна мережа, побудована на нейронах із довгою короткочасною пам'яттю. Рекурентні нейронні мережі дають змогу обробляти дані, в яких є важливим порядок одиниць даних, подібно до того, як є важливим порядок слів у людській мові [4].

Довга короточасна пам'ять – це архітектура РНН, ключова перевага якої для вирішення задачі семантичного аналізу речень – здатність реагувати на ключові для визначення класу слова незалежно від того, як далеко ці слова знаходяться один від одного [5; 6].

Блок ДКЧП складається з вхідного, вихідного та забувального вентилів, що контролюються відповідними векторами і визначають внутрішній стан блоку. На рисунку 1 проілюстровано будову вентиляю.

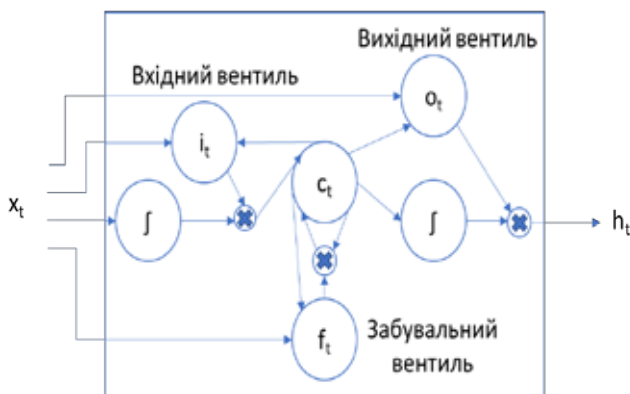


Рис. 1. Схема вузла ДКЧП

Вузол ДКЧП визначається такими формулами [7]:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma_g(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f), \\ i_t &= \sigma_g(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i), \\ o_t &= \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o), \\ c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_h(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c), \\ h_t &= \sigma_h \circ \sigma_h(c_t), \end{aligned}$$

де f_t – вектор вентиля забуття, i_t – вектор вентиля входу, o_t – вектор вентиля виходу, c_t – вектор стану блоку, h_t – вектор виходу, x_t – вектор входу, σ_g – сигмоїдна функція, σ_c – гіперболічний тангенс, σ_h – функція, що повертає аргумент.

Постановка завдання. Основною метою є порівняння наявних програмних бібліотек для інтелектуальної обробки текстових даних, а саме – для вирішення задачі класифікації текстів методом рекурентних нейронних мереж. Для порівняння обрані TensorFlow, PyTorch і Keras. У цій роботі оцінка бібліотек відбувається за точністю класифікації, швидкістю навчання моделі в однакових середовищах та наявністю засобів, що полегшують побудову та апробацію цієї моделі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як набір даних використовується набір IMDb, що містить 50 000 рецензій на фільми і мітки класів «позитивний» та «негативний». Задача поля-

гає в тому, щоб засобами трьох різних бібліотек розробити модель, що буде здійснювати семантичний аналіз висловлення і здатна визначати, чи є рецензія позитивною чи негативною. В наборі даних рецензії поділені на навчальні та тестові, в кожній категорії по 25 000 рецензій. У рамках цієї статті навчання моделей відбувається виключно на навчальних даних. Точність рахується як відсоток тестових рецензій, мітку класу яких модель змогла вказати вірно.

Конфігурація комп'ютера, на якому були проведені дослідження:

- CPU: AMD Ryzen 3 2300U
- GPU: Radeo Vega Mobile Gfx
- RAM: 8 GB DDR4 2666 MHz
- ROM: SK Hynix – 256GB M.2 SSD HFS256GD9TNG-62A0A

Схема первинної обробки. Окрім розробки моделі, необхідно провести первинну обробку вхідних даних, а саме почистити одиниці даних від шумів (теги HTML, розділові знаки, лишні пробіли, всі літери приводяться в нижній регістр), здійснити токенизацію слів, привести всі рецензії до однієї довжини. При цьому первинна обробка здійснюється, перш за все, засобами бібліотек, або самописними алгоритмами, якщо необхідних засобів немає.

Очистка даних від шумів здійснюється за допомогою методу рядків replace, що дає змогу замінювати необхідні підрядки на строки нульової довжини, методу lower, що перетворює всі символи на символи нижнього регістру, а також за допомогою засобів бібліотеки re, що дає змогу працювати з регулярними виразами.

Токенизація здійснюється за допомогою заміни кожного слова в повідомленні на список цілих чисел, де кожне число – порядковий номер слова в файлі з натренованою моделлю векторного перетворення слів (GloVe чи Word2Vec).

Приведення всіх повідомлень до однієї довжини є важливою, хоч і, на перший погляд, простою задачею, адже від довжини повідомлення залежить розмір вхідного шару нейронної мережі. Проблема полягає в тому, що, з одного боку, необхідно зменшити кількість вхідних нейронів, адже збільшення цього числа значно ускладнює розрахунки вагів при навчанні моделі. З іншого боку, якщо відкидати частину слів із довгих повідомлень, може зникнути і важлива інформація, яка, можливо, і визначала суть повідомлення. Щоб досягти компромісу, розглянемо розподіл довжин повідомлень.

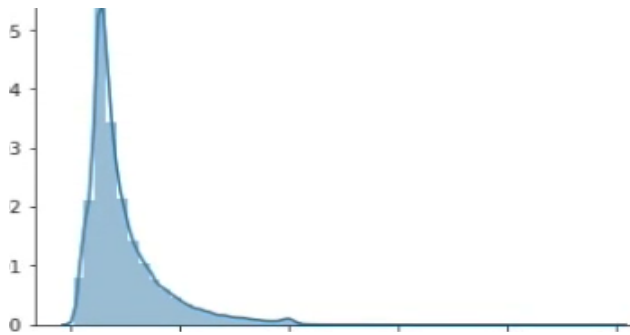


Рис. 2. Розподіл довжин повідомлень

Графік розподілення довжин повідомлень показує, що переважна кількість повідомлень є коротшою за 500 символів. Тому оберемо це число як оптимальне значення довжини одного пові-

домлення. Після фільтрації даних і приведення одиниць даних до однієї довжини можна за допомогою токенів замінити слова на вектори GloVe. Тепер дані готові до використання в навчанні моделі.

Слід зауважити, що бібліотека Keras має вбудовані засоби такої первісної обробки, для двох інших бібліотек необхідно розробляти необхідні програми власноруч.

Як модель машинного навчання було обрано рекурентну нейронну мережу з нейронами з довгою короткочасною пам'яттю. Кількість вхідних нейронів дорівнює розміру вхідних даних – 500, кількість вихідних дорівнює кількості класів – 2. Слід зауважити, що всі навчання моделей виконувались виключно на CPU.

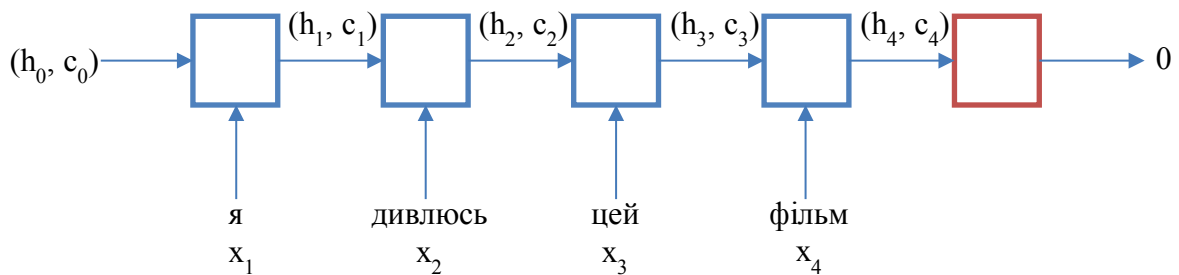


Рис. 3. Схема рекурентної нейронної мережі

TensorFlow. TensorFlow – це безплатна програмна бібліотека символьного програмування з відкритим сирцевим кодом для роботи з нейронними мережами і потоками даних. Моделі в цій бібліотеці представлені у вигляді графів потоків даних. Граф містить набір вузлів, що зветься операціями. Операції – це абстракції, що відображають певні обчислення, які можуть бути як простими, як-от додавання і віднімання, так і складними, як функції багатьох змінних. По цих графах потоків переходять від операції до операції тензори – багатовимірні матриці. Тому бібліотека і називається tensorflow – потік тензорів. На вхід моделі завжди подаються тензори, повертає модель також тензори.

Важливою особливістю цієї бібліотеки є поняття компіляції графу і сесії обчислень, так бібліотека реалізована на базі архітектури «визначи і запусти», що означає, що спочатку компілюється власне потік даних, а потім в ньому запускаються обчислення. Таке рішення значно збільшує швидкість обчислень. Але таке рішення має численні недоліки, а саме неможливість використання засобів потоку (циклів, умовних операторів), і значно ускладнює відлагодження прог-

рами (неможливість користування функцією print, вбудованим відлагоджувачем і логуванням).

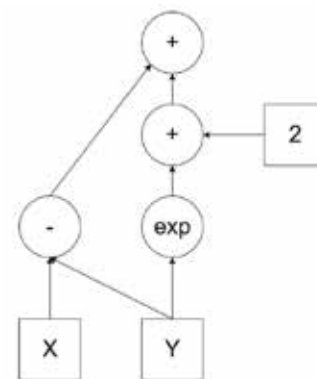


Рис. 4. Приклад елементарного графу потоку даних

Бібліотека TensorFlow є низькорівневою, жодних вбудованих інструментів для роботи з наборами даних у ній не передбачено, тому дані необхідно скачувати й обробляти вручну за допомогою бібліотеки requests та регулярних виразів.

Keras. Keras – це бібліотека для роботи з нейронними мережами з відкритим сирцевим кодом, написана мовою Python.

Ця бібліотека здатна працювати з бек-ендом у вигляді TensorFlow, Microsoft Cognitive Toolkit, Theano, чи PlaidML (ву дослідженні використовувався бек-енд TensorFlow). Ця бібліотека розроблена для того, щоб бути дружньою до користувача, модульною та легко розширюваною і дозволяти робити швидкі експерименти з нейронними мережами глибокого навчання. Keras представляє високорівневий, більш інтуїтивний набір абстракцій, який робить простим формування нейронних мереж незалежно від тилової бібліотеки наукових обчислень. Фактично, її можна цілком розглядати як синтаксичний цукор для низькорівневих бібліотек, який дає змогу замінити десятки рядків коду на TensorFlow кількома викликами класів, що дуже зручно, коли треба дуже швидко спробувати багато різних варіантів архітектури нейронних мереж.

Keras дає змогу використовувати різноманітні шари типових мереж (рекурентних, згорткових, рекурсивних, тощо) у вигляді класів, що імпортуються і додаються, як цеглини, в клас моделі, створюючи новий шар нейронної мережі. При цьому дуже легко можна задати розмір кожного шару, типи зв'язків, функцію активації.

Keras має вбудовану підтримку популярних наборів даних, у тому числі і набору IMDb, а також змогу провести токенизацію, векторне перетворення слів і приведення повідомлень до однієї довжини кількома командами. До його недоліків можна зарахувати те, що він не успадковує 100% функціоналу бібліотек, що стоять за ним. Мається на увазі, що іноді виникає необхідність вставити код, написаний на TensorFlow, всередину програми, написаної на Keras.

PyTorch. PyTorch – ще одна бібліотека для машинного навчання з відкритим сирцевим кодом. Її принципи засновані на бібліотеці Torch для мови програмування Lua. PyTorch є суттєво схожим на TensorFlow, але при цьому є дві ключові відмінності.

Перша відмінність – підтримка імперативного програмування, тобто відходження від обмежень символічного програмування. Це дає змогу робити програми більш гнучкими і зручними у розробці, адже можна використовувати всі можливості Python, такі як цикли, умовні оператори, засоби для відлагодження і контролю.

Друга ключова особливість частково впливає з першої і являє собою можливість використання динамічних графів потоків даних. Іншими словами, PyTorch використовує архітектуру «визначений запуском». Отже, граф починає формуватись у момент запуску. Це дає змогу зручно працювати з такими моделями, граф потоку даних яких може змінюватися. Наприклад, це можуть бути рекурентні нейронні мережі, рекурентний шар яких може збільшуватись чи зменшуватись, залежно від розмірності чинної одиниці даних.

Висновки. У результаті були отримані точності різних моделей, час їх навчання, а також факт наявності вбудованих засобів для роботи з наборами даних.

Таблиця 1

Порівняння бібліотек для машинного навчання

	Наявність засобів для роботи з наборами даних	Час навчання моделі, с	Отримана точність, %
TensorFlow	Ні	4719	79.2
Keras	Так	101	86.48
PyTorch	Так	418	86.02

Результати досліджень показують, що найбільшу точність показали моделі, реалізовані за допомогою Keras і PyTorch. При цьому модель на TensorFlow програє їм в точності і надзвичайно програє в часі навчання, що пов'язано з тим, що в усіх тестових запусках навчання, саме ця модель зіштовхувалась із проблемою перенавчання. Згідно з цим дослідженням, Keras показав найкращі результати, це може пояснюватись тим, що багато необхідних інструментів у цій бібліотеці створено спільнотою розробників, що гарантує високу якість реалізації моделей і меншу швидкість навчання.

У подальшому планується проводити дослідження з моделями, що містять різну кількість нейронів у рекурентному шарі, використати інші алгоритми для оптимізації моделі та векторного представлення слів. Також планується дослідити напрацювання за напрямом інтелектуального аналізу текстових даних великого об'єму.

Список літератури:

1. Samarth Agrawal. Sentiment Analysis using LSTM. Samarth Agrawal. 2019. URL: <https://towardsdatascience.com/sentiment-analysis-using-lstm-step-by-step-50d074f09948>. (Last accessed: 17.04.2019).

2. Jason Brownlee. Predict Sentiment From Movie Reviews Using Deep Learning. 2016. URL: <https://machinelearningmastery.com/predict-sentiment-movie-reviews-using-deep-learning/>. (Last accessed: 15.04.2019).
3. Christopher D. Manning. GloVe: Global Vectors for Word Representation. 2014. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/D14-1162>. (Last accessed: 15.04.2019).
4. Grus J. Data Science from Scratch . Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2015. – 336 p.
5. Mandic D., Chambers C. Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 308 p.
6. Duyu T., Bing Q., Ting L. Document Modeling with Gated Recurrent Neural Network for Sentiment Classification. 2015. URL: <https://www.aclweb.org/anthology/D15-1167>. (Last accessed: 15.04.2019).
7. Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber. Long Short-term Memory. 1997. URL: https://www.researchgate.net/publication/13853244_Long_Short-term_Memory/download. (Last accessed: 15.04.2019)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В работе рассмотрены библиотеки для решения задач машинного обучения. Выполнен сравнительный анализ данных библиотек. Для сравнения были выбраны задачи классификации текстовых данных. Обучение модели происходило методами обучения с учителем. Для обучения были использованы искусственные нейронные сети с нейронами, имеющими долгую кратковременную память. Оценка библиотек происходит по точности классификации, скорости обучения модели в одинаковых средах и наличию средств, облегчающих построение и апробацию данной модели.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, глубокое обучение, интеллектуальный анализ текстовых данных, классификация текстов, обучение с учителем.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE LIBRARIES FOR THE CLASSIFICATION OF TEXT DATA USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

In this paper libraries for solving machine learning problems are being considered. Comparative analysis of library data is being performed. For comparison, the task of text data classification was selected. The model was taught using supervised learning methods. For training, artificial neural networks with neurons with long short-term memory were used. The evaluation of libraries is based on the accuracy of the classification, the speed of learning the model in the same environment and the availability of tools that facilitate the construction and testing of machine learning model.

Key words: artificial neural networks, deep learning, texts mining, texts classification, supervised learning.

Відомості про авторів

Абрамчук І.В. – старший викладач кафедри вищої математики Вінницького національного технічного університету

Беглов К.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерні технології автоматизації Одеського національного політехнічного університету

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Боднар М.А. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету

Бугайов М.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова

Булгакова І.В. – старший викладач кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії (м. Бахмут)

Вдовичин Т.Я. – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри інформатики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Войтович О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету

Герасін О.С. – молодший науковий співробітник Науково-дослідної частини Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Говорущенко Т.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету

Григорчук Г.В. – асистент кафедри прикладної математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Григорчук Л.І. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Добаріна О.В. – студентка Одеського національного політехнічного університету

Дудатсьєв А.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету

Сторов А.Д. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу фізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України

Сторов В.А. – провідний інженер-дослідник відділу фізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України

Сторов С.А. – аспірант, молодший науковий співробітник відділу фізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України

Єременко О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та інженерії середовища Національного університету біоресурсів і природокористування України

Жидик В.Б. – старший викладач кафедри інформатики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Зленко С.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету

Зубок Т.О. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та інженерії середовища Національного університету біоресурсів і природокористування України

Іродов В.Ф. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Іценко А.І. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України

Кирик В.В. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кирилашук С.А. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Вінницького національного технічного університету

Кімстач О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Козлов О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кологойда А.В. – старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Чернігівського національного технологічного університету

Кондратенко Ю.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Костюкова О.М. – студент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Одеського національного політехнічного університету

Криворучко І.О. – аспірант Вінницького національного технічного університету

Кудін О.О. – старший викладач Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кужельний Я.В. – викладач Чернігівського національного технологічного університету

Лазурчак Л.В. – старший викладач кафедри інформатики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка

Лисюк Г.П. – старший викладач кафедри комп'ютерні технології автоматизації Одеського національного політехнічного університету

Ложечников В.Ф. – доцент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Одеського національного політехнічного університету

Лошак К.Р. – студент Одеського національного політехнічного університету

Макарова Л.М. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Мартинюк Є.А. – студентка Одеського національного політехнічного університету

Медзатий Д.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування Хмельницького національного університету

Миронюк В.В. – аспірант кафедри захисту інформації Вінницького національного технічного університету

Нікулін Д.С. – студент Одеського національного політехнічного університету

Олійник А.П. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Орлов О.І. – бакалавр Одеського національного політехнічного університету

Паламарчук М.І. – магістр Вінницького національного технічного університету

Повхан І.Ф. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Поліщук М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Полушкін Є.М. – студент Одеського національного політехнічного університету

Приходько Н.В. – кандидат економічних наук, доцент Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Романюк О.Н. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету

Романюк С.О. – здобувач кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету

Сичило А.А. – студент Одеського національного політехнічного університету

Сінельников І.Є. – молодший науковий співробітник відділу фізичної інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України

Скакодуб О.С. – провідний фахівець Науково-дослідної частини Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Скирда І.І. – аспірант Національного авіаційного університету

Тарасенко М.В. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Терещенко Д.О. – студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

Терлецький В.О. – бакалавр Одеського національного політехнічного університету

Тимчик С.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету

Уліцька О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Одеського національного політехнічного університету

Фуртат І.Е. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та промислової теплотехніки теплоенергетичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фуртат Ю.О. – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу моделювання енергетичних процесів і систем Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України

Цокота М.В. – аспірант кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чернетченко Д.В. – асистент кафедри експериментальної фізики та фізики металів Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара

Чорнофостова К.В. – студентка кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Одеського національного політехнічного університету

Шадура О.В. – здобувачка наукового ступеня кандидата наук Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шапгала Д.Є. – кандидат технічних наук, аспірант кафедри системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Шевченко О.І. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач науково-технічного відділу Головної астрономічної обсерваторії НАН України

Широкова А.М. – студент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Одеського національного політехнічного університету

Яременко В.С. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 30 (69) № 2 2019

Частина 2

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Ковальчук*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 20,27. Ум.-друк. арк. 25,81. Зам. № 0719/156

Підписано до друку 27.06.2019. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

73021, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105

Телефон +38 (0552) 39 95 80

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.