

Сайко В. Г.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Зінченко М. О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В. О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Солодовник В. І.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я. В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г. Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО МЕРЕЖЕВОГО КОМПЛЕКСУ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРІШЕННЯ ЦІЛЮВИХ ЗАВДАНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Інтеграція безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у систему управління бойовими діями відкриває нові можливості для вдосконалення військових тактик. Завдяки універсальності та ефективності, БПЛА можуть стати незамінним інструментом у сучасних бойових умовах, сприяючи покращенню координації між механізованими підрозділами та підвищенню загальної боєздатності військ. Застосування БПЛА значно розширює можливості збройних сил, забезпечуючи високий рівень контролю та доступу до інформації на полі бою. У роботі представлено результати розробки моделі мережі з використанням БПЛА, де елементи програмно-конфігурованих мереж (SZDN) повністю реалізовані на базі безпілотників. Це спрямовано на підвищення ефективності виконання завдань бронетанковими підрозділами. Запропоновано архітектуру мережі, яка включає інтеграцію технологій SDN, у якій окремі БПЛА виконують функції SDN-комутаторів, а контроль здійснюють прив'язані БПЛА, що належать до повітряного сегмента мережі й здатні взаємодіяти між собою. Визначено у межах цієї архітектури БПЛА наступний поділ на кластери: кожен кластер має головний вузол, через який здійснюється зв'язок з іншими кластерами. У інфраструктурі комплексу також передбачено наявність прив'язної висотної телекомунікаційної платформи, що складається з наземного і повітряного модулів, з'єднаних кабелем-тросом, який забезпечує як механічний зв'язок, так і передачу інформації між модулями [23]. Окрім того, наведено методіку моделювання мережі на основі БПЛА із підтримкою технологій SDN/NFV у середовищі Matlab, яка дозволяє оптимізувати управління мережевими ресурсами та необхідний обсяг обчислювальних потужностей для кожного віртуального пристрою, що виконує спеціалізовані завдання.

Ключові слова: БПЛА, технологія SDN/NFV, мобільні мережі, прив'язна висотна телекомунікаційна платформа.

Постановка проблеми. Інтеграція БПЛА до структури управління бойовими діями відкриває нові горизонти для військових тактик. Їх універсальність та ефективність роблять їх незамінними інструментами у сучасному бойовому контексті, дозволяючи покращити взаємодію між бронетанковими підрозділами та підвищувати загальну

боєздатність армійських формувань [1, 2]. Загалом БПЛА значно посилюють можливості сучасних збройних сил, забезпечуючи високий ступінь контролю та інформації на полі бою. Практика застосування безпілотної авіації у останніх військових конфліктах продемонструвала її рівнозначну ефективність. Сучасні БПЛА різної

розмірності та цільового призначення широко використовувалися у бойових операціях, серед яких особливе місце займають операції в Іраку та Афганістані, під час яких загальний наліт БПЛА становив 894 335 годин [3, 4]. У війні між Україною та російською федерацією наліт безпілотних авіаційних систем перевищив у рази більше. Аналіз військовими фахівцями показав, що широко-масштабне впровадження БПЛА, створюваних з урахуванням нових технологій, значно змінює способи ведення військових операцій [3]. З цієї точки зору представляє особливий інтерес аналіз існуючих рішень у галузі інтеграції ресурсів БПЛА та наземних мереж зв'язку, які побудовані на базі програмно-конфігурованих мереж SDN.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мережі безпілотних літальних апаратів на основі SDN останнім часом привертають дедалі більшу увагу дослідників у всьому світі [5]. Архітектура SDN може забезпечити гнучке керування мережами БПЛА [6]. Розгортання технології SDN у мережах БПЛА дозволяє останнім ефективно виконувати завдання у встановлений термін. Далі розглянемо різні архітектурні рішення на основі SDN, відомі з літератури мереж БПЛА.

Автори в [7] запропонували систему на основі SDN для управління зв'язком між БПЛА. Основна мета цієї системи – покращити використання мережевих ресурсів, зменшити затримку та збільшити пропускну спроможність мережі БПЛА. Контролер SDN відіграє роль централізованого керуючого пристрою, який забезпечує зберігання, обробку та необхідне керування в мережі. У [8] запропоновано алгоритм централізованої диференціальної маршрутизації трафіку (TDR) на основі двох різних контролерів: (i) контролера координації та (ii) контролера кластера SDN. TDR спрямований на забезпечення необхідного рівня якості обслуговування QoS та характеристик надійності для з'єднань, чутливих до затримок. Як правило, БПЛА організовані у вигляді кількох кластерів. У кожному кластері контролер SDN кластера управляє передачею даних, плануванням мережевих ресурсів та взаємодією з усіма БПЛА в кластері. На наступному рівні розташований прив'язний дирижабль, який контролює всі області, в яких усі БПЛА повинні знати своє становище та швидкість. Нове рішення для маршрутизації пакетів запропоновано в [9] на основі гібридної технології SDN, розгорнутої серед групи БПЛА та пристроїв IoT. Деякі БПЛА можуть належати мережі SDN та враховувати правила переадресації SDN відповідно до топо-

логії мережі. Ці БПЛА також мають можливість переходу з SDN на розподілений традиційний протокол маршрутизації. В роботі [10] запропоновано структуру багатошляхової маршрутизації на основі SDN для мереж БПЛА. Контролер SDN використовується поверх цієї структури, щоб уникнути перекриття маршрутів. БПЛА, у свою чергу, працюють як програмні комутатори і можуть виконувати команди передачі даних відповідно до директив контролера. В [11] запропоновано архітектуру мережі мобільних датчиків на основі SDN для надійної передачі даних у рогах БПЛА. Метою цієї архітектури є подолання обмежень мереж БПЛА, таких як обчислювальні проблеми та обмежений розподіл ресурсів каналу.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування структури розподіленої сетецентричної системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів і розробка моделі побудови мережевої інфраструктури з використанням БПЛА, в якій елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовані на БПЛА, для підвищення ефективності вирішення цільових завдань бронетанковими підрозділами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Загальні положення щодо аспектів впровадження мереж з використанням БПЛА

Програмно-конфігуровані мережі (SDN) є архітектурою з адаптивним і динамічним управлінням, де площина даних відокремлена від площини управління. Це дозволяє програмувати мережу та абстрагувати рівень додатків та сервісів від рівня мережевої інфраструктури [12, 13]. SDN розглядається як підхід до проектування мережі, що забезпечує управління ресурсами та обробку даних через програмне адміністрування та відкриті інтерфейси. Цей підхід дозволяє ізолювати управління від мережевого рівня, що сприяє ефективнішому розподілу ресурсів. Далі проаналізуємо використання SDN у мережах безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [15, 16]. Проблеми проектування мереж БПЛА

При розробці мереж БПЛА виникають такі основні проблеми:

- Високе навантаження на мережу. Підвищений попит на певні типи трафіку може призвести до навантаження мережі та збільшення енергоспоживання.
- Переривання зв'язку та фрагментація мережі. Висока мобільність БПЛА викликає часті розриви з'єднань.
- Обмежені ресурси [14]. Мережі БПЛА стикаються з нестачею обчислювальних потуж-

ностей та складнощами взаємодії з наземними сегментами, такими як базові станції або вузли сенсорних полів.

2. Аспекти побудови мережі БПЛА з підтримкою SDN/NFV технологій для рішення цільових задач спеціального призначення

2.1. Архітектура мереж БПЛА

Мережі БПЛА є бездротовими мережами і складаються з двох сегментів [4]:

- літаючого, організованого як одиночними БПЛА, так і їх групами;
- наземного.

На особливу увагу заслуговує те, що і наземний, і літаючий сегменти можуть бути реалізовані архітектурно як однорангові, так ієрархічні (або кластерні) мережі. При цьому як головний вузол кластерів наземного сегменту можуть виступати окремі БПЛА.

Для організації нормально функціонуючої мережі БПЛА потрібно визначити, як взаємодіятимуть БПЛА із наземним сегментом. Взаємодія кількох БПЛА вимагатиме також організації в літаючому сегменті мережі зв'язку між окремими безпілотними літаючими апаратами. Безпілотні літаючі апарати цієї мережі можуть взаємодіяти один з одним за допомогою наземних станцій керування. Існує безліч прикладів архітектури мереж БПЛА, але серед них найпоширеніші наступні три архітектури (у яких БПЛА взаємодіють одна з одною завдяки базовим станціям): централізовану, кластерну та стільникову.

1. Централізована архітектура. У цій архітектурі декілька БПЛА обмінюються інформацією з однією наземною базовою станцією, тобто при взаємодії БПЛА між собою всі пакети даних передаються через наземну базову станцію. Переваги відмовостійкості при збоях окремих БПЛА, паралельне виконання завдань, покращення обчислювальних та запам'ятовувальних характеристик. Недоліки: пропорційність пропускнуої спроможності мережі щільності БПЛА, високі затримки, а також уразливість базових наземних станцій.

2. Архітектура кластеризації. У даній архітектурі літаючий сегмент розбитий на кілька кластерів, в якій один з БПЛА вибирається як головний вузол і забезпечує взаємодію всіх БПЛА в межах одного кластера, а також взаємодію БПЛА кластера з наземною базовою станцією. Переваги архітектури – підтримка БПЛА з різними характеристиками зв'язку та польоту. Недоліки: можливість поділу БПЛА (неможливості БПЛА одного кластера взаємодіяти з БПЛА іншого кластера) при частковому або повному пошкодженні базової станції.

3. Стільникова архітектура. Ця архітектура поділяє наземний сегмент на кілька осередків, у кожній з яких використовується власна унікальна смуга частот, що дозволяє запобігти впливу завад від інших осередків. БПЛА можуть взаємодіяти як з використанням базових станцій, так і без їх допомоги. Проблеми: висока вартість наземних базових станцій та їх можливе пошкодження.

На рис. 1 зображено архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технології програмно-конфігуруваних мереж, в якій як комутатори SDN виступають окремі БПЛА, а як контролери SDN – прив'язані БПЛА, що відносяться до літаючого сегменту мережі та мають здатність взаємодіяти між собою. Також у цій архітектурі БПЛА розділені за кластерами, у кожному з яких один БПЛА виконує роль головного вузла, через який учасники даного кластеру здійснюють взаємодію з БПЛА з іншого кластера. Іншими словами, взаємодія БПЛА з різних кластерів здійснюється завдяки обміну інформацією між головними вузлами кластерів, які можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо, через базові станції, в якості яких виступають прив'язані БПЛА. Обмін даними між БПЛА в даній архітектурі в межах одного кластера може здійснюватися без участі головного вузла. Також на рівні додатків представленої на рис. 1 мережі мережеві функції можуть бути представлені у вигляді програмних модулів.

Застосування концепції віртуалізації мережевих функцій дозволить підвищити продуктивність обробки трафіку, що передається мережами БПЛА [17]. При реалізації мережевої архітектури із спільним використанням БПЛА та концепції NFV вирішуються наступні технічні питання:

1. Для абстрактного представлення мережевої структури можна віртуалізувати не лише основні функції, але й різні засоби апаратного забезпечення пристроїв мережі БПЛА.

2. Прозоре масштабування мережі та розподіл ресурсів завдяки застосуванню концепції NFV.

3. Зниження обсягів споживання електроенергії безпілотними літальними апаратами.

4. Завдяки віртуалізації основних функцій та апаратних ресурсів можна зменшити витрати, що виникають при розгортанні додаткових апаратних пристроїв, які використовуються при виконанні певних поставлених завдань.

3. Прив'язні висотні телекомунікаційні платформи на основі безпілотних літальних апаратів

Таким чином в роботі, авторами пропонується технічне рішення, щодо можливості застосування прив'язних висотних телекомунікаційних плат-

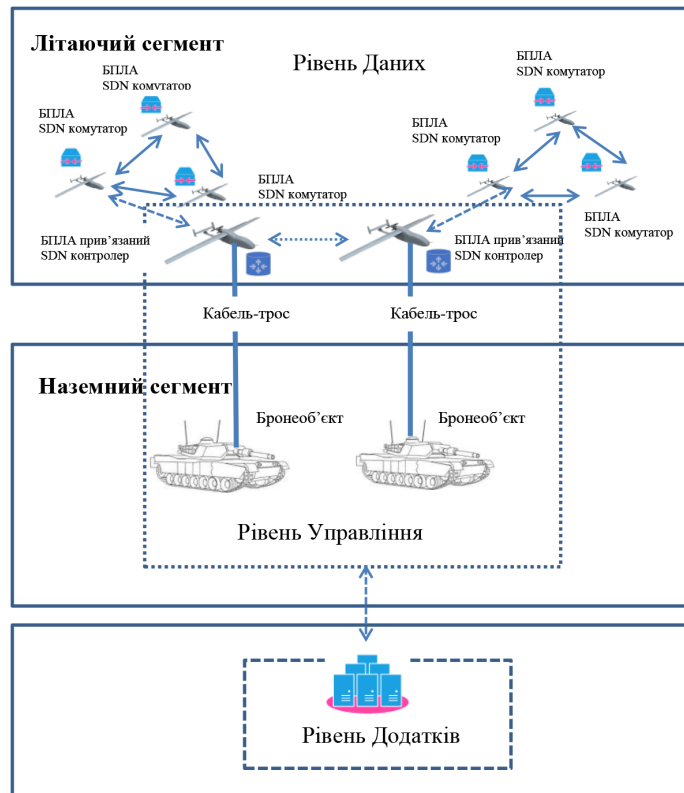


Рис. 1. Архітектура мережі БПЛА з контролером SDN на прив'язаному БПЛА літаючого сегменту

форм (ВТП) на основі безпілотних літальних апаратів (як прив'язних БПЛА), які також отримали назву «прив'язаних дронів» Flying COWs (Cell on Wings), для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення бронетанковими підрозділами.

З точки зору архітектури, прив'язна висотна телекомунікаційна платформа є системою, що складається з повітряного та наземного модулів, які пов'язані між собою гнучким з'єднанням у вигляді кабелю-троса (див. рис. 2).

Цей кабель забезпечує як механічне, так і інформаційне з'єднання між модулями. Повітряний модуль (ПМ) виконує функцію утримання спеціального обладнання в певній точці над поверхнею Землі. До його складу входять пристрій для створення підйомної сили, платформа для монтажу обладнання, бортове джерело енергії, а також система управління положенням і орієнтацією.

Наземний модуль (НМ), розташований у кабіні бронеоб'єкта, забезпечує подачу енергії на ПМ через кабель-трос, намотаний на барабан лебідки. Ця лебідка використовується для підйому та спуску ПМ, а також для управління його роботою оператором. До складу НМ входять наземний пункт управління, перетворювач напруги, лебідка для кабелю та причальний пристрій. Кабель-трос виконує функції гнучкого механічного з'єднання

між модулями, подачі енергії на ПМ та створення високошвидкісного каналу передачі даних.

Додатковою перевагою кабельного живлення є можливість одночасного використання кабелю для управління безпілотним літальним апаратом та передачі відео без втрат і спотворень. Прив'язні ВТП вирізняються мобільністю, малою вагою через відсутність бортових акумуляторів, швид-

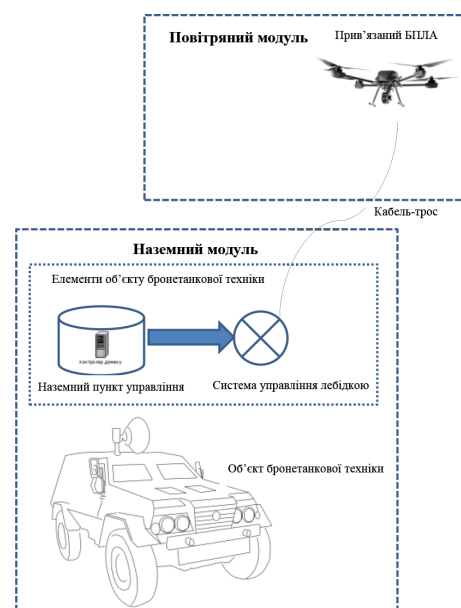


Рис. 2. Архітектура прив'язаного БПЛА

ким розгортанням на місцевості та здатністю працювати в режимі зависання.

Сучасні ВТП будуються на базі телекомунікаційного обладнання, що підтримує стандарти 5G/LTE, WiMAX та Wi-Fi. Технологія LTE забезпечує швидкість передачі даних до 1000 Мбіт/с у низхідному каналі та до 500 Мбіт/с у висхідному. WiMAX дозволяє створювати універсальні бездротові з'єднання на великих відстанях, навіть для об'єктів, що рухаються зі швидкістю до 120 км/год. Технологія Wi-Fi, заснована на стандарті IEEE 802.11.x, теоретично забезпечує швидкість передачі даних до 600 Мбіт/с.

При цьому для управління та обміну даними з БПЛА організуються такі напрями зв'язку:

- напрям «вгору» – організується від НМ до БПЛА і включає: командну лінію управління (КЛУ) для передачі команд управління спеціальною апаратурою та технічними засобами корисного навантаження, розміщеними на БПЛА;
- напрям «вниз» – організується від БПЛА до НМ і включає: КЛУ для передачі телеметричної інформації про стан підсистем БПЛА, спеціальної апаратури та технічних засобів корисного навантаження, а також квитанції про виконання команд управління;
- високошвидкісна лінія передачі даних від спеціальної апаратури та технічних засобів корисного навантаження, розміщених на БПЛА.

У безпілотних літальних апаратів прив'язаного типу з використанням оптоволоконного кабелю передаються по ньому наступні дані:

1. Команди управління – сигнали від оператора для управління рухом, стабілізацією та функціональністю дрону.
2. Дані телеметрії – інформація про стан БПЛА, включаючи його положення, висоту, швидкість, заряд акумулятора та інші параметри.
3. Відеосигнал – потокове відео високої чіткості з камер дрона.
4. Дані з датчиків – показання від тепловізорів, радарів, лазерних далекомірів, систем спостереження чи інших встановлених модулів.
5. Зворотний зв'язок – підтвердження виконання команд та дані про стан системи.

Оптоволоконний кабель забезпечує:

- дуже високу пропускну здатність – до десятків гігабіт за секунду в залежності від типу використовуваного волокна та обладнання.
- мінімальні затримки – швидкість передачі близька до швидкості світла, що робить такі системи практично миттєвими для керування.

- стійкість до завад – сигнали в оптоволоконному кабелі не піддаються впливу електромагнітних полів.

- дальність передачі – довжина кабелю обмежує дистанцію роботи, зазвичай це від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. Цей тип зв'язку потрібний там, де потрібна висока безпека передачі даних, наприклад, для розвідувальних або військових операцій.

4. Методика моделювання літаючої мережі

4.1. Загальні зауваження

Однією з можливих переваг мереж БПЛА є надання можливості організації зв'язку в реальному часі без необхідності надання будь-якої інфраструктури. Основні ж проблеми мереж БПЛА пов'язані з:

- Значними втратами пакетів даних, високими затримками чи можливістю порушення процесу передачі інформації, викликаними високою мобільністю БПЛА.
- Обмеженістю енергетичних ресурсів БПЛА, що також може спричинити можливі збої та порушення роботи мережі.

Тому забезпечення зв'язності (особливо між окремими БПЛА), а також зниження споживання енергії є важливими завданнями в мережах БПЛА [14]. Для організації нормально функціонуючої мережі БПЛА потрібно визначити, як взаємодіятимуть БПЛА із наземним сегментом, в якості якого виступають об'єкти бронетанкової техніки. Взаємодія кількох БПЛА вимагатиме також організації в літаючому сегменті мережі зв'язку між окремими безпілотними літаючими апаратами [18, 19]. Безпілотні літаючі апарати цієї мережі можуть взаємодіяти один з одним за допомогою наземних станцій керування, які знаходяться на об'єктах бронетанкової техніки.

Для досягнення цієї мети пропонується впровадження віртуалізації мережевих пристроїв у літаючих мережах із підтримкою технологій SDN і NFV. SDN (Software-Defined Networking) являє собою мережу зв'язку, де управління літаючою мережею відокремлено від апаратного забезпечення та реалізується програмно. NFV (Network Functions Virtualization) – це концепція, яка передбачає відокремлення мережевих функцій від фізичного обладнання. Використання цих технологій дозволяє створювати та керувати мережами не лише на основі спеціалізованого мережевого обладнання, але й із використанням обчислювальних пристроїв архітектури x86. Це, у свою чергу, спрощує та здешевлює обслуговування літаючих мереж зв'язку, підвищує їхню енергоефективність, оптимізує

роботу та знижує обсяг службового трафіку [20]. Актуальність таких підходів і технологій підтверджується значною кількістю наукових досліджень.

Однак автори розглядають ці питання стосовно проблем створення наземних мобільних мереж 5G/6G. У зв'язку з особливостями використання даних технологій для запропонованого рішення побудови літаючих мереж з підтримкою SDN та NFV для об'єктів бронетанкової техніки необхідно врахувати наступне:

1. Сучасні БПЛА, що застосовуються як окремо, так і у складі групи, можуть нести на борту одночасно кілька цільових навантажень, побудованих на різних фізичних принципах: багатофункціональна оптико-електронна система, цифрова аерофотосистема, бортова станція радіолокації, система радіо- і радіотехнічної розвідки, система зв'язку для передачі даних з цільових навантажень (датчиків) на мобільний пристрій (наприклад, планшет) віддаленому особовому складу бронетанкового підрозділу і т. д. При цьому практично в науковій літературі не освітленим залишається питання визначення оцінки ефективності рішення як окремих цільових завдань БПЛА, так і знаходження інтегральної оцінки ефективності застосування авіаційних комплексів з БПЛА при вирішенні набору цільових завдань (послідовно або послідовно-паралельно в часі) з урахуванням їхньої пріоритетності та ряду інших факторів.

2. На сучасному етапі розвитку військової безпілотної авіації дуже активно проводяться науково-дослідні роботи зі створення нових ударних безпілотних літальних апаратів, здатних вирішувати завдання у складі групи. У зв'язку з цим актуальним є вирішення завдання щодо обґрунтування структури розподіленої системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів та розробки алгоритмів її функціонування, що дозволяють підвищити ефективність групового застосування ударних безпілотних літальних апаратів шляхом координації їх сумісних дій в автономному режимі на користь підрозділів бронетанкової техніки.

3. З огляду на зазначене вище, розробка побудови мереж БПЛА з підтримкою технологій SDN та NFV та їх моделювання є актуальними, як з наукової, так і з практичної точки зору.

Технології SDN та NFV надають можливість створювати більш оптимальні й енергоефективні мережі зв'язку завдяки раціональному розподілу обчислювальних ресурсів між віртуальними вузлами. Для досягнення цього кожному віртуальному пристрою виділяється стільки ресурсів, скільки потрібно для обробки запитів без переванта-

ження, але без надлишку, щоб уникнути простоїв. Таким чином, управління мережевими ресурсами зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі з визначення необхідного обсягу обчислювальних ресурсів для кожного віртуального пристрою.

У [21, 22] для управління такими мережами як вхідні дані використовуються як актуальні, так і прогнозовані дані. Проте, цей підхід має свої обмеження, адже дані, отримані в реальному часі, можуть швидко застарівати, що не дозволяє точно враховувати поточні потреби мережі.

Тому виникає необхідність розробки моделі інтелектуального управління мережевими ресурсами у літаючих мережах із підтримкою SDN і NFV. Така модель, на відміну від існуючих, повинна забезпечувати динамічний розподіл ресурсів залежно від поточних потреб мережі, враховуючи можливі незначні розбіжності між отриманими даними та реальними потребами. Крім того, вона повинна бути стійкою до дестабілізуючих факторів як зовнішнього, так і внутрішнього характеру. Додатково варто дослідити ефективність запропонованої моделі шляхом її тестування на змодельованій мережі зв'язку.

4.2. Аспекти методики моделювання

Результати досліджень, представлені у цьому підрозділі, можна резюмувати так:

1. Створено імітаційну модель літаючої мережі з підтримкою SDN та NFV для об'єктів бронетанкової техніки для отримання навчального набору даних та змодельовано мережеву систему за допомогою MATLAB.

При виконанні першого пункту процесу моделювання було побудовано модель системи, використовуючи блоки бібліотеки Simulink, встановлено необхідні параметри системи та вхідних впливів, організовано потік заявок у системі за допомогою пакету Matlab. Імітаційна модель показана на рис. 3.

При часі моделювання 50 маємо: 38 згенерованих заявок, 1 у сервері на обробці, 1 у черзі в другому каналі (рис. 4 та рис. 5).

2. Після збору, аналізу та обробки набору даних цей набір був використаний як вхідні дані для моделі керування мережевими ресурсами на основі адаптивної системи нейро-нечіткого виводу ANFIS. Після завантаження набору даних, отриманих на першому етапі, як вхідні дані для мережі набір даних ділиться на два підмножини в стовпцях Вхід (I) і Вихід (O), а потім відповідно ділиться на підмножини навчання, тестування та перевірки. Нормалізація вхідних даних здійснюється в інтервалі $[-1, 1]$, сумісному з фактичними максимальними або мінімальними значеннями (рис. 6 та 7).

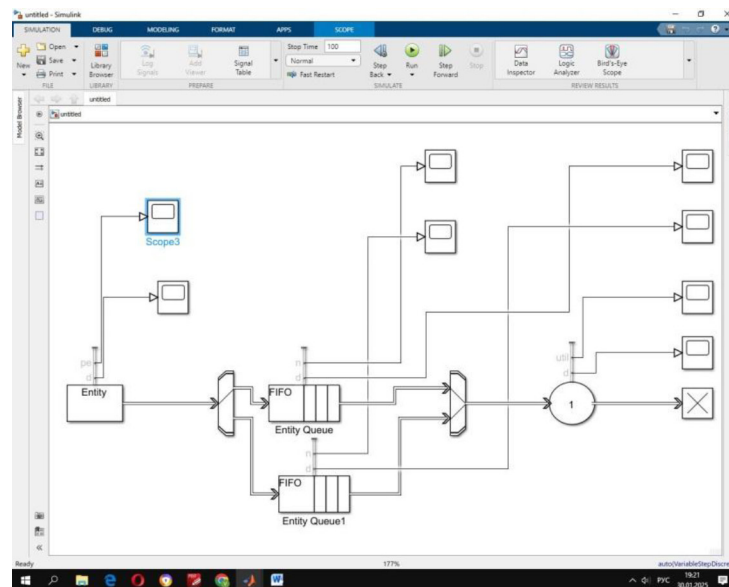


Рис. 3. Вид імітаційної моделі пункту 1

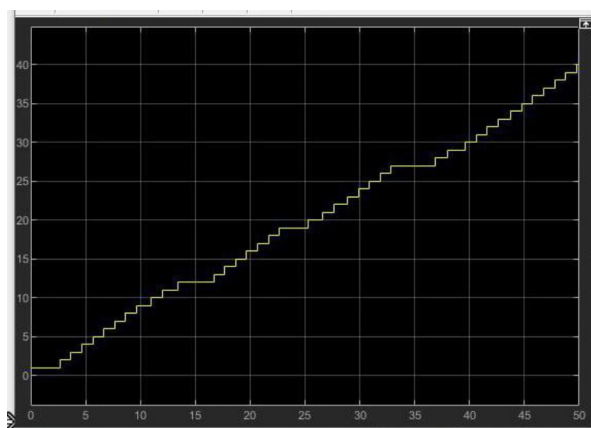


Рис. 4. Кількість згенерованих заявок

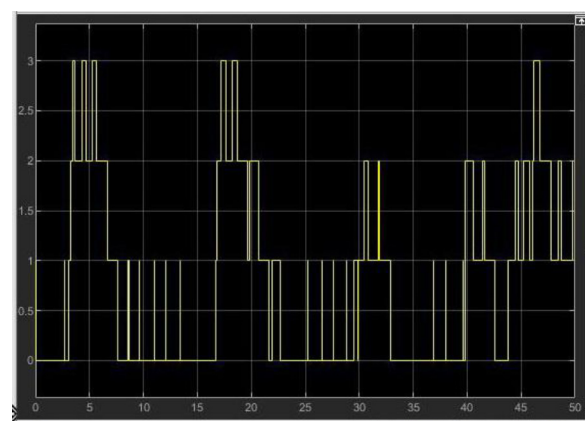


Рис. 5. Графік заявок у першій черзі

Таким чином, для вирішення поставленого завдання в роботі пропонується використання нейромережових методів, методів нечіткої логіки та імітаційного моделювання. Основу концептуальної моделі управління мережевими ресурсами складатиме адаптивна система нейро-нечіткого виводу (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) (Jang, 1993). Ця система поєднує принципи нейронних мереж та нечіткої логіки, що дозволяє об'єднати переваги обох підходів. Завдяки використанню принципів нейронних мереж система здатна навчатися на основі отриманих даних та адаптуватися до змін потреб мережі. У свою чергу, застосування нечіткої логіки дозволяє розглядати вхідні дані як нечіткі величини, що, ймовірно, знижує чутливість моделі до незначних розбіжностей між фактичними даними та вимогами мережі. На вхід моделі подаватимуться дані про кількість запитів від кінцевих пристроїв, а на виході визначатиметься необхідний обсяг

обчислювальних ресурсів для віртуального маршрутизатора. Для перевірки ефективності моделі буде проводитися моделювання мережі зв'язку та тестування моделі в середовищі MATLAB.

3. За результатами моделювання в усіх випадках віртуальні маршрутизатори зможуть обробити запити без перевантажень та затримок, а також мають деяку кількість додаткової обчислювальної можливості.

Висновки.

1. В роботі наведено архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технології програмно-конфігурованих мереж, в якій як комутатори SDN виступають окремі БПЛА, а як контролери SDN – прив'язані БПЛА, що відносяться до літаючого сегменту мережі та мають здатність взаємодіяти між собою.

2. Наведено архітектуру елементу даної системи – прив'язаної висотної телекомунікаційної платформи, що складається з повітряного та наземного модулів, які пов'язані між собою

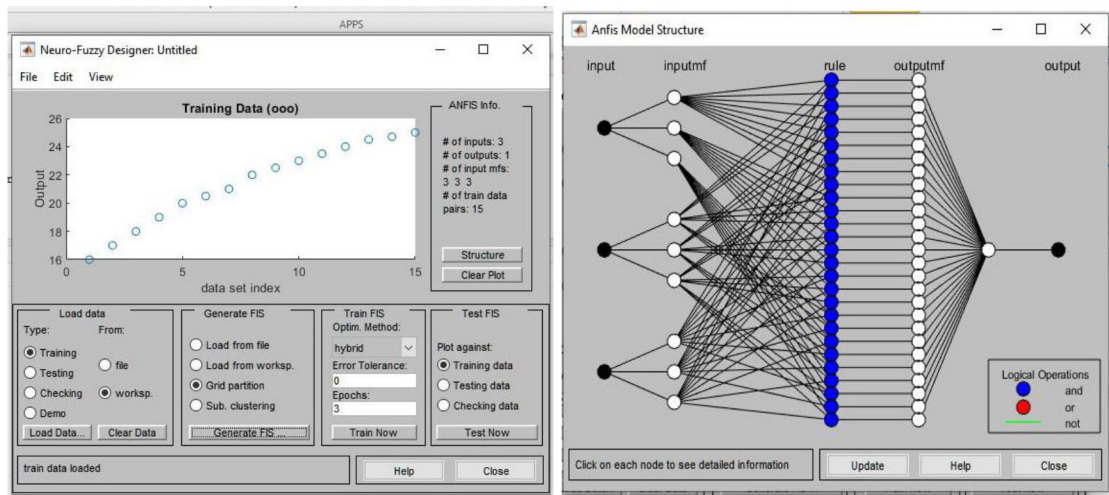


Рис. 6 (зліва). Графічний інтерфейс редактора ANFIS після загрузки навчальних даних та Рис. 7 (праворуч). Структура згенерованої нейро-нечіткої мережі

гнучким з'єднанням у вигляді кабелю-троса. Цей кабель забезпечує як механічне, так і інформаційне з'єднання між модулями об'єктів бронетанкової техніки.

3. Наведено методику моделювання літаючої мережі з підтримкою SDN/NFV технологій

в програмному середовищі Matlab для управління мережевими ресурсами з визначення необхідного обсягу обчислювальних ресурсів для кожного віртуального пристрою з метою рішення цільових задач спеціального призначення.

Список літератури:

1. Зінченко М. О., Сайко В. Г., Комаров В. О. Щодо питання вирішення проблем спостереження екіпажем танка за полем бою в умовах бойових дій. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку: Матеріали LIII-ої міжнародної науково-практичної конференції*. м. Кордова (Іспанія): 7 лютого 2025 року. С. 219–224.
2. Зінченко М. О., Сайко В. Г., Комаров В. О. Пропозиції щодо побудови перспективної мережевої інфраструктури об'єктів бронетанкової техніки в умовах бойових дій. *Грааль науки: міжн. Науковий журнал*. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа» НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці». 2025. № 49. 1298/572–589 с.
3. Безпілотна авіація у військовій справі: колективна монографія / Мосов С. П., Погорецький М. В., Салій С. М. та інш. Київ : Інтерсервіс, 2019. 324 с.
4. Бернацький А. П. Основи робототехніки військового призначення. Київ : Видавництво Ліра-К, 2024. 500 с.
5. T. Dapper, C. F. E. de Melo, P. Cumino, D. Rosário, E. Cerqueira, and E. P. de Freitas. STFANET: SDN-based Topology Management for Flying Ad Hoc Network. *IEEE Access*. 2019.
6. F. Al-Turjman, M. Abujubbeh, A. Malekloo, and L. Mostarda. UAVs assessment in software-defined IoT networks: An overview. *Computer Communications*. 2019.
7. A. Ramaprasath, A. Srinivasan, C.-H. Lung, and M. St-Hilaire. Intelligent wireless ad hoc routing protocol and controller for UAV networks. *Ad Hoc Networks*. Springer. 2017. pp. 92–104.
8. W. Qi, Q. Song, X. Kong, and L. Guo. A traffic-differentiated routing algorithm in Flying Ad Hoc Sensor Networks with SDN cluster controllers. *Journal of the Franklin Institute*. 2017.
9. A. T. Albu-Salih, S. A. H. Seno, and S. J. Mohammed. Dynamic Routing Method over Hybrid SDN for Flying Ad Hoc Networks. *Baghdad Science Journal*. 2018. vol. 15, no. 3, pp. 361–368.
10. G. Secinti, P. B. Darian, B. Canberk, and K. R. Chowdhury. Resilient end-to-end connectivity for software defined unmanned aerial vehicular networks. *Proceedings of the IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2017. pp. 1–5.
11. Z. Yuan, X. Huang, L. Sun, and J. Jin. Software defined mobile sensor network for micro UAV swarm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. IEEE, 2016. pp. 1–4.
12. Saiko, V., Fomin, M., Nakonechnyi, V., Toliupa, S., Brailovskyi, M. A Method for Determining the Location of a Low-Flying Air Object under Conditions of Multipath Propagation of Radio Waves. *Conference Proceedings* –

2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2024. 2024. Pp. 302–307.

13. Volodymyr Saiko; Roman Odarchenko; Bogdan Zhurakovskiy; Maryna Yevdokymenko; Vladyslav Fesenko; Olena Tkachova. A Model for Building a Wireless Terahertz Network for 5G NR. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS*. 2023. Pp. 1071–1076.

14. Патент України на корисну модель № 150433. Спосіб бездротової підзарядки джерела бортового живлення безпілотного літального апарату. Сайко В.Г., Домрачев В.М., Наритник Т.М., Гнатієнко Г.М., Тменова Н.П. / Заявник і патентовласник КНУ імені Тараса Шевченка; дата публікації 16.02.2022 р. Бюл. № 7 з пріоритетом від 17.02.2022 р.

15. Yan, Z.; Zhang, P. and Vasilakos, A.V. A security and trust framework for virtualized networks and software-defined networking. *Security and communication networks*. 2016. Vol. 9. No. 16. pp. 3059–3069.

16. Ojo, M.; Adami, D. and Giordano, S. A SDN-IoT architecture with NFV implementation. *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE. 2016. pp. 1–6.

17. Патент України на корисну модель № 157427. Спосіб визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль. Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Коломійцев О.В., Склярів О.В., Наритник Т.М., Фомін М.М., Нестеренко І.К., Гримуд А.Г. дата публікації 16.10.2024. Бюл. № 42.

18. Безпілотні летальні апарати: Методика наближених розрахунків основних параметрів та характеристик. За загальною ред. В.І. Силкова. К. : ЦНДІ ЗС України, 2009. 302 с.

19. Патент України на корисну модель № 157902. Ударний дистанційно керований безпілотний літальний апарат. Заявник і патентовласник Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Коломійцев О.В., Зінченко М.О., Яковчук О.В. дата публікації 11.12.2024. Бюл. № 50.

20. Палагін, В., Євтушенко, І., Гожий, О. Віртуалізація як середовище реалізації мережевих функцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. 31–38.

21. Скулиш, М., Суліма, С. Керування ресурсами для віртуалізованих мережевих функцій. *Наукові технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах*: Колективна монографія. 2019. С. 97–126.

22. Суліма, С., Скулиш, М. Гібридна система управління ресурсами для віртуалізованих мережевих функцій. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 1.

23. Міноборони показало українські FPV-дрони на оптоволокну. Електронний ресурс. URL: <https://www.unian.ua/weapons/optovolokno-minoboroni-pokazalo-novi-fpv-droni-12871632.html>. (дата звернення 01.02.2025).

Saiko V.G., Zinchenko M.O., Komarov V.O., Solodovnyk V.I., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya.
MODEL OF AN INTEGRATED NETWORK COMMUNICATION COMPLEX USING UAVS
TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SOLVING SPECIAL PURPOSE TARGETED TASKS

The integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into the combat control system opens up new opportunities for improving military tactics. Due to their versatility and efficiency, UAVs can become an indispensable tool in modern combat conditions, helping to improve coordination between mechanized units and increase the overall combat capability of troops. The use of UAVs significantly expands the capabilities of the armed forces, providing a high level of control and access to information on the battlefield. The paper presents the results of developing a network model using UAVs, where elements of software-defined networks (SDN) are fully implemented on the basis of UAVs. This is aimed at increasing the efficiency of task performance by armored units. A network architecture is proposed that includes the integration of SDN technologies, in which individual UAVs perform the functions of SDN switches, and control is carried out by tethered UAVs that belong to the air segment of the network and are able to interact with each other. The following division into clusters is defined within this UAV architecture: each cluster has a main node through which communication with other clusters is carried out. The infrastructure of the complex also provides for the presence of a tethered high-altitude telecommunications platform consisting of ground and air modules connected by a cable-rope, which provides both mechanical communication and information transfer between modules [23]. In addition, a methodology for modeling a network based on UAVs with support for SDN/NFV technologies in the Matlab environment is presented, which allows optimizing network resource management and the required amount of computing power for each virtual device performing specialized tasks.

Key words: UAV, SDN/NFV technology, mobile networks, tethered high-altitude telecommunications platform.