

Далека В.Х.Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова**Фуртат С.О.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОГО ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА КОРЕКЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Стаття присвячена викладу методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктами сенсорів спрямованої дії мобільних роботів і транспортних засобів.

Актуальним є завдання розробки саме інженерної методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та технічних засобів електротранспорту. Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених цілей: поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу. Обмеження стаціонарності математичної моделі об'єкту управління можливо замінити на квазістаціонарну, якщо в загальний алгоритм обробки інформації і управління додати алгоритм оперативної ідентифікації параметрів об'єкту управління.

Постановка проблеми: зменшення часу перехідного процесу в каналі управління кутом повороту ротора електроприводу, синтезувати квазіінваріантну цифрову систему автоматичного управління (ЦСАУ) по відношенню до зовнішньої обурюючої дії.

Методика рекомендує виділити два режими роботи електроприводу : орієнтації(переорієнтації) осі чутливості сенсора і її стабілізації. Структура закону управління для обох режимів залишається незмінною. Алгоритм регулювання складається з алгоритмів цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання, алгоритму корекції динамічних властивостей електроприводу і алгоритму відновлення(оцінювання) вектору стану (спостерігач Люенбергера або фільтр Кальмана). Інформація в спостерігач або фільтр поступає від цифрового амперметра.

Використання методики дозволить: поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити вантажногабаритні показники електроприводу.

Ключові слова цифрове автоматичне управління електроприводом, електротранспорт, сенсори спрямованої дії, моделювання в просторі станів, мобільні роботи, корекція динамічних характеристик електроприводів.

Постановка проблеми. Нині, цифрове управління електроприводами мехатронних пристроїв, які реально використовуються на практиці, здійснюється, у кращому разі, цифровими ПД-регуляторами [10-11]. Ці ПД – регулятори параметрично налаштовуються на детерміновані математичні моделі, які придатні тільки для налаштування в режимі орієнтації (переорієнтації). Потім, у кращому разі, виконується параметричне доналаштування (доведення) під час випробувань або регламентних робіт в процесі нормальної експлуатації. Алгоритмічна корекція динамічних

характеристик електроприводу не виконується. Швидкість обертання ротора електроприводу і (чи) кута його повороту вимірюються спеціальними механічними сенсорами (датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і при цьому, збільшують масу і енергоспоживання електроприводу [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що розширення і впровадження інформаційних технологій признано пріоритетним напрямком економічного розвитку нашої держави. Розвиток мобільної робототехніки та без-

пілотних систем транспорту відбувається стрімкими темпами. Успішне рішення задачі локалізації мобільної основи робота і його робочого органу є необхідною умовою не лише ефективного застосування мобільного робота, а і в цілому визначає можливість його застосування [1-4]. Перспективні моделі мобільних роботів усіх сфер застосування в переважній більшості призначені для автономного режиму застосування, тобто з використанням власних ресурсів під час роботи. Таким чином, швидкість, точність і енергетична ощадливість, дальність дії сенсорів навігаційної системи і робочого органу дозволяють збільшити час ефективного активного функціонування мобільного робота по його призначенню. Особливі вимоги до сенсорів мобільних роботів виникають у разі групового застосування роботів при виконанні деякого загального завдання в умовах наявності мобільних перешкод, що непередбачувано переміщуються [3-6].

Методи рішення такого роду завдань припускають наявність досить точної інформації про вектор стану, абсолютною і відносною швидкостях руху роботів і перешкод. Можливий шлях рішення задачі по забезпеченню навігаційних систем мобільних роботів первинною навігаційною інформацією – це застосування великої кількості різномірних сенсорів всенаправленої дії. Проте, використання надмірної кількості всенаправлених сенсорів в умовах автономного функціонування погіршує техніко-економічні показники функціонування робота.

Аналогічні питання потребують подальшого вирішення і на транспорті, зокрема, на автомобільному та електротранспорті [6-10]. Застосування сенсорів спрямованої дії дозволяє вирішувати задачу отримання високоточної первинної інформації швидко і ефективно тільки за умови наявності спеціальної системи електроприводів орієнтації(переорієнтації) і стабілізації стеження за об'єктом [12].

Постановка завдання. Нині, цифрове управління електроприводами мехатронних пристроїв, які реально використовуються на практиці, здійснюється, у кращому разі, цифровими ПД-регуляторами [10-11]. Ці ПД – регулятори параметрично налаштовуються на детерміновані математичні моделі, які придатні тільки для налаштування в режимі орієнтації (переорієнтації). Потім, у кращому разі, виконується параметричне доналаштування (доведення) під час випробувань або регламентних робіт в процесі нормальної експлуатації. Алгоритмічна корекція динамічних

характеристик електроприводу не виконується. Швидкість обертання ротора електроприводу і(чи) кута його повороту вимірюються спеціальними механічними сенсорами(датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і при цьому, збільшують масу і енергоспоживання електроприводу [12].

Синтез цифрових регуляторів, які дозволяють зробити прецизійними електроприводи для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктом сенсорів спрямованої дії мобільних роботів дозволять поліпшити технічні характеристики функціонування як окремих мобільних роботів, так і їх груп. Особливого значення цей факт набуває для групового застосування мобільних роботів у військових цілях. Методика синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів розвиває інженерний методичний апарат синтезу цифрових регуляторів. Аналізуємо інженерні методики цифрового управління електроприводами орієнтації і стабілізації осі чутливості сенсорів спрямованої дії, які використовуються в мобільних роботах та на транспортних засобах [10].

Об'єктом дослідження є процес цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації сенсора спрямованої дії.

Предметом дослідження є алгоритми цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації сенсора спрямованої дії.

Хід роботи:

1. Пошук структури закону керування, яка є спільною для розв'язання завдань орієнтації та стабілізації стеження за об'єктом.

2. Вибір об'єкту керування(типу електроприводу) та побудова його математичної моделі.

3. Вибір структури закону керування.

4. Детермінована параметрична оптимізація закону керування орієнтацією.

5. Алгоритмічна корекція динамічних властивостей (характеристик) електроприводу (обчислення раціональних значень параметрів регулятора внутрішнього корегуючого контуру) при умові, що всі компоненти вектору стану електроприводу вимірюються абсолютно точно.

6. Параметрична оптимізація регулятора зовнішнього контуру при умові, що всі компоненти вектору стану електроприводу вимірюються абсолютно точно.

7. Синтез спостерігача Люенбергера та його підключення до зовнішнього та внутрішнього контурів ЦСАК електроприводом.

8. Обчислювальний експеримент стосовно оцінки якості функціонування ЦСАК із спостерігачем Льюенбергера.

Виклад основного матеріал. полягає в тому, щоб завдяки алгоритмічній модернізації (удосконаленню алгоритму управління) цифрового електроприводу задовольнити дві суперечливі вимоги (критерії): швидка переорієнтація сенсора спрямованої дії і точність його стабілізації в заданому положенні [1,4].

У методиці, що викладається, наукове завдання декомпонується на дві підзадачі: перша підзадача полягає в модернізації алгоритму переорієнтації; друга підзадача полягає в модернізації алгоритму стабілізації. Рішення першої підзадачі пропонується виконувати в детермінованій постановці, а рішення другої підзадачі – в стохастичній. При цьому міняються тільки параметри алгоритмів управління, а їх структура залишається незмінною в результаті рішення обох підзадач. Таким чином, методика дозволяє синтезувати адаптивний до конкретного режиму роботи алгоритм цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації і стабілізації сенсора спрямованої дії.

Об'єктом керування є конкретний тип електроприводу, який за своїми технічними характеристиками найкращим чином узгоджується із загальною конструкцією системи орієнтації та стабілізації. Припустимо, що це двигун постійного струму (ДПС). Математичну модель ДПС уявно у багатовимірному просторі станів із двома входами та двома виходами. Один із входів – це вхід за яким подається керуюча напруга на якорі ДПС, а інший – це збурення. Виходом вважаємо струм в якорі ДПС $i(t)$, а іншим – кутову швидкість обертання його ротора $w(t)$. Між входом та виходом існує лінійний стаціонарний зв'язок. Таким чином, математичну модель об'єкта керування можна класифікувати як багатовимірну лінійну стаціонарну модель (МІМО LTI – модель) [3-4].

Алгоритм цифрового регулятора цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) кутовою швидкістю ротора (якорі) ДПС складається із трьох алгоритмів: двох алгоритмів регуляторів та алгоритму спостерігача стану. Регулятори являють собою послідовну та паралельну одиниці що корегують динамічні властивості ДПС. У якості послідовної корегуючої одиниці обираємо цифровий пропорційно – інтегрально – диференціальний регулятор (ЦПІД-регулятор), який надає ЦСАК властивість квазіадаптивності. У якості паралельної корегуючої одиниці вико-

ристовується лінійний зворотній зв'язок за вектором стану ДПС із матричним коефіцієнтом підсилення. Для обчислення цього матричного коефіцієнту підсилення використаємо в подальшому три методи регулювання стану: метод регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням; метод модального регулювання стану; метод лінійного квадратичного регулювання стану. Для корекції динамічних властивостей об'єктів керування із МІМО LTI математичними моделями функціонування ці методи в інженерній практиці застосовуються найчастіше [5].

У методиці передбачено виконання імітаційного моделювання, за результатами якого пропонується обрати найкращий із обчислених за вказаними методами матричний коефіцієнт зворотного зв'язку. Коефіцієнт обирається в залежності від режиму (орієнтація або стабілізація стеження за об'єктом) за заданими для відповідних режимів роботи критеріями.

Критерії налаштування параметрів регуляторів та спостерігача стану залежать від режиму роботи ЦСАК.

Завдання переорієнтації вісі чутливості сенсора розглядається в детермінованій постановці. У цій задачі необхідно обрати параметри таким чином, щоб мінімізувати час тривалості перехідного процесу, перерегулювання, коливальність та додаткові витрати енергії на переорієнтацію (якщо сенсор має автономне джерело живлення).

Завдання стабілізації вісі чутливості сенсора в режимі стеження розглядається в стохастичній постановці. У цій задачі параметри обираються за умови мінімізації дисперсії помилки утримання вісі чутливості сенсора в заданому положенні та мінімізації додаткових витрат енергії автономним джерелом живлення сенсора [5,6,10].

Характерно, що методичні прийоми налаштування ЦСАК, є однаковими для обох режимів її роботи. Якщо відомі параметри математичних моделей ДПС та збурення, то налаштування параметрів регулятора та спостерігача стану можна виконати заздалегідь із використанням цих моделей, тобто перед початком застосування сенсора. Якщо таких відомостей немає, то зрозуміло, потрібно виконувати оперативну ідентифікацію параметрів математичних моделей та оперативне налаштування ЦСАК під конкретну ситуацію, тобто робити ЦСАК адаптивною (квазіадаптивною).

У детермінованій постановці спостерігач стану використовує алгоритм, який носить назву спо-

стерігач Люенбергера, а в стохастичній – фільтр Кальмана [5,10].

За результатом виконання методики отримуємо структуру математичної моделі ЦСАК у вигляді, що представлена на рисунку 1 [10].

Для імітаційного моделювання (алгоритмічного обчислення значень критеріїв оптимізації) та параметричного синтезу регуляторів, спостерігача Люенбергера, фільтру Кальмана використані неперервна та дискретна МІМО ЛТІ математичні моделі ДПС.

Неперервна МІМО ЛТІ математична модель ДПС (на рис. 1. модель представлена у вигляді блоку State Space та підсилювача B_n) має наступні значення параметрів: $A=[-25 \ -7.5; 7.5 \ 0]$; $B=[1 \ 0; 0 \ -1]$; $B_n=[5 \ 0; 0 \ -5]$; $C=[1 \ 0; 0 \ 1]$; $D=[0 \ 0; 0 \ 0]$. Вхідними сигналами безперервної МІМО ЛТІ математичній моделі ДПС (блок 6, рис. 1) являються: напруга підводиться до якоря ДПС (управління по ланцюгу якоря), яке подається з виходу ЦПІД-регулятора – перший вхід (блок 4.1, рис. 1), що керує, і гальмівний момент, що управляє, який подається з блоку 3, рис. 1 – другий вхід, що керує. Відмітимо, що по фізичному сенсу завдання управління електроприводом, по обох входах можуть діяти обурення (блок 1, рис. 1). Вихідними сигналами блоку 6, рис. 1 являються: струм якоря $i(t)$ і кутова швидкість якоря (ротора) ДПС $w(t)$.

Дискретна МІМО ЛТІ математична модель ДПС була побудована для інтервалу дискретизації $T_e=0.06$ із за допомогою функції `c2d` системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink:

$$x(n+1) = Ad \cdot x(n) + Bd \cdot u(n); \quad (1)$$

$$y(n) = Cd \cdot x(n) + Dd \cdot u(n), \quad (2)$$

де $Ad = [0.1841 \ -0.2256; 0.2256 \ 0.9359]$,

$Bd = [0.1504 \ 0.04274; 0.04274 \ -0.2928]$,

$Cd = [1 \ 0; 0 \ 1]$, $Dd = [0 \ 0; 0 \ 0]$.

Звернемо увагу на те, що запис $Cd = [1 \ 0; 0 \ 1]$ означає вимір цифровими датчиками первинної інформації обох вихідних сигналів ДПС. У цій статті пропонується використати цифровий амперметр для виміру струму якоря ДПС і далі алгоритмічно за допомогою спостерігача Люенбергера або фільтру Кальмана (у залежності від режиму роботи електроприводу) обчислювати значення кутової швидкості ротора (якорі) ДПС. У такому разі $Cd = [1 \ 0]$.

Підключення спостерігача Люенбергера до алгоритму ЦПІД-регулятора ЦСАК електроприводом орієнтації осі чутливості сенсора спрямованої дії не впливає на якість перехідного процесу в ЦСАК і її реакцію на ступінчасте збурення. Тривалість перехідного процесу зберігається рівною приблизно 5 з для ЦСАК з корекцією динамічних характеристик ДПС будь-яким з трьох методів: методом регулювання стану із бажаним(заданим) характерним рівнянням; методом модального регулювання; методом лінійного квадратичного регулювання [11-12].

Позитивним є те, що алгоритмічний вимір кутової швидкості обертання ротора ДПС за допомогою спостерігача Люенбергера або філь-

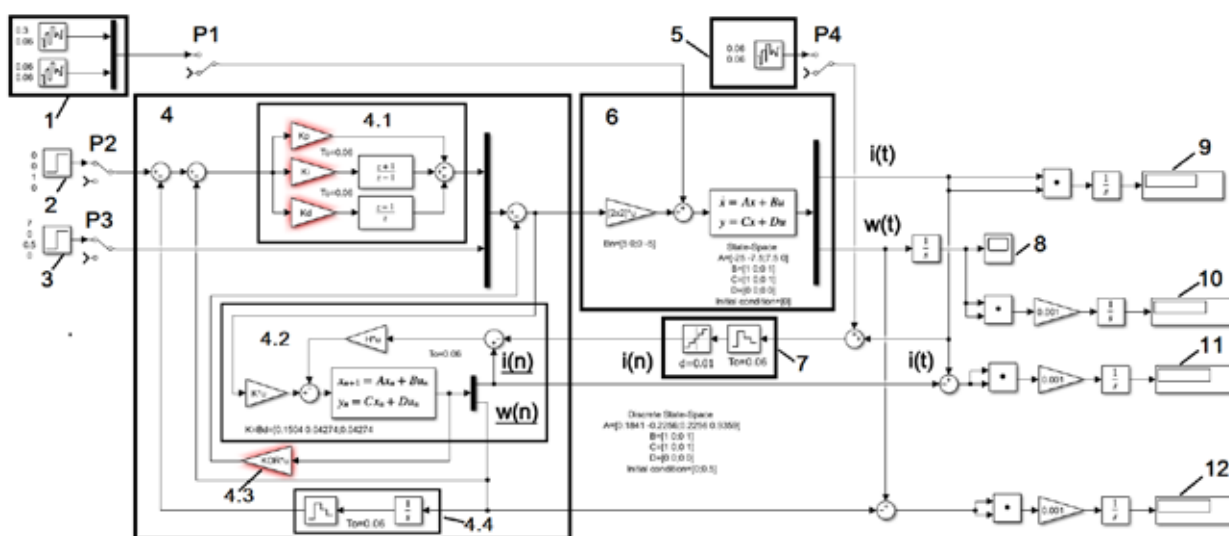


Рис. 1. Структура комп'ютерної математичної моделі ЦСАК прецизійним електроприводом для системи орієнтації і стабілізації стержня за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та транспортних засобів

тру Кальмана дозволяє зменшити вагу і габарити ЦСАК і підвищити її надійність. Поліпшення пояснюється відмовою від використання механічного тахогенератора і вимірника кута повороту в ланцюзі зворотного зв'язку ЦСАК. Для виміру струму в ланцюзі якоря ДПС пропонується використати малогабаритний цифровий сенсор.

Самим енергетично вигідним алгоритмом стеження за об'єктом є алгоритм ЦПД регулювання без корекції динамічних характеристик електроприводу. Найточнішим алгоритмом стеження за метою є алгоритм ЦПД – регулювання, використаний спільно з алгоритмом корекції динамічних характеристик електроприводу, який синтезований методом лінійного квадратичного регулювання [11-12].

Показано, що найкращим компромісним варіантом алгоритму стеження за об'єктом, який дозволяє зменшити дисперсію помилки стеження до 30% і всього в два рази збільшити споживання енергії, являється алгоритм ЦПД регулювання, використаний спільно з алгоритмом корекції динамічних характеристик електроприводу, який синтезований методом регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням.

Усі алгоритми в режимі стабілізації стеження за метою використовують інформацію про век-

тор стану електроприводу, яка подається з виходу фільтру Кальмана.

У ЦСАК з корекцією динамічних характеристик ДПС вдається до 40% зменшити час перехідного процесу і в десятки разів зменшити амплітуду сплеску вихідного сигналу при дії ступінчастого гальмівного збурення в порівнянні з ЦСАК – без корекції динамічних характеристик ДПС [12].

Висновки. Таким чином, актуальним є завдання розробки саме інженерної методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та транспортних засобів. Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених цілей : поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу. Обмеження стаціонарності математичної моделі об'єкту управління можливо замінити на квазістаціонарну, якщо в загальний алгоритм обробки інформації і управління додати алгоритм оперативної ідентифікації параметрів об'єкту управління. Також в подальшому є доцільним продовження досліджень та розробки відповідних наукових та технічних рішень для впровадження інформаційних технологій з використанням штучного інтелекту.

Список літератури:

1. Шворов С.А. Математичний апарат організації руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод. Наука і техніка ВПС України. том. 3, стор. 185-188.
2. Михайлов Є.П., Крис М.В. Локальна навігація мобільних роботів за допомогою засобів одометрії. Підйомно-транспортне обладнання. том. 4, 21-30 с.
3. Лисенко О.: стипендія HANDONG UNITWIN (Республіка Корея). Курс [S084-Україна]. Математичне програмування та дослідження операцій у телекомунікаціях.
4. Лисенко О., Тачініна О., Алексеева І., Новіков В. Математичне моделювання руху цільового вузла Iron Bird датчиків системи керування даними безпеки. Матеріали семінару CEUR, том. 2711, 482–491 с.
5. Lin, L., Wu, P., He, B., Chen, Y., Zheng, J., Peng, X.: The sliding mode control approach design for nonholonomic mobile robots based on non-negative piecewise predefined-time control law. IET Control Theory & Applications. Vol. 15(9), pp. 1286–1296 с.
6. Мокін О.Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія О. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця, 2013. 192 с.
7. Кашканов А.А. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту А.А. Кашканов, В.П. Кужель, О.Г. Грисюк. – Вінниця, 2010. 230 с.
8. Ніконов О.Я. Безпілотні багатоцільові транспортні засоби: Сучасні технології О.Я. Ніконов, Л.Є. Кулакова, Т.О. Полосухіна, В.О. Чернишов Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології, 2017. 46-49 с.
9. Автомобільний інжиніринг: Сучасні технології О.Я. Ніконов, Л.Є. Кулакова, М.В. Сіндєєв, Є.М. Шпінда Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології. 2017. 71-74 с.
10. Фуртат О.В., Фуртат С.О., Лисенко О.І. Методика синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктами сенсорів спрямованої дії мобільних роботів. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій», 2024, 209–211 с.
11. Uminsky, V.V.: Analysis of Control Systems for Mobile Robot Movement. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. Vol. 3-4, pp. 2013. 306-308 с.

12. Lysenko, O., Tachinina, O., Novikov, V., Guida, O., Kirchu, F., & Sushyn, I. 2023. Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors. CEUR Workshop Proceedings 3513, 51–63 c.

Daleka V.H., Furtat S.O. FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF DIGITAL PROPORTIONAL-INTEGRAL-DIFFERENTIAL REGULATION AND CORRECTION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE ELECTRIC DRIVE OF MOBILE ROBOTS AND VEHICLES

The article is devoted to the presentation of the methodology for the synthesis of digital controllers of precision electric drives for the orientation and stabilization system for tracking objects of directional sensors of mobile robots and vehicles.

The task of developing an engineering methodology for the synthesis of digital controllers of precision electric drives for the orientation and stabilization system of directional sensors of mobile robots and technical means of electric transport is relevant. The use of the proposed recommendations will allow achieving the set goals: to improve the dynamic characteristics of the electric drive with a slight increase in energy consumption; to increase reliability and reduce the weight and dimensions of the electric drive. The stationarity restriction of the mathematical model of the control object can be replaced by a quasi-stationary one if an algorithm for operational identification of the parameters of the control object is added to the general information processing and control algorithm.

***Goal:** to reduce the time of the transient process in the control channel of the angle of rotation of the rotor of the electric drive, to synthesize a quasi-invariant digital automatic control system (DACS) with respect to external disturbing action.*

***Research results:** The methodology recommends distinguishing two modes of operation of the electric drive: orientation (reorientation) of the sensor sensitivity axis and its stabilization. The structure of the control law for both modes remains unchanged.*

The control algorithm consists of digital proportional-integral-differential control algorithms, an algorithm for correcting the dynamic properties of the electric drive, and an algorithm for restoring (estimating) the state vector (Lyuenberger observer or Kalman filter). Information to the observer or filter comes from a digital ammeter.

***Conclusion:** the use of the methodology will allow: to improve the dynamic characteristics of the electric drive with a slight increase in energy consumption; to increase reliability and reduce the load-bearing capacity of the electric drive.*

***Key words:** digital automatic control of electric drives, electric vehicles, directional sensors, state space modeling, mobile robots, correction of dynamic characteristics of electric drives.*