

*А. П. Кушнір, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)
В. М. Оксентюк, канд. техн. наук, Т. Я. Дзьоба
(Національний університет "Львівська політехніка")*

ВИБІР СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ПОВОРОТУ ЛЮЛЬКИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДЙМАЧА ДЛЯ СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ

Поставлено завдання синтезувати оптимальну за швидкодією систему автоматичного керування швидкістю виконавчого двигуна безредукторного електропривода повороту люльки, яка би забезпечила задані статичні і динамічні показники координати швидкості в режимах позиціонування і стабілізації. В результаті досліджень було вибрано систему оптимального керування з релейним регулятором швидкості, який працює з безмежно великим коефіцієнтом підсилення при забезпеченні стійкого ковзного режиму релейного елемента. Ця система забезпечує: найкращі статичні і динамічні показники перехідного процесу координати швидкості, які полягають в аперіодичному відпрацюванні завдання з астатизмом першого порядку із максимальною швидкодією; астатичний процес відновлення швидкості з меншим перерегулюванням, під час впливу координатного збурення у вигляді накидання статичного навантаження; меншу чутливість до дії параметричних збурень порівняно з іншими системами.

Ключові слова: пожежний автопідйомник, механізм повороту платформи, система автоматичного керування, система оптимального керування, релейний регулятор.

A. P. Kushnir, V. M. Oksentyuk, T. J. Dzjoba

CHOICE OF THE SPEED CONTROL SYSTEM USED FOR TURNING THE ARTICULATED BOOM AERIAL PLATFORM DURING STAND TESTS

The optimum for speed system of the automatic control of speed of an executive engine of a gearless electric rotation of the aerial platform was synthesized, which would provide the given static and dynamic indicators of speed coordinates in positioning and stabilization modes. As a result of the research, an optimal control system with a relay speed controller was chosen. This system provides: the best static and dynamic parameters of the transition process of the coordinate velocity, which consist in the aperiodic work out of the task with first-order astaticism with maximum speed; the best process of astatic restoration of speed with less overregulation, during the influence of coordinate perturbation in the form of stacking the static load; less sensitivity to the effect of parametric disturbances compared to other systems.

Key words: articulated boom, aerial platform's rotation mechanism, automatic control system, optimal control system, relay regulator.

Постановка проблеми. Для проведення рятувальних робіт на значних висотах та подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі необхідно забезпечити плавне, рівномірне і з високою точністю переміщення люльки в задану точку простору та її нерухомість протягом усього часу роботи рятувальників [1, 2]. Система повороту люльки повинна працювати в режимі позиціонування, коли необхідно перемістити люльку на заданий кут без статичної похибки з обмеженням координат, а також в режимі стабілізації. Переміщення люльки на заданий кут повинно відпрацьовуватися з заданою точністю, без статичної похибки з обмеженням координат для даного механізму кутової швидкості, кутового прискорення, динамічного моменту [2, 3]. Намагання отримати кращі показники переміщення призводить до ускладнення завдань, що виконуються приводами повороту люльки. Тому система автоматичного керування (САК) електричним приводом повороту люльки повинна забезпечити такі вимоги: високу швидкодію, статичну і динамічну точності відтворення заданих траєкторій, плавність розгону і гальмування двигуна, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низьку чутливість до координатних і параметричних збурень, високу надійність [4].

Під час повороту люльки як в режимі позиціонування, так і в режимі стабілізації можливі параметричні та координатні збурення [2]. Крім того, автопідйомник працює на відкритому повітрі і піддається атмосферному впливу, що також призводить до зміни параметрів електрообладнання. Усі ці фактори негативно впливають на роботу систем. Тому САК елек-

троприводом (ЕП) поворотом платформи автопідіймача має бути мінімально чутливою до них. До того ж, через дію реактивної складової статичного навантаження та великі маси рухомих частин, САК повинна бути налаштована таким чином, щоб забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу координати швидкості і положення.

Розроблення контуру керування положенням є предметом окремих досліджень, а заданням цієї роботи є розроблення такої системи керування швидкістю виконавчого двигуна повороту платформи, яка б забезпечила задані статичні і динамічні показники до координати швидкості в режимах позиціонування і стабілізації.

Проведення випробувань ЕП повороту платформи пожежного автопідіймача з моментним виконавчим двигуном [5] на реальній установці недоцільне через високу вартість створення такого опорно-поворотного механізму зі стрілою і люлькою, можливість пошкодження дорогого та високоточного обладнання, механічних конструкцій тощо. Тому в [6] запропоновано замінити натурні випробування стендовими. Під час стендових випробувань імітації та моделюванню підлягає навантаження, яке створюється на валу виконавчого двигуна електропривода повороту платформи. А усі інші елементи, такі як виконавчий двигун, системи керування, силові перетворювачі та ін. повинні бути реальними. Реальна система керування швидкістю повороту платформи необхідна для випробувань, досліджень, налагоджень ЕП повороту платформи на дослідному стенді з навантажувальною машиною [6], який імітує статичне і динамічне навантаження з урахуванням великого і змінного моменту інерції стріли з люлькою та змінних активного та реактивного статичних моментів. Тому під час проведення стендових випробувань необхідною є система керування швидкістю виконавчого двигуна, яка планується до реалізації у реальній пожежній установці для можливості отримання інформації, максимально наближеної до натурних умов роботи ЕП повороту платформи.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Основною координатою керування привода повороту платформи є переміщення вихідного вала виконавчого двигуна. Але до складу САК переміщенням входить внутрішній контур керування швидкістю вихідного вала виконавчого двигуна, від налаштувань якого суттєвим чином залежать кількісно-якісні показники координати положення. Для забезпечення необхідних показників координати швидкості проаналізовано ряд принципово відмінних САК. Необхідність забезпечення плавності руху може бути отримана за модального керування [7]. Проте, незважаючи на суттєві переваги систем модального керування, вони є складними під час синтезу та налагодження, не дають можливості регулювати і обмежувати проміжні координати, а лише вихідну. Таких недоліків можна позбутися при побудові САК за принципом підпорядкованого керування [7], але виникають проблеми забезпечення статичної та динамічної точності, а також чутливості щодо параметричних збурень. Високих показників САК можна досягнути за комбінованого принципу керування, математичною базою якого є теорія інваріантності [8]. Проте виникають суттєві складнощі щодо фізичної реалізації коректуючих пристроїв і контролю різноманітних збурювальних факторів. Альтернативним варіантом САК швидкістю є САК, синтезована методом узагальненого характеристичного полінома (УХП) [7, 9]. У [9] на цифровій моделі проведено дослідження синтезованої триконтурної САК поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли за умови налаштування її на стандартну біноміальну форму. Незважаючи на переваги, вказана САК має недолік необхідності збільшення швидкодії ω_0 для компенсації динамічної похибки. Однак із збільшенням швидкодії системи транспортування людей в люльці стає небезпечним. Тому необхідно шукати інший принцип побудови САК.

Перспективним напрямком синтезування є системи оптимального керування (СОК), в яких алгоритм керування отримується шляхом вирішення задачі аналітичного конструювання регуляторів (АКР) і є оптимальний за мінімумом прийнятих апіорі інтегральних квадратичних критеріїв якості [11]. Особливості задач АКР детально проаналізовані в [11, 12], у результаті чого було розроблено нову методологію структурно-алгоритмічного синтезу лінійних та релейних СОК, стійких при безмежно великому коефіцієнті підсилення регуляторів, що забезпечують бажані динамічні і статичні показники при низькій чутливості до широкого спектра

збурювальних факторів. Максимальна швидкість досягається ввімкненням у замкнутий контур керування релейного елемента. Реалізація безмежно великого коефіцієнта підсилення завдяки роботі релейного елемента в ковзному режимі дає змогу знизити чутливість системи до координатних та параметричних збурень теоретично до нульового значення. Виходячи з цього, для побудови САК поворотом платформи обрали останній принцип керування.

Постановка задач дослідження. У роботі поставлено завдання дослідження, вибору та синтезу раціонального варіанта оптимальної за швидкістю САК швидкістю виконавчого двигуна безредукторного ЕП повороту люльки, яка б забезпечила задані статичні і динамічні показники координати швидкості в режимах позиціонування і стабілізації.

Виклад матеріалу дослідження. У попередніх роботах [4, 6] аргументовано показано необхідність модернізації привода повороту платформи та розроблення системи автоматичного керування позиційно-слідкуючим ЕП. Забезпечення високих показників у статичних і динамічних режимах з використанням традиційних редукторних систем привода є проблематичним, тому для сучасного пожежного автопідйомника використано безредукторний ЕП повороту платформи на базі вентильного моментного двигуна (ВМД) постійного струму [4, 12], який збуджується постійними магнітами, вал якого з'єднується безпосередньо з валом об'єкта керування. Запропонований моментний двигун [12] забезпечує поєднання здатності високоточної роботи на низьких швидкостях з необхідністю розвивати великий момент на валу і дає можливість недовготривалої роботи останнього навіть у режимі короткого замикання на природній характеристиці. Це дає можливість відмовитися від синтезу внутрішнього контура струму. У роботі [12] було доведено правомірність заміни математичного опису вентильного двигуна на колекторний двигун постійного струму, коли важливою є залежність моменту і кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання. Математична модель колекторного двигуна є загальновідомою [7, 8], зручною, широко адаптованою і дає змогу отримувати необхідні рішення різноманітних математичних задач синтезу САК без ускладнення процесу математичного опису.

Параметри досліджуваного ЕП повороту мають такі значення: $M_n = 8750,8 \text{ Нм}$; $M_c = 1279 \text{ Нм}$; $I_n = 66,8 \text{ А}$; $\omega_n = 0,21 \text{ рад/с}$; $T_m = 6,5 \text{ с}$; $J = 160000 \text{ Нм}$ [12]. Дослідження проведено на базі розробленого в спеціальному конструкторському бюро електромеханічних систем НУ "Львівська політехніка" ВМД, який розглядається у цій роботі, з такими номінальними параметрами: $R_y = 1,52 \text{ Ом}$; $L_y = 0,0091 \text{ Гн}$; $C = 131 \text{ Нм/А}$; $M_{\max} = 13000 \text{ Нм}$; $M_n = 8750,8 \text{ Нм}$; $J = 2000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $U_n = 150 \text{ В}$ [12]. Стала часу якірного кола ВМД T_y становить близько $0,006 \text{ с}$.

За базовий варіант системи керування поворотом платформи приймемо САК, побудовану за принципом підпорядкованого регулювання. Синтез такої системи підпорядкованого керування (СПР) проведено без врахування зворотного зв'язку за електрорушійною силою двигуна, оскільки величина електромагнітної сталої T_y є набагато меншою за величину електромеханічної сталої T_{em} . В цьому випадку замкнутий контур регулювання швидкості налаштований на симетричний оптимум, а регулятор швидкості є пропорційно-інтегрального, типу. Динамічні та статичні характеристики, які забезпечує ця СПР, загальновідомі [7, 8]. Відпрацювання сигналу завдання відбувається з астазмом першого порядку, з перерегулюванням $\sigma = 41,82\%$. СПР астатично відпрацьовує збурення за навантаженням. Наявність такого перерегулювання координати швидкості під час виходу на заданий рівень призведе до коливань вихідного вала вентильного двигуна і, як наслідок, до коливань люльки. Це є небажаним явищем, враховуючи особливості поворотного механізму висотних автопідйомників, а також вимоги до безпеки праці. Тому необхідно синтезувати і проаналізувати декілька інших варіантів контурів регулювання швидкості. Наприклад, побудованих за допомогою нової методології структурно-алгоритмічного синтезу СОК [10, 11], яким властиві високі показники якості регулювання.

У результаті розв'язання задачі АКР знаходиться алгоритм оптимального керування,

визначаються параметри системи керування швидкістю та її структура. Причому параметри і структура під час синтезу системи керування у різних координатних базисах будуть різними [10]. Це, своєю чергою, визначає статичні і динамічні властивості системи керування, її чутливість до параметричних і координатних збурень, а також шляхи технічної реалізації.

Під час вибору та порівняння таких САК було в першу чергу враховано забезпечення максимальної швидкодії, мінімальних параметричної і координатної чутливостей, аперіодичного перехідного процесу координати швидкості. У результаті попереднього аналізу статичних та динамічних показників, чутливості до параметричних та координатних збурень, а також можливостей технічної реалізації вибрано такі варіанти СОК, доцільні для подальшого більш детального аналізу з метою застосування в ЕП повороту платформи.

Найбільш високими динамічними показниками і малою чутливістю до збурень відзначаються СОК з релейними регуляторами. Перевагою релейних систем є їх властивість стійкої роботи з безмежно великим коефіцієнтом підсилення ($g_j \rightarrow \infty$) при забезпеченні стійкого ковзного режиму релейного елемента. Релейний закон керування j -ю координатою має вигляд [10]:

$$U_j = -\text{sign}\left(m_n \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i\right) \quad (1)$$

і мінімізує інтегральний квадратичний функціонал якості

$$I_j = \int_0^{\infty} 2 \left| m_n \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right| dt. \quad (2)$$

де n – порядок системи; m_n – постійний коефіцієнт, j – лічильник кількості координат в розширеному на одиницю фазовому просторі розмірністю $n+1$, $j = 0, 1, \dots, n$; η_i – величина відхилення i -ї координати дійсного руху від бажаного; v_{in}^j – коефіцієнти функції Ляпунова $V(\eta) = \sum_{i,k=0}^n v_{ik}^j \eta_i \eta_k$, $v_{ik}^j = v_{ki}^j$, які зв'язані між собою співвідношенням $v_{ik}^j = \frac{v_{in}^j v_{kn}^j}{v_{nn}^j}$, ($i, k = 0, 1, \dots, n$). Коефіцієнти v_{in}^j , v_{kn}^j , v_{nn}^j визначаються мінорами i -их, k -их або n -их елементів j -го стовпця визначника коефіцієнтів системи.

Коефіцієнти v_{in}^j знаходяться як і для лінійного керування. Алгоритм оптимального релейного керування, отриманий в результаті структурно-алгоритмічного синтезу модифікованим методом аналітичного конструювання регуляторів при записі системи диференціальних рівнянь у формі Коші (η -базис), виражається через абсолютні значення змінних і має такий вигляд, відповідно до (1):

$$u_{кри} = u_{км} \text{sign}[\omega^* - \beta_{22}\omega - \beta_{23}I - \beta_{24}E_n], \quad (3)$$

де: $u_{кри}$ – напруга оптимального керування регулятора швидкості, В; $u_{км}$ – максимальне значення напруги керування, В; ω^* – задана координата швидкості; ω , I , E_n – дійсні значення координат кутової швидкості, струму якоря та ЕРС перетворювача відповідно, рад/с, А, В; β_{ij} – оптимальні коефіцієнти, отримані в результаті синтезу СОК через коефіцієнти v_{in}^j . Коефіцієнти β_{ij} визначаються за виразами з [10, с. 159—163]:

$$\beta_{22} = \frac{T_M}{T_M + T_n}, \quad \beta_{23} = \frac{T_A R_A}{(T_M + T_n)C}, \quad \beta_{24} = \frac{T_n}{(T_M + T_n)C}.$$

Технічна реалізація цього алгоритму не викликає труднощів, оскільки забезпечується контурами з жорсткими від'ємними зворотними зв'язками. Однак, СОК синтезовані в η -

базисі, є статичними щодо задаючих і збурювальних дій, мають підвищену чутливість до параметричних змін.

Найкращими динамічними властивостями та інваріантністю щодо параметричних і координатних збурень відзначаються СОК, які працюють у стійкому ковзному режимі і синтезовані в β -базисі (опис об'єкта керування у формі Фробеніуса). Проте наявність похідних високого порядку в законі керування і пов'язана з цим необхідність використання спостерігачів призводить до значних ускладнень під час технічної реалізації.

Компромiсним варіантом є побудова СОК, які реалізують алгоритми релейного керування, синтезовані в $p\eta$ -базисі, координатні осі якого відображають відхилення основної регульованої змінної кожного контуру, її першу похідну, а також перші похідні допоміжних змінних [10]:

$$u_{кри} = u_{км} \text{sign}[\omega^* - \omega - \gamma_{22} p\omega - \gamma_{23} pI] \quad (4)$$

де: γ_{ij} – коефіцієнти, отримані в результаті синтезу СОК через коефіцієнти v_{in}^j ; $p\omega$ – перша похідна координати швидкості, рад/с²; pI – перша похідна координати струму, А/с.

Коефіцієнти γ_{ij} визначаються за виразами з [10, с.162]

$$\gamma_{22} = \frac{T_m (T_y + T_n)}{T_m + T_n}, \quad \gamma_{23} = \frac{T_y T_n R_y}{(T_m + T_n) C}.$$

Такі системи характеризуються задовільними статичними і динамічними властивостями та низькою чутливістю до параметричних збурень, а їх технічна реалізація не викликає принципових труднощів. На рис. 1 представлена структурна схема СОК, яка синтезована відповідно до (4).

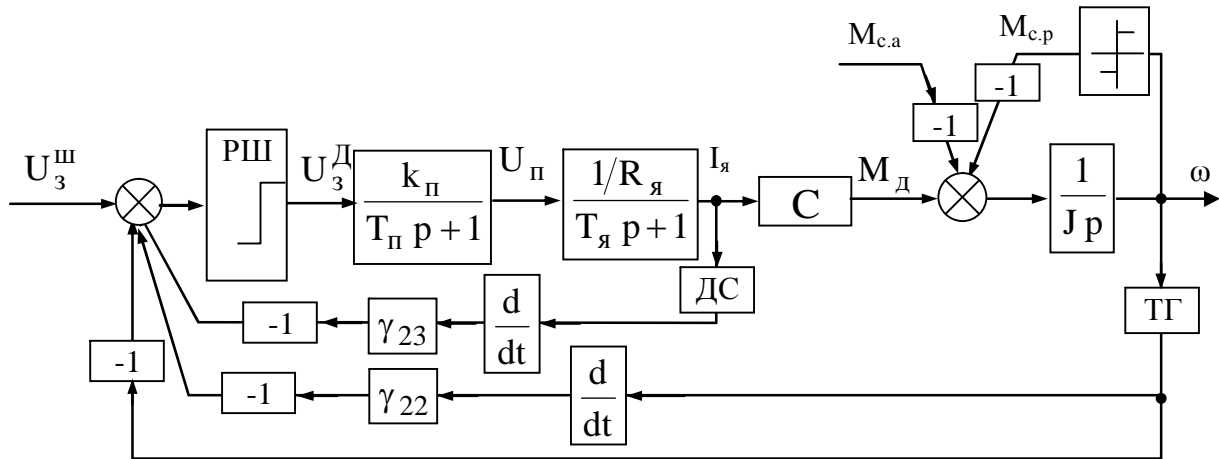


Рисунок 1 – Структурна схема СОК з релейним РШ, яка синтезована в $p\eta$ -базисі

На розробленій в середовищі MATLAB/Simulink моделі СОК з релейним регулятором швидкості (РШ) (рис. 1) було проведено експеримент відпрацювання системою стрибкоподібного та лінійно наростаючого сигналу завдання, і накидання статичного навантаження (рис. 2 а, б). Сигналом завдання є $\omega_z = 0,0013 \text{ с}^{-1}$, яке виводиться на графік з коефіцієнтом масштабування $21 \cdot 10^3$, як і координата поточної швидкості ω . Вибір такого малого значення ω_z зумовлений необхідністю забезпечення лінійності САК і виключення її роботи на ділянках обмежень. У момент часу 0,36 с відбувається накидання навантаження у виді номінального моменту статичного навантаження 1279 Нм.

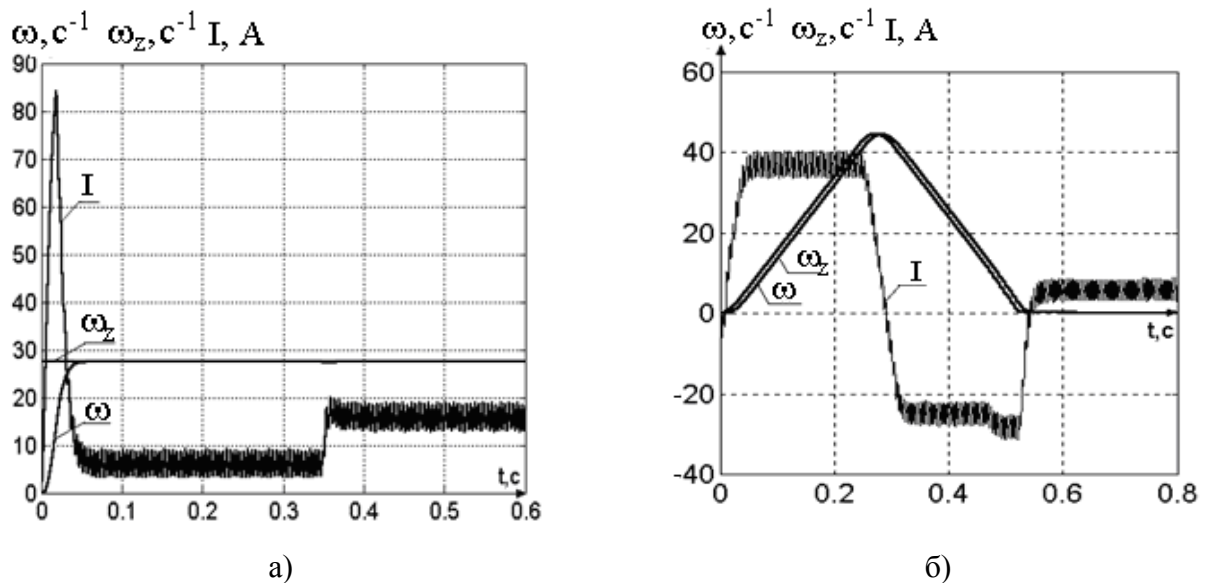


Рисунок 2 – Осцилограми перехідних процесів СОК з релейним РШ, яка синтезована в η -базисі: а) стрибкоподібний сигнал завдання; б) лінійно наростаючий сигнал завдання

Аналіз результатів підтвердив теоретично очікувані показники статичних і динамічних характеристик такої системи. Ця СОК володіє усіма перевагами системи, синтезованої в η -базисі, але позбавлена недоліків статизму відносно сигналів завдання та збурення. До того ж, відхилення швидкості під час накидання навантаження у 12 разів менше, а швидкодія відновлення координати швидкості майже у 4 рази більша від аналогічних параметрів, які є в СПР, синтезований на симетричний оптимум.

Наявність динамічної похибки у СОК синтезованих в η і $r\eta$ -базисі є можливою, враховуючи підвищення монотонності відпрацювання завдання. Також в процесі роботи системи в контурі регулювання положення динамічна похибка під час наростання швидкості буде компенсуватися такою ж похибкою, але протилежного знака. Під час режиму позиціонування основною координатою регулювання є положення вала виконавчого двигуна.

Також було досліджено запропоновані САК на чутливість до параметричних збурень у вигляді зміни опору якірної кола R_j виконавчого двигуна та моменту інерції J азимутальної осі повороту. Аналіз результатів показав задовільну роботу усіх розглянутих САК швидкістю під час зменшення опору якірної кола на 20%. Під час роботи ЕП з опором, збільшеним на 20% від номінального, статичні і динамічні характеристики усіх розглянутих САК під час відпрацювання накидання навантаження залишаються такі ж самі, але у всіх системах відбувається збільшення величини відхилення координати швидкості від її заданого значення під дією статичного навантаження $\Delta\omega_{30}$, що свідчить про негативний вплив збільшення величини R_j .

Проведено комп'ютерні моделювання під час зміни моменту інерції J порівняно з номінальним J_n . Під час зменшення J в 2 рази у СПР, синтезований на симетричний оптимум, спостерігається підвищення в 1,5 рази швидкодії разом із підвищенням коливності перехідного процесу швидкості, про що свідчить збільшення у 1,3 рази величини перерегулювання σ . У СОК з релейним РШ, яка синтезована в η -базисі, з'являється незначне перерегулювання швидкості, її перехідний процес закінчується у 1,5 рази швидше, а статична похибка залишається майже така ж сама. У СОК з релейним РШ, яка синтезована в $r\eta$ -базисі, основні показники перехідного процесу залишаються без змін. Було проведено експеримент відпрацювання завдання швидкості з моментом інерції, збільшеним в 2 рази. Його результати показали добру роботу усіх синтезованих систем без суттєвого погіршення статичних і динамічних характеристик.

Порівнюючи основні показники роботи САК між собою під час дії параметричних збурень, можна зауважити, що найменш чутливою до зміни J є СОК з релейним РШ, яка синтезована в $p\eta$ -базисі, про що свідчать майже незмінні її характеристики перехідного процесу швидкості.

Висновки. Найкращі статичні і динамічні показники перехідного процесу координати швидкості спостерігаються у СОК з релейним РШ, синтезованій $p\eta$ -базисі. Вони полягають в аперіодичному відпрацюванні завдання з астатизмом першого порядку із максимальною швидкодією. Ця система, під час впливу координатного збурення у вигляді накидання статичного навантаження, забезпечує найкращий процес астатичного відновлення швидкості з меншим перерегулюванням. Наявність невеликої динамічної похибки є допустимою, враховуючи його роботу у замкнутому контурі регулювання переміщення вала ВМД.

СОК з релейним РШ, яка синтезована у $p\eta$ -базисі, відрізняється від інших варіантів меншою чутливістю до дії параметричних збурень. Під час дії координатних збурень система є астатичною. Спостерігається незначний динамічний спад швидкості, але час її відновлення є значно меншим. Тому для регулювання швидкості обертання вала двигуна було вибрано цю СОК з релейним РШ, який працює в ковзному режимі. В подальшому планується провести стендові дослідження алгоритму керування навантажувальною машиною, який імітує статичне і динамічне навантаження, та синтезувати контур положення.

Список літератури:

1. Гашук П. М. Загальні світові тенденції в царині проектування й виготовлення мобільної пожежно-рятувальної техніки. Європа / Гашук П. М., Сичевський М. І. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2017. – №30. – С. 22-43.
2. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT) : ДСТУ EN 14043:2008. – [Чинний від 2008-12-26]. – К. ; Дерспоживстандарт України, 2008. – 176 с. – (Національний стандарт України).
3. Innovative technologies and intelligent solutions. [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.magirusgroup.com/de/en>.
4. Кушнір А. П. Вентильний електропривод механізму повороту платформи пожежного автопідйомника / Кушнір А. П., Марущак Я. Ю., Оксентюк В. М. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2014. – №24. – С. 103-110.
5. Ткачук В. І. Електромеханотроніка : навч. посіб. / В. І. Ткачук – Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2001. – 404 с.
6. Оксентюк В.М. Імітатор статичного і динамічного навантажень для безредукторного електропривода механізму повороту платформи пожежного автопідйомача / Оксентюк В.М, Кушнір А. П., Дзьоба Т.Я., Шаповалов О.В. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – №29. – С.107-115.
7. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: навчальний посібник / Марущак Я. Ю. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2005. – 208 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
9. Кушнір А. П. Синтез системи автоматичного керування поворотом люльки пожежного автопідйомача з урахуванням пружних властивостей стріли / Кушнір А. П., Оксентюк В.М, Кравець І.П., Войцех М. В. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – №29. – С.93-99.
10. А. В. Садовой. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. / А. В. Садовой, Б. В.Сухинин, Ю. В.Сохина – Київ: ИСИМО, 1996. – 298 с.
11. Дерез А.Л. Оптимизация по быстрдействию режима «большого треугольника» релейной системы четвертого порядка методом n-і переключений / Дерез А.Л., Садовой А.В. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015 – №12 – С. 96-100.

12. Оксентюк В. М. Комп'ютерне моделювання вентильного виконавчого двигуна для механізму повороту платформи пожежного автопідійомника / Оксентюк В. М., Кушнір А. П., Кравець І. П. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2015. – №26. – С.123-132.

References:

1. Haschuk P. M. and Sychevskij M. I. (2017) “Global trends in desing and manufacture of firefighting and rescue service vehicles. Europe. *Fire of safety. Lviv State University of Life Safety*, no. 30, pp. 123-132.
2. *Autostairs are fire. General technical requirements and methods of test* (EN 14043:2005, IDT): DSTU EN 14043:2008/ Kyiv: Derzspozuvstandart of Ukraine 2004.
3. Innovative technologies and intelligent solutions. Retrieved from: <http://www.magirusgroup.com/de/en>.
4. Marushchak, Ya. Yu., Kushnir, A. P. and Oksentyuk, V. M. (2014). “Switched electrical drive of platform’s rotation mechanism of aerial appliance”. *Fire of safety. Lviv State University of Life Safety*, no. 24, pp. 103-110.
5. Tkachuk, V. (2001). *Elektromehanotronika*. National university “Lviv polytechnic”, Lviv, Ukraine.
6. Oksentyuk, V. M., Kushnir, A. P., Dz'oba, T. Ja. and Shapovalov, O. V. (2016). “Static and dynamic loads simulator for direct electric drive of the turning mechanism platform fire lift”. *Fire of safety. Lviv State University of Life Safety*, no. 29, pp. 107-115.
7. Marushchak, Ya. Yu. (2005). *Synthesis of electromechanical systems with serial and parallel adjustment*. Lviv : National university “Lviv polytechnic”.
8. Kljucev, V.Y. (2001). *Teoryja elektropryvoda* [Electric drive theory]. Energoatomizdat. Moscow, Russia.
9. Oksentyuk, V. M., Kushnir, A. P., Kravec', I. P. and Vojceh, M. V. (2016). “Automatic control system synthesis of basket turning fire lifts with taking into account elastic properties of arrows”. *Fire of safety. Lviv State University of Life Safety*, no. 29, pp. 93-99. (in Ukr.).
10. Sadovoy, A. V., Suhinin, B. V. and Sohina, Yu. V. (1996). *Sistemy optimalnogo upravleniya pretsizionnyimi elektroprivodami* [Systems for the optimal control of electric drives precision]. ISIMO, Lviv, Ukraine.
11. Derec, A.L. and Sadovoj, A.V. (2015). Optimization on the speed of the “triangle big” mode of the fourth-order relay system by the n-i switching method. *Problems of automatic electric drive. A theory and practice : Proceedings of the National technical university the "Kharkiv polytechnic institute"*, no. 12, pp. 96-100.
12. Oksentyuk, V. M., Kushnir, A. P., and Kravec, I. P. (2015). “Computer simulation of executive switched motor for platform rotation mechanism of fire autolifts”. *Fire of safety. Lviv State University of Life Safety*, no. 26, pp. 123-132.

