

УДК 62-83:621.313.2

В. М. Оксентюк, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

СИНТЕЗ КОНТУРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЛЕЙНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ДЛЯ ВЕЛИКОГО ОПТИЧНОГО ТЕЛЕСКОПА

Для перспективного великого оптичного телескопа застосовано безредукторний електропривод, побудований на базі моментного вентильного двигуна з давачем положення ротора. Синтезовано декілька варіантів систем оптимального за швидкістю керування швидкістю виконавчого двигуна телескопа у результаті вирішення задачі аналітичного конструювання регуляторів, стійких при безмежно великому коефіцієнті підсилення за рахунок роботи релейного елемента у ковзному режимі.

Ключові слова: *оптичний телескоп, оптимальне регулювання швидкістю, релейний регулятор.*

Постановка проблеми. Для спостереження за космічними об'єктами у науково-технічних дослідницьких, прикладних та військових цілях використовують різноманітні технічні засоби, провідне місце серед яких займають оптичні телескопи (ОТ) [1, с. 54–62]. У цій статті розглядається великий оптичний телескоп-рефлектор з масою дзеркала біля 20 т і відповідно великим моментом інерції — біля $160\,000\text{ кг}\cdot\text{м}^2$ для азимутальної осі повороту.

Для можливості здійснення астрономічних спостережень необхідно навести трубу ОТ в задану точку небосхилу та забезпечити підтримання напрямку на об'єкт спостережень протягом усього часу досліджень, причому рух має бути плавним і рівномірним з особливо високою точністю. ОТ може працювати в режимі позиціонування, коли необхідно перемістити трубу телескоп на заданий кут (так зване переключення) без статичної похибки з обмеженням координат, в режимі слідкування — необхідно стежити за об'єктом спостережень, а також в інших допоміжних режимах роботи [1, с. 63–69]. Під час роботи в режимі слідкування електропривод (ЕП) повинен забезпечити як необхідну точність, статичну і динамічну, так і плавність стеження, для запобігання так званих зривів стеження. Переключення труби ОТ на заданий кут повинно відпрацьовуватися без статичної похибки з обмеженням координат для даного ОТ кутової швидкості, кутового прискорення, динамічного моменту [2; 3]. Намагання отримати кращі показники спостережень, наприклад, на сьогоднішній день вимоги до точності позиціонування сучасних ОТ доходять до 1 кутової секунди [2; 3], призводить до ускладнення завдань, що виконуються електроприводами (ЕП) наведення телескопа. Тому система автоматичного керування (САК) ЕП повинна забезпечити вимоги: висо-

ка швидкодія, статична і динамічна точності відтворення заданих траскторій, плавність руху, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низька чутливість до координатних і параметричних збурень, висока надійність [2].

Забезпечення необхідних статичних і динамічних показників ОТ з використанням традиційних редукторних систем ЕП є проблематичним, тому для сучасного ОТ використано безредукторний ЕП [3] з вентильним моментним двигуном постійного струму (ВМД) [4, с. 155–170], який збуджується постійними магнітами. Враховуючи високі вимоги до швидкодії ЕП було вибрано для керування привідними ВМД широтно-імпульсні перетворювачі на базі IGBT-модулів.

Під час роботи ЕП телескопа як в режимі слідування, так і в режимі позиціонування можливі параметричні та координатні збурення [1, с. 82–91]. Усі ці фактори негативно впливають на якість отриманого зображення і тому САК ЕП оптичного телескопа має бути мінімально чутливою до них. До того ж, через дію реактивної складової статичного навантаження та великі маси рухомих частин ОТ, САК повинна бути налаштована таким чином, щоби забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу координати швидкості і положення. Розроблення контуру керування положенням є предметом окремих досліджень, а завданням даної роботи є розроблення такої системи керування швидкістю виконавчого двигуна ОТ, яка би забезпечила задані статичні і динамічні вимоги до координати швидкості в режимах позиціонування і слідування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення необхідних показників координати швидкості ОТ можливе різноманітними варіантами систем керування. 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. За базовий варіант вибрано класичну САК, побудовано за принципом підпорядкованого регулювання [5, с. 43–65; 6], через відомі переваги таких САК. Але виникають проблеми забезпечення статичної та динамічної точності, а також чутливості щодо параметричних збурень.

Високі показники якості регулювання властиві системам оптимального керування (СОК). Зокрема, за дії обмежень на координати системи кращі результати під час розв'язання задачі підвищення швидкодії САК можна отримати з допомогою оптимального за швидкістю керування [7, с. 95–123]. Алгоритм керування є оптимальний за мінімумом прийнятого апріорі інтегрального квадратичного критерію якості і отримується шляхом вирішення задачі аналітичного конструювання регуляторів (АКР) [7, с. 36–46]. Максимальна швидкодія досягається ввімкненням у замкнутий контур керування релейного елемента. Реалізація безмежно великого коефіцієнта підсилення за рахунок роботи релейного елемента в ковзному режимі дозволяє знизити чутливість системи до координат-

них та параметричних збурень теоретично до нульового значення. Алгоритм оптимального релейного керування, знайдений в результаті вирішення задачі АКР, визначає не тільки параметри керуючої частини системи, але і її структуру, яка під час синтезу в різних базисах координат буде іншою [8]. Відмінності в структурах систем приводять не тільки до різних шляхів їх технічної реалізації, але й до різних статичних властивостей і до різного ступеня чутливості до параметричних і координатних збурень. Для даного ОТ актуальним є синтез декількох варіантів СОК в різних координатних базисах, їх дослідження під час відпрацювання вхідних сигналів різних типів та вибір раціонального закону керування швидкістю ЕП наведення труби ОТ.

Мета статті. Поставлено завдання синтезу, дослідження та вибору раціонального варіанту оптимальної за швидкодією САК швидкістю виконавчого двигуна ЕП ОТ.

Виклад основного матеріалу. Особливість моментного двигуна, який розглядається в даній роботі, полягає у можливості його недовготривалої роботи в режимі короткого замикання на природній характеристиці та у достатньо малій величині електромагнітної сталої часу якірного кола. Тому в контурі регулювання струму якірного кола ВМД немає необхідності і в подальшому аналізі він виключається зі складу САК. Для досліджень ЕП телескопа, коли важливою є залежність моменту і кутової швидкості виконавчого двигуна від вхідної напруги, а не його конструктивне виконання, вибирається математична модель колекторного двигуна. Таке рішення зумовлено малим відсотком розбіжності (до 5%) статичних і динамічних характеристик колекторного і безконтактного двигунів.

Таким чином САК швидкістю є одноконтурною. Параметри досліджуваного ЕП телескопа мають такі значення: $M_n = 8750,8 \text{ Нм}$; $M_c = 1279 \text{ Нм}$; $I_n = 66,8 \text{ А}$; $\omega_n = 0,37 \text{ рад/с} = 21 \text{ град/с}$; $T_m = 6,5 \text{ с}$; $J = 153564 \text{ Нм}$. Дослідження проведено на базі розробленого в спеціальному конструкторському бюро електромеханічних систем НУ «Львівська політехніка» ВМД для ЕП ОТ, який розглядається в даній роботі, з такими номінальними параметрами: $R_{\text{я}} = 1,52 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,0091 \text{ Гн}$; $C = 131 \text{ Нм/А}$; $M_{\text{max}} = 13000 \text{ Нм}$; $M_n = 8750,8 \text{ Нм}$; $J = 2000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $U_n = 150 \text{ В}$. Стала часу якірного кола ВД Тя складає біля $0,006 \text{ с}$.

Як зазначено вище, за базовий варіант системи керування ОТ прийнято САК, побудовану за принципом підпорядкованого керування. Синтез такої САК проведено без врахування зворотного зв'язку за електрорушійною силою двигуна, оскільки величина електромагнітної сталої $T_{\text{я}}$ є набагато меншою за величину електромеханічної сталої $T_{\text{ем}}$. В цьому випадку замкнутий контур регулювання

швидкості налаштований на симетричний оптимум, а регулятор швидкості є пропорційно-інтегрального типу з передавальною функцією:

$$W_{PШI}(p) = k_{pш} + \frac{1}{T_{I_{pш}} p}, \quad (1)$$

де $k_{pш} = \frac{J R_{я}}{2 T_{\mu} k_n C k_{зш}}$ — коефіцієнт підсилення (пропорційна складова)

ва) ПШ; $T_{I_{pш}} = \frac{8 T_{\mu}^2 k_n C k_{зш}}{J R_{я}}$ — стала часу інтегрування ПШ; T_{μ} —

мала некомпенсована стала часу, $T_{\mu} = T_{я} + T_n$; $T_{я}$ — стала часу якірного кола виконавчого двигуна; T_n — стала часу силового перетворювача; k_n — коефіцієнт підсилення силового перетворювача; C — конструктивна стала двигуна; $k_{зш}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

Налаштування замкнутого контуру регулювання швидкості (ЗКРШ) на симетричний оптимум передбачає на вході контуру фільтр під час відпрацювання стрибкоподібного сигналу завдання. У нашому випадку в режимі позиціонування на ЗКРШ, який є в контурі регулювання положення, подається лінійно-наростаючий сигнал завдання швидкості [8]. У режимі слідкування необхідно забезпечити астатизм другого порядку за завданням, а наявність фільтра буде демпфувати форсуючий ефект регулятора положення. Тому фільтр на вході ЗКРШ доцільно не використовувати.

В середовищі MATLAB\Simulink розроблена комп'ютерна модель на основі структурної схеми ЗКРШ з лінійним ПШ (ЗКРШ першого типу) (рис. 1).

На розробленій комп'ютерній моделі було проведено експеримент відпрацювання стрибкоподібного сигналу завдання та накидання статичного навантаження (рис. 2, а). З рисунку видно, що відпрацювання сигналу завдання I відбувається з астатизмом першого порядку, з перерегулюванням $y = 41,82\%$.

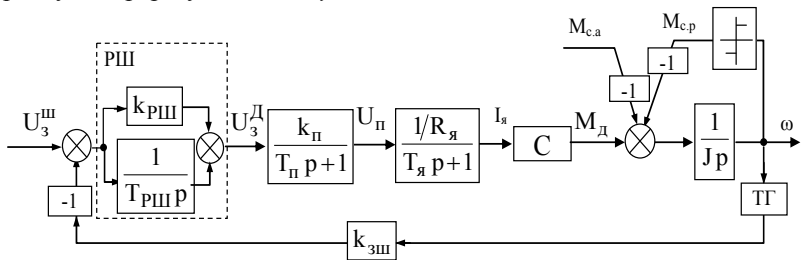


Рис. 1. Структурна схема ЗКРШ з лінійним ПІ-регулятором швидкості (перший тип)

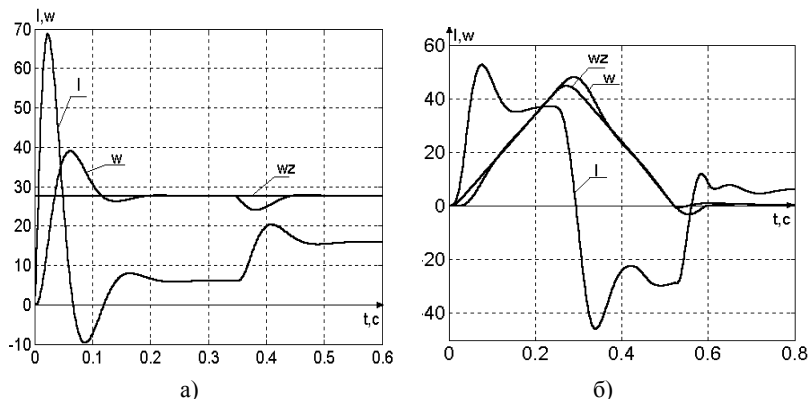


Рис. 2. Осцилограми перехідних процесів ЗКРШ першого типу:
 а) стрибкоподібний сигнал завдання б) лінійно наростаючий сигнал завдання

Сигналом завдання є $\omega_z = 0,0013 \text{ c}^{-1}$, яке виводиться на графік з коефіцієнтом масштабування $21 \cdot 10^3$, як і координата поточної швидкості w . Вибір такого малого значення w_z зумовлений необхідністю забезпечення лінійності ЗКРШ і виключення її роботи на ділянках обмежень. У момент часу 0,36 с відбувається накидання навантаження у виді номінального моменту статичного навантаження 1279 Нм. Досліджуваний ЗКРШ астатично відпрацьовує збурення за навантаженням (рис. 2, а). Робота ЗКРШ відбувається під дією реактивного статичного навантаження, що також враховано під час моделювання. Отримані результати експерименту підтвердили задовільну роботу такого контура регулювання швидкості. Проте, наявність перерегулювання координати швидкості під час виходу на заданий рівень призведе до коливань вихідного валу ВД телескопа. Це є небажаним явищем, враховуючи особливості даного великого ОТ, а також вимоги до кількісно-якісних показників наведення ОТ. Тому було синтезовано і проаналізовано декілька інших варіантів контурів регулювання швидкості, побудованих за допомогою нової методології структурно-алгоритмічного синтезу систем оптимального керування [7, с. 57–63; 8].

Особливості задач АКР детально проаналізовані в [7, с. 54–125], у результаті чого було розроблено методологію структурно-алгоритмічного синтезу СОК, стійких при безмежно великому коефіцієнті підсилення регуляторів, що гарантують бажані динамічні і статичні показники за низької чутливості до широкого спектру дестабілізуючих факторів. У даній роботі використано результати, викладені в [7, с. 31–185], але із адаптацією для даного об'єкта керування ЕП ОТ.

Наприклад, для системи керування, збурений рух якої визначається системою диференціальних рівнянь у формі Коші

$$p\eta_i = \sum_{k=1}^n b_{ik}\eta_k + m_n U, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

де n — порядок системи; η_i — величина відхилення i -ї координати дійсного руху від бажаного; b_{ik} — постійний коефіцієнт, який враховує вплив k -ї координати η_k на i -ту координату керування; m_n — постійний коефіцієнт, U — керуюча дія, закон лінійного керування j -ю координатою є [7, с. 36–43; 8]:

$$U_j = -\frac{g_j}{m_n} \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i, \quad (j \leq n), \quad (3)$$

і мінімізує інтегральний квадратичний функціонал якості

$$I_j = \int_0^{\infty} \left(g_j \left(\sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right)^2 + \frac{m_n^2}{g_j} U_j^2 \right) dt, \quad (4)$$

де j — лічильник кількості координат в розширеному на одиницю фазовому просторі розмірністю $n + 1$, $j = 0, 1, \dots, n$; g_j — коефіцієнт підсилення регулятора j -ї координати; 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 спів-

відношенням $v_{ik}^j = \frac{v_{in}^j v_{kn}^j}{v_{nn}^j}$, ($i, k = 0, 1, \dots, n$). 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 (2).

У результаті попереднього аналізу статичних та динамічних показників, чутливості до параметричних та координатних збурень, а також можливостей технічної реалізації вибрано наступні варіанти СОК, доцільні для подальшого більш детального аналізу з метою застосування в ЕП даного телескопа.

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. Для того ж самого об'єкта керування (2) релейний закон керування j -ю координатою виходячи з (3) і (4) має вигляд [7, с. 44–94, 114; 8]:

$$U_j = -\text{sign} \left(m_n \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right) \quad (5)$$

і мінімізує інтегральний квадратичний функціонал якості

$$I_j = \int_0^{\infty} 2 \left| m_n \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right| dt. \quad (6)$$

Коефіцієнти v_{in}^j знаходяться як і для лінійного керування. Алгоритм оптимального релейного керування, отриманий в результаті структурно-алгоритмічного синтезу модифікованим методом АКР при записі системи диференціальних рівнянь у формі Коші (з-базис), виражається через абсолютні значення змінних і має наступний вигляд відповідно до (5):

$$u_{кри} = u_{км} \text{sign}[\omega^* - \beta_{22}\omega - \beta_{23}I - \beta_{24}E_n], \quad (7)$$

де $u_{кри}$ — напруга оптимального керування регулятора швидкості; $u_{км}$ — максимальне значення напруги керування; ω^* — задана координата швидкості; ω , I , E_n — дійсні значення координат кутової швидкості, струму якоря та ЕРС перетворювача відповідно; β_{ij} — оптимальні коефіцієнти, отримані в результаті синтезу СОК через коефіцієнти v_{in}^j . Коефіцієнти β_{ij} визначаються за виразами з [7, с. 159–163]:

$$\beta_{22} = \frac{T_m}{T_m + T_n}, \quad \beta_{23} = \frac{T_y R_y}{(T_m + T_n)C}, \quad \beta_{24} = \frac{T_n}{(T_m + T_n)C}.$$

На рис. 3 представлена структурна схема контуру регулювання швидкості з релейним регулятором, синтезованим відповідно до (7). Технічна реалізація цього алгоритму не викликає труднощів, оскільки забезпечується контурами з жорсткими від'ємними зворотними зв'язками. Проте системи, синтезовані в η -базисі, є статичними щодо задаючих і збурюючих дій, мають підвищену чутливість до параметричних змін.

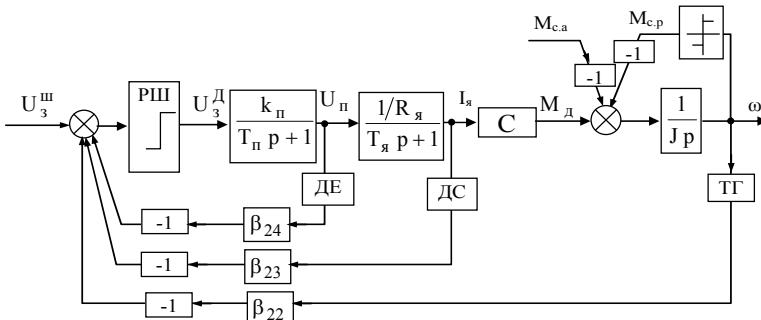


Рис. 3. Структурна схема ЗКРШ з релейним регулятором швидкості, синтезованим в з-базисі (другий тип)

На розробленій в середовищі MATLAB\Simulink моделі, відповідно до структурної схеми ЗКРШ з релейним РШ (ЗКРШ другого типу, рис. 3), було проведено аналогічний попередньому випадку експеримент відпрацювання ЗКРШ стрибкоподібного сигналу завдання та накидання статичного навантаження (рис. 4).

Аналіз результатів підтвердив теоретично очікувані показники статичних і динамічних характеристик такого ЗКРШ. Незаперечною перевагою порівняно до ЗКРШ першого типу є аперіодичний характер перехідного процесу координати швидкості та підвищення швидкодії відпрацювання швидкості більше ніж в 3 рази. Але, враховуючи високі вимоги до точності роботи ЗКРШ, наявність статичної похибки відпрацювання завдання, навіть такого значення як 4,18%, є небажаною. Під час дії координатного збурення у виді моменту статичного навантаження ЗКРШ другого типу також є статичним, що відноситься до недоліків контурів регулювання, синтезованих у з-базисі. Такого явища можна позбутись введенням в алгоритм керування (7) інтегральної складової [7, с. 86–92], та синтезувавши контур швидкості в розширеному з-базисі. Проте, як відомо, інтегральні елементи негативно впливають на стійкість систем.

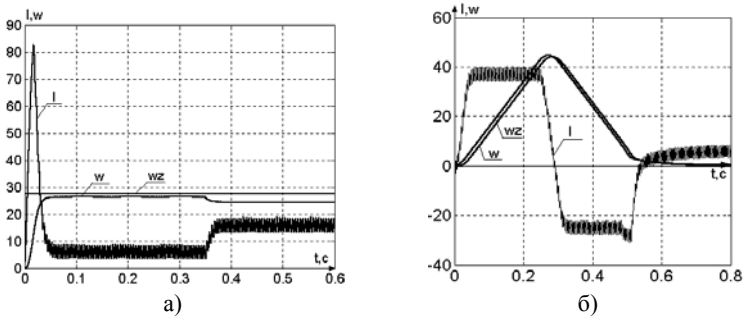


Рис. 4. Осцилограми перехідних процесів ЗКРШ другого типу:
а) стрибкоподібний сигнал завдання б) лінійно наростаючий сигнал завдання

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

Компромісним 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 [7, с. 155–163, 8]:

$$u_{\text{кпу}} = u_{\text{км}} \text{sign}[\omega^* - \omega - \gamma_{22} p\omega - \gamma_{23} pI], \quad (8)$$

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

Коефіцієнти γ_{ij} визначаються за виразами з [7, 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 і низькою чутливістю до параметричних збурень, а їх технічна реалізація не викликає принципових труднощів. На рис. 5 представлена структурна схема ЗКРШ з релейним регулятором, синтезованим відповідно до (8).

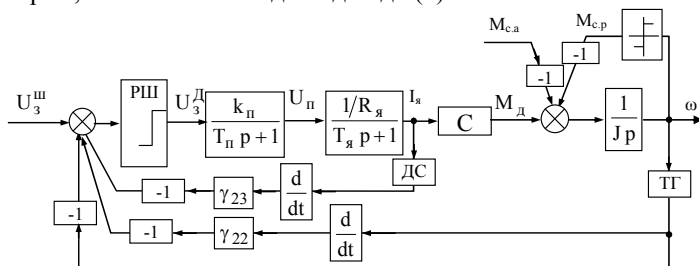


Рис. 5. Структурна схема ЗКРШ з релейним регулятором швидкості, синтезованим в рз-базисі (третій тип)

На розробленій в середовищі MATLAB/Simulink моделі ЗКРШ з релейним РШ (ЗКРШ третього типу, рис. 5) було проведено експеримент відпрацювання ЗКРШ стрибкоподібного сигналу завдання та накидання статичного навантаження (рис. 6, а).

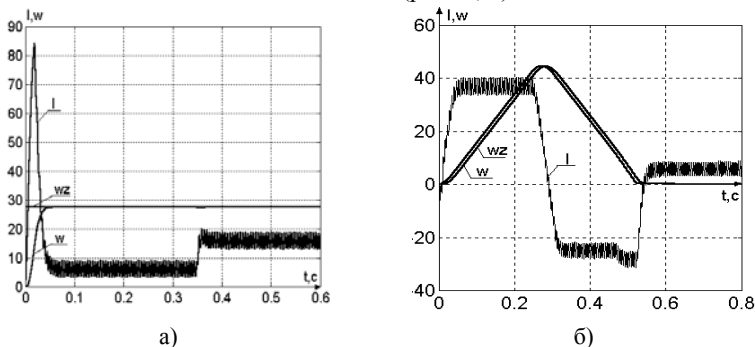


Рис. 6. Осцилограми перехідних процесів ЗКРШ третього типу: а) стрибкоподібний сигнал завдання б) лінійно наростаючий сигнал завдання

Аналіз результатів підтвердив теоретично очікувані показники статичних і динамічних характеристик такого ЗКРШ. ЗКРШ третього типу володіє усіма перевагами контуру швидкості другого типу, але позбавлений недоліків статизму по відношенню до 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 мають місце у ЗКРШ першого типу. Величина квадратичної інтегральної оцінки (КІО) для ЗКРШ першого типу під час відпрацювання завдання є в 1,57 разів більша за величину КІО ЗКРШ третього типу і є набагато більшою за величину КІО ЗКРШ другого і третього типів під час накидання статичного навантаження, що також свідчить на користь останньої.

На вказаних комп'ютерних моделях було проведено експеримент відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання із однаковою швидкістю його наростання і спадання, наприклад $d\omega/dt = 0,0262 \text{ c}^{-2}$. Основні осцилограми представлені на рис. 2,б; 4,б; 6,б відповідно. Аналізуючи отримані результати, можна зауважити, що в ЗКРШ першого типу відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу відбувається без усталеної динамічної похибки, проте у початкові моменти пуску і гальмування спостерігається значне відхилення координати швидкості від заданого значення (на початку запуску величиною до 80 %). У ЗКРШ другого і третього типів відпрацювання координатою швидкості лінійно-наростаючого сигналу відбувається з усталеною динамічною похибкою, яка для ЗКРШ третього типу в 1,4 рази менша порівняно з усталеною динамічною похибкою, яка отримується в контурі керування другого типу. У ЗКРШ другого і третього типів перехідний процес у загальному є більш монотонний, про що свідчить зменшення величини КІО в 1,37 рази для контуру другого типу і в 1,4 рази для контуру третього типу порівняно з КІО, яка отримується в контурі регулювання першого типу.

Наявність динамічної похибки у ЗКРШ другого і третього типів є можливою, враховуючи підвищення монотонності відпрацювання завдання. Також в процесі роботи ЗКРШ в контурі регулювання положення динамічна похибка під час наростання швидкості буде компенсуватися такою ж похибкою, але протилежного знаку. Під час режиму слідкування основною координатою регулювання є положення валу ВД.

Також було досліджено ЗКРШ на чутливість до параметричних збурень у вигляді зміни опору якірного кола R_j виконавчого двигуна та моменту інерції J азимутальної осі повороту. Аналіз результатів показав задовільну роботу усіх типів ЗКРШ під час зменшення опору якірного кола на 20%. Під час роботи ЕП з опором, збільшеним на 20% від номінального, відбувається зниження швидкодії відпрацювання завдання швидкості для ЗКРШ першого типу у 1,5 рази, а для

другого і третього швидкодія така ж сама. Статичні і динамічні характеристики усіх ЗКРШ під час відпрацювання накидання навантаження залишаються такі ж самі, але у всіх ЗКРШ відбувається збільшення величини відхилення координати швидкості від її заданого значення під дією статичного навантаження $\Delta\omega_{зб}$, що свідчить про негативний вплив збільшення величини $R_{я}$. Але у ЗКРШ третього типу КЮ є набагато, в 131 разів, менша за КЮ першого типу, що свідчить на користь третього типу.

Проведено експерименти під час зміни моменту інерції J азимутальної осі порівняно з номінальним J . Під час зменшення J в 2 рази спостерігається підвищення в 1,5 рази швидкодії для ЗКРШ першого типу разом із підвищенням коливності перехідного процесу швидкості, про що свідчить збільшення у 1,3 рази величини перерегулювання u . У ЗКРШ другого типу з'являється незначне перерегулювання швидкості, її перехідний процес закінчується у 1,5 рази швидше, а статична похибка залишається майже така ж сама. У ЗКРШ третього типу основні показники перехідного процесу залишаються без змін. У всіх контурах швидкості спостерігається незначне зменшення КЮ. Було проведено експеримент відпрацювання завдання швидкості з моментом інерції, збільшеним в 2 рази. Його результати показали добру роботу усіх ЗКРШ без суттєвого погіршення статичних і динамічних характеристик.

Порівнюючи основні показники роботи ЗКРШ між собою під час дії параметричних збурень, можна зауважити, що найменш чутливою до зміни J є ЗКРШ третього типу, про що свідчать майже незмінні її характеристики перехідного процесу швидкості.

Висновки. Найкращі статичні і динамічні показники перехідного процесу координати швидкості спостерігаються у ЗКРШ третього типу, які полягають в аперіодичному відпрацюванні завдання з астатизмом першого порядку із максимальною швидкодією. Під час впливу координатного збурення у вигляді накидання статичного навантаження, також ЗКРШ третього типу забезпечує найкращий з трьох варіантів СОК процес астатичного відновлення швидкості з меншим, порівняно зі ЗКРШ першого типу, перерегулюванням. Під час відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання у ЗКРШ першого типу відсутня усталена динамічна похибка, проте у загальному перехідний процес у ЗКРШ третього і другого типів є більш монотонний, про що свідчить менше значення КЮ. Наявність невеликої динамічної похибки у ЗКРШ третього типу є допустимою, враховуючи його роботу у замкнутому контурі регулювання переміщення валу ВМД.

ЗКРШ з релейним регулятором швидкості, синтезованим у rz -базисі, відрізняється від інших варіантів меншою чутливістю до дії параметричних збурень. Під час дії координатних збурень ЗКРШ

першого і третього типів є астатичними, проте в третьому випадку динамічний спад швидкості і час її відновлення є значно меншими. Тому для регулювання швидкості обертання валу двигуна ОТ було вибрано ЗКРШ третього типу з релейним регулятором швидкості, який працює в ковзному режимі, побудованим у pz -базисі. Для подальших досліджень планується створення цифрових моделей ЗКРШ на основі рекурентних формул з використанням z -перетворення. Такі дослідження є актуальними оскільки планується цифрова реалізація як ЗКРШ, так і цілої САК ЕП ОТ.

Список використаних джерел:

1. Оптические и информационные телескопы 90-х годов / [Ф. Джиллет, А. Лабейри, Дж. Нельсон и др.]; пер. с англ. — М. : Мир, 1983. — 195 с.
2. Leonardi F. PM motors for direct driving optical telescope / F. Leonardi, M. Venturini, A. Vismara // IEEE, Industry Applications Magazine. — 1996. — Vol. 2, № 4. — P. 10–16.
3. Прецизійний тихохідний безредукторний безконтактний електропривід / Ю. І. Чучман, І. З. Щур, М. В. Черепаняк, В. М. Журкіна // Електроінформ. — 2006. — №45. — С. 11–13.
4. Ткачук В. І. Електромеханотроніка : навч. посіб. / В. І. Ткачук — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. — 404 с.
5. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням : навч. посіб. / Я. Ю. Марущак. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. — 208 с.
6. Журкіна В. М. Моделювання системи автоматичного керування позиційним електроприводом телескопа / В. М. Журкіна // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2003. — № 485: Електроенергетичні та електромеханічні системи. — С. 49–54.
7. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. — К. : ИСИМО, 1996. — 298 с.
8. Щур І. З. Система оптимального прецизійного керування позиційним електроприводом інформаційного телескопа / І. З. Щур, В. М. Журкіна // Вісник Харківського Національного технічного університету «ХП». — 2003. — № 41. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. — С. 159–163.

For the perspective big optical telescopes used direct electric drive, based on a torque brushless motor with rotor position sensor. Several variants of the speed optimal for the executive motor of the telescope speed control was synthesized as a result of solving the problem of regulators analytical design, which are stable in infinitely large gain at the expense of the relay element in the sliding mode.

Key words: *optical telescope, optimal speed control, relay controller.*

Отримано: 24.02.2014