

УДК 62-83:621.313.2

В. М. Оксентюк

Національний університет "Львівська політехніка",
СКБ Електромеханічних систем

ПОЗИЦІЙНО-СЛІДКУЮЧИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ОПТИЧНОГО ТЕЛЕСКОПА ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

© Оксентюк В. М., 2014

*Синтезовано систему керування електроприводу оптичного телескопа для автоматизації процесів спостереження в режимах роботи позиціонування і слідування з метою забезпечення різних кількісно-якісних показників роботи телескопа у вказаних режимах. Розроблено математичні та комп'ютерні моделі системи керування в режимах позиціонування і слідування. Результати комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink розробленої системи керування підтвердили теоретично отримані результати.
Ключові слова: електропривод телескопа, змінна структура системи керування, оптимальне керування.*

The control system of optical telescope electric drive, which is used for automation of observation processes in positioning and tracking modes to ensure the quality of various quantitative parameters of the telescope in these modes, is synthesized. Mathematical and computer control system models in modes of positioning and tracking were developed. The results of computer simulation in MATLAB / Simulink of developed control system confirmed the theoretical results.

Key words: telescope electric drive, variable structure control systems, optimal control.

Постановка проблеми. У роботі розглядається великий оптичний телескоп-рефлектор (ОТ), що відзначається масою дзеркала близько 20 т і відповідно великим моментом інерції – близько 160 000 кг·м² для азимутальної осі повороту. У загальному електропривод (ЕП) ОТ повинен забезпечити наведення труби телескопа в задану точку небосхилу із заданою точністю в основних та допоміжних режимах роботи за умов дії координатних та параметричних збурень. При цьому рух має бути плавним і рівномірним з особливо високою точністю. ОТ може працювати в режимі позиціонування, коли необхідно перемістити трубу телескопа на заданий кут (так зване переключення), в режимі слідування – коли необхідно стежити за об'єктом спостереження, що рухається, а також в інших допоміжних режимах роботи [1].

До силового ЕП ОТ, що працює в режимі слідування за об'єктом спостереження і режимі позиціонування, висувають різні вимоги [1]. Під час роботи в режимі слідування ЕП повинен забезпечити як необхідну статичну і динамічну точність, так і плавність стеження для запобігання так званих зривів стеження. Робота в режимі позиціонування визначається граничними кутовими швидкостями труби телескопа, яку може забезпечити система автоматичного керування (САК) на основі тактико-технічних вимог, що ставлять до телескопа загалом. Позиціонування труби ОТ на заданий кут повинно відпрацьовуватися без статичної похибки з обмеженням координат кутової швидкості, кутового прискорення $\varepsilon_{max} = 1,5^\circ/c^2$, динамічного моменту – $M_{max}^{dyn} = 4020 \text{ Нм}$. Однією з особливостей великих ОТ, наприклад, такого, як розглядається в цій роботі, є наявність високоточного оптичного обладнання. До його умов експлуатації, зокрема температурного режиму, висувають дуже жорсткі вимоги, порушення яких негативно впливає на умови роботи системи наведення [1]. Для виконання цієї умови необхідно обмежити перегрівання обмоток ВД, для цього ОТ на рівні 10°C згідно з умовами експлуатації [1]. Тому під час роботи ОТ в режимі позиціонування необхідно обмежувати нагрівання обмоток виконавчого двигуна із забезпеченням усіх решта вимог.

Під час роботи ЕП телескопа як в режимі слідкування, так і в режимі позиціонування можливі параметричні і координатні збурення, які негативно впливають на якість отриманого зображення і тому САК оптичного телескопа повинна бути мінімально чутливою до таких збурень. До того ж через дію реактивної складової статичного навантаження та великі маси рухомих частин ОТ, САК повинна бути налаштована так, щоби забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу координати положення.

Оскільки вимоги, які висувають до режиму позиціонування і слідкування, істотно відрізняються, тому існує необхідність розроблення САК, яка би розрізняла ці режими, тобто була диференційованою за режимами роботи ОТ. Це можливо здійснити за допомогою застосування САК із змінною структурою залежно від режиму роботи ОТ.

Аналіз останніх досліджень. У режимах роботи ОТ - позиціонування і слідкування - статичні і динамічні характеристики ЕП під час відпрацювання сигналу завдання, які необхідно забезпечити системою керування, відмінні. Тому для побудови підсистем керування ЕП телескопа та синтезування регуляторів у режимах слідкування і позиціонування використано різні підходи та методи.

Для синтезування системи керування в режимі позиціонування застосовано принцип оптимального за нагріванням обмоток двигуна керування з врахуванням обмеження прискорення і ривка [2]. На основі визначених оптимальних діаграм струму, швидкості розроблено програмний пристрій керування під час роботи ОТ в режимі позиціонування. Результати, отримані в [2], використано в цій роботі.

Для побудови САК ОТ в режимі слідкування застосовано комбінований принцип керування, математичною базою якого є теорія інваріантності. Це дало можливість забезпечити астатизм другого порядку відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання. У [3] порівняно нескладну методику розрахунку параметрів компенсуючих ланок, залежно від того, вплив конкретно яких компонент похибки сигналу завдання необхідно знешкодити. Проте немає конкретних рекомендацій щодо поєднання таких двох принципів керування: оптимального відносно нагрівання та комбінованого.

Для синтезування системи керування швидкістю привідного двигуна ЕП ОТ як в режимі позиціонування, так і в режимі слідкування застосовано принцип оптимального за швидкодією керування [4, 5]. За допомогою методу аналітичного конструювання регуляторів [5] синтезовано релейний регулятор та побудовано замкнутий контур регулювання швидкості, стійкий при безмежно великому коефіцієнті підсилення. Це дало можливість отримати аперіодичний характер відпрацювання завдання швидкості з астатизмом першого порядку із максимальною швидкодією та мінімальною чутливістю до дії параметричних та координатних збурень.

Для забезпечення різних вимог у режимах позиціонування і слідкування однією системою керування необхідно застосувати принцип змінної структури САК [6]. Не достатньо з'ясованими є питання роботи в режимі слідкування з погляду обмеження прискорення і ривка. Запропонована в [7] структура САК з перемиканням структури за сигналом положення потребує подальшого дослідження для отримання точного позиціонування цього ЕП ОТ.

Задачі досліджень. У роботі поставлено завдання розроблення системи автоматичного керування зі змінною структурою залежно від режиму роботи ОТ для слідкування і позиціонування.

Виклад основного матеріалу.

Розроблено двоканальну САК зі змінною структурою з окремими каналами керування ЕП в режимах позиціонування і слідкування та автоматичним перемиканням режимів роботи, функціональна схема якої показана на рис. 1. Вона складається із замкнутого контуру регулювання швидкості (ЗКРШ), підсистеми оптимального за нагріванням програмного керування в режимі позиціонування (ПОПК), підсистеми керування в режимі слідкування (ПС), керованого ключа К1 для перемикання структури САК, блока керування ключем БКК1, блока обмеження прискорення і ривка (БОПР), давача положення ДП. Блоком ЗКРШ зображено замкнуту систему регулювання швидкості, побудовану на основі релейного регулятора швидкості.

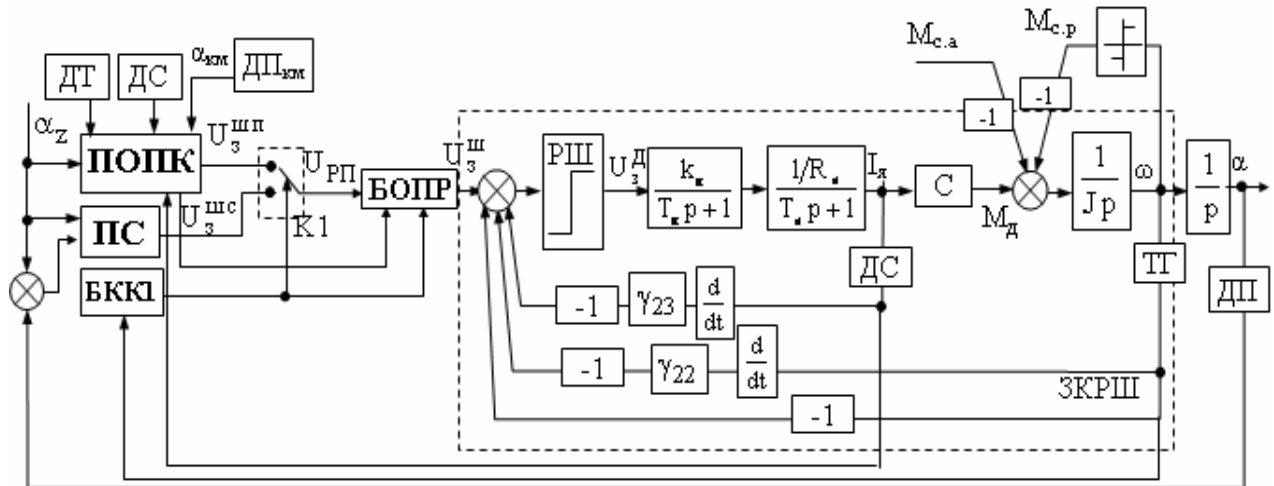


Рис. 1. Функціональна схема позиційно-слідкуючого ЕП ОТ з САК зі змінною структурою

Розглянемо окремі функціональні частини цього ЕП ОТ. Для забезпечення високих статичних і динамічних показників якості роботи ОТ використання традиційних редукторних систем ЕП є проблематичним, тому для цього телескопа використано безредукторний ЕП з вентильним моментним двигуном постійного струму (МДПС) [8]. Враховуючи високі вимоги до швидкодії ЕП, було вибрано для керування МДПС широтно-імпульсний перетворювач на базі IGBT-модулів. Параметри досліджуваного ЕП телескопа мають такі значення: $M_H = 8750,8 \text{ Нм}$; $M_C = 1279 \text{ Нм}$; $I_H = 66,8 \text{ А}$; $\omega_H = 0,37 \text{ рад/с} = 21 \text{ град/с}$; $T_M = 6,5 \text{ с}$; $J = 153564 \text{ Нм}$.

Побудований на базі МДПС безредукторний тихохідний ЕП телескопа має певні особливості: можливість роботи привідного МДПС у режимі короткого замикання; навантаження на валу виконавчого двигуна у вигляді значного реактивного статичного моменту, що створюється силами сухого та незначного в'язкого тертя через значну масу телескопа; мала електромагнітна стала часу якорного кола і порівняно з останньою велика електромеханічна стала часу ЕП. Особливість моментного двигуна, який розглядається в роботі, полягає у можливості його недовготривалої роботи в режимі короткого замикання на природній характеристиці та у достатньо малій величині електромагнітної сталої часу якорного кола. Тому в контурі регулювання струму якорного кола МДПС немає необхідності і в подальшому аналізі він вилучається зі складу САК. Отже, САК регулювання швидкості є одноконтурною, що забезпечить її швидкодію.

Під час роботи ЕП телескопа як в режимі слідкування, так і в режимі позиціонування можливі такі параметричні збурення: зміна опору якорних обмоток внаслідок значних температурних коливань; зміна магнітного потоку; кутова нерівномірність моменту двигуна; полюсні та зубцеві пульсації, кутова нерівномірність та нелінійність крутизни тахогенератора при широкому діапазоні регулювання швидкості; зміна моменту інерції внаслідок зміни положення рухомих частин телескопа тощо. До координатних збурень такої системи можна, насамперед, віднести коливання моменту статичного навантаження, специфіка якого зумовлена наявністю активної складової дії вітрового навантаження, через розташування телескопа, зазвичай, на високих відкритих гірських місцевостях. Момент статичного навантаження має також постійно діючу змінну реактивну складову моменту, що створюється силами тертя в механічних конструкціях і при перетягуванні кабелів. Усі ці фактори негативно впливають на якість отриманого зображення і тому САК ЕП оптичного телескопа має бути мінімально чутливою до параметричних та координатних збурень. До того ж через дію реактивної складової статичного навантаження та великі маси рухомих частин ОТ САК повинна бути налаштована так, щоби забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу.

Для отримання заданих показників перехідного процесу координати швидкості було синтезовано і досліджено три варіанти ЗКРШ [5]: з лінійним регулятором пропорційно-інтегрального типу; з релейними регуляторами, синтезованими в η -базисі та $r\eta$ -базисі за методологією структурно-алгоритмічного синтезу систем оптимального за швидкодією керування, стійких при безмежно великому коефіцієнті підсилення. Проведені порівняння результатів дослідження цих варіантів показали, що найкращі статичні і динамічні характеристики перехідних процесів відпрацювання стрибкоподібного і лінійно наростаючого сигналів завдання, а також під час дії параметричних і координатних збурень, властиві останньому варіанту ЗКРШ із законом керування [4, 5]:

$$u_{крш} = u_{км} \text{sign}[\omega^* - \omega - \gamma_{22} p\omega - \gamma_{23} pI] \quad (1)$$

де $p\omega$ – перша похідна координати швидкості; pI – перша похідна координати струму.

Коефіцієнти g_{ij} визначаються з [4]

$$g_{22} = \frac{T_M(T_J + T_n)}{T_M + T_n}, \quad g_{23} = \frac{T_J T_n R_J}{(T_M + T_n)C}, \quad (2)$$

де T_n, T_J, T_M – сталі часу перетворювача, якірного кола МДПС та електромеханічна, відповідно, R_J – опір якірного кола ВМД.

ЗКРШ забезпечує астатизм першого порядку за стрибкоподібним сигналом завданням і під час накидання навантаження, майже в три рази менший час відновлення швидкості і в 8 разів менша динамічна похибка швидкості порівняно із першим варіантом [5]. ЗКРШ з релейним регулятором швидкості, синтезованим у $r\eta$ -базисі, відрізняється від інших варіантів меншою чутливістю до дії параметричних збурень.

До складу ОТ входять високоточні та дорогі оптико-електронні та механічні пристрої. Відсутність редуктора дозволяє підвищити точність позиціонування, проте в такому випадку істотно погіршується демпфування механічних ударів, які мають негативний вплив на зазначені пристрої. Також, враховуючи малу електромагнітну сталу часу якірного кола двигуна (порядку 0,006 с) електричне демпфування механічних ударів не забезпечує достатнього обмеження швидкості наростання струму, а отже і ривка. Тому, враховуючи також велику електромеханічну сталу часу ЕП, необхідно забезпечити обмеження координат прискорення і ривка під час перехідних процесів, які формуються, враховуючи з оптимальне за нагріванням керування.

Під час режиму позиціонування мірою ефективності роботи ОТ є величина переміщення вала ВД. У [2] розв'язано задачу оптимального за нагріванням керування: визначено такі часові функції струму і швидкості, що забезпечують мінімальні втрати в обмотках ВД при заданому значенні кута переміщення труби ОТ та за наявності рівняння зв'язку відповідно до електромеханічної характеристики двигуна постійного струму з постійним збудженням з врахуванням обмежень координат прискорення і ривка. Координати прискорення і ривка підтримуються на своєму допустимому рівні для забезпечення максимальної швидкодії відпрацювання заданого кута. Отримані діаграми (рис. 2) ілюструють перехідні процеси відпрацювання заданого переміщення для кутів як для трикутної, так і трапецеподібної тахограм. Діаграми $i(\tau), v(\tau)$ складаються з:

1) ділянок лінійного наростання та спадання струму і прискорення під час рушання та зупинки відповідно, коли координата ривка ρ обмежується своїм допустимим значенням ρ_{lim}^* , на інтервалах $[0; \tau_p]$ та $[(\tau_z - \tau_p); \tau_z]$; швидкість має параболічний характер;

2) ділянок обмеження струму і прискорення допустимими значеннями $i_{d.lim}, \epsilon_{lim}^*$, відповідно, на інтервалах $[\tau_p; (\tau_p + \tau_{\epsilon 1})]$ і $[(\tau_z - (\tau_{\epsilon 2} + \tau_p)); (\tau_z - \tau_p)]$; швидкість має лінійний характер;

3) ділянки на інтервалі $\tau_{opt} = (\tau_z - (\tau_{\epsilon 2} + \tau_p)) - (\tau_p + \tau_{\epsilon 1})$, що визначаються екстремалами; швидкість має параболічний характер.

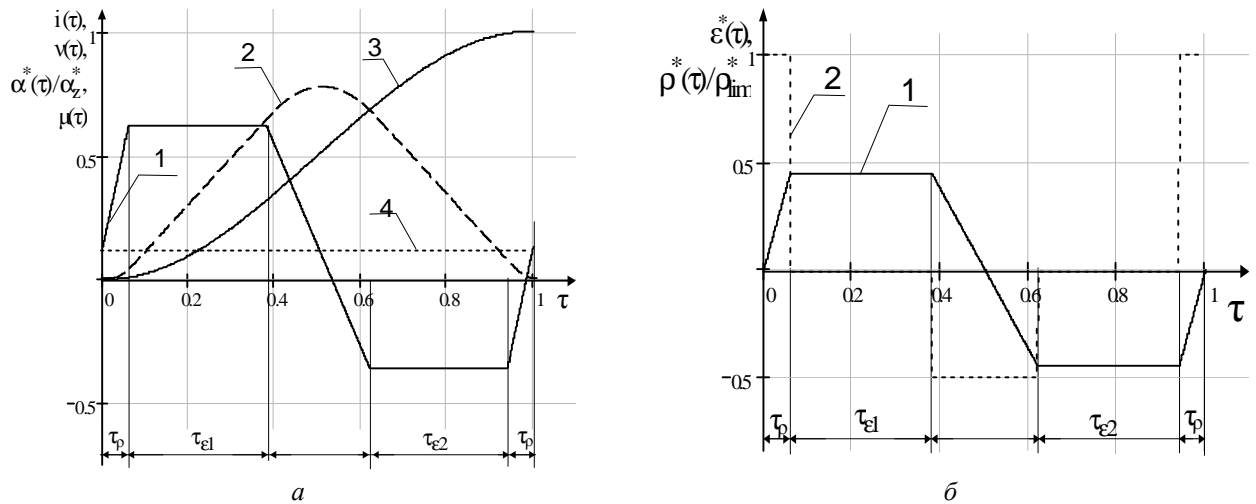
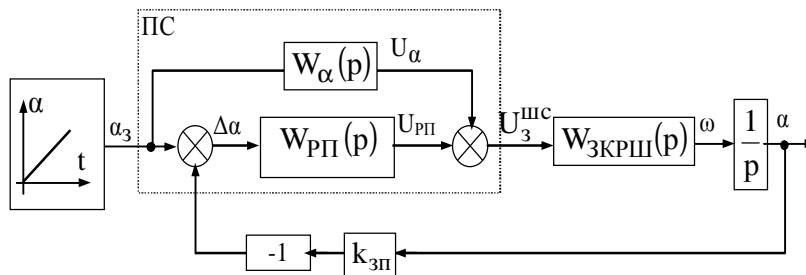


Рис. 2. Перехідний процес відпрацювання заданого переміщення з оптимізацією нагрівання:
 а – крива 1 – струм, крива 2 – швидкість, крива 3 – положення, 4 – статичне навантаження;
 б – крива 1 – прискорення, крива 2 – ривок

На основі отриманих аналітичних залежностей було розроблено підсистему оптимального за нагріванням програмного керування (ПОПК) ОТ в режимі позиціонування [2]. Вхідними сигналами ПОПК (рис.1) є величина кута переключення α_z , повного струму двигуна $I_{я}$, кута переключення кутомісної осі наведення $\alpha_{км}$. Вихідним сигналом є оптимальна за нагріванням діаграма швидкості - сигнал U_3^{un} завдання швидкості, який відпрацьовується контуром ЗКРШ з астатизмом першого порядку. На початку переключення виміряні сигнали M_c від давача струму у ДС, J від ДП_{км}, $\Delta t^\circ\text{C}$ від давача температури ДТ подаються у ПОПК для врахування їх під час оптимізації керування за нагріванням. Потім відбувається переключення труби ОТ на заданий кут α_z з оптимальною за нагріванням двигуна діаграмою швидкості, параметри якої (i відсоток збільшення часу позиціонування $\Delta\tau\%$ також) визначені на початку сеансу позиціонування з врахуванням M_c , J , $\Delta t^\circ\text{C}$. Сигнали від ДС, ДП_{км} і ДТ подаються у ПОПК неперервно у часі, оскільки вони можуть змінюватися. Тому і розрахунок параметрів у всіх блоках ПОПК відбувається також безперервно в часі для можливості їх адаптації.

Під час роботи ОТ в режимі слідування ЕП наведення труби телескопа повинен відпрацьовувати змінний у часі сигнал завдання. Як відомо [3], зведення динамічної похибки відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання практично до нульового значення без підвищення порядку астатизму та коефіцієнта підсилення замкнутої системи керування можливо за рахунок введення ланки прямого додаткового каналу керування за завданням та побудови комбінованої системи керування. У такому випадку підсистема керування в режимі слідування ПС має у своєму складі регулятор положення з $W_{PI}(p)$ та додаткову ланку за завданням з $W_\alpha(p)$, які сполучені за схемою, показаною на рис. 3. Вхідними сигналами ПС є сигнали завдання α_3 і реального положення α . Вхідним сигналом блока $W_{PI}(p)$ є сигнал $\Delta\alpha$ різниці сигналів завдання і реального положення вала α , а вхідним сигналом блока $W_\alpha(p)$ є сигнал завдання α_3 . На виході ПС формується сигнал завдання швидкості U_3^{uc} шляхом додавання сигналів U_α і U_{PI} . Сформований так сигнал U_3^{uc} відпрацьовується ЗКРШ з астатизмом першого порядку.

Рис. 3. Структурна схема САК ЕП наведення труби ОТ, що працює в режимі слідування



За базовий варіант системи керування ОТ прийнято САК, побудовану за принципом підпорядкованого керування. У такому випадку замкнутий контур регулювання положення під час роботи ОТ в режимі слідування налаштований на технічний оптимум, а регулятор положення РП є пропорційного типу і має таку передавальну функцію:

$$W_{РП}(p) = k_{РП} = \frac{k_{зу}}{8T_{\mu} k_{зн}}, \quad (3)$$

де $k_{РП}$ – коефіцієнт підсилення регулятора положення; $k_{зу}$, $k_{зн}$ – коефіцієнти зворотних зв'язків за швидкістю та положенням відповідно; T_{μ} – мала некомпенсована стала часу в ЗКРШ.

Для подальшого синтезу ЗКРШ може бути еквівалентно представлений аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією

$$W_{ЗКРШ}(p) = \frac{1/k_{зу}}{4T_{\mu} p + 1}. \quad (4)$$

Як показано в [3], передавальна функція $W_{\alpha}(p)$, що забезпечує виконання умови абсолютної інваріантності, обернено пропорційна до частини електромеханічної системи, виокремленої після точки додавання сигналу прямого розімкнутого каналу. Очевидно степінь чисельника передавальної функції більший від степеня її знаменника, що суперечить умові фізичної реалізації. Це свідчить про неможливість досягнення абсолютної інваріантності системи за завданням. До того ж на практиці часто виникає необхідність компенсації основних компонентів похибки системи. У такому разі доцільно замінити $W_{\alpha}(p)$ функцією, яку можливо фізично реалізувати, враховуючи конкретні техніко-технологічні умови. Як показано в [3], для систем, аналогічних до такої, що розглядається у цьому випадку (рис. 3) і для забезпечення другого порядку астатизму системи за завданням, додаткова ланка за завданням має бути реальним диференціатором з передавальною функцією:

$$W_{\alpha}(p) = \frac{T_2 p}{T_3 p + 1}, \quad (5)$$

де T_2 , T_3 – невідомі сталі часу коригуючої ланки.

Процедура визначення невідомих параметрів детально описана в [3]. Спочатку запишемо передавальну функцію системи (рис. 3) по відношенню до завдання

$$W_3^C(p) = \frac{(k_{зу} T_3 + 8T_{\mu} k_{зн} T_2) p + k_{зу}}{(32T_{\mu}^2 p^2 + 8T_{\mu} p + 1)(T_3 p + 1) k_{зу} k_{зн}}. \quad (6)$$

Параметри коригуючої ланки прямого додаткового зв'язку визначаємо з умови, щоб коефіцієнт похибки C_1 був нульовим. Для цього прирівнюємо коефіцієнти при першому степені оператора p чисельника та знаменника і визначимо T_2 :

$$T_2 = \frac{k_{зу}}{k_{зн}}. \quad (7)$$

Величиною сталої часу задамося: $T_3 = 0,001$ с.

У середовищі MATLAB\Simulink розроблена комп'ютерна модель ЕП телескопа під час роботи в режимі слідування, структурна схема якої відповідає рис.3, але з БОПР на вході ЗКРШ.

Сигнал завдання формується як лінійно-наростаючий сигнал з певним темпом наростання. Блок БОПР виконує комплексну функцію обмеження інтенсивності: контролює першу і другу похідну сигналу завдання швидкості U_{PI} .

Було проведено серію експериментів відпрацювання системою лінійно наростаючого сигналу положення без додаткової ланки за завданням (рис.4, а) та з нею без обмежень координат прискорення і ривка (рис. 4, б), за наявності обмеження лише прискорення (рис. 4, в), за наявності обмежень прискорення і ривка (рис. 4, г). На рис. 4 позначено: az - завдання положення, a - реальне положення вала, I - струм, w - швидкість. Наприклад, для звичайного режиму слідкування темп наростання вхідного сигналу переміщення становить $0,0017 \text{ рад/с}$ ($0,1^\circ/\text{с}$), для якого і було знято осцилограми (рис. 4). У системі керування, яка працює без додаткової ланки за завданням, усталена динамічна похибка відпрацювання переміщення становить $31''$, що є недопустимо, враховуючи вимоги до точності слідкування. Під час роботи з ланкою додаткової дії за завданням (рис. 4, б) усталена динамічна похибка $\Delta\alpha_{у,дин}$ зменшується в 21 раз та становить $1,5''$, за рахунок форсування струму якірного кола (майже у 3 рази порівняно до рис. 4, а). На $0,1 \text{ с}$ зменшується час відпрацювання t_y до усталеного значення переміщення.

Необхідне обмеження прискорення не погіршує динаміку усталеного спостереження (рис.4, в), але призводить до збільшення перерегулювання положення, максимальної динамічної похибки під час запуску ЕП і зупинки ЕП. Обмеження координати ривка (рис.4, г) призводить до збільшення $\Delta\alpha_{у,дин}$ в 2,7 разів порівняно до попереднього варіанта, збільшення в 1,8 разів перерегулювання положення під час зупинки ЕП, незначного збільшення t_y та величини максимальної динамічної похибки під час запуску ЕП. У загальному обмеження координат прискорення і ривка призводить до незначних погіршень динамічних і статичних показників слідкування, але при цьому забезпечуються необхідні технічні вимоги до режиму слідкування, які підвищують якість останнього.

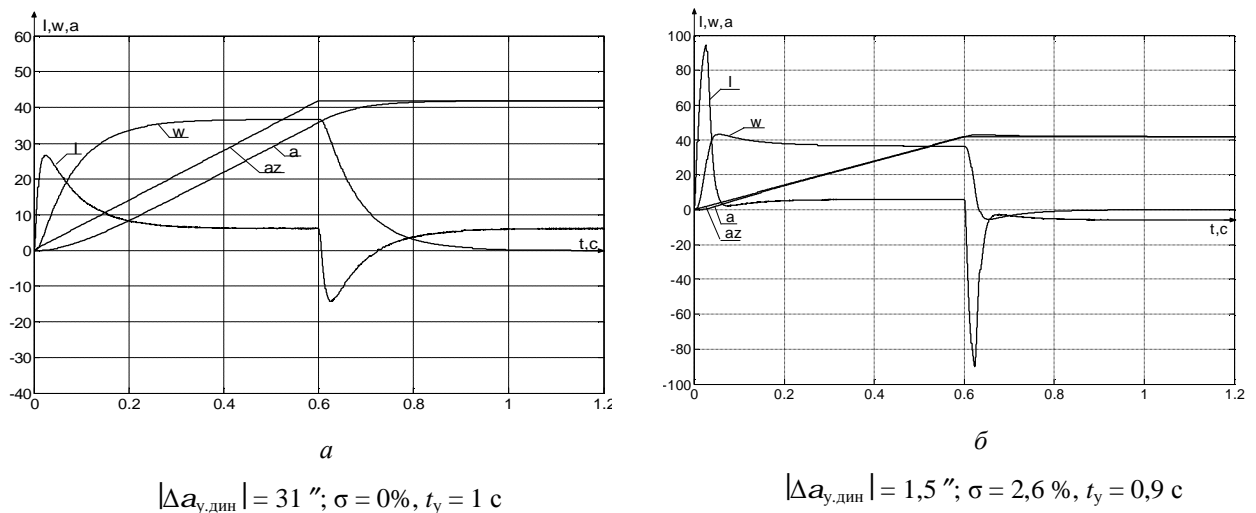


Рис. 4. Осцилограми перехідних процесів і показники якості регулювання під час відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання положення (координати кутової швидкості і положення наведені з масштабними коефіцієнтами 1900ж, 2500ж):

- а – без додаткової ланки за завданням і без обмежень прискорення і ривка;
- б – з додатковою ланкою за завданням і без обмежень прискорення і ривка;
- в – з додатковою ланкою за завданням, з обмеженням прискорення і без обмеження ривка;
- г – з додатковою ланкою за завданням, з обмеженням прискорення і ривка

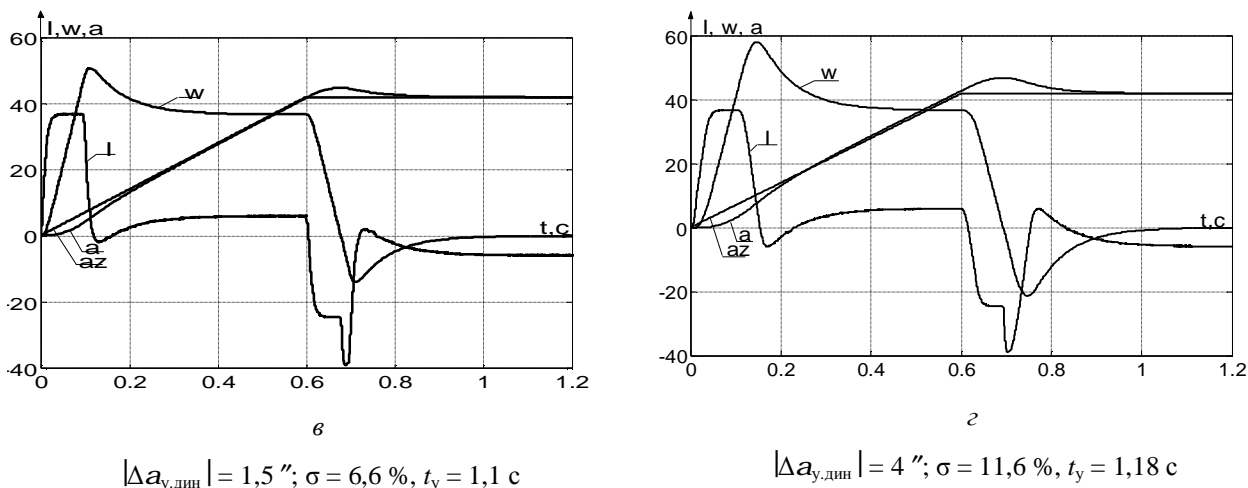


Рис. 4. (Продовження). Осцилограми перехідних процесів і показники якості регулювання під час відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання положення (координати кутової швидкості і положення наведені з масштабними коефіцієнтами 1900х, 2500х):
 а – без додаткової ланки за завданням і без обмежень прискорення і ривка;
 б – з додатковою ланкою за завданням і без обмежень прискорення і ривка;
 в – з додатковою ланкою за завданням, з обмеженням прискорення і без обмеження ривка;
 г – з додатковою ланкою за завданням, з обмеженням прискорення і ривка

Попередньо розроблені підсистеми об'єднані в САК ОТ зі змінною структурою системи керування відповідно до функціональної схеми рис.1. Під час роботи в режимі слідкування сигнал завдання швидкості формується як лінійно-наростаючий сигнал переміщення з певним темпом наростання і подається на ЗКРШ через БОПР (рис. 5). Останній контролює першу і другу похідні сигналу завдання швидкості U_{PI} . Контроль прискорення здійснюється ланкою обмеження темпу наростання ЗІ 1: сигнал завдання U_{PI} передається без змін, коли його перша похідна знаходиться в межах допустимого прискорення, і обмежується лінійно наростаючим чи спадаючим сигналами з допустимими темпами, що відповідають ϵ_{lim} у випадках перевищення. Для обмеження другої похідної сигналу U_{PI} вихід ЗІ 1 під'єднано до блока обмеження ривка ОР, який складається з послідовно з'єднаних ланок диференціювання ($\frac{du}{dt}$), ЗІ 2 та інтегрування ($\frac{1}{p}$). Під час роботи ОТ в режимі слідкування вхідний сигнал для БОПР містить форсуючу складову внаслідок дії прямої додаткової ланки. Перша похідна U_{PI} матиме велике значення і в разі її перевищення величини $\pm\epsilon_{lim}$ буде вступати в дію блок ЗІ 1. Далі сигнал з виходу ЗІ1 подається в блок ОР, де аналізується його похідна, і у разі її перевищення величини $\pm\rho_{lim}$ обмежується останньою. Відбувається формування сигналу U_3^{usc} з обмеженням прискорення і ривка та з одночасним забезпеченням астатизму другого порядку за дією завдання.

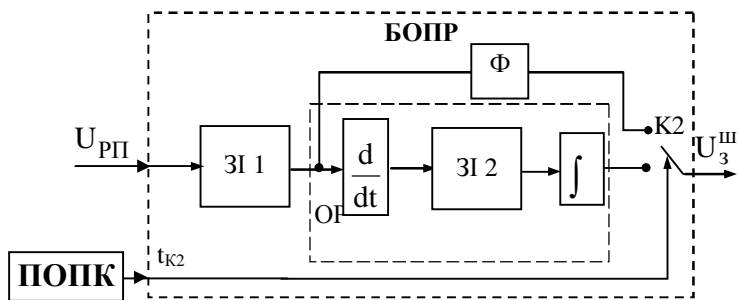


Рис. 5. Функціональна схема БОПР

У режимі позиціонування за допомогою ключа К1 (рис. 1) на вхід БОПР подається сигнал $U_{PPI} = U_3^{un}$ програмного завдання від ПОПК. У цьому випадку БОПР пропускає U_{PPI} без змін. Для точного позиціонування у цьому режимі необхідно замкнути контур керування положенням. Для цього БКК1 перемикає ключ К1 на контур слідкування, коли кутова швидкість зменшиться до рівня уставки $\omega_y = \varepsilon_{lim}^2 / (2\rho_{lim})$. Величина уставки ω_y була розрахована, враховуючи такі міркування. По-перше, необхідно вибрати ділянку замикання контуру керування за положенням для поєднання можливості оптимального за нагріванням керування і забезпечення точної зупинки двигуна для $\alpha = \alpha_z$. По-друге, необхідно визначити параметр керування і його величину, за яким буде відбуватися замикання контуру положення. Для виконання першої умови вибрано ділянку в кінці відпрацювання завдання α_z , а саме ділянку АВ оптимальних діаграм швидкості та положення (рис. 6), де формується гальмування з постійним значенням ривка. Це означає, що в момент часу $\tau = \tau_z - \tau_p$ (відповідає т. А на рис. 6), коли $\omega_A = \varepsilon_{lim}^2 / (2\rho_{lim})$ необхідно перемикати ключ К1 з виходу ПОПК на вихід ПС. Перемикати ключ К1 за величиною часу позиціонування не доцільно, оскільки це не враховує реальне переміщення вала двигуна. Перемикати за величиною положення не коректно, оскільки в цій САК формується сигнал завдання швидкості, а не положення.

Тому параметром керування, за величиною якого відбувається замикання контуру за положенням, вибрано поточну кутову швидкість ω , тобто $\omega_y = \omega_A = \varepsilon_{lim}^2 / (2\rho_{lim})$.

Після перемикання ключа К1 з ПОПК на ПС здійснюється зупинка ЕП протягом часу τ_p з обмеженням ривка у блоці БОПР. Після цього в БОПР вимикається ключем К2 (рис. 5) частина обмеження ривка ОР, яка вносить похибку позиціонування через свою інтегральну складову. Після перемикання К2 у верхнє положення сигнал завдання швидкості U_3^u формується послідовно з'єднаними ланками ЗП і фільтром Ф. Стала часу Ф визначається з умови забезпечення також самого темпу наростання координати струму. Такого заходу вжито з метою дотягування положення і забезпечення астатизму позиціонування. Ключ К2 перемикається через час τ_p (подається з блока ПОПК) після моменту $\omega_y = \omega_A = \varepsilon_{lim}^2 / (2\rho_{lim})$.

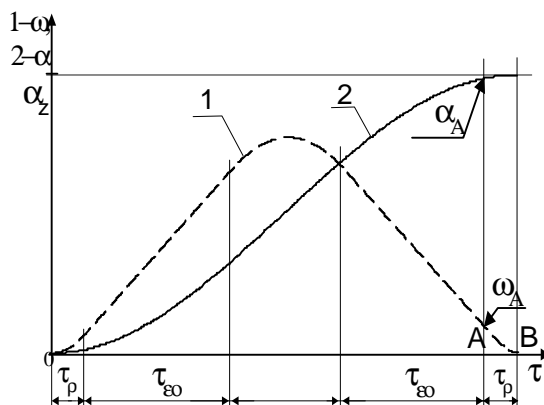


Рис. 6. Оптимальна діаграма швидкості і положення

Побудовано комп'ютерну модель позиційно-слідкуючого ЕП ОТ в середовищі MATLAB/Simulink. Проведено дослідження відпрацювання стрибкоподібного сигналу завдання позиціонування величиною $0,5^\circ$ (рис. 7). Осцилограма свідчить про забезпечення розробленою САК зі змінною структурою необхідних статичних і динамічних показників, а саме: для перекладання труби ОТ з оптимізацією нагрівання обмоток двигуна та з обмеженням прискорення і ривка працює ПОПК до часу 1,21 с, далі відбувається автоматичне перемикання на ПС для точної зупинки двигуна (рис. 7, б, в).

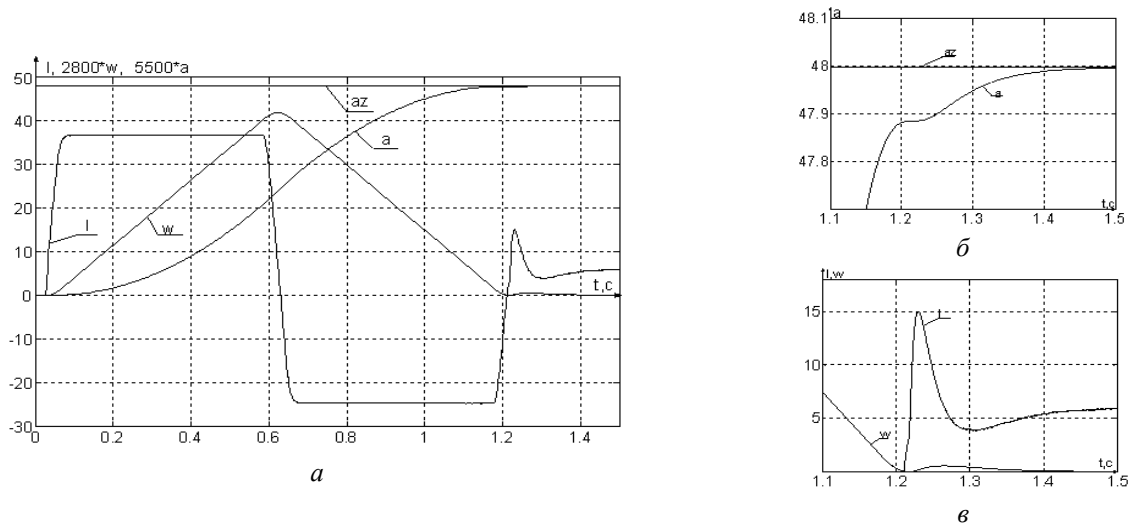


Рис. 7. Осцилограми перехідного процесу відпрацювання сигналу завдання позиціонування: а – загальний вигляд; б, в – фрагменти закінчення позиціонування (аз і а – відповідно заданий і реальний кути позиціонування; I, w – координати струму і кутової швидкості)

Висновки. Розроблена система автоматичного керування ЕП ОТ зі змінною структурою забезпечує поєднання вимог статичної точності та оптимізації процесу нагрівання виконавчого двигуна під час позиціонування, динамічної точності у разі слідкування, максимальної швидкодії відпрацювання сигналу завдання швидкості ЕП ОТ. Додаткова ланка прямої дії за завданням, яка входить до складу САК під час слідкування, синтезована з умови підвищення порядку астатизму системи, істотно покращує перехідний процес відпрацювання лінійно-наростаючого сигналу завдання переміщення та зводить практично до нульового значення величину усталеної динамічної похибки координати положення, а її поєднання з роботою блока БОПР забезпечує необхідні обмеження значень прискорення і ривка в режимі слідкування.

Розроблено математичні і комп'ютерні моделі, за допомогою яких проведено експерименти та підтверджено теоретично очікувані результати. Для подальших досліджень заплановано розробити цифрову систему автоматизації процесу спостереження ОТ на основі рекурентних формул з використанням z-перетворення.

1. *Оптические и информационные телескопы 90-х годов* : Пер. с англ. / [Ф. Джиллет, А. Лабейри, Дж. Нельсон и др.] – М.: Мир, 1983. - 195 с. 2. Щур І.З. Оптимальне за нагріванням керування позиційним електроприводом оптичного телескопа з обмеженням прискорення і ривка / І. З. Щур, В. М. Журкіна // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*.- 2005. – № 544 : *Електроенергетичні та електромеханічні системи* – С. 160-167. 3. Ахметжанов А. А. *Следящие системы и регуляторы: навч. посіб. для вузів.* / А. А. Ахметжанов, А. В. Кочемасов – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 288 с. 4. Садовой А. В. *Системы оптимального управления прецизионными электроприводами.* /А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с. 5. Щур І. З. Система оптимального прецизійного керування позиційним електроприводом інформаційного телескопа / І. З. Щур, В. М. Журкіна // *Вісник Харківськ. нац. техн.. ун-ту "ХПІ"*. – 2003. – № 41: *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* – С. 159-163. 6. *Теорія систем з перемінною структурою.* / С. В. Емельянов, В. И. Уткин, В. А. Таран и др.; Под ред. С. В. Емельянова. – М.: Наука, 1991 – 592 с. 7. Журкіна В. М. *Позиційно-слідкуючий електропривід великого оптичного телескопа та його стендові випробування з моделюванням реальних параметрів* / В. М. Журкіна, І. З. Щур // *Вісник Харківськ. Нац. техн.. ун-ту "Харківський політехнічний інститут"*. - 2005. - №45 : *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* - С. 278-280. 8. Ткачук В. І. *Електромеханотроніка : навч. посіб.* / В. І. Ткачук. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2001. – 404 с.