

## ІМІТАТОР СТАТИЧНОГО І ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕНЬ У СТЕНДІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕЛЕСКОПА

© Щур І.З., Журкіна В.М., Черепаняк М.В., 2004

Розроблено динамічну модель телескопа з врахуванням особливостей реального об'єкта керування. Синтезовано динамічний функціональний аналог на основі розробленого алгоритму керування навантажувальною машиною стенда для імітації реального моменту навантаження та моменту інерції телескопа. У середовищі MATLAB/Simulink проведено математичне моделювання динамічної моделі телескопа.

The dynamic model of telescope is developed taking into account the real control object features. A dynamic functional analogue is synthesized on the basis of the developed control algorithm by the stand loading machine for the imitation of the real telescope loading moment and telescope inertia moment. The mathematical simulation of telescope dynamic model in the MATLAB/Simulink is conducted.

**Постановка проблеми.** Проведення випробувань електроприводів (ЕП) оптичного інформаційного телескопа на реальній установці не доцільне через специфіку географічного розташування обсерваторій та можливість пошкодження високоточного та дорогого оптичного і електронного обладнання, механічних конструкцій тощо. У таких випадках існує потреба заміни натурних випробувань стендовими [1], коли бажаною є робота ЕП та системи автоматичного керування (САК) разом з тим пристроєм або механізмом, для якого вони призначені. Отож, виникає завдання розробки пристрою, що відтворює під час стендових випробувань еквівалентні навантаження на ЕП та систему керування.

З метою розробки та дослідження ЕП телескопа у науково-дослідній лабораторії СКБ електромеханічних систем (Національний університет “Львівська політехніка”) розроблений і виготовлений стенд з електромашинним агрегатом, який складається з привідного двигуна, електричної машини для імітації навантаження і тахогенератора, що розташовані на одному вертикальному валі. Привідними двигунами, які здійснюють просторову орієнтацію оптико-електронної системи інформаційного телескопа, використано спеціальні моментні двигуни постійного струму (МДПС), що дозволило створити тихохідний безредукторний ЕП.

Реальний телескоп відзначається великою масою (порядку 20 т) і відповідно великим моментом інерції (порядку  $160\,000\text{ кг}\cdot\text{м}^2$  для азимутальної осі повороту). Навантаження на валі виконавчого двигуна має реактивну складову статичного моменту, що створюється силами тертя в опорах і при перетягуванні кабелів, а також може мати ще й активну складову моменту вітрового навантаження. Реактивна складова є змінною величиною залежно від кута позиціонування оптико-електронної системи телескопа, момент інерції також може змінюватися залежно від просторового розташування рухомих частин телескопа. Отже, випробування та дослідження реальних двигунів із реальними ЕП і САК ними повинно бути проведено за імітації на стенді всіх вказаних особливостей привода.

У попередніх роботах [2, 3] проаналізовано деякі особливості такого об'єкта керування та розроблена модель реактивного типу статичного навантаження. Найскладнішим завданням є імітація реального моменту інерції телескопа на дослідному стенді, оскільки власне стенд має свій порівняно невеликий момент інерції.

**Аналіз останніх досліджень.** Достатня кількість публікацій на тему випробувань пов'язана з різноманітними аспектами автоматизації збору та обробки результатів спостережень [4]. Проблеми відтворення режимів для об'єктів дослідження, що відповідають умовам їх експлуатації, висвітлені недостатньо повно. Загально розповсюдженими є класичні схеми навантажувальних пристроїв для дослідження пуско-гальмівних режимів виконавчих двигунів [1].

У [1, 5, 6] розглянуто питання динамічного моделювання об'єктів керування, зображено та проаналізовано різноманітні схеми і характеристики динамічних моделей, наведено приклади синтезу та реалізації стендів для імітації реальних умов роботи. Ці роботи взяті за вихідні для розробки алгоритму роботи імітатора реального навантаження телескопа.

**Задачі досліджень.** У роботі поставлено завдання розробки алгоритму керування навантажувальною машиною дослідного стенда з метою забезпечення імітації реального моменту навантаження ЕП телескопа в статичних і динамічних режимах з врахуванням змінних активного і реактивного статичних моментів та великого і змінного моменту інерції телескопа.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 показана функціональна схема стенда для проведення випробувань, який є динамічною моделлю (ДМ) реального телескопа. Об'єктом випробування є ЕП телескопа, що складається з привідного МДПС і керованого перетворювача (в даному стенді – широтно-імпульсний перетворювач ШПП). Труба телескопа зі всією оптико-електронною системою, а також компоненти технологічного призначення і зовнішнє середовище становлять об'єкт заміщення, що отримується при виокремленні з технічної системи конкретного ОВ. У динамічній моделі ДМ вказаний об'єкт заміщення еквівалентно зображений динамічним функціональним аналогом (ДФА), до складу якого входять НМ, РНМ та ПК.

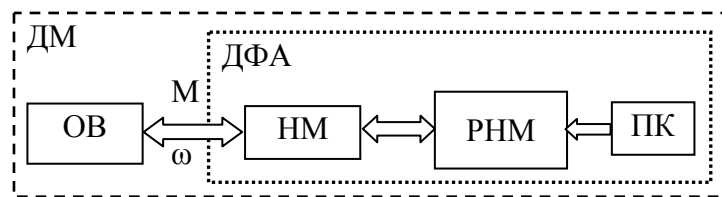


Рис. 1. Функціональна схема стенда для проведення випробувань:

*ОВ – об'єкт випробування; НМ – навантажувальна машина, що створює момент на валі ОВ; РНМ – регулятор, призначений для вироблення керуючого впливу на НМ; ПК – пристрій керування*

Повноцінні випробування систем керування можливо проводити на стенді тільки у тому випадку, якщо за допомогою ДФА можливо створити на валу двигуна момент, що має таку ж саму функціональну залежність від параметрів системи і зовнішнього середовища, що існує під час роботи з реальним об'єктом керування. Така заміна моментів допустима, оскільки процеси в двигуні та САК ним визначаються сумарним моментом на валу і не залежать від характеру їх появи. З цією метою стенд обладнають пристроєм завдання, що визначає режими роботи, та навантажувальним пристроєм для відтворення моментів на валу виконавчого двигуна досліджуваної системи.

Момент, що створює виконавчий двигун ЕП, зумовлюється зовнішнім середовищем та умовами роботи і описується відомим рівнянням балансу моментів

$$M_d = M_c + M_{дин} \quad (1)$$

де  $M_c$  – момент статичного опору, який виникає внаслідок дії сил тертя і кабелів;  $M_{дин}$  – динамічний момент, що виникає внаслідок зміни кінетичної енергії системи через зміну швидкості, маси рухомих частин тощо.

Загальний вираз для динамічного моменту може бути отримано з рівняння Лагранжа другого роду [7] для систем, сумарна маса яких протягом визначеного часу залишається незмінною

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} = M, \quad (2)$$

де  $T = J\omega^2/2$  – кінетична енергія системи;  $\theta$  – координата руху (кут повороту вала);  $\omega = d\theta/dt$  – кутова швидкість руху;  $J$  – сумарний момент інерції;  $M$  – узагальнений обертовий момент, що є алгебраїчною сумою рушійних моментів та моментів опору.

Враховуючи (1) і (2), В.І.Мещерський отримав загальне рівняння балансу моментів для складних систем зі зміною мас [8]

$$M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\theta} + \omega k_i (v - u_x) \frac{dm}{d\theta}, \quad (3)$$

де  $k_i = R i$  – коефіцієнт, що визначається добутком приведенного радіуса  $R$  шків двигуна та передавальним числом редуктора  $i$ ;  $u_x$  – складова швидкості частинок маси, що приєднуються або від'єднуються вздовж напрямку руху системи;  $v$  – поступальна швидкість робочих органів об'єкта керування в точці зміни маси;  $m$  – маса рухомих частин системи.

Проаналізуємо рівняння (3) стосовно до нашого об'єкта.  $M_c$  є сумою реактивної та активної складових моменту статичного опору. Другий доданок присутній, але  $J$  для азимутальної осі може змінюватися в значних межах, залежно від розташування труби телескопа в кутовимірній площині. Третій доданок може мати нерегулярне значення для ЕП азимутальної осі у випадку одночасної роботи ЕП обох осей. Четвертий доданок не має місця в даній системі через відсутність зміни мас. Тому в подальшому аналізі третій та четвертий доданки опущено, а зміну  $J$  під час переміщення можна змоделювати другим доданком.

Ідентичність поведінки системи під час стендових випробувань та в натурних умовах роботи забезпечується заданням відповідних умов роботи, початкових умов та забезпеченням рівнянь [1]

$$\begin{cases} M_d^{ct}(t) = M_d^T(t) = M_d(t) \\ \theta^{ct}(t) = \theta^T(t) = \theta(t) \end{cases} \quad (0 \leq t \leq T), \quad (4)$$

де  $M_d^{ct}(t)$ ,  $M_d^T(t)$  – моменти виконавчого двигуна стенда та реального телескопа відповідно;  $\theta^{ct}(t)$ ,  $\theta^T(t)$  – координати руху – кути повороту вала виконавчого двигуна стенда та реального телескопа відповідно;  $T$  – час проведення одного циклу випробування (в позначеннях верхній індекс відображає технічний пристрій).

Перше рівняння системи (4) відображає вимогу рівності моментів на валу виконавчого двигуна при випробуваннях за допомогою моделі на стенді та в натурних умовах. Друге рівняння (4) визначає ідентичність руху системи.

Враховуючи (3), отримуємо рівняння руху електромеханічних систем стенда та реального телескопа

$$\begin{aligned} M_d^{ct} &= M_c^{ct} + J^{ct} \frac{d\omega}{dt} + M^{HM}, \\ M_d^T &= M_c^T + J^T \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $M_c^{ct}$ ,  $M_c^T$  – моменти статичного опору стенда і реального телескопа відповідно;  $J^{ct}$ ,  $J^T$  – моменти інерції стенда і реального телескопа відповідно;  $\omega = d\theta/dt$  – швидкість обертання вала виконавчого двигуна стенда, яка відповідно до (4) дорівнює швидкості обертання вала телескопа;  $M^{HM}$  – момент навантаження стенда, що створює НМ.

Вираз для  $M^{HM}$ , що забезпечує виконання умов (4), отримуємо шляхом прирівнювання правих частин першого і другого рівнянь системи (5)

$$M^{HM} = M_{c,p}^T + M_{c,a}^T - M_{c,p}^{CT} + (J^T - J^{CT}) \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

де  $M_{c,p}^T$ ,  $M_{c,a}^T$  – відповідно моменти реактивного і активного статичних навантажень у реальному телескопі;  $M_{c,p}^{CT}$  – момент реактивного статичного навантаження стелда.

Фізична реалізація такого алгоритму керування НМ потребує диференціювання координати швидкості та великого коефіцієнта підсилення замкнутої системи для забезпечення достатньої швидкодії. Це завдання технічно складно реалізувати через значні пульсації сигналу з тахогенератора. Тому необхідно знайти інший алгоритм для фізичної реалізації рівняння (6), який би дозволив отримати кутове прискорення  $d\omega/dt$ . З найменшою похибкою це значення можна отримати з математичної моделі двигуна, вхідним сигналом якої є реальний сигнал струму якоря  $I_d$ :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J^T} (C_1 I_d - M_{c,p}^T - M_{c,a}^T), \quad (7)$$

де  $C_1$  – стала двигуна, що випробовується.

Цей алгоритм відображено в першій частині блока ПК, який в цілому реалізує рівняння (6) в структурній схемі ДФА, поданий на рис. 2. Сигнали реактивних складових моментів  $M_{c,p}^T$  та  $M_{c,p}^{CT}$  отримано за допомогою математичних моделей реактивного типу статичного навантаження, що детально описані в [2, 3]. Вхідним сигналом для них є сигнал реальної швидкості стелда  $\omega$ . Вихідним сигналом ПК є бажаний момент навантажувальної машини  $M^{HM}$ , що є сигналом завдання для РНМ, який повинен бути безінерційно відтворений моментом на валу НМ. Вихідним сигналом блока РНМ є сигнал напруги завдання  $U_3^{HM}$ , що подається на вхід керованого перетворювача КП2.

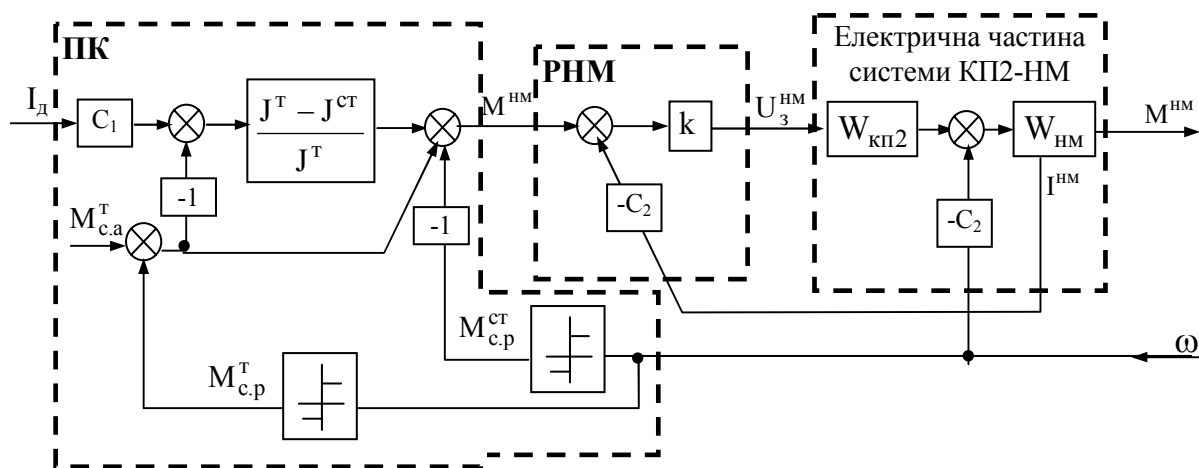


Рис. 2. Структурна схема ДФА динамічної моделі телескопа

Для визначення структури та параметрів РНМ використано класичний принцип побудови САК зі зворотним зв'язком за регульованою координатою (в даному випадку – це  $M^{HM}$ ). Отже, РНМ складається з пропорційного регулятора з коефіцієнтом підсилення  $k$ , на вхід якого подається

різниця сигналів бажаного значення  $M^{HM}$  та реального значення  $M^{HM}$ . Величина коефіцієнта  $k$  вибирається з умови забезпечення необхідної статичної та динамічної точності відтворення  $M^{HM}$ .

Функціональна схема всієї динамічної моделі телескопа, що складається з трьох окремих функціональних частин, подана на рис. 3.

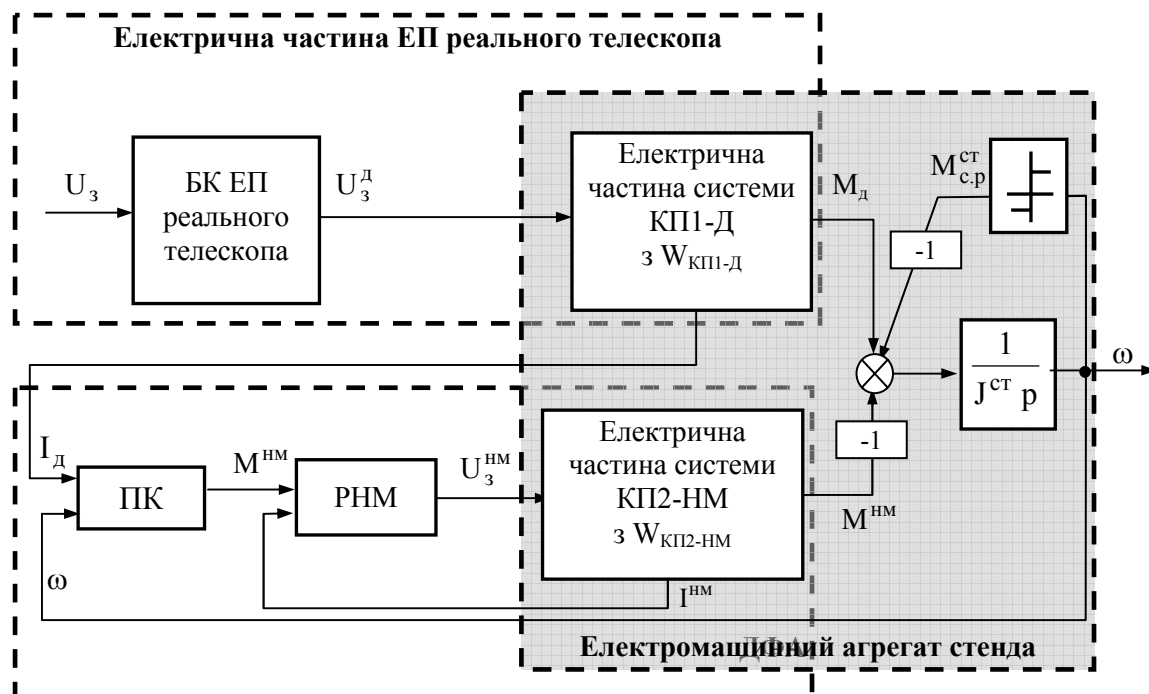


Рис. 3. Функціональна схема динамічної моделі телескопа

Електрична частина ЕП реального телескопа складається з досліджуваного блока керування БК ЕП реального телескопа [2] та з керованого перетворювача енергії КП1-Д (система ШПП – МДПС), причому ці блоки фізично реалізовано на конкретному стенді. БК ЕП є системою оптимального релейного керування виконавчим МДПС телескопа та призначений для вироблення керуючого впливу  $U_3^d$ , що подається на КП1.

Електромашинний агрегат фізично реалізований на конкретному дослідному стенді з власним  $J^{ct}$  та  $M_{c.p}^{ct}$ . Цей агрегат складається з виконавчого МДПС з КП1 та НМ з КП2. МДПС та НМ сполучені спільним валом без редукторного з'єднання, мають загальний момент інерції стенда  $J^{ct}$  та спільну швидкість обертання вала  $\omega$ .

ДФА імітує роботу оптико-електронної системи реального телескопа і складається з ПК, РНМ та системи КП2 – НМ (рис. 2). Блоки ПК та РНМ передбачено фізично реалізувати на персональному комп'ютері засобами відповідного програмного забезпечення.

У середовищі MATLAB/Simulink проведено математичне симулювання таких моделей: 1) математичної моделі САК позиційним ЕП з реальними параметрами телескопа; 2) математичної моделі САК позиційним ЕП з параметрами дослідного стенда, побудованої за функціональною схемою, показаною на рис. 3.

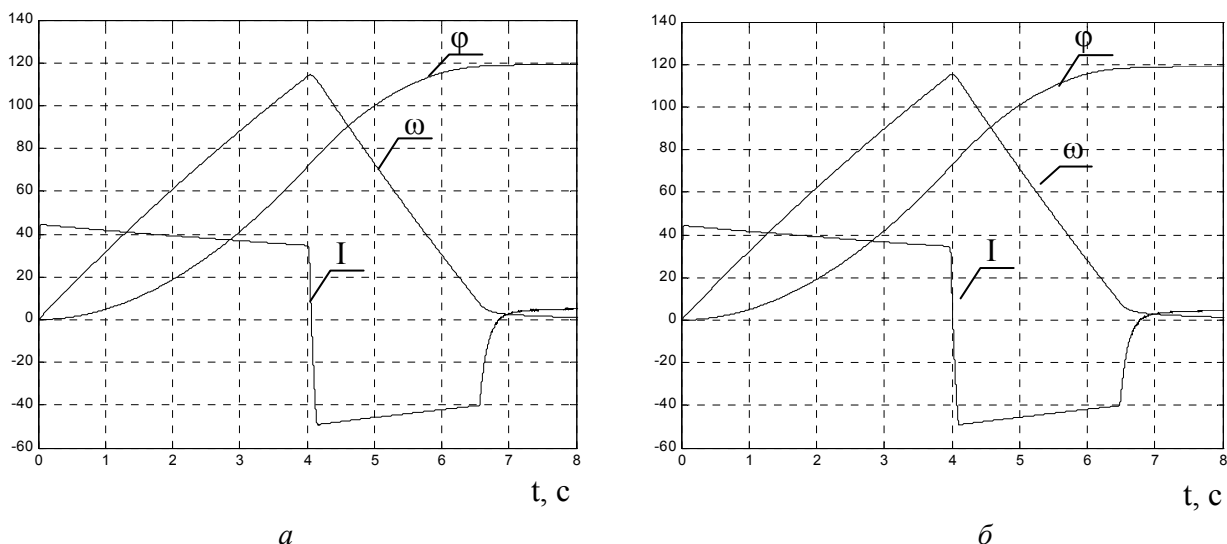


Рис. 4. Осцилограми перехідних процесів відпрацювання заданого переміщення в реальному телескопі (а) і в динамічній моделі реального телескопа (б):  
 $I, [A]$ ;  $\omega \times 1000, [rad/c]$ ;  $\varphi \times 300, [rad]$

На рис. 4 подано осцилограми перехідних процесів відпрацювання заданого переміщення в обох моделях. Порівнюючи осцилограми, можна зауважити, що кількісні та якісні характеристики перехідного процесу відпрацювання заданого переміщення збігаються з невеликим відсотком розбіжності (до 3 %). Останнє пояснюється наявністю часової затримки в блоках моделей реактивного типу статичного навантаження. Проте, враховуючи допустиму величину розбіжності, результати моделювання можна вважати задовільними.

**Висновки.** Розроблено алгоритм керування навантажувальною машиною стенда для випробування ЕП та виконавчих двигунів реальних телескопів. Синтезований динамічний функціональний аналог та динамічна модель в цілому дозволяють забезпечити імітацію реального моменту навантаження ЕП телескопа в статичних та динамічних режимах роботи з врахуванням змінних активного і реактивного статичних моментів та змінного моменту інерції телескопа.

Результати проведеного математичного моделювання динамічної моделі телескопа підтвердили теоретично очікувані результати. Для подальшої роботи планується технічна реалізація такої динамічної моделі на реальній фізичній установці.

1. Кочубиевский И.Д., Стражмейстер В.А. Динамическое моделирование нагрузок при испытаниях автоматических систем. – М. – Л.: Энергия, 1965. 2. Щур І.З., Журкіна В.М. Система оптимального прецизійного керування позиційним електроприводом інформаційного телескопа // Вісн. Східноукраїнського націон. ун. ім. В.Даля, 2003. – № 6[64]. – С. 41–46. 3. Журкіна В.М. Моделювання системи автоматичного керування позиційним електроприводом телескопа // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 485. – С. 49–54. 4. Хилл П. Наука и искусство проектирования. – М.: Мир, 1973. 5. Кочубиевский И.Д., Стражмейстер В.А., Калиновская Л.В., Матвеев П.А. Динамическое моделирование и испытания технических систем / Под ред. И.Д. Кочубиевского. – М.: Энергия, 1978. 6. Кочубиевский И.Д. Системы нагружения для исследования и испытания машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1985. 7. Мазепа С.С., Лозинський А.О. Системи керування та динаміка роботів. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1998. 8. Мецгерский И.В. Работы по динамике тел переменной массы. – М.: Гос. издат. технико-теоретической литературы, 1949.