

УДК 621.523.3

Канд. техн. наук М. О. Дегтярьов, В. Ю. Карпенко,
канд. техн. наук Л. Р. Козак

ДИНАМІКА СЛІДКУВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Наведено результати досліджень динаміки слідувальних електроприводів, отриманих теоретичними розрахунками та в ході експериментального відпрацювання електроприводів великої потужності. Теоретичні дослідження проводили за допомогою досить повної математичної моделі слідувального електропривода, що містить рівняння тракту формування керувального сигналу, електродвигуна, редуктора та навантаження. Рівняння контуру формування керувального сигналу містять лише характеристики коректувальної ланки в припущенні, що мінімізовані решта запізнювань у тракці перетворення. Рівняння електродвигуна взято в класичній формі, яка враховує вплив на динаміку двигуна таких основних параметрів, як індуктивність і опір обмотки статора, коефіцієнти моменту та реакції якоря й момент інерції ротора. Взаємодію двигуна з багатомасовою системою редуктора та навантаження подано у вигляді силової взаємодії двох мас – зведеної маси ротора та маси навантаження через деяку еквівалентну жорсткість кінематичного ланцюга. Для опису ефекту люфту кінематичного зв'язку використано спеціальний обчислювальний спосіб, який значно спрощує його математичний опис. ККД редуктора подано у вигляді внутрішнього тертя, пропорційного передаваному зусиллю. Результати розрахунків із застосуванням цієї математичної моделі добре узгоджуються з результатами натурних випробувань різних зразків слідувальних електроприводів, що дозволяє використовувати її під час проєктування нових сервомеханізмів, а також для коректного моделювання польоту під час відпрацювання систем керування літальних апаратів. Зокрема, на основі розрахунків частотних характеристик замкненого контуру із застосуванням цієї математичної моделі можна визначити оптимальні параметри коректувального контуру. Реакція на ступеневий вплив за різних колових коефіцієнтів підсилення в контурі дає повну інформацію про області стійкості замкненого контуру та вплив різних параметрів приводу на ці області. На основі теоретичних і експериментальних робіт отримано та подано основні висновки та рекомендації, урахування та реалізація яких дозволить забезпечити високі динамічні характеристики новопроектованих слідувальних електроприводів.

Ключові слова: електропривід, сервопривід, редуктор, стійкість, математична модель.

The article gives the analysis results for the servo drives dynamics, obtained from the theoretical calculations and during the development testing of the high power electric drives. Theoretical research was conducted, using the complete mathematical model of the servo drive, which included the equations of the control signal shaping path, electric motor, reducer and load. The equations of the control signal shaping network include only the characteristics of the compensating element in the assumption that all other delays in the transformation path are minimized. The electric motor equations are assumed in the classical form, taking into account the influence of the following main parameters on the motor dynamics: inductance and stator winding resistance, torque and armature reaction coefficients and rotor moment of inertia. Interaction of the motor with the multimass system of the reducer and load is presented in the form of force interaction of two masses – a reduced mass of the rotor and mass of the load through the certain equivalent rigidity of the kinematic chain. To describe the effect of gap in the kinematic connection the special computational trick, which considerably simplifies its mathematical description, is used. Efficiency of the reducer is presented in the form of the internal friction, proportional to the transmitted force. Calculation results with the application of the given mathematical model match well with the results of the full-scale testing of different specimens of servo drives, which makes it possible to use it for the development of new servomechanisms, as well as for the correct flight simulation when testing the aircraft control systems. In particular, based on the frequency response calculations of the closed circuit with the application of the given mathematical model, it is possible to define optimal parameters of the correcting circuit. Reaction on the step action with the various values of circular amplification coefficient in the circuit gives complete information on the stability regions of the closed circuit and influence of various drive parameters on these regions. Based on the conducted theoretical and experimental studies, the basic conclusions and recommendations were obtained and presented, accounting and implementation of which will provide high dynamic characteristics of the newly designed servo drives.

Keywords: electric drive, servo drive, reducer, stability, mathematical model.

Електричні слідкувальні приводи широко використовують як виконавчі ланки систем керування в багатьох промислових виробках, особливо в ракетній і авіаційній техніці.

У ракетній техніці найчастіше електроприводи застосовують у малих ракетах класу «земля–повітря», «повітря–повітря», «повітря–земля», а також у тактичних і оперативних ракетках.

Електроприводи порівняно з іншими типами приводів мають цілий ряд переваг:

- високі динамічні характеристики;
- малі габарити та мала вага;
- найпростіша організація первинних джерел потужності (батареї або акумулятори);
- простота регламентних перевірок;
- висока надійність експлуатації завдяки виконанню двигунів без щіткових колекторів («вентильні двигуни»).

Широкому поширенню електроприводів, особливо останніми десятиріччями, також сприяли створення та застосування в роторах електродвигунів висококоерцитивних магнітів, які різко зменшили габарити та масово-інерційні характеристики роторів, а отже, у такій же мірі збільшили швидкодію приводів.

Другим чинником, що сприяє їх повсюдному використанню, стали доскональне відпрацювання схем і масове виробництво надійних драйверів – електронних комутаторів (електронних колекторів).

Ця робота ґрунтується на теоретичних дослідженнях динаміки електроприводів, викладених у монографії [1], і на результатах робіт з проектування й експериментального відпрацювання нового електропривода великої потужності.

Математична модель слідкувальних електроприводів

Електроприводи мають певні особливості, які їх відрізняють від інших типів приводів.

Оскільки електричні двигуни, як правило, мають високі максимальні оберти (від $\sim 1\,000$ до $\sim 15\,000$ об/хв), а необхідна швидкість виконавчих органів ракет в основному лежить у діапазоні $10\text{--}30$ об/хв, у більшості електричних приводів використовують *знижувальні редуктори*.

Слід відзначити ще одну особливість структури електросервоприводів порівняно зі структурою, наприклад, гідравлічних сервоприводів – це необхідність використання в тракті формування команди керування електродвигуном *коректувального контуру* у вигляді *форсувальної ланки*.

Необхідність установлення коректувальної (у цьому випадку форсувальної) ланки зумовлено різною фізичною природою процесів формування механічних зусиль електричними та, наприклад, гідравлічними приводами: у електричних приводів «ланцюжок» формування зусилля більш «довгий», що збільшує час набору зусилля і, як наслідок, призводить до збільшення фазового запізнювання в замкненому контурі та до підвищеної коливальності під час відпрацювання швидкозмінних сигналів керування. Форсувальна ланка усуває додаткове фазове запізнювання в робочому діапазоні частот і фактично «вирівнює» амплітудно-частотну характеристику приводу.

Загальний вигляд структурної схеми слідкувального електропривода подано на рис. 1.

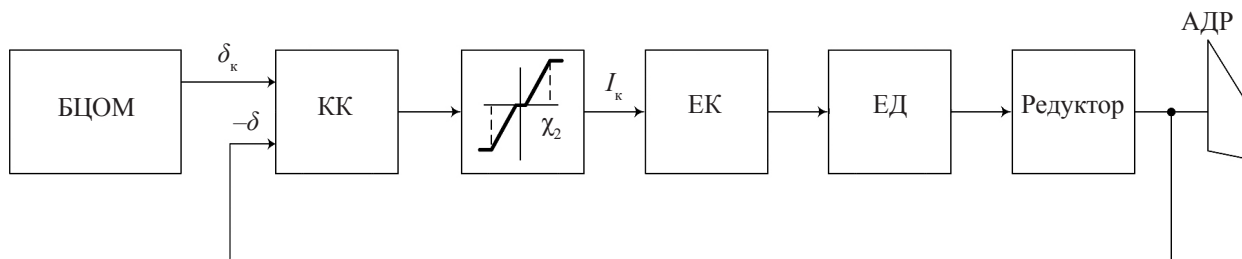


Рис. 1. Структурна схема слідкувального електропривода:

- БЦОМ – бортова цифрова обчислювальна машина; δ_k – командний сигнал;
 δ – кут відхилення керувального органа; КК – коректувальний контур (форсувальна ланка);
 χ_2 – лінійна зона керувального сигналу; I_k – керувальний сигнал; ЕК – електронний колектор;
 ЕД – електродвигун; АДР – навантаження, наприклад, у вигляді аеродинамічного руля

Відповідно, математична модель слідкувального електропривода повинна містити:

- рівняння блока формування керувального сигналу та напруги на статорних обмотках двигуна;
- рівняння електродвигуна;
- рівняння редуктора;
- рівняння навантаження.

Рівняння блока формування керувального сигналу та напруги на статорних обмотках двигуна

Різниця командного сигналу та сигналу зворотного зв'язку за положенням навантаження – ε пропускається через аперіодичну ланку зі сталою часу T_f і форсувальну ланку зі сталою часу T_d .

Вихід коректувальної ланки – керувальний сигнал ε_2 :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \delta_k - \delta; \\ \dot{\varepsilon}_1 &= \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{T_f}; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_1 + \dot{\varepsilon}_1 \cdot T_d. \end{aligned} \quad (1)$$

Формування змінної напруги на статорних обмотках двигуна відбувається в електронному комутаторі за допомогою широтно-імпульсного перетворювача відповідно до знака та значення вихідного сигналу коректувальної ланки ε_2 . При цьому в тракці формування керувального сигналу в багатьох випадках необхідно реалізувати спеціальну зону нечутливості χ_1 , яка необхідна для підвищення перешкодозахищеності контуру сервопривода. Ця необхідність зумовлена великими коловими коефіцієнтами підсилення контуру та, внаслідок цього, великою чутливістю до зовнішніх електромагнітних перешкод.

Значення зони нечутливості залежно від прийнятого колового коефіцієнта підсилення може досягати 5–10 % від рівня максимального керувального сигналу, тобто значення лінійної зони χ_2 .

Важливим параметром замкненого контуру електропривода є вже згадане значення лінійної зони. в тракці формування керувального сигналу χ_2 .

При вибраних параметрах двигуна, редуктора та напруги живлення значення лінійної зони керувального сигналу χ_2 фактично

визначає коловий коефіцієнт підсилення в контурі сервопривода:

$$K = \frac{U_{\text{живл}}}{i_R \cdot C_c \cdot \chi_2}. \quad (2)$$

З урахуванням зони нечутливості χ_1 і значення лінійної зони χ_2 вираз для змінного значення напруги на статорних обмотках двигуна записують у вигляді

$$U_{\text{дв}} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |\varepsilon_2| \leq \chi_1; \\ (|\varepsilon_2| - \chi_1) \cdot \text{sign}(\varepsilon_2) \cdot \frac{U_{\text{живл}}}{\chi_2 - \chi_1}, & \text{якщо } \chi_1 < |\varepsilon_2| < \chi_2; \\ U_{\text{живл}} \cdot \text{sign}(\varepsilon_2), & \text{якщо } |\varepsilon_2| > \chi_2. \end{cases} \quad (3)$$

Рівняння електродвигуна

Класичні рівняння двигуна постійного струму, взяті в математичній моделі, урахують його основні параметри:

- момент інерції ротора двигуна $J_{\text{д}}$;
- коефіцієнт моменту C_M ;
- коефіцієнт реакції якоря C_e ;
- індуктивність статорної обмотки $L_{\text{я}}$;
- повний опір статорного ланцюга $R_{\text{пр}}$ (опір обмотки статора, внутрішній опір джерела живлення, опір вихідних ключів комутатора).

Використання цих параметрів досить для якісного опису роботи електродвигуна.

На ранніх етапах проектування електропривода можуть виникнути проблеми з визначенням основних параметрів двигуна для математичної моделі, які остаточно визначають лише після відпрацювання та випробувань самого двигуна.

У цьому випадку можна використовувати каталоги фірм-виготовлювачів двигунів, у яких завжди можна підібрати близький аналог двигуна за напругою живлення, обертами та потужністю та взяти його основні константи для першого наближення.

Як приклад на рис. 2 подано графіки зміни параметрів двигунів від потужності в межах від 10 до 80 Вт, з обертами 3 000–4 000 об/хв і живленням 24–30 В, побудовані на основі каталогу безколекторних двигунів фірми Fulling Motor. При використанні цих графіків слід пам'ятати, що коефіцієнти C_M і C_e в СІ мають однакові числові значення.

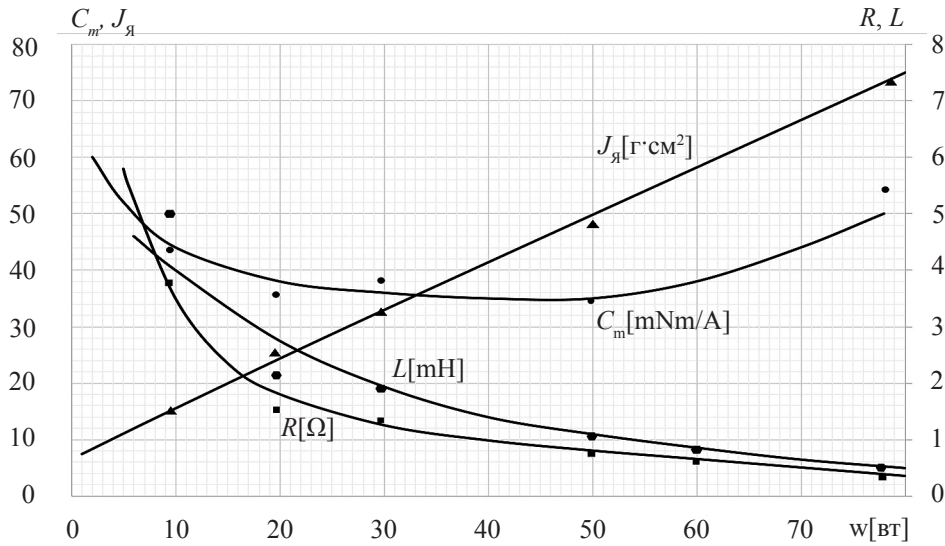


Рис. 2. Орієнтовні параметри електродвигунів залежно від їхньої потужності

Числова рівність коефіцієнта реакції якоря C_e і коефіцієнта моменту C_M в СІ дозволяє досить просто визначити основні параметри двигуна, виходячи з обраної максимальної швидкості холостого ходу двигуна та напруги джерела живлення:

$$C_e = \frac{U_{\text{живл}}}{\omega_{\text{хх}}} [\text{В} \cdot \text{с/рад}].$$

Після цього для рівнянь двигуна залишається вибрати орієнтовні значення моменту інерції ротора, індуктивності й опору обмотки статора, взявши ці значення з характеристик двигунів подібної потужності.

З урахуванням можливого штучного обмеження значення статорного току (для захисту транзисторів силових ключів) рівняння двигуна записують так:

$$\frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{дв}} - C_e \cdot \omega_{\text{д}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{пр}}}{L_{\text{я}}}, \quad \text{якщо } |I_{\text{я}}| < I_{\text{я}}^{\text{max}}; \quad (4)$$

$$\frac{dI_{\text{я}}}{dt} = 0, \quad \text{якщо } |I_{\text{я}}| > I_{\text{я}}^{\text{max}} \quad \text{і} \quad \frac{dI_{\text{я}}}{dt} \cdot I_{\text{я}} > 0;$$

$$M_{\text{д}} = C_M \cdot I_{\text{я}};$$

$$\dot{\omega}_{\text{д}} = \frac{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{пр}}},$$

де $I_{\text{я}}$, $I_{\text{я}}^{\text{max}}$ – струм статора (якоря) та максимальний струм статора;

$J_{\text{зв}}$ – момент інерції ротора зі зведеними масами ступенів редуктора;

$L_{\text{я}}$ – індуктивність обмотки якоря (статорної обмотки);

$M_{\text{д}}$ – момент, який розвиває двигун;

$M_{\text{с}}$ – момент опору з боку редуктора;

$\omega_{\text{д}}$ – кутова швидкість двигуна.

Математичний опис редуктора

Електропривід, що містить електродвигун, редуктор і навантаження, з точки зору механіки є типовою *багатомасовою системою*.

Силова взаємодія ротора двигуна з редуктором і навантаженням досить строго може бути описана через конструктивні жорсткості та пружні деформації всіх рухомих мас механічної передачі: ротор двигуна – вали та шестірні всіх ступенів редуктора – навантаження на вихідному валу (наприклад, АДР).

Математичний опис силової взаємодії чотирьох, п'яти або більше мас виконує диференціальне рівняння, а також процес їх інтегрування надто складний і громіздкий. Тому доцільно звести цю багатомасову систему до динамічно подібної, але двомасової системи, у якій дещо збільшений (зведений) момент інерції ротора двигуна та момент інерції навантаження взаємодіють через деяку еквівалентну пружність і передавальне число редуктора.

Зведення моментів інерції всіх проміжних ланок кінематичного ланцюга редуктора до осі ротора двигуна провадять починаючи від вихідного вала шляхом ділення моменту інерції кожного ступеня на квадрат передавального числа всіх наступних до ротора ступенів редуктора та підсумовуванням цих «додатків» з моментом інерції ротора двигуна.

Становить інтерес співвідношення наведених моментів інерції ротора двигуна та моменту інерції навантаження у двомасовій системі. У багатьох випадках інерційний вплив ротора виявляється значно вище, ніж вплив моменту інерції навантаження.

Наприклад, порівняння зведених мас ротора двигуна й інерційної маси АДР у розглянутому нижче прикладі показує:

– приведена до вихідного вала приводу інерційна маса ротора двигуна приблизно в десять разів *більше* моменту інерції АДР;

– відповідно, приведена до вала двигуна маса АДР приблизно в десять разів *менше* інерційної маси ротора двигуна.

Отже, для цього електропривода (як, зрештою, і для більшості електроприводів з редукторами) превальювальний вплив на динаміку замкнутого контуру сервопривода справляє момент *інерції ротора двигуна*. Збільшення або зменшення моменту інерції навантаження навіть у кілька разів у багатьох випадках практично не позначається на динамічних характеристиках виконавчих органів з електроприводами.

Оскільки момент інерції ротора має визначальне значення для динаміки приводу, операцію визначення його зведеного значення слід проводити *обов'язково*.

Після операції зведення механічну взаємодію електродвигуна, редуктора та навантаження можна описати у вигляді рівнянь *двомасової* системи, у яких силова взаємодія та взаємні кутові переміщення двох мас – приведеної інерційної маси ротора двигуна й інерційної маси навантаження – визначають через сумарне передавальне число та деяку *еквівалентну жорсткість редуктора* від вала двигуна до вихідного вала редуктора.

Слід відзначити ще декілька важливих обставин під час математичного опису редуктора в прийнятій двомасовій математичній моделі. Вони пов'язані з вибором *розрахункового* значення еквівалентної

жорсткості механічної передачі, математичного опису еквівалентного люфту передачі та математичного опису ефекту механічного ККД редуктора.

Вибір еквівалентної жорсткості редуктора

Для розрахунків динаміки електроприводів необхідно використовувати або експериментально виміряну, або оцінену жорсткість редуктора з боку вала двигуна.

Оскільки експериментальні дані про жорсткість на початкових стадіях розроблення приводу, як правило, відсутні, виходячи з діапазону робочих частот виконавчих органів для великих і малих ракет, який не перевищує 10 Гц, можна взяти розрахункове значення еквівалентної жорсткості, яка відповідає ~20–30 Гц власних коливань ротора двигуна на цій жорсткості.

Розрахунки показують, що зменшення в півтора – два рази або значне збільшення отриманої таким чином еквівалентної жорсткості значно не впливають на динамічні характеристики приводу в робочому діапазоні частот.

Використання у двомасовій математичній моделі електропривода того або іншого розрахункового значення еквівалентної жорсткості кінематичної передачі необхідно, насамперед, для коректного математичного опису *силової взаємодії* інерційних мас.

Математичний опис люфту

Математичний опис люфтів у редукторі, у прийнятій *двомасовій* математичній моделі, також вимагає застосування спеціального обчислювального способу.

Найточніший опис люфту в механічній передачі – це подання люфту у вигляді *зони нечутливості в ланці жорсткості*, що дорівнює люфту між двома рухомими масами.

Якщо «привести» реальний люфт лише в останній, вихідній ланці редуктора, наприклад, в одну кутову хвилину до вала двигуна, то, за передавального числа редуктора для розглянутого нижче приклада – 337, вал двигуна повинен прокрутитися на кут більше п'яти градусів, перш ніж він «вибере» цей люфт і «зустріне» силовий опір веденої маси навантаження.

Зона нечутливості такого порядку в замкненій системі в більшості випадків викличе незгасаючі автоколивання.

Проте, насправді, під час обертання ротора в межах зведеного до осі двигуна люфту (наприклад, у межах $\pm 5-10$ град) послідовно задіюються всі шестірні редуктора, які будуть чинити наростаючий *інерційний* опір обертанню вала двигуна. Іншими словами, «чистої» *силової* зони нечутливості на практиці не існує, оскільки під час найменшого обертання ротора двигуна виникає наростаючий силовий опір наступних ступенів редуктора.

Якщо додатково, як пом'якшувальні обставини, врахувати, що, за наявності знакосталого навантаження, люфти «вибираються» та фактично не впливають на процеси руху, то, за зведення багатомасової системи до двомасової, можна досить просто, без великої динамічної похибки, вирішити проблему коректного математичного опису люфту.

Щоб «всередині» еквівалентного люфту врахувати силову взаємодію двох мас, але *послабити* його (що фактично спостерігається в процесі послідовного проходження люфтів кожного ступеня), досить у межах цього люфту взяти зменшену в кілька разів прийнятну розрахункову жорсткість кінематичної передачі (наприклад, у 2–3 рази).

Додаткові конструктивні заходи для зменшення люфтів у вигляді *селективного* складання з попереднім підтисненням шестерень ступенів редуктора дуже ефективно зменшують люфти і, відповідно, небажані ефекти, з ними пов'язані.

Математичний опис ефекту механічного ККД редуктора

ККД редукторів – це фактично узагальнене числова характеристика втрат на *тепловиділення* передаваної редуктором енергії. Цей коефіцієнт практично не залежить від передаваної потужності, швидкості та напрямку обертання валів і звичайно лежить у діапазоні 0,6–0,98 для різних редукторів.

Причина втрати потужності – *сухе тертя ковзання* між зубцями шестерень, тертя в підшипниках валів, а також внутрішнє конструкційне тертя матеріалів.

Момент тертя пропорційний зусиллю, з яким взаємодіють контактні поверхні,

тобто в нашій моделі – моменту опору на валу двигуна M_c .

Виходячи з цього, формула для розрахунку моменту внутрішнього тертя редуктора, що відповідає значенню його ККД, може бути записана так:

$$M_{тр} = M_c \cdot i_R \cdot (1 - \eta) \cdot \text{sign} \dot{\delta}, \quad (5)$$

де $M_{тр}$ – момент внутрішнього тертя редуктора, що відповідає ККД; M_c – момент пружної силової взаємодії мас з боку вала двигуна; i_R – передавальне число редуктора; η – ККД редуктора; $\dot{\delta}$ – кутова швидкість приводу.

Під час математичного моделювання польоту ракет отриманий таким чином момент підсумовується із зовнішніми аеродинамічними моментами, моментами вагового дисбалансу, тертям на валу навантаження й іншими моментами, що діють відносно вала.

Слід відзначити, що, крім негативного ефекту, пов'язаного із втратою корисної потужності приводу та проявленням ефектів сухого тертя, момент внутрішнього тертя редуктора, *діючи значно «м'якше»*, ніж звичайне сухе тертя, сприяє *збільшенню загасання перехідних процесів у механічній системі приводів*.

З урахуванням отриманих вище залежностей і силової взаємодії всіх елементів кінематичного ланцюга систему рівнянь, яка пов'язує рух двигуна та навантаження, можна подати у вигляді

$$\dot{\phi}_d = \omega_d;$$

$$\Delta = \phi_d - \delta \cdot i_R;$$

$$\dot{M}_c = \begin{cases} C_1 \cdot (\omega_d - \dot{\delta} \cdot i_R), & \text{якщо } |\Delta| < \Delta_\phi \\ C_2 \cdot (\omega_d - \dot{\delta} \cdot i_R), & \text{інакше} \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{тр} = M_c \cdot i_R \cdot (1 - \eta) \cdot \text{sign} \dot{\delta};$$

$$\ddot{\delta} = \frac{M_c \cdot i_R - M_{тр} - M_a - M_{вд}}{J_H},$$

де ω_d – кутова швидкість обертання двигунів; ϕ_d – кут повороту вала двигуна; i_R – передавальне число редуктора; Δ – пружна деформація редуктора; Δ_ϕ – значення еквівалентного, приведенного до осі двигуна люфту; $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ – кут відхилення, кутова

швидкість та прискорення навантаження; M_a – аеродинамічний момент; $M_{вд}$ – момент вагового дисбалансу; J_H – момент інерції навантаження.

У цих рівняннях для поліпшення процесів числового інтегрування обчислення моменту опору на валу двигуна M_c проводять інтегруванням похідної цього моменту.

Отже, послідовний ланцюг отриманих вище диференціальних і алгебричних рівнянь (1–6) у сукупності є *повною математичною моделлю* електроприводів для досліджень власної динаміки приводів і математичного моделювання польоту ракет.

Стійкість замкнутого контуру електропривода

При прийнятих допущеннях система рівнянь (1–6) має восьмий порядок. Будь-яка, навіть спрощена, але ще досить коректна лінійна модель для оцінювання стійкості та якості перехідних процесів у слідкувальному електроприводі буде мати мінімум п'ятий порядок. Як наслідок, застосування до такої системи алгебричних критеріїв або частотних методів не дає простих і наочних рішень.

Проте якісні висновки відносно стійкості слідкувальних електроприводів можна зробити виходячи з аналізу та можливостей спрощення їх лінійних рівнянь.

З повної системи рівнянь (1–6) можна досить легко отримати систему лінійних рівнянь замкнутого електропривода, яка буде мати *вищий порядок*, ніж, наприклад, лінійна система рівнянь гідравлічних сервомеханізмів [2]. Це зумовлено наявністю в тракці керування форсувальної ланки, а в тракці обчислення рушійного зусилля інерційної ланки – рівнянь електродвигуна.

Для якісного оцінювання запасів стійкості замкнутого електропривода можна штучно знизити порядок цієї системи.

Якщо врахувати, що в робочому діапазоні частот вплив додаткового запізнювання за рахунок електродвигуна практично повністю нівелює форсувальна ланка коректимального контуру, у першому наближенні можна виключити із системи рівняння форсувальної ланки та спростити рівняння двигуна, записавши його швидкість у вигляді підсилювальної ланки сигналу помилки з поправкою на значення навантаження.

Тоді система лінійних рівнянь електропривода умовно зводиться до системи третього порядку за структурою, аналогічною системі лінійних рівнянь гідроприводу [2].

Проведений у роботі [2] аналіз алгебричних критеріїв стійкості гідравлічних сервоприводів показав, що область стійкості в замкнутому контурі гідроприводу визначають добутком двох параметрів: жорсткості силової передачі *всередині контуру* сервопривода та крутості падіння швидкості приводу під час зростання навантаження.

Очевидно, при прийнятих вище спрощеннях цю закономірність можна застосувати і для якісного *оцінювання* запасів стійкості слідкувальних електроприводів.

При близькому для різних типів приводів характері зміни швидкості за зміни навантаження конструктивна жорсткість силової передачі в електроприводах *значно вище* жорсткостей рідини або газу в порожнинах силових циліндрів, отже, *запаси стійкості замкнених електроприводів повинні бути значно вище, ніж у гідравлічних або газових сервомеханізмах*.

Ці висновки справедливі при забезпеченні *мінімального запізнювання в тракці формування керувального сигналу*. Збільшення будь-якої сталої часу тракту до рівня 0,01–0,02 с різко, в 1,5–2 рази, знижує область стійкості.

Ці оцінки та висновки підтверджують результати випробувань і експлуатації реальних електроприводів, а також розрахунки із застосуванням повної математичної моделі електроприводів.

Приклад розрахунків динамічних характеристик електропривода

Застосування як інструмента досліджень числового інтегрування повної системи рівнянь дозволяє отримати досить достовірні та швидкі результати, особливо на стадії проєктування електроприводів.

Розрахунки процесів відпрацювання приводом різних командних сигналів, у тому числі стрибкоподібних, імпульсних або синусоїдних, фактично дають повну інформацію про його динамічні властивості.

Крім розрахункової оцінки стійкості, практичний інтерес викликає визначення за допомогою аналізу перехідних процесів і

частотних характеристик оптимальних значень сталої часу форсувального ланцюга коректувального контуру.

Значення необхідної сталої часу залежить від багатьох параметрів приводу, але, за інших рівних умов, визначальним параметром є відношення максимального рушійного моменту до моменту інерції ротора двигуна. Фактично, максимальне прискорення ротора та відповідна йому швидкість наростання рушійного зусилля визначають значення необхідного форсування: чим *більша* швидкість наростання зусилля, тим *менша* необхідна стала часу форсувального ланцюга.

Сталі часу форсувальних ланок, залежно від зазначеного співвідношення, для різних приводів можуть лежати в діапазоні 0,005–0,02 с.

Як приклад використання отриманої математичної моделі наведемо деякі результати розрахунків динамічних процесів в електроприводі з досить великою (для електроприводів) потужністю, більше 1 кВт, з двигуном, що розвиває 6000 об/хв на холостому ході, і передавальним числом редуктора 337.

Інші необхідні для розрахунків параметри цього приводу та його навантаження наведено нижче:

T_d, T_f – сталі часу коректувальної ланки, їх вибирають за результатами розрахунків;

χ_1 – значення зони нечутливості;

χ_2 – значення лінійної зони передпідсилювача, розраховують для заданого значення колового коефіцієнта;

$R_{пр}$ – повний опір статорного ланцюга (опір обмотки статора, вихідних ключів підсилювача, внутрішній опір джерела живлення), 0,35 Ом;

$L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря, 0,00016 Гн;

$U_{живл}$ – напруга живлення, 60 В;

$I_{я}^{max}$ – рівень обмеження струму якоря двигуна, 70 А;

$C_M, (C_e)$ – коефіцієнт моменту та коефіцієнт реакції якоря 0,08 Н·м/А (В·с/рад);

$J_{зв}$ – зведений момент інерції ротора двигуна, $70 \cdot 10^{-6}$ кг·м²;

C_2 – прийнята в розрахунках жорсткість редуктора з боку двигуна, 4 Н·м/рад;

C_1 – прийнята в розрахунках жорсткість редуктора «всередині» люфту, 2 Н·м/рад;

Δ_ϕ – сумарне значення приведених до двигуна люфтів, 0,1 рад;

η – ККД редуктора 0,6–0,8;

$M_a, M_{вд}$ – зовнішні моменти на валу навантаження (у цих розрахунках не враховували);

J_H – момент інерції навантаження, 0,7 кг·м².

Реакція на ступеневий вплив. Амплітудні та фазові частотні характеристики сервопривода. Стійкість контуру

За типом перехідних процесів відпрацювання приводом ступеневої команди можна визначити якість роботи слідкувального приводу:

– ступінь коливального характеру перехідного процесу;

– статичну помилку відпрацювання (якщо є момент опору навантаження);

– запаси стійкості слідкувального приводу.

Зокрема, при збільшенні колового коефіцієнта за моментом виникнення незгасаючих коливань можна оцінити критичний коефіцієнт підсилення в контурі.

Результати розрахунків і добре узгоджені з ними результати випробувань реальних приводів дають значення критичних колових коефіцієнтів у контурі замкненого електропривода на рівні 250–300 с⁻¹, що дозволяє брати робочі значення цих коефіцієнтів у діапазоні 80–120 с⁻¹.

Такі значення колового коефіцієнта, за їх реалізації, забезпечують високі динамічні характеристики електроприводів. Для порівняння: у гідравлічних сервоприводів порівнюваної потужності застосовувані колові коефіцієнти підсилення рідко виходять за межі діапазону 10–20 с⁻¹, що на порядок нижче, ніж у електроприводів.

На рис. 3 подано розрахунки реакції електропривода на ступеневий сигнал з рівнем 0,05 рад без включення в контур коректувальної форсувальної ланки.

Реакція сервопривода на ступеневий сигнал, навіть за близького до можливих номінальних значень колового коефіцієнта, має коливальний характер, для усунення якого необхідно ввести корекцію різницевого сигналу.

Наведені на рис. 4 сітки амплітудно-фазові частотні характеристики (АФЧХ) при різних значеннях сталої часу форсувальної ланки найбільш наочно

демонструють вплив форсування на роботу замкненого контуру.

Сталу часу фільтра, необхідного для організації операції форсування, у всіх випадках брали 0,001 с.

Розрахунки показують, що збільшення сталої часу форсування до $T_d = 0,007$ с повністю усуває підняття амплітудної характеристики та додаткове фазове запізнювання.

Реакція на ступеневий сигнал сервопривода з коректувальною ланкою та сталою часу форсувальної ланки, що дорівнює 0,007 с (див. рис. 3), близька до реакції аперіодичної

ланки першого порядку при значеннях зони лінійності швидкісної характеристики 0,5–1 град і має коливальний характер з переходом у режим автоколиваний при коловому коефіцієнті 250–300 1/с.

Такі дані відповідають практично трикратному (!) запасу стійкості в контурі при номінальному коловому коефіцієнті 100 1/с.

Розрахункові характеристики електроприводів, отримані із застосуванням поданої вище математичної моделі, досить добре узгоджуються з результатами випробувань реальних електроприводів.

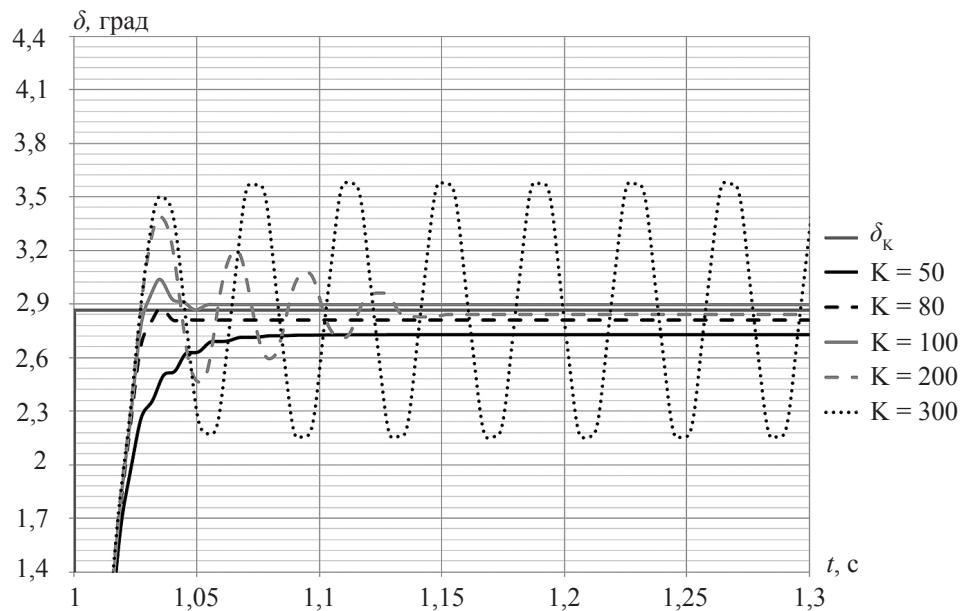


Рис. 3. Реакція електропривода на ступеневий сигнал при відсутності корекції та при різних значеннях колового коефіцієнта підсилення

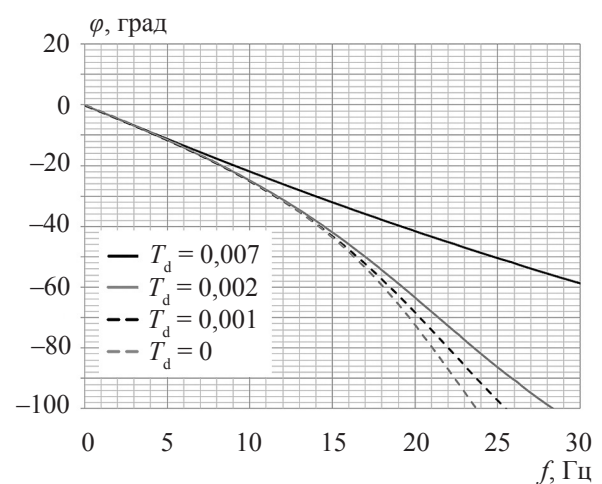
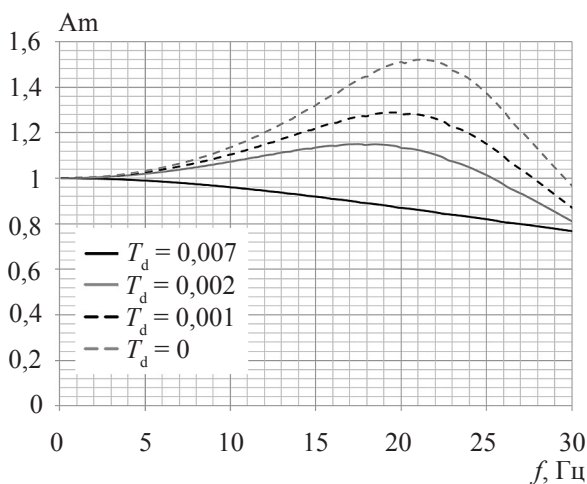


Рис. 4. АФЧХ привода при різних значеннях сталих часу форсувальної ланки T_d і коловому коефіцієнті підсилення 100 1/с

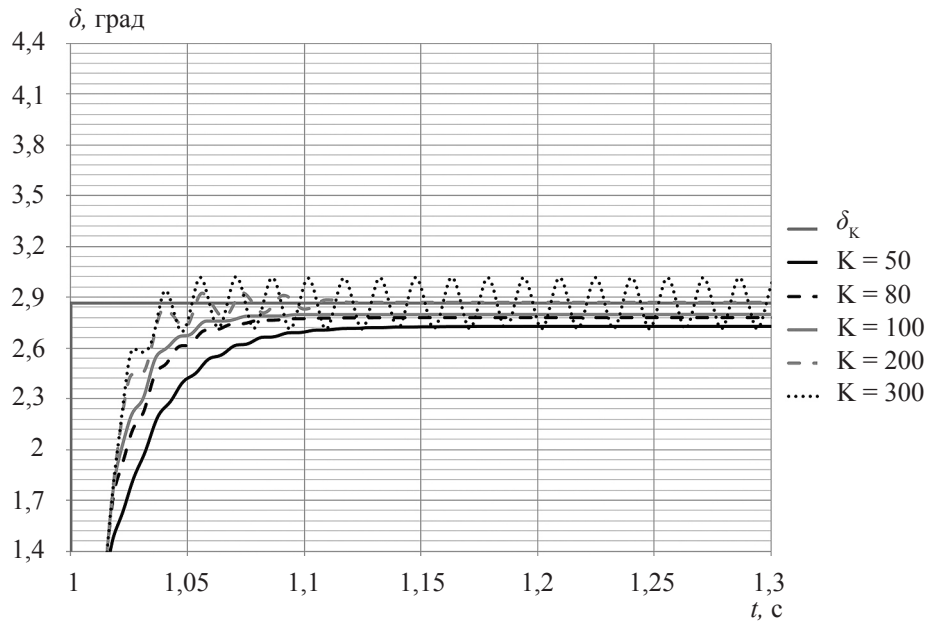


Рис. 5. Реакція електропривода на ступеневий сигнал за наявності в тракці формування керувального сигналу коректувального контуру та різних значень колового коефіцієнта підсилення

Основні висновки про результати теоретичного аналізу й експериментальних робіт щодо визначення динамічних характеристик слідкувальних електроприводів

Результати розрахунково-теоретичних і експериментальних робіт з дослідження динаміки електричних сервомеханізмів дозволяють констатувати такі основні положення:

1. Електроприводи, створені на базі сучасних безколекторних двигунів з висококоерцитивними магнітами, забезпечують високі динамічні характеристики, недосяжні для гідравлічних або газових типів сервомеханізмів.

2. Високі динамічні характеристики електроприводів зумовлені великими допустимими коефіцієнтами підсилення, які можна реалізувати в замкнених контурах приводів.

3. Широкий діапазон допустимих коефіцієнтів підсилення в електроприводах зумовлений великою конструктивною жорсткістю кінематичної передачі двигун–редуктор–навантаження.

4. Електроприводи, без корекції сигналу всередині контуру, мають підвищену коливальність процесів під час відпрацювання керувальних команд.

5. Коливальний характер виконання команд зумовлений обмеженою швидкістю зміни моменту, передаваного двигуном редуктору, який змінюється під час обертання вала двигуна та зміни деформації кінематичного тракту.

6. Підвищену коливальність електроприводів досить ефективно усувають введенням форсувальної ланки в контур оброблення різницевого сигналу.

7. Сталі часу диференціюючого ланцюга форсувальної ланки можуть лежати в діапазоні від 5 до 50 мілісекунд, залежно від максимального кутового прискорення, яке розвиває ротор двигуна: чим більше максимальне прискорення, тим менша необхідна стала часу.

8. Значення сталих часу запізнювання в тракці формування керувального сигналу (а їх може бути кілька) не повинні перевищувати 1–2 мс. Збільшення хоча б однієї сталої до рівня 0,01–0,02 с призводить до різкого скорочення області стійкості контуру.

9. Основний та превалювальний вплив на динамічні характеристики замкненого електропривода у великій кількості практичних реалізацій має момент інерції ротора електродвигуна.

Зміна в широких межах моменту інерції навантаження у багатьох випадках істотно

не впливає на динамічні характеристики електропривода.

10. Коефіцієнт корисної дії редуктора в межах 0,6–0,9 у більшості випадків досить слабо впливає на динамічні характеристики електроприводів.

11. Амплітудні та фазові частотні характеристики електроприводів, з оптимально вибраними параметрами коректувальних контурів, у робочому діапазоні частот близькі до частотних характеристик аперіодичної ланки першого порядку.

12. Для розрахунків керованості та стійкості різних літальних апаратів досить коректно можна використати найпростішу математичну модель електропривода у ви-

гляді аперіодичної ланки зі сталою часу, що дорівнює оберненому коловому коефіцієнту підсилення, і з обмеженням максимальної швидкості приводу.

Список використаної літератури

1. Козак Л. Динамика сервомеханизмов ракетной техники. Инженерные методы исследования. Изд-во: LAP LAMBERT Academic Publishing Германия. 2022 г.

2. Козак Л. Р., Шахов М. И. Математические модели гидравлических сервомеханизмов ракетно-космической техники. Космическая техника. Ракетное вооружение. 2019. Вып. 1.

Стаття надійшла 22.03.2024