

УДК 681.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).23](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).23)

ELECTRIC DRIVE WITH NON-LINEAR SWITCHING SIGNALS

ЕЛЕКТРОПРИВОД З НЕЛІНІЙНИМИ ПЕРЕМІКАЮЧИМИ СИГНАЛАМИ

Oleg V. Savchenko
savchenko1984@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9718-7857

О. В. Савченко,
старший викладач

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The use of nonlinear correction signals in an electric drive increases the accuracy, quality of transients and stability of the system. The main goals of correction in electric drives are to compensate for internal nonlinearities, where electric drives often contain nonlinear elements such as friction, saturation of magnetic links, dead zones and hysteresis. Also, in systems with deep regulation, correction with nonlinear signals reduces overshoot, and also increases accuracy and dynamic stability. The essence of the considered type of correction signals is that the signals change the parameters of the links themselves, and only the dynamic parameters change, and their static parameters remain unchanged. *Purpose.* Creation of a control system based on dynamic nonlinear switching signals to reduce the inertia of nonlinear links. *Methodology.* Theoretical research performed with the involvement of modern electric drive theory, methods of automatic control theory and computer modeling, processing and analysis of the results obtained. *Results.* The work determined the required type of engine, compiled a structural diagram with the definition of static and dynamic parameters of the links. The characteristic equation of the system was compiled, and from the stability expression the dependence between the critical gain and the parameters of the links was determined, and the parameters that can be practically changed when introducing a nonlinear dynamic correction device were also determined. At

$\frac{u_0}{u} = 1, 2$, the gain of the system when introducing nonlinear dynamic correction signals can be increased by 22 times.

Scientific novelty. The work presented substantiates a new approach to the synthesis of electric drive control systems by switching signals with inherent nonlinearities that already exist in the system to reduce the inertia of nonlinear links.

Practical significance. The results of the work can be used in the design of electric drives operating in modes with high requirements for speed and accuracy of regulation. The proposed approaches contribute to the creation of more effective control algorithms that take into account the compromise between speed, accuracy and stability of the system.

Key words: inherent nonlinearity; electric drive; nonlinear correction link; synthesis; electric drive; correction by signal switching; nonlinear system; control quality indicators.

Анотація. Використання нелінійних коригуючих сигналів в електроприводі підвищує точність, якість перехідних процесів та стійкість системи. Основними цілями корекції в електроприводах є компенсація внутрішніх нелінійностей, де електроприводи часто містять нелінійні елементи, такі як тертя, насичення магнітних ланок, мертві зони і гістерезис. Також в системах з глибоким регулюванням коригування нелінійними сигналами зменшує перерегулювання, а також підвищує точність і динамічну стійкість. Суть розглядаємого типу коригуючих сигналів полягає в тому, що сигнали змінюють параметри самих ланок, причому змінюються тільки динамічні параметри, а їх статичні параметри залишаються незмінними. *Мета.* Створення системи керування на основі динамічних нелінійних перемикаючих сигналів для зниження інерційності нелінійних ланок. *Методика.* Теоретичні дослідження, виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання, обробка та аналіз отриманих результатів. *Результати.* В роботі було визначено необхідний тип двигуна, складено структурну схему з визначенням статичних та динамічних параметрів ланок. Складено характеристичне рівняння системи, а з виразу стійкості визначено залежність між критичним коефіцієнтом підсилення та параметрами ланок, а також визначено параметри, які практично можуть

бути змінені при введенні нелінійного динамічного коригуючого пристрою. При $\frac{u_0}{u} = 1, 2$ коефіцієнт підсилення системи при введенні нелінійних динамічних коригуючих сигналів може бути збільшений в 22 рази. *Наукова новизна.* В приведеній роботі обґрунтовано новий підхід до синтезу систем керування електроприводами за допомогою перемикаючих сигналів з притаманними нелінійностями, які вже існують в системі, для зниження інерційності нелінійних ланок. *Практична значимість.* Результати роботи можуть бути використані при про-

ектуванні електроприводів, які працюють у режимах із високими вимогами до швидкодії та точності регулювання. Запропоновані підходи сприяють створенню більш ефективних алгоритмів керування, що враховують компроміс між швидкістю, точністю та стійкістю системи.

Ключові слова: притаманна нелінійність, електропривод; нелінійна коригувальна ланка; синтез; електропривод; коригування перемиканням сигналів; нелінійна система; показники якості керування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Використання нелінійних перемикаючих сигналів в електроприводі пов'язано з застосуванням нелінійних методів керування, часто для підвищення швидкодії, точності та стійкості до змін параметрів і збурень системи. Нелінійне перемикаюче керування (керування зі змінною структурою) припускає, що керуючий вплив приймає дискретне значення, і момент перемикання між цими значеннями визначається станом системи.

Суть даного керування полягає у максимальному швидкому досягненню цільового стану за рахунок використання нелінійних динамічних перемикаючих сигналів. Це дозволяє забезпечити оптимальне по швидкодії керування, а також високу стійкість до неточності моделі, зміни параметрів двигуна та зовнішніх навантажень.

Виходячи з цього, є сенс у більш поглибленому дослідженні нелінійних динамічних перемикаючих сигналів з використанням нелінійного пристрою з гальмівною муфтою.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одною з основних проблем, виникаючих при проектуванні автоматичних систем керування, являється забезпечення необхідної точності. Як правило, вимоги до точності викликають протиріччя не тільки до умов стійкості, а й до умов фізичного виконання системи. Для забезпечення потрібних умов параметрів системи, використовують різні варіанти зворотних зв'язків по швидкості і прискоренню обробки. Ввід подібних коригуючих сигналів дозволяє в десятки разів підвищити добротність системи і отримати якісні перехідні процеси, якщо в системі немає ланок з великою інерційністю.

У статті [1] розглядається вивчення нелінійних властивостей окремих елементів системи. В роботі [2, 3] досліджуються нелінійні властивості самих об'єктів керування, залишаючи по за увагою питання стійкості системи.

У статтях [4, 5] розглянуто використання нелінійних динамічних перемикаючих коректувальних сигналів, що дозволяють отримати нові результати. Їх фізична сутність полягає в тому, що вони змінюють лише динамічні параметри ланок системи, залишаючи статичні характеристики незмінними.

У роботі [6, 7] аналізуються проблеми синтезу та забезпечення стійкості нелінійних слідкуючих систем електроприводів із релейними характеристиками.

Водночас, на відміну від запропонованого підходу, там розглядаються лише умови абсолютної стійкості, причому для систем зі значними спотвореннями статичних характеристик, спричиненими суттєвими нелійнностями.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є створення системи на основі динамічних нелінійних перемикаючих сигналів для зниження інерційності нелінійних ланок. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

- визначити необхідний тип двигуна і устаткування системи;
- скласти структурну схему проектованої системи з визначенням статичних та динамічних параметрів ланок;
- скласти рівняння ланок та характеристичне рівняння системи, а з виразу стійкості визначити залежність між критичним коефіцієнтом підсилення та параметрами ланок;
- з складу системи визначити параметри, які практично можуть бути змінені при введенні нелінійних динамічних коригуючих пристроїв;
- виходячи з необхідного діапазону зміни параметрів ланки та характеру робочих умов системи, визначити тип коригуючої ланки;
- провести гармонічну лінеаризацію вибраного коригуючого пристрою та побудувати залежність коефіцієнтів від параметрів динамічного коригуючого сигналу;
- провести аналіз стійкості системи та визначити параметри, які її забезпечують.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження. Визначення стійкості системи при використанні нелінійних динамічних перемикаючих сигналів.

Предмет дослідження. Параметри регуляторів системи керування електропривода з нелінійним динамічним пристроєм.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В представленій роботі розглядається нелінійні динамічні перемикаючі сигнали, які в ряді випадків допомагають отримати нові якісні результати. Фізична суть розглядаємого типу коригуючих сигналів

полягає в тому, що сигнали змінюють параметри самих ланок, причому змінюються тільки динамічні параметри ланок, а їх статичні параметри залишаються незмінними. Зміни динамічних параметрів виконуються за допомогою корекції під час перехідного процесу сигналів на виході лінійної ланки [8].

Аналіз системи з нелінійними перемикаючими коригуючими сигналами доречніше проводити методом гармонічного балансу, а сигнал на вході ланки розкладається в ряд Фур'є і при розрахунках використовується тільки основна гармоніка коливань. Таким чином, основний ефект від такої системи в тому, що з'являється можливість міняти динамічні параметри ланок, які входять в систему автоматичного керування.

Більшість реальних ланок, які входять в автоматичні системи, мають інерційність. Розмір інерційності надає відчутний вплив на поведінку автоматичних систем. В електроприводі найбільшу величину постійної часу, як правило, має виконавчий електродвигун. Розміром постійної часу визначається якість електропривода.

Використання нелінійних динамічних перемикачів дозволяє не тільки зменшити ефект, визваний інерційністю двигуна, а й під час перехідного процесу звести його до нуля. Фізичні засади часткової компенсації інерційності двигунів наступні: негативний вплив постійного часу двигуна полягає в тому, що двигун з деяким запізненням розганяється до швидкості, що відповідає прикладеній напрузі; після зникнення сигналу або зміни його полярності (або фази) двигун продовжує обертатися в тому ж напрямку, що призводить до перерегулювання в системі. Причому фізично друга сторона негативного впливу інерційності двигуна видається більш небажаною. Однак практично можливо спроектувати систему таким чином, що у перехідному процесі двигун не спричинить суттєвого перерегулювання.

Для введення нелінійних динамічних коригуючих сигналів найбільш доречним є використання

гальмівних муфт. Гальмівна муфта при цьому повинна бути встановлена на валу виконавчого електродвигуна. На обмотку гальмівної муфти подається та ж напруга, що і на двигун. При цьому, коли напруга на двигуні мала, двигун загальмований. Якщо напруга, що подається на муфту, перевищує напругу спрацювання, муфта розгальмовується і двигун починає обертатися. Наявність муфти в деяких випадках може спричинити підвищення статичної помилки системи. Однак цей недолік окупується тими суттєвими перевагами, які має система з подібним двигуном. Зокрема, наявність муфти дозволяє значно зменшити вплив електромеханічної постійної часу двигуна на поведінку системи. Це пов'язано з тим, що у випадках, коли напруга на двигуні різко падає, муфта гальмує двигун і запобігає перерегулюванню у системі. Технічні характеристики двигуна з редуктором *DC PRO GM25-370SH 5*, який використано в системі, зведено у таблиці 1. В якості електромагнітної гальмівної муфти використано *Mufta Mayr Roba-stop-M*.

Виходячи з параметрів двигуна, розглянемо особливості розрахунку електропривода. Для оцінки впливу нелінійних динамічних сигналів, що подаються на гальмівну муфту, насамперед розглянемо типову лінійну систему, структурна схема якої представлена на рис. 1.

Сигнал у системі, який пропорційний неузгодженості, надходить з датчика на підсилювачі. Підсилювач з коефіцієнтом посилення k_2 є безінерційним, тиристорний перетворювач (ТП) з коефіцієнтом посилення k_3 має постійну часу T_1 . Напруга u_3 з виходу ТП надходить на виконавчий двигун, який через редуктор з'єднаний з приймачем електропривода. Для підвищення якості системи двигун та ТП охоплені швидкісним зворотнім зв'язком C_1 . Перехідні процеси у системі рис. 1 описуються системою рівнянь:

Таблиця 1. Технічні характеристики електродвигуна *DC PRO GM25-370SH 5*

Напруга, В	Потужність, Вт	Номінальна швидкість, об/хв	Номінальна швидкість, об/хв	Номінальний момент інерції, г · см	Струм, А	Струм зриву, А	Момент інерції на старті, г · см
24	13,44	100	150	1000	0,56	2,45	1300

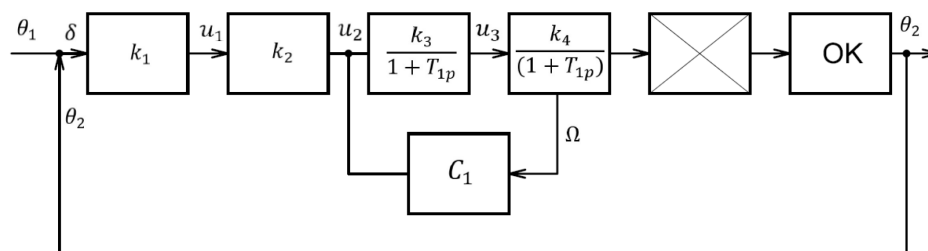


Рис. 1. Структурна схема електропривода

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \theta_1 - \theta_2; \\ u_1 &= k_1 \delta; \\ u_2 &= k_1 k_2 \delta; \\ \Omega &= \frac{k_4}{1 + T_2 p} u_3; \\ \theta_2 &= k_5 \frac{1}{p} \Omega; \\ u_{o.c.} &= C_1 \Omega; \\ u_3 &= \frac{k_3}{1 + T_1 p} (u_2 - u_{o.c.}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Виконавши перетворення, отримаємо

$$\delta = \frac{p(1 + T_1 p)(1 + T_2 p) + k_3 k_4 C_1 p}{p(1 + T_1 p)(1 + T_2 p) + k_3 k_4 C_1 p + k} \theta_1. \quad (2)$$

Виходячи з цього, характеристичне рівняння системи буде мати вигляд:

$$A_0 p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0; \quad (3)$$

де

$$A_0 = 1; \quad A_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}; \quad A_2 = \frac{1 + k_3 k_4 C_1}{T_1 T_2};$$

$$A_3 = \frac{k}{T_1 T_2}; \quad k = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5.$$

Система рис. 1 знаходиться на границі стійкості, якщо коефіцієнти характеристичного рівняння 3 зв'язані між собою співвідношенням

$$A_1 A_2 - A_0 A_3 = 0. \quad (4)$$

Система рис. 1 буде знаходитися на границі стійкості, якщо

$$\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \frac{1 + k_3 k_4 C_1}{T_1 T_2} - \frac{k}{T_1 T_2} = 0. \quad (5)$$

З рівняння 5 визначаємо вираз для критичного коефіцієнта системи k :

$$k = \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) (1 + k_3 k_4 C_1). \quad (6)$$

Підставивши в формулу 6 данні, які показані в таблиці 2, отримаємо значення максимально допустимого коефіцієнта підсилення, $k_{\max} = 60$ сек. Таким чином, система на рис. 1 має низьку якість.

Для підвищення якості системи, яку зображено на рис. 1, шляхом введення динамічних коригуючих сигналів, на валу виконавчого двигуна встановлена гальмівна муфта. На обмотку гальмівної муфти подається та ж напруга, що й на електродвигун. Передаточна функція електродвигуна в даному випадку буде виглядати наступним чином:

$$\frac{\Omega}{\omega} = \frac{q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)}}{1 - \frac{1}{\omega} \cdot \frac{q'(a)}{q(a)} p}. \quad (7)$$

Використовуючи дане рівняння разом з іншими рівняннями ланок системи, характеристичне рівняння гармонічно лінеаризованої системи приведемо до вигляду:

$$p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0. \quad (8)$$

Для оцінки стійкості системи використаємо формулу 4, де умови стійкості будуть мати вигляд:

$$\left[\frac{1}{T_1} - \frac{\omega q(a)}{q'(a)} \right] \left[\frac{1 + k_3 C_1 \left(q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right)}{-\frac{T_1 q'(a)}{\omega q(a)}} \right] - k' \left[\frac{q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)}}{-T_1 \frac{q'(a)}{\omega q(a)}} \right] = 0. \quad (9)$$

Виділимо з цього рівняння критичний коефіцієнт підсилення

$$k' \left[\frac{q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)}}{q(a)} \right] = \left[\frac{1}{T_1} - \frac{\omega q(a)}{q'(a)} \right] \left[1 + k_3 C_1 \left(q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right) \right]. \quad (10)$$

Для визначення якості перехідних процесів в системі з нелінійним двигуном доцільно використати формули для коефіцієнта згасання ξ та частоти коливань ω :

$$\xi = \frac{\left[\left[\frac{1}{T_1} - \frac{\omega q(a)}{q'(a)} \right] \left\{ 1 + k_3 C_1 \left[q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right] \right\} - \left[-k' \left[q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right] \right] \right]}{2 \left\{ \left[1 + k_3 C_1 \left[q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right] \right] - \left[-\left[\frac{1}{T_1} - \frac{\omega q(a)}{q'(a)} \right] + 2\xi \right] \frac{T_1 q'(a)}{\omega q(a)} \right\}}; \quad (11)$$

Таблиця 2. Коефіцієнти розрахунку

T_1	T_2	k_1	k_3	k_4	k_5	C_1
0,05	0,1	1	1	200	0,004	0.005

$$\omega^2 = \frac{k' \left[q(a) + \frac{q'(a)^2}{q(a)} \right]}{T_1 - \frac{q'(a)}{\omega q(a)} - 2\xi \frac{T_1 q'(a)}{\omega q(a)}}. \quad (12)$$

Побудовані по результатам розрахунків формул 11 і 12, залежності коефіцієнтів згасання ξ від амплітуди коливань $\frac{u}{u_0}$, показані на рис. 2.

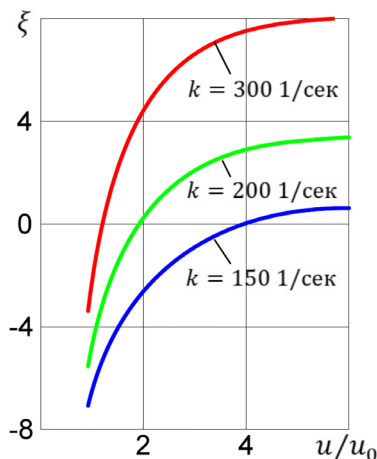


Рис. 2. Результати розрахунків коефіцієнтів згасання від амплітуди коливань

Для більшої наглядності діаграма нелінійних перехідних процесів наведена на рис. 3. Крива $\xi = 0$, система починає розгойдуватись, а при малих відхиленнях, затухати. З діаграми рис. 3 можна зробити висновок, що система з використанням гальмівної муфти для введення нелінійних динамічних коригуючих сигналів має високий критичний коефіцієнт підсилення з достатньою якістю перехідного процесу [9].

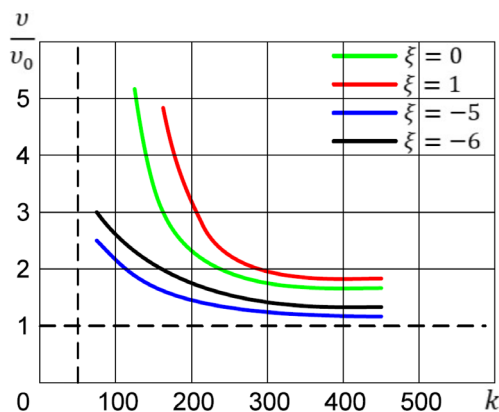


Рис. 3. Діаграма затухання перехідних процесів

Недоліком системи з гальмівною муфтою є обмеження, накладені на величину допустимої амплітуди відхилень, але в систему можуть бути внесені зміни,

які дозволяють виключити цей недолік. Суть полягає в тому, що в систему вводиться додаткова нелінійна ланка, характеристики якої вибрані таким чином, що виключають необхідність обмеження амплітуди коливань системи. Для системи, яка показана на рис. 1, додатковою нелінійністю є введення насичення ТП, яке призведе до того, що амплітуда коливань напруги на вході ніколи не буде перевищувати задану величину. Таким чином, незалежно від величини неузгодження чи відхилення системи, перехідні процеси будуть відповідати тій частині діаграми згасання перехідних процесів, яка характеризує стійкість системи. В даному випадку, ніяких обмежень на початкову амплітуду відхилення системи не накладається, а перехідні процеси описуються системою рівнянь 1. Основною задачею при аналізі системи являється визначення параметрів, які повинен мати ТП з насиченням, щоб забезпечити стійкість системи при любых початкових відхиленнях системи.

Так як величина коефіцієнтів підсилення лінійної частини характеристики була знайдена, потрібно визначити лінійну зону підсилювача. Для цього можна скористатися діаграмою затухання перехідних процесів рис. 3, де видно, що амплітуда коливань не повинна перевищувати a^* , а значення параметра b підсилювача з насиченням $b = a^*/k_3$. З цього можна зробити висновок, що введення в систему додаткової нелінійності дозволяє суттєво збільшити діапазон можливих значень коефіцієнтів підсилення, при яких система стійка при будь-яких початкових відхиленнях.

Як показав аналіз, використання нелінійних динамічних перемикачів сигналів для компенсації інертності виконавчих електродвигунів, дозволив значно підвищити добротність системи.

Далі розглянуто введення динамічних перемикаючих сигналів, при яких величина еквівалентної величини часу не тільки знижується до нуля, а двигун набуває деякі властивості не інерційної, а диференційної ланки. Основною ознакою, по якій визначається інтервал і доцільність введення нелінійних коригуючих сигналів, являється відмінність в знаках вхідної та вихідної напруги двигуна і його швидкості, де коригуючий сигнал вводиться в систему в моменти часу Δt , в який при зміні знаку напруги двигун продовжує обертатися в протилежну сторону. Однак, вся крива розгону двигуна, внаслідок його інерційності, зміщена відносно керуючої напруги навіть після вимкнення швидкості двигуна в інтервалі часу $\omega \Delta t_3$. Основна гармоніка двигуна при цьому трохи відстає від керуючого сигналу u .

Для зміни способу введення в систему коригуючого сигналу, який зможе повністю компенсувати постійну часу двигуна, ввід коригуючого сигналу вводиться зі здвигом в часі на величину попередження γ . Змінюючи величину γ , можна в широких межах міняти коефіцієнт гармонічної лінеаризації $q(a)$

і $q'(a)$, на рис. 4 показаний випадок, коли коефіцієнт гармонійної лінеаризації $q'(a) > 0$.

Передаточна функція двигуна записується наступним чином:

$$\Omega = \left[q(a) + \frac{q'(a)}{\omega} p \right] u. \quad (13)$$

В даному випадку швидкість двигуна має дві складові: 1) співпадає по фазі з керуючою напругою u і пропорційна коефіцієнту гармонічної лінеаризації $q(a)$; 2) складова рівна $\frac{q'(a)}{\omega} pu$, де вона випереджає на кут $\frac{\pi}{2}$ керуючу напругу u . Змінюючи величину γ , можна в міняти співвідношення між коефіцієнтами $q(a)$ і $q'(a)$.

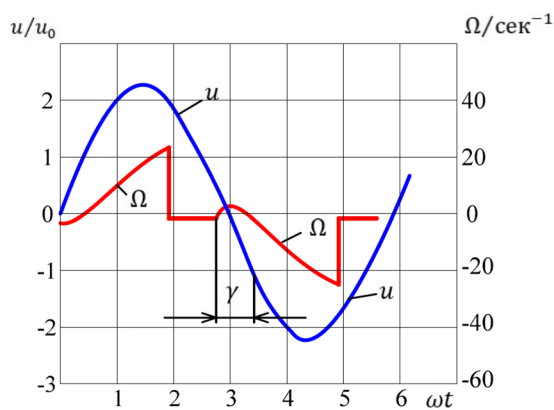


Рис. 4. Вплив величини γ на коефіцієнт гармонічної лінеаризації

Структурна схема з введеним випереджальним сигналом наведена на рис. 5, де сигнал для керування гальмівною муфтою надходить від одного з проміжних каскадів підсилювача. Для цього паралельно основному каналу системи під'єднується допоміжний керуючий канал, для керування гальмівною муфтою встановлюється передаточна функція з коефіцієнтом підсилення k_6 і постійною часу T_6 . Постійна часу T_6 для подачі випереджального сигналу повинна підбиратися таким чином, щоб виконувалась рівність:

$$\arctg \omega T_6 + \arctg \omega T_M < \arctg \omega T_Y. \quad (14)$$

Коефіцієнт підсилення k_6 при деяких умовах може не впливати на стійкість системи. В статичі навіть при малих неузгодженостях системи, напруга, яка подається на гальмівну муфту, буде достатня для розгальмування двигуна, при цьому неузгодженість буде відпрацьована системою. Співвідношення напругою спрацювання муфти і амплітудою напруги на ній визначає інтервал часу, в який коригуючий сигнал подається в систему. З урахуванням γ при малих T_6, T_M :

$$\varphi_1 \approx \arcsin \frac{u_0}{u} - \arctg \omega T' = \varphi - \gamma, \quad (15)$$

де $T' = T_Y - T_6$.

При різних відхиленнях системи амплітуда напруги u на двигуні змінюється. При цьому змінюються інтервали $\omega \Delta t$, в які подається випереджаючий сигнал, а при великих відхиленнях інтервал, в період якого подається випереджаючий сигнал $\Delta t \rightarrow 0$. Це призводить до того, що система може бути стійка при малих відхиленнях, і нестійка при великих. Навіть якщо обмежити амплітуду можливих відхилень системи, коефіцієнт згасання системи ξ буде сильно змінюватись при зміні амплітуди коливань системи, що в свою чергу, може погіршувати якість перехідних процесів.

Для виключення цього недоліку таким же чином, як це робилося при включенні коригуючих сигналів без випередження, може бути використана нелінійність типу «випередження», яка включена в систему. Тільки цю нелінійність доцільно вводити не в основний канал, а в допоміжний. Незалежно від амплітуди відхилення системи та від амплітуди напруги, яка надходить до двигуна, зберігається постійним співвідношення $\frac{u_0}{u}$. Це призводить до того, що коефіцієнт згасання якості перехідного процесу ξ не залежить від амплітуди коливання системи і може бути вибраним оптимально. Виходячи з цього, при великих відхиленнях системи швидкість двигуна не обмежується, а система швидко відпрацьовує неузгодженість.

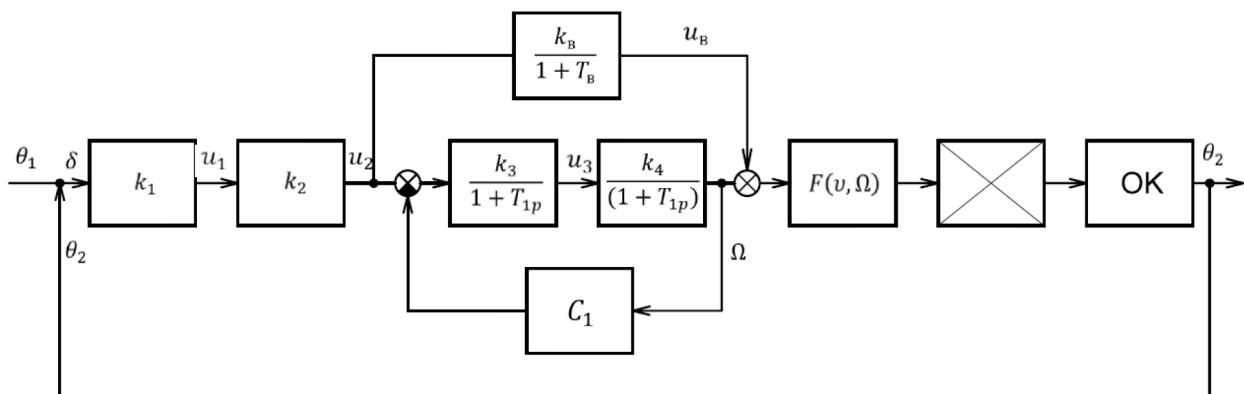


Рис. 5. Структурна схема з введеним випереджальним сигналом

Таким чином, при включенні гальмівної муфти по схемі рис. 5, може бути отримана якісна система.

Для аналізу впливу випереджальних коригуючих сигналів на параметри необхідно визначити коефіцієнти гармонійної лінеаризації $q(a)$ і $q'(a)$, а рівняння швидкості буде мати вид:

$$\Omega = \frac{ku}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi_1 - \psi) - e^{-\frac{1}{T}} \sin(\varphi_1 - \psi) \right] [\text{сек}^{-1}]. \quad (16)$$

Коефіцієнти гармонійної лінеаризації $q(a)$ і $q'(a)$ мають вигляд:

$$q(a) = \frac{2}{\pi a} \int_0^a \Omega \sin(\omega t + \varphi_1) d(\omega t + \varphi_1); \quad (17)$$

$$q'(a) = \frac{2}{\pi a} \int_0^a \Omega \cos(\omega t + \varphi_1) d(\omega t + \varphi_1). \quad (18)$$

На рис. 6 Побудовані графіки $\frac{1}{k}q(a)$ та $\frac{1}{k}q'(a)$ для різних значень $\frac{u_0}{u}$ та різних значень ω при різниці постійної часу основних та допоміжних ланок $T' = 0,01$ сек.

Для аналізу стійкості використаємо наступні формули:

$$k_1 k_2 k_6 = \frac{1 + Cq(a)k_3}{\left[\frac{q(a) \left(T_1 T_2 + Ck_3 T_1 \frac{q'(a)}{\omega} \right)}{T_1 + T_2 + T_1 Ck_3 q(a) + C \frac{q'(a)}{\omega}} \right] k_3 k_5}; \quad (19)$$

$$\omega^2 = \frac{k_1 k_2 k_3 q(a) k_5 k_6}{T_1 + T_2 + T_1 Ck_3 q(a) + C \frac{q'(a)}{\omega}}. \quad (20)$$

Результати розрахунку наведені на діаграмі рисунку 7, де крива 1 позначає залежність k від $\frac{u_0}{u}$ для системи зі зворотним зв'язком і випередженням $T = 0,01$ сек. Крива 2 позначає те ж саме, але при $\gamma = 0$, крива 3 для системи без зворотного зв'язку випередженням $T = 0,01$ сек., крива 4 теж саме при $\gamma = 0$.

Діаграма ділить всю площину на дві частини, визначаючи стійкість і нестійкість системи. Нижня частина діаграми визначає область параметрів

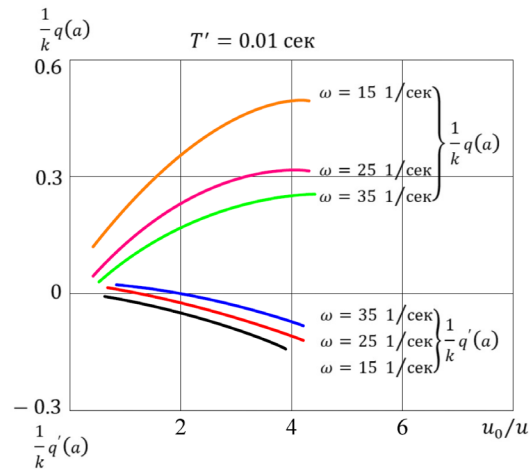


Рис. 6. Побудовані графіки $\frac{1}{k}q(a)$ та $\frac{1}{k}q'(a)$ для різних значень $\frac{u_0}{u}$

стійкості системи, тоді як нижня частина визначає область параметрів нестійкості системи. Без використання динамічних коригуючих сигналів значення критичного коефіцієнту підсилення дорівнює: $k_{кр} = 30 \text{ сек}^{-1}$ для системи без зворотного зв'язку і для системи зі зворотнім зв'язком $k_{кр} = 60 \text{ сек}^{-1}$.

ВИСНОВКИ

В роботі обґрунтовано новий підхід до синтезу систем керування електроприводами за допомогою перемикання сигналів з притаманними нелінійностями, які вже існують в системі для зниження інерційності нелінійних ланок. Представлені результати узагальнюють теоретичні дослідження системи керування на основі динамічних нелінійних перемикаючих сигналів для зниження інерційності нелінійних ланок. В роботі було визначено необхідний тип двигуна, складено структурну схему з визначенням статичних та динамічних параметрів ланок. Складено характеристичне рівняння системи, а з виразу стійкості визначено залежність між критичним коефіцієнтом підсилення та параметрами ланок, а також визначено параметри, які практично можуть бути змінені при введенні нелінійних динамічних коригуючих пристроїв.

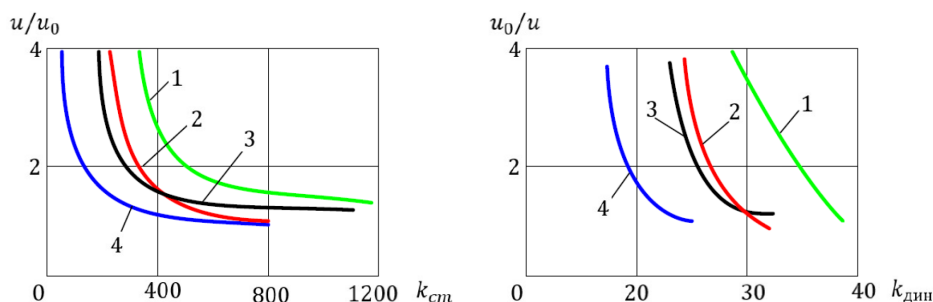


Рис. 7. Результати стійкості системи

При порівнянні отриманих результатів (рис. 7) можна зробити висновок, що критичний коефіцієнт підсилення нелінійної системи без зворотного зв'язку при $\frac{u_0}{u} = 1,4$ у 8 разів перевищує коефіцієнт підсилення лінійної системи. Статичний коефіцієнт підсилення нелінійної системи зі зворотним зв'язком в 7.5 разів перевищує коефіцієнт підсилення лінійної системи зі

зворотнім зв'язком. Ввід попередження $T' = 0,01$ сек дозволяє вдвічі збільшити статичний коефіцієнт підсилення. Якщо обмежитись $\frac{u_0}{u} = 1,2$, то коефіцієнт підсилення системи при введенні нелінійних динамічних коригуючих сигналів може бути збільшений в 22 рази. Отже, за допомогою введення динамічних нелінійних сигналів було отримано якісну систему.

REFERENCES

- [1] Kodkin, V. L., Anikin, A. S., & Baldenkov, A. A. (2020). Structural correction of nonlinear dynamics of frequency-controlled induction motor drives. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(1), 220.
- [2] Islam, M. R., Sadhu, P. K., Islam, M. M., & Hossain, M. K. (2015). Performance Analysis of a DTC and SVM Based Field-Orientation Control Induction Motor Drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 5(3), 336.
- [3] Li, C. (2015, October). A Nonlinear System Control Strategy Based on Single Chip Computer. In *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering* (pp. 321–325). Atlantis Press.
- [4] Vaidyanathan, S., & Volos, C. (Eds.). (2016). *Advances and applications in nonlinear control systems*. Berlin : Springer International Publishing.
- [5] Sastry, S. (2013). *Nonlinear systems: analysis, stability, and control* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- [6] Ajwad, S. A., Iqbal, J., Ullah, M. I., & Mehmood, A. (2015). A systematic review of current and emergent manipulator control approaches. *Frontiers of mechanical engineering*, 10(2), 198–210.
- [7] Hu, J., Guo, Q., Sun, Z., & Yang, D. (2023). Study on low-frequency torsional vibration suppression of integrated electric drive system considering nonlinear factors. *Energy*, 284, 129251.
- [8] Biluk, I., Shareyko, D., Savchenko, O., Koshkin, D., Maiboroda, O., Rudenko F. (September, 2024). Stability of Electric Drives Optimized by Nonlinearity Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2024.
- [9] Biluk, I., Shareyko, D., Fomenko, A., Havrylov, S., Savchenko, O., & Stavinskiy, R. (2019, September). Construction and Adjustment of a Vibration Machine Based on a Complete Electric Drive. In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (pp. 114–117). IEEE.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kodkin, V., Anikin, A., Baldenkov, A. (2020). Structural correction of nonlinear dynamics of frequency-controlled induction motor drives. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* № 11. С. 220–227.
- [2] Islam, R., Islam, M., Hossain, K. (2015). Pintukumar Sadhu performance analysis of a DTC and SVM based field-orientation control induction motor drive. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* № 3. С. 336–343.
- [3] Chunmei, Li, A., L. A. (2015). Nonlinear system control strategy based on single chip computer, 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering. С. 321–325. DOI: <https://doi.org/10.2991/icadme-15.2015.64>
- [4] VAIDYANATHAN, Sundarapandian, et al. (ed.). (2016). *Advances and applications in nonlinear control systems*. Berlin : Springer International Publishing. ISBN 978-3-31-930167-9.
- [5] SASTRY, Shankar. (2013). *Nonlinear systems: analysis, stability, and control*. Springer Science & Business Media, ISBN 978-1-4419-3132-0.
- [6] AJWAD, Syed Ali, et al. (2015). A systematic review of current and emergent manipulator control approaches. *Frontiers of mechanical engineering* 10.2: 198–210.
- [7] HU, Jianjun, et al. (2023). Study on low-frequency torsional vibration suppression of integrated electric drive system considering nonlinear factors. *Energy*, 284. 129251.
- [8] Biluk, I., Shareyko, D., Savchenko, O., Koshkin, D., Maiboroda, O., Rudenko, A. (September 18-21, 2024). Stability of Electric Drives Optimized by Nonlinearity Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2024.
- [9] Biluk, I., et al. Construction and Adjustment of a Vibration Machine Based on a Complete Electric Drive. In: 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). IEEE, 2019. p. 114–117.

© Савченко О. В.

Дата надходження статті до редакції: 03.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 20.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0