

УДК 621.313
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.26](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.26)

RESEARCH OF AN ELECTRIC DRIVE WITH NONLINEAR CONSTRAINTS OF PHYSICAL VARIABLES

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З НЕЛІНІЙНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ ФІЗИЧНИХ ЗМІННИХ

Andriy V. Obrubov¹
andrii.obrubov5@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9667-1703

Oleksandr O. Chernov¹
oleksandr.chernov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1670-8276

Oleg Yu. Kimstach¹
Oleg.kimstach@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1447-8852

Larisa V. Vakhonina²
vakhoninalv@mnaeu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1668-2275

Dmitry L. Koshkin²
koshkindl@mnaeu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6927-8487

А. В. Обрубов¹,
докт. техн. наук, доцент

О. О. Черно¹,
докт. техн. наук, професор

О. Ю. Кімстач¹,
канд. техн. наук, доцент

Л. В. Вахоніна²,
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Д. Л. Кошкін²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

Abstract. Purpose. The purpose of the study is to increase the dynamic performance and reliability of a DC electric drive under conditions of significant disturbances and load changes by developing and analyzing a modal control system with nonlinear constraints on physical variables, in particular current and speed. **Methods.** The study was performed using methods of automatic control theory, modal synthesis of regulators, analysis of linear and nonlinear electromechanical systems, as well as methods of mathematical and simulation modeling. Structural modeling and numerical solution of differential equations in the MATLAB software environment were used to analyze the dynamic processes of the electric drive. The control quality was assessed by indicators of transient processes of the armature circuit current and the speed of rotation of the electric motor shaft during start-up and sudden load changes. **Results.** A structural diagram of a modal control system for a DC electric drive with nonlinear feedback on current and speed was developed. It is shown that the use of nonlinear cutoffs provides the formation of variable stiffness of the electromechanical characteristic depending on the operating mode. According to the simulation results, it was established that the armature circuit current is effectively limited to a given permissible level both in the starting mode and during a sharp change in load, while the transient processes are aperiodic in nature and there is no speed overregulation. **Scientific novelty.** A combination of the modal control method with nonlinear constraints of physical variables is proposed, which allows simultaneously ensuring high dynamic performance in the operating zone and effective protection of the electric drive from current and dynamic overloads in transient modes. **Practical significance.** The results obtained can be used in the design and modernization of automatic control systems for DC electric drives operating under conditions of alternating and shock loads, as well as in the educational process in the training of specialists in electromechanics and automation.

Key words: electric drive; nonlinearity; synthesis; correction device; feedback; transfer function; transients; current limitation; speed limitation; dynamic characteristics; electromechanical system; current overloads.

Анотація. Мета. Метою дослідження є підвищення динамічних показників та надійності електроприводу постійного струму в умовах дії значних збурень і змін навантаження шляхом розробки та аналізу системи модального керування з нелінійними обмеженнями фізичних змінних, зокрема струму та швидкості. **Методи-**

ка. Дослідження виконано з використанням методів теорії автоматичного керування, модального синтезу регуляторів, аналізу лінійних і нелінійних електромеханічних систем, а також методів математичного та імітаційного моделювання. Для аналізу динамічних процесів електроприводу застосовано структурне моделювання та чисельне розв'язання диференціальних рівнянь у програмному середовищі MATLAB. Оцінювання якості керування здійснювалося за показниками перехідних процесів струму якірного кола та швидкості обертання валу електродвигуна при пуску та стрибкоподібній зміні навантаження. **Результати.** Розроблено структурну схему системи модального керування електроприводом постійного струму з нелінійними зворотними зв'язками по струму та швидкості. Показано, що застосування нелінійних відсічок забезпечує формування змінної жорсткості електромеханічної характеристики залежно від режиму роботи. За результатами моделювання встановлено, що струм якірного кола ефективно обмежується до заданого допустимого рівня як у режимі пуску, так і при різкій зміні навантаження, при цьому перехідні процеси мають аперіодичний характер і відсутнє перерегулювання швидкості. **Наукова новизна.** Запропоновано поєднання методу модального керування з нелінійними обмеженнями фізичних змінних, що дозволяє одночасно забезпечити високі динамічні показники в робочій зоні та ефективний захист електроприводу від струмових і динамічних перевантажень у перехідних режимах. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем автоматичного керування електроприводами постійного струму, що працюють в умовах змінних і ударних навантажень, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з електромеханіки та автоматизації. **Ключові слова:** електропривод; нелінійність; синтез; коректувальний пристрій; зворотний зв'язок; передаточна функція; перехідні процеси; обмеження струму; обмеження швидкості; динамічні характеристики; електромеханічна система; струмові перевантаження.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Недоліком системи модального керування є відсутність обмеження координат при значних змінах вхідних сигналів завдання та впливів. Лінійна система відпрацьовує впливи різної величини за однаковий час перехідного процесу, що призводить до зростання одночасно прискорення та струму при збільшенні, наприклад, сигналу завдання по швидкості. Це може спричинити недопустимі перевантаження. Таким чином, сприятливі динамічні властивості електроприводу, забезпечені модальним регулятором у обмеженому діапазоні роботи, втрачаються в загальному випадку.

Усунення перевантажень по струму та прискоренню при великих впливах завдання можливо шляхом обмеження темпу зміни вхідного сигналу за допомогою спеціального формуючого пристрою – задатчика інтенсивності. Проте при цьому залишається ризик виникнення недопустимих струмів та моментів при прикладанні великих навантажень до валу двигуна.

Покращення властивостей електроприводу при значних змінах вхідних впливів можливе за допомогою нелінійних зворотних зв'язків (відсічок). Нелінійність у зворотних зв'язках дозволяє підтримувати дію контролюючого сигналу у тих інтервалах, де вона є ефективною, та виключати її у випадках, коли вона погіршує якість системи. Зокрема, при стабілізації швидкості в зоні робочих навантажень небажаний від'ємний зв'язок по струму якірного кола, тоді як у зоні великих навантажень сильний зворотний зв'язок по струму обмежує перевантаження під час старту, стопу та гальмування. Аналогічно, отримання статичної характеристики двигуна високої жорсткості для точного підтримання швидкості та низької жорсткості для обмеження струму у перехідних процесах

забезпечується нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по швидкості.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання вдосконалення систем керування електроприводами постійного струму є предметом активних наукових досліджень у галузі автоматизації та електромеханіки. Велика частина сучасних робіт присвячена моделюванню, аналізу стабільності та синтезу керуючих алгоритмів для покращення динамічних властивостей і надійності електроприводів.

У сучасних роботах значна увага приділяється порівняльному аналізу класичних та інтелектуальних методів керування двигунами постійного струму. Зокрема, у [1] представлено узагальнений огляд PID-, адаптивних, нечітких та прогностичних алгоритмів керування, в якому підкреслюється їх обмежена ефективність у режимах пуску та перевантажень, що обґрунтовує доцільність використання комбінованих і нелінійних стратегій керування.

В роботі [2] розглядаються математичні моделі та лінеаризація систем електроприводу постійного струму для подальшого аналізу динамічних режимів та частотних характеристик системи, що є фундаментом для синтезу систем автоматичного керування. Такі моделі часто використовуються як відправна точка для розробки сучасних регуляторів.

Дослідження поведінки систем керування електроприводом постійного струму з різними налаштуваннями контурів регулювання показали, що оптимальне налаштування контурів струму та швидкості істотно впливає на якість і стійкість перехідних процесів, що особливо важливо при побудові замкнених систем з кількома зворотними зв'язками [3]. Подальший розвиток даного напрямку пов'язаний із

застосуванням алгоритмів оптимізації параметрів регуляторів. У роботі [4, 5] показано, що використання сучасних методів оптимізації дозволяє суттєво покращити динамічні характеристики електроприводу, проте при цьому не враховуються жорсткі обмеження струму та моменту, що знижує ефективність таких підходів у перевантажувальних режимах.

У [6] також розглядаються методи підлеглого регулювання координат у системах електроприводу постійного струму, включно з оцінюванням станів і параметричною ідентифікацією, що дозволяє підвищити швидкодію та точність регулювання швидкості.

Аналогічні підходи до побудови багатоконтурних систем регулювання швидкості та струму розглянуті в [7], де підкреслюється, що класичні структури з підлеглим регулюванням не забезпечують ефективного обмеження струму в умовах різких змін навантаження без введення додаткових нелінійних елементів.

В роботі [8] зосереджуються на нелінійних аспектах моделювання та керування електроприводами, включно з прийомами врахування нелінійностей у моделі двигуна або перетворювача. Наприклад, моделювання нелінійної системи двигуна постійного струму з урахуванням реальних параметрів підсилювача та навантаження дозволяє отримати більш точне представлення динаміки приводу в порівнянні з лінійними моделями.

Порівняльний аналіз стратегій керування струмом у двигунах постійного струму, наведений у [9], демонструє, що застосування нелінійних методів обмеження струму дозволяє зменшити пікові значення струму в перехідних режимах, однак питання їх узгодження з динамікою швидкісного контуру залишається відкритим.

Також відзначено сучасні підходи до нелінійного керування в інших електричних системах, що можуть бути адаптовані для систем електроприводу, зокрема використання нелінійних стратегій зворотного зв'язку для поліпшення стабільності та регулювання експлуатаційних параметрів [10]. У роботі [11] запропоновано схеми керування з нелінійним обмеженням струму для пускових і аварійних режимів, які підтверджують ефективність попереджувального обмеження струму. Водночас такі рішення розглядаються окремо від методів модального синтезу, що обмежує можливість комплексного керування динамічними характеристиками приводу.

Також огляд роботи [7] із сучасної теорії моделювання та лінійного керування двигунами постійного струму висвітлює основні принципи побудови моделей та традиційні підходи до проектування лінійних регуляторів, які є основою для розширення методів керування включно з нелійними алгоритмами.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері лінійного та нелінійного керування, поєднання модального керування з спеціальними нелійними

обмеженнями по струму та швидкості в електроприводах постійного струму залишається відносно малодослідженим напрямом. Це створює актуальну наукову нішу для розробки та аналізу керуючих структур, які забезпечують одночасне обмеження фізичних змінних та покращення динамічних показників приводу.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі керування електроприводами постійного струму, існуючі системи модального керування здебільшого орієнтовані на лінійні моделі та забезпечують задані динамічні характеристики лише в обмеженому діапазоні режимів роботи. При значних змінах сигналів завдання та різких стрибках навантаження такі системи не враховують фізичних обмежень струму та моменту, що призводить до перевантажень і погіршення надійності електроприводу.

Відомі методи обмеження струму не забезпечують повного усунення пікових значень у пускових і перехідних режимах та не дозволяють гнучко змінювати жорсткість електромеханічної характеристики залежно від режиму роботи. Питання узгодженого застосування нелінійних зворотних зв'язків по струму та швидкості в системах модального керування залишається недостатньо дослідженим.

Таким чином, актуальною залишається задача розробки системи модального керування електроприводом постійного струму, яка б поєднувала високі динамічні показники в робочій зоні з ефективним обмеженням струму та моменту в перехідних і перевантажувальних режимах.

Метою даної статті є підвищення динамічних показників та надійності електроприводу постійного струму шляхом розробки і дослідження системи модального керування з нелійними зворотними зв'язками по струму та швидкості, які забезпечують обмеження струмових перевантажень і формування змінної жорсткості електромеханічної характеристики в різних режимах роботи.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є електропривод постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги в складі системи автоматичного керування. Предметом дослідження є динамічні та статичні властивості системи модального керування електроприводом постійного струму з нелійними зворотними зв'язками по струму та швидкості в різних режимах роботи. У процесі дослідження використано методи теорії автоматичного керування, зокрема методи модального синтезу регуляторів, аналізу лінійних і нелінійних систем, а також методи математичного моделювання електромеханічних систем. Для аналізу динамічних процесів та оцінювання впливу

нелінійних обмежень струму і швидкості застосовано структурне та імітаційне моделювання з використанням програмного середовища MATLAB. Дослідження перехідних процесів виконувалося шляхом чисельного розв'язання диференціальних рівнянь, що описують електромеханічну систему, з подальшим аналізом показників якості регулювання.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Розглянемо схемну реалізацію та дію обмежень фізичних змінних для здійснення модального керування в електроприводі постійного струму (рис. 1).

Завдання виключення зв'язку по струму в зоні робочих навантажень і введення сильного обмеження струму в зоні великих навантажень виконує так звана відсічка по струму, яка реалізована на схемі рис. 1 на операційному підсилювачі (ОП) У4 та стабілітронах VS3-VS4.

Характеристика зворотного зв'язку по струму має зону нечутливості, що створена стабілітронами з напругою $u_{o.c.}$ (рис. 2, а), а характеристика

електродвигуна з вузлом відсічки по струму окрім робочої ділянки 1 включає ділянку обмеження по струму 2 (рис. 2, б).

Напруга зв'язку по струму $u_{i.л.}$ на вході суматора підсилювача У4 визначається по різному для різних ділянок зміни струму:

$$u_{o.c.} = u_{д.с.} - u_{вдс} = k_{o.c.} (I_a - I_{вдс}) \quad \text{для } I_a \geq I_{вдс}, \quad (1)$$

$$u_{o.c.} = 0 \quad \text{для } I_a \leq I_{вдс}$$

де $k_{o.c.} = k_{д.с.}$ – коефіцієнт передачі датчика струму, Ом; $I_{вдс}$ – струм відсічки, А.

Коефіцієнт підсилення по замкненому контуру струму та коефіцієнт зворотного зв'язку при заданих значеннях струмів відсічки $I_{вдс}$ та стопорного струму $I_{ст}$ визначається наступним чином. З урахуванням того, що тиристорний перетворювач (ТП) представлений пропорційною ланкою $k_{ТП}$, для стопорного режиму можна записати:

$$\omega = 0; E_{II} = I_{ст} R_a = \frac{k_{рш}}{k_{pc}} k_{ТП} \left(u_{зс} - \frac{k_2}{k_{дс}} k_{дс} (I_a - I_{вдс}) \right), \quad (2)$$

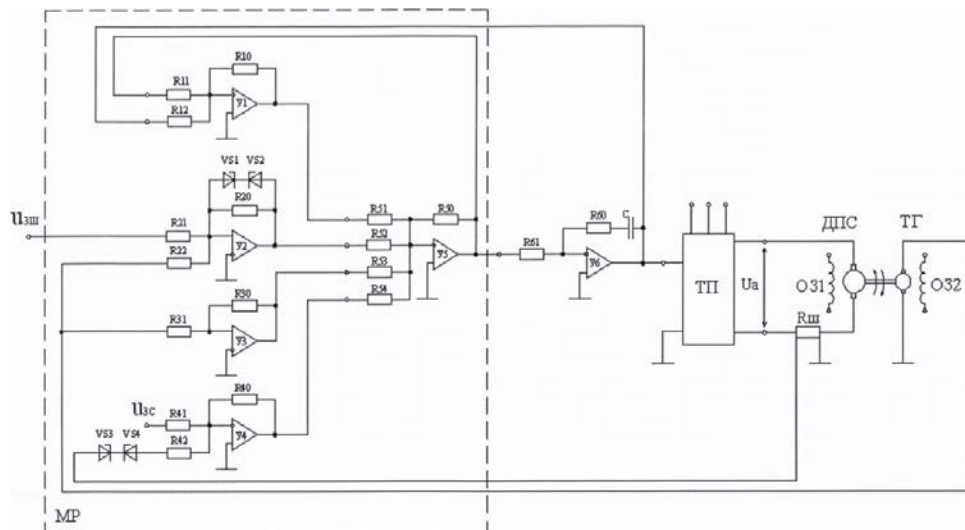


Рис. 1. Функціональна схема системи модального керування електроприводом з нелінійним обмеженням змінної стану по струму

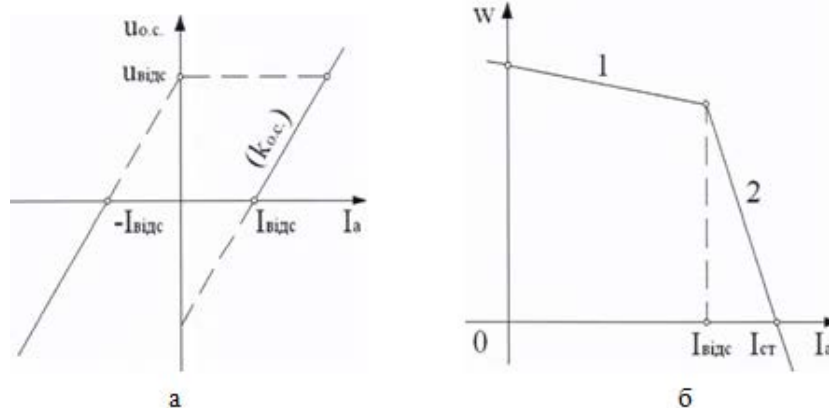


Рис. 2. Характеристики відсічки по струму (а) та електроприводу з відсічкою по струму (б)

де E_n – ЕРС керованого перетворювача напруги, В;
 u_{3c} – напруга завдання, що визначає рівень струму,
 В. Тоді коефіцієнт підсилення по контуру струму:

$$k_{\alpha} = k \frac{k_{\alpha\beta} k}{k_{\alpha\beta} R_{\alpha\beta} I} = \frac{I_{\alpha\beta} I_{\alpha\beta}}{I}, \quad (3)$$

де $I_{\alpha\beta}$, А – розрахунковий струм КЗ якірного кола при лінійних характеристиках операційного підсилювача і ТП.

Вводячи позначення $k_{вдс} = I_{вдс} / I_{ст}$, отримаємо вираз для коефіцієнта відсічки:

$$k_{вдс} = 1 - \frac{1}{k_c} \left(\frac{I_{кз}}{I_{ст}} - 1 \right), \quad (4)$$

Із виразу для $k_{вдс}$ випливає, що відсічка забезпечує статичне регулювання струму зі статизмом

$$\frac{I_{ст} - I_{вдс}}{I_{ст}} = 1 - k_{вдс} = \frac{1}{k_c} \left(\frac{I_{кз}}{I_{ст}} - 1 \right), \quad (5)$$

який прямує до нуля, якщо $k_r \rightarrow \infty$.

Параметри кола зворотних зв'язків (33) та відсічки по струму обираються наступним чином:

$$\frac{R_{40}}{R_{42}} = \frac{k_2}{k_{дс}}, \quad u_{ст} = k_{дс} I_{вдс}, \quad u_{3c} \frac{R_{40}}{R_{41}} = \frac{k_{рш} R_{\alpha} - I_{ан}}{k_{рш} k_{тп}}, \quad (6)$$

Недоліком відсічки по струму в електроприводах з тиристорним перетворювачем являється можливість перевищення миттєвим струмом стопорного значення на початку пускового процесу. За рахунок нечутливості тиристорного перетворювача до зміни керуючого сигналу на інтервалі провідності при малій інерційності якірного кола струм може встигнути вирости до величини, що перевищує стопорне значення. Вільним від цих недоліків являється попереджувальне обмеження струму.

Ідея попереджувального обмеження струму заключається в тому, що відповідний заданому допустимому рівню струму керуючий сигнал подається одночасно з сигналом завдання. Це здійснюється подачею на вхід перетворювача керуючого сигналу, що збільшується одночасно з ростом швидкості за рахунок додатного зворотного зв'язку по швидкості. Схема вузла попереджувального обмеження струму реалізована на операційному підсилювачі УЗ (рис. 1), що працює в режимі підсилювача для забезпечення додатного зворотного зв'язку по швидкості та погодження даного сигналу по величині з сигналом завдання по струму.

У відповідності до схеми, для безінерційного перетворювача можна записати наступне рівняння:

$$k_{тп} \frac{k_{рш}}{k_{рц}} \left(\frac{R_{40}}{R_{41}} u_{3c} + k_{тг} k_y \omega \right) = e_{п}, \quad (7)$$

$$= k_{д} \omega + (T_E p + 1) i_a R_a,$$

де $k_y = R_{30} / R_{31}$ – коефіцієнт підсилення суматора підсилювача УЗ; $k_{тг}$ – коефіцієнт передачі тахогенератора, В·с/рад; $k_{д}$ – коефіцієнт передачі електродвигуна, В·с/рад.

Нехай

$$k_y k_{тп} k_{тг} \frac{k_{рш}}{k_{рц}} \frac{1}{k_{д}} = k_c = 1, \quad (8)$$

тоді

$$(T_E p + 1) i_a = k_{тп} \frac{k_{рш}}{k_{рц}} \frac{R_{40}}{R_{41}} \frac{u_{3c}}{R_a}, \quad (9)$$

та в усталеному режимі

$$I_a = I_{ст} = k_{тп} \frac{k_{рш}}{k_{рц}} \frac{R_{40}}{R_{41}} \frac{u_{3c}}{R_a} = const, \quad (10)$$

Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача У5 обирається наступним чином:

$$k_y = \frac{R_{30}}{R_{31} + R_{тг}} = \frac{k_{рц}}{k_{тп} k_{тг}} \frac{k_{д}}{k_{рш}}, \quad R_{30} = R_{40}, \quad (11)$$

Охоплений додатним зворотним зв'язком по швидкості з критичним значенням коефіцієнту $k_{о.ш.} = \frac{k_{рц}}{k_{тп} k_{рш}} \frac{R_{41}}{R_{40}}$ перетворювач набуває властивостей керованого джерела струму. Значення стопорного струму суттєво залежить від зони не чуттєвості та гістерезису в характеристиці перетворювача, дрейфу нуля підсилювача, а також від значення R_a , яке не залишається постійним при зміні температури. Це являється недоліком розглянутого способу обмеження струму. До його переваг можна віднести попередження піків миттєвого струму і простоту реалізації. Так, за допомогою одного тахогенератора можна забезпечити в електроприводі як обмеження струму, так і стабілізацію швидкості.

Вузол відсічки по струму, що реалізований на операційному підсилювачі У2, що також представлений на рис. 1. Для лінеаризованих характеристик керування підсилювача, перетворювача та зворотного зв'язку з відсічкою електромеханічна характеристика електропривода при блокуванні зворотного зв'язку по швидкості

$$\left(\frac{R_{20}}{R_{21}} u_{3.ш.} \geq u_{вдс}; \quad \omega \leq \frac{1}{k_{тг}} \frac{R_{22}}{R_{20}} \left(\frac{R_{20}}{R_{21}} u_{3.ш.} - u_{вдс} \right) = \omega_{вдс} \right), \quad (12)$$

має вигляд показаний на рис. 3 а, б.

При дії від'ємного зворотного зв'язку по швидкості отримаємо сімейство характеристик для різних значень визначеної напруги завдання $u_{3.ш.} = const (u_{3.ш.1}, u_{3.ш.2}, u_{3.ш.3})$.

Знаючи значення $E_{пmax}$ та $I_{вдс}$ можна знайти граничне значення напруги завдання, якому відповідає суміщення відсічок по швидкості та струмові ($u_{3.ш.2}$ на рис. 3, б):

$$u_{3.ш.} = \frac{R_{21}}{R_{20}} \left(u_{вдс} + \frac{k_1}{k_{д}} (E_{пmax} - I_{вдс} R_a) \right), \quad (13)$$

При цьому значенні напруги задана електромеханічна характеристика електропривода має тільки дві ділянки, на одній з яких діє тільки зв'язок по швидкості, а на другій – тільки зв'язок по струму. При більших значеннях $u_{3.ш.}$ ($u_{3.ш.3}$ на рис. 3, б) на електромеханічній характеристиці з'являється середня ділянка, де $I_a < I_{вдс}$ і $\omega < \omega_{вдс}$, тобто не діють обидва зв'язки.

Вище розглянута відсічка по швидкості реалізована в даній системі модального керування на

операційному підсилювачі У2 за допомогою стабілітронів VS1 і VS2. Параметри кола регулятора при швидкості відсічки $\omega_{\text{ВДС}}$ визначається наступним чином:

$$u_{CT} = u_{BIDC} = \frac{R_{20}}{R_{21}} u_{3.III.} - k_{TT} \frac{R_{20}}{R_{22}} \omega_{BIDC}, \quad (14)$$

$$\frac{R_{20}}{R_{21}} u_{3,III.} = k_{TT} \frac{R_{20}}{R_{22}} \omega_{HOM}, \frac{R_{20}}{R_{21}} = \frac{1}{k_{TT}},$$

Від’ємний зворотний зв’язок по інтегральній складовій напруги ІІ – регулятора в колі керування реалізований на операційному підсилювачі У1 (рис. 1). При цьому параметри даного кола розраховані наступним чином:

$$\frac{R_{10}}{R_{11}} = \frac{R_{60}}{R_{61}} k_3, \frac{R_{10}}{R_{12}} = k_3, \quad (15)$$

На суматорі – операційному підсилювачі У5, згідно методу модального керування, виконується складання усіх сигналів у відповідності до знаку. При цьому параметри даного підсилювача:

$$\frac{R_{50}}{R_{51}} = \frac{R_{50}}{R_{52}} = \frac{R_{50}}{R_{53}} = \frac{R_{50}}{R_{54}} = k_{PIII} \quad , \quad (16)$$

Таким чином, суміщення відсічок по струму та по швидкості, забезпечуючи жорсткі механічні характеристики в зоні робочих навантажень, виконує одночасно й функцію обмеження струму при великих навантаженнях, коли $I_a > I_{\text{відс.}}$. В перехідних процесах при виході електроприводу на ділянку 1, де діє від'ємний зв'язок по швидкості, можливий різко коливальний режим роботи. Для демпфірування коливань можуть бути застосовані допоміжні зворотні зв'язки, які налаштовуються як модальний регулятор на потрібні динамічні показники якості.

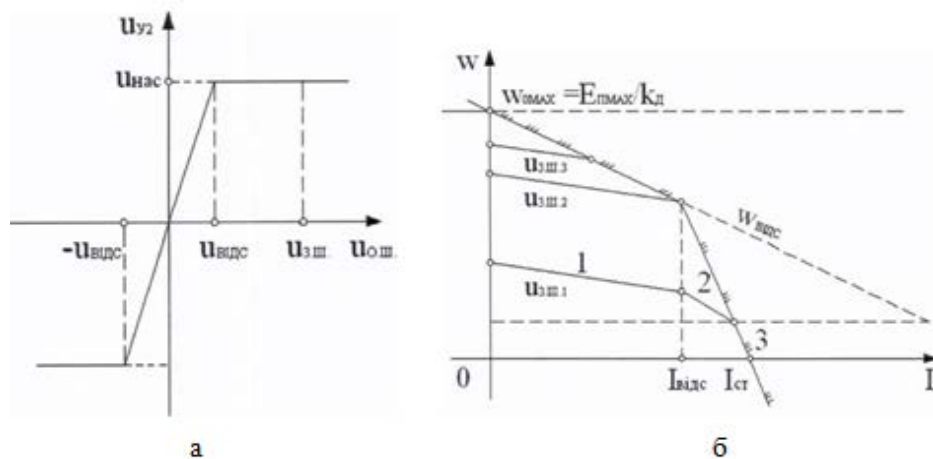


Рис. 3. Характеристика відсічки по швидкості (а) та електромеханічні характеристики електроприводу з відсічками по швидкості та струму (б): 1 – діє від’ємний зв’язок по швидкості в інтервалі від ω_0 до $\omega(I_{A\Delta N})$ ($I \leq I_{A\Delta N}$; $\omega > \omega_{A\Delta N}$); 2 – діє зв’язок по швидкості і відсічка по струму в інтервалі швидкостей від $\omega(I_{A\Delta N})$ до $\omega_{A\Delta N}$ ($I > I_{A\Delta N}$; $\omega > \omega_{A\Delta N}$); 3 – діє тільки відсічка по струму ($I > I_{A\Delta N}$; $\omega \leq \omega_{A\Delta N}$);

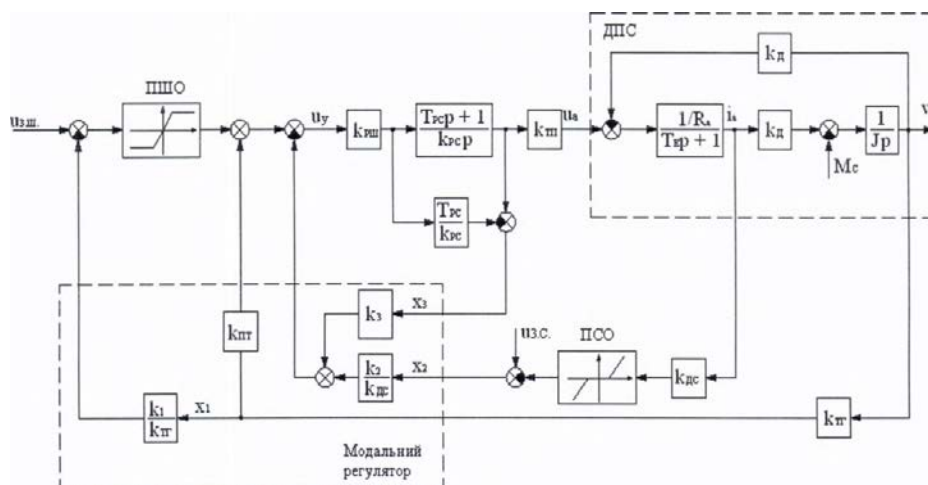


Рис. 4. Структурна схема системи модального керування з відсічкою по швидкості і нелінійним обмеженням струму

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

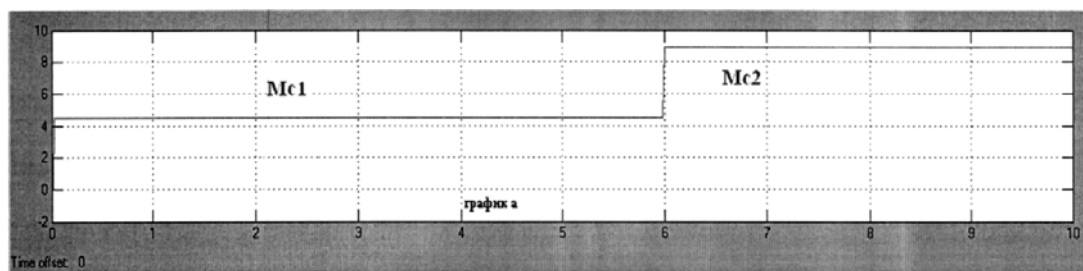
За допомогою математичного програмного середовища Matlab виконано моделювання роботи електроприводу постійного струму за схемою, наведеною на рис. 4. Для аналізу впливу нелінійних зворотних зв'язків по швидкості та струму було змодельовано різку зміну сигналу завдання та стрибкоподібне збільшення навантаження M_c на валу електродвигуна.

Параметри електродвигуна приймалися такими: опір якорного кола $R_a = 0,67$ Ом, індуктивність якорного кола $L_a = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн, що відповідає електромагнітній сталій часу $T_e = 0,0075$ с. Момент інерції, приведений до валу двигуна, становив $J = 0,162$ кг·м², а коефіцієнт електромагнітного моменту – $k_m = 1,05$ Н·м/А. Момент навантаження M_c задавався у вигляді ступінчастої функції, що імітує різке збільшення навантаження на валу електродвигуна. До моменту часу $t = 0,5$ с навантаження становило $M_c = 12$ Н·м, після чого воно зросло до значення $M_c = 20$ Н·м. Такий характер

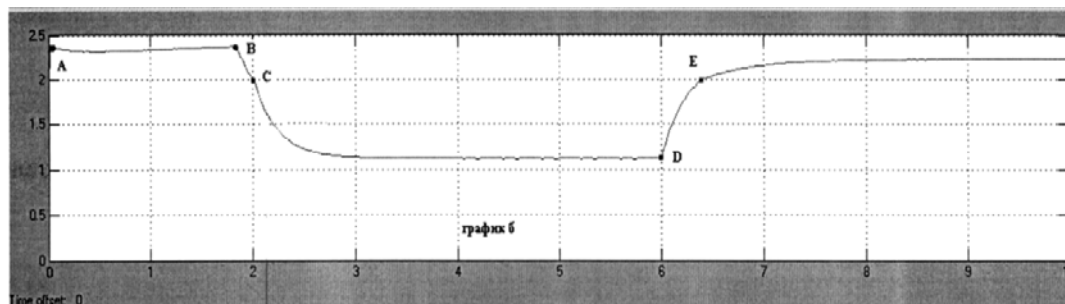
збурення дозволяє оцінити роботу системи керування в нестационарних режимах.

Регулювання струму якорного кола здійснювалося ПІ-регулятором із коефіцієнтом підсилення $K_{pi} = 8$ та інтегральною сталою $T_{ii} = 0,01$ с. Для захисту силових елементів та двигуна в моделі передбачено обмеження струму на рівні $i_{a,max} = 40$ А. Контур швидкості реалізовано з використанням пропорційного регулятора з коефіцієнтом підсилення $K_\omega = 1,8$, при цьому задане значення кутової швидкості становило $\omega = 150$ рад/с.

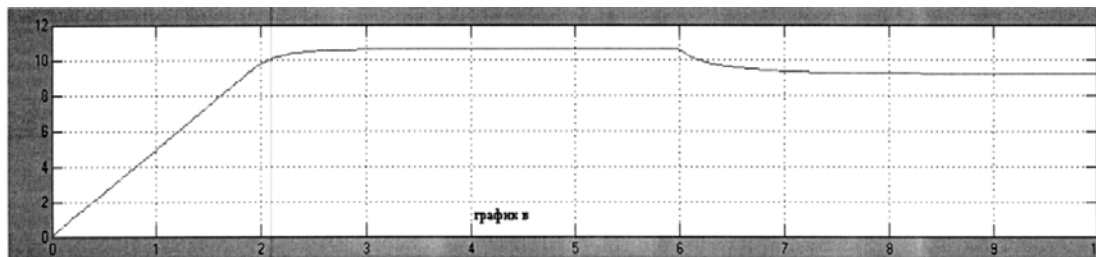
Результати моделювання приведені у вигляді характеристик перехідних процесів (рис. 5): зміна збурюючого сигналу M_c (графік а) у вигляді стрибкоподібного збільшення навантаження M_{c2} , що близьке до моменту стопору; зміна струму якорного кола ДПС i_a в момент пуску та стрибкоподібної зміни навантаження на валу (графік б); зміна вихідної величини – швидкості обертання валу електродвигуна ω (графік в) під впливом прикладених навантажень.



а)



б)



в)

Рис. 5. Зміна моменту навантаження M_c , струму якорного кола i_a , та швидкості обертання валу електродвигуна відповідно у часі

Як видно зі перехідної характеристики струму якорного кола (графік б), в момент запуску ДПС струм якоря не перевищує своє задане стопорне значення $u_{з.с.}$ (крива АВ) і в зоні, де зупиняється дія відсічки по струму (точка С), жорсткість електромеханічної характеристики збільшується, що чітко видно по перелому графіка в даній точці. В момент стрибкоподібного збільшення навантаження (точка D) струм якорного кола збільшується по аперіодичному закону і в момент досягнення струму відсічки (точка Е) жорсткість електромеханічної характеристики зменшується, а значення струму встановлюється близьким до стопорного.

Аналізуючи графік зміни швидкості обертання валу (графік в), бачимо, що розгін двигуна при запуску відбувається з постійним максимально заданим прискоренням з виходом на значення робочої швидкості без перегулювання. Дія зворотного зв'язку по швидкості тут передбачена на всьому робочому діапазоні навантаження електродвигуна, окрім значень швидкості близьких до нуля. Таким чином, за допомогою нелінійних ЗЗ по струму та по швидкості забезпечується повне обмеження та керування величиною струму якорного кола як в режимах пуску, так і в перехідних режимах при зміні навантаження.

ВИСНОВКИ

Розроблено та досліджено систему модально-го керування електроприводом постійного струму

з нелінійними зворотними зв'язками по струму та швидкості, спрямовану на підвищення динамічних показників і надійності роботи електроприводу в широкому діапазоні режимів. Показано, що застосування класичного модального керування без урахування фізичних обмежень струму та моменту призводить до перевантажень і погіршення якості перехідних процесів при значних змінах сигналів завдання та навантаження.

Запропоновано структурну схему системи керування, яка поєднує нелінійну відсічку по струму та відсічку по швидкості, що забезпечує формування змінної жорсткості електромеханічної характеристики електроприводу залежно від режиму роботи. У зоні робочих навантажень система характеризується високою жорсткістю та точним підтриманням швидкості, тоді як у перехідних і перевантажувальних режимах ефективно обмежуються струмові та динамічні перевантаження.

На основі математичного моделювання в програмному середовищі Matlab підтверджено, що введення нелінійних зворотних зв'язків дозволяє обмежити струм якорного кола до заданого стопорного значення як у режимі пуску, так і при стрибкоподібній зміні навантаження, без перегулювання швидкості та зі збереженням заданих динамічних показників. Отримані результати свідчать про аперіодичний характер перехідних процесів та відсутність небажаних коливань у робочій зоні електроприводу.

REFERENCES

- [1] Ekreem, N., Abusaad, S., & Abuitbel, M. (2025). An overview of control methodologies applied for DC motors. *International Science and Technology Journal*, vol. 37, pp. 1–26. <https://doi.org/10.62341/NAsm8002>
- [2] Model ta analiz elektropryvodu postiinoho strumu z urakhuvanniam dynamichnykh kharakterystyk [Model and analysis of DC electric drive considering dynamic characteristics]. (2023). *Electronic Scientific Journal*. Retrieved from: <https://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/254775>
- [3] Doslidzhennia vplyvu nalashtuvannia konturiv rehuliuвання na dynamiku elektropryvodu [Study of the influence of control loop tuning on electric drive dynamics]. (2022). *Vinnitsia National Technical University Repository*. Retrieved from: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/24494>
- [4] Savchenko, O., Shareiko, D., Biliuk, I., & Mardziavko, V. (2025). Optymizatsiia system avtomatychnoho keruvannia elektropryvodom postiinoho strumu iz vykorystanniam nelineinykh koryhuvalnykh prystroiv [Optimization of DC electric drive automatic control systems using nonlinear corrective devices]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*, no. 4, pp. 21–30. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-4-3>
- [5] Ekinci, S., Izci, D., Almomani, M. H., et al. (2025). Advanced control parameter optimization in DC motors and liquid level systems. *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 1394. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85273-y>
- [6] Sposterezhennia ta otsinka staniv u systemakh pidporiadkovanoho rehuliuвання elektropryvodiv [Observation and state estimation in subordinate control systems of electric drives]. (2021). *KPI Electronic Archive*. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/items/ca9b48fb-8b6c-40b1-be85-e88461a858e3>
- [7] Kuczmam, M. (2024). Review of DC motor modeling and linear control: Theory with laboratory tests. *Electronics*, vol. 13, no. 11, Art. no. 2225. <https://doi.org/10.3390/electronics13112225>
- [8] Ndje, M., Ngouem, F. J., Guidkaya, G., Nkeutia, S. Z., Fotsa-Mbogne, D. J., Djogdom, G. V. T., & Bitjoka, L. (2023). Modelling and quadratic dynamic matrix control of a DC motor system with nonlinearities consideration. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.55923>
- [9] Herlino, A. L., et al. (2013). Comparative study of current control strategy for DC motors. In *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp. 588–593. Langkawi, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564616>
- [10] Verrelli, C. M., Bigarelli, L., Di Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). A new nonlinear control of an active rectifier for variable speed generating units. *Control Engineering Practice*, vol. 139, Art. no. 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>
- [11] Hilal, M., Alrikabi, H., & Aljazaery, I. (2023). A control system of DC motor speed: Systematic review. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, vol. 2, pp. 93–111. <https://doi.org/10.31185/wjcm.121>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ekreem, N., Abusaad, S., & Abuitbel, M. (2025). An overview of control methodologies applied for DC motors. *International Science and Technology Journal*, 37, 1–26. <https://doi.org/10.62341/NAsm8002>
- [2] Модель та аналіз електроприводу постійного струму з урахуванням динамічних характеристик. (2023). *Electronic Scientific Journal*. <https://ecsrt.diit.edu.ua/article/view/254775>
- [3] Дослідження впливу налаштування контурів регулювання на динаміку електроприводу. (2022). *Vinnitsia National Technical University Repository*. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/24494>
- [4] Савченко, О., Шарейко, Д., Білюк, І., & Мардзявко, В. (2025). Оптимізація систем автоматичного керування електроприводом постійного струму із використанням нелінійних коригувальних пристроїв. *Електротехніка та електроенергетика*, (4), 21–30. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-4-3>
- [5] Ekinci, S., Izci, D., Almomani, M. H., et al. (2025). Advanced control parameter optimization in DC motors and liquid level systems. *Scientific Reports*, 15, 1394. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85273-y>
- [6] Спостереження та оцінка станів у системах підпорядкованого регулювання електроприводів. (2021). *KPI Electronic Archive*. <https://ela.kpi.ua/items/ca9b48fb-8b6c-40b1-be85-e88461a858e3>
- [7] Kuczmam, M. (2024). Review of DC motor modeling and linear control: Theory with laboratory tests. *Electronics*, 13(11), 2225. <https://doi.org/10.3390/electronics13112225>
- [8] Ndje, M., Ngouem, F. J., Guidkaya, G., Nkeutia, S. Z., Fotsa-Mbogne, D. J., Djogdom, G. V. T., & Bitjoka, L. (2023). Modelling and quadratic dynamic matrix control of a DC motor system with nonlinearities consideration. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.55923>
- [9] Herlino, A. L., et al. (2013). Comparative study of current control strategy for DC motors. In 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) (pp. 588–593). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564616>
- [10] Verrelli, C. M., Bigarelli, L., Di Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). A new nonlinear control of an active rectifier for variable speed generating units. *Control Engineering Practice*, 139, 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>
- [11] Hilal, M., Alrikabi, H., & Aljazaery, I. (2023). A control system of DC motor speed: Systematic review. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, 2, 93–111. <https://doi.org/10.31185/wjcm.121>

© Обрубков А. В., Черно О. О., Кімстач О. Ю., Вахоніна Л. В., Кошкін Д. Л.

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)