

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.39.2021.8

УДК 62-83

О.Л. Дерезь, к.т.н., доцент, ald_dstu@i.ua

О.В. Садовой, д.т.н., професор, sadovoyav@ukr.net

Г.О. Дерезь, студентка, hanna.derets@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ОПТИМІЗОВАНОЇ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ В УМОВАХ ЗМІНИ РОЗРАХУНКОВОЇ АМПЛІТУДИ НАПРУГИ

Актуальність роботи зумовлена необхідністю адаптації методів теорії оптимального керування до можливостей їх сучасної технічної реалізації. Метою дослідження є підвищення якості перехідних процесів релейних систем керування швидкістю електропривода, синтезованих методом N–i перемикань. Серія чисельних експериментів, виконана в умовах варіювання розрахункової амплітуди напруги силового перетворювача, дозволила виявити стійку закономірність зміни швидкодії системи. На її підставі запропоновано спосіб корекції параметрів релейних регуляторів, який наближає тривалість керування швидкістю до встановленого емпірично оптимального значення.

Ключові слова: релейна система керування, метод N–i перемикань, перехідний процес, оптимальність за швидкодією.

The relevance of the work is due to the need to adapt the methods of the optimal control theory to the possibilities of their modern technical implementation. The purpose of the study is to improve the quality of transients of relay speed control systems of an electric drive, synthesized by the method of N–i switching. A series of numerical experiments carried out under the conditions of varying the calculated voltage of the power converter made it possible to reveal a stable pattern of changes in the system speed. On its basis, a method for correcting the parameters of relay controllers is proposed, which approximates the duration of speed control with an empirically established optimal value.

Keywords: sliding mode control system, N–i switching method, transient, optimality in speed.

Постановка проблеми

Невпинна інтенсифікація технологічних процесів диктує постійно зростаючі вимоги до динамічних характеристик електромеханічних систем (ЕМС). Показники якості керування швидкістю задаються як безпосередньо технологічними характеристиками обладнання, так і вимогами з боку зовнішніх контурів керування більш складних ЕМС, для яких швидкість є проміжною координатою, зокрема, позиційних електроприводів [1]. Однією з таких вимог є оптимальність за швидкодією в умовах обмеження струму або прискорення. Побудова сучасних електроприводів з транзисторними інверторами у якості силових перетворювачів створює умови широкого використання релейних регуляторів, які є типовим структурним рішенням для реалізації алгоритмів оптимального за швидкодією керування. Разом з тим, у більшості комплектних електроприводів застосування релейних регуляторів обмежене [2] контурами струму через складність параметричного синтезу систем високих порядків варіаційними методами [3, 4, 5]. Для подолання цього протиріччя створено метод N–i перемикань [6, 7]. Йому притаманна простота математичного апарату, отримана завдяки введенню низки спрощувальних допущень. Невиконання окремих з них не дозволяє отримати бажану якість реальних перехідних процесів, що спонукає до досліджень [7], спрямованих на вдосконалення даного методу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основою оптимізації систем керування за швидкістю всіма відомими методами є прогнозування розрахункових траєкторій їх руху [5], яке достатньо достовірно здійснюється з врахуванням відомих рівнів обмежень проміжних координат [3, 4]. Згідно з методом N-ї перемикань [6], на цьому етапі синтезу приймається допущення про сталість ривка на інтервалах стабілізації напруги перетворювача. Воно дозволяє уніфікувати фрагменти розрахункової траєкторії, які відповідають таким інтервалам, і є дуже продуктивним у теоретичному сенсі. Його прийняття дає змогу не лише узагальнити процедуру синтезу на довільний порядок релейних систем підпорядкованого керування, але й отримати аналітичні вирази для параметрів оптимальних за швидкістю систем [7]. В дійсності це допущення не виконується на жодному зі згаданих інтервалів через дію внутрішніх зворотних зв'язків ЕМС, внаслідок чого розрахункове значення ривка лише наближено дорівнює його реальному значенню. Це спричиняє відхилення руху систем керування електроприводами від розрахункових траєкторій [8, 9]. В більшості випадків мала відносна тривалість інтервалів стабілізації напруги дозволяє нехтувати такими відхиленнями без практично значущого впливу на швидкість систем [10]. Тим не менш, такі системи не можна вважати строго оптимальними за швидкістю.

Формулювання мети дослідження

Дієвим засобом мінімізації тривалості перехідних процесів є корекція налаштувань регуляторів [7], синтезованих методом N-ї перемикань, з використанням отриманих емпіричним шляхом поправочних коефіцієнтів, як було показано в серії робіт [8, 9] на прикладі систем керування положенням. В основі цієї методики лежить варіювання розрахункової амплітуди напруги відносно її реального значення під час параметричного синтезу. Метою даного дослідження є подальший розвиток математичного апарата методу N-ї перемикань шляхом розробки методики емпіричної корекції налаштувань релейних систем підпорядкованого керування швидкістю електроприводів.

Виклад основного матеріалу

Система диференціальних рівнянь динаміки електропривода постійного струму зі швидкодіючим транзисторним перетворювачем [11, 12] має вигляд

$$\left. \begin{aligned} p\omega &= \frac{c}{J} \cdot (i - i_c) \\ pi &= \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де ω — кутова швидкість вала двигуна, i — струм якоря, i_c — статичний струм, u — напруга якірного кола, R — активний опір якірного кола, L — індуктивність якірного кола, $c = k\Phi$ — коефіцієнт, прийнятий за константу при постійному потоці збудження Φ , J — момент інерції електропривода, який включає моменти інерції якоря та приведені до вала двигуна моменти інерції

редуктора й робочого органа, $p = \frac{d}{dt}$ — символ диференціювання за часом.

Відповідно до методу N-ї перемикань для побудови оптимальної за швидкістю системи керування динамічним об'єктом (1) необхідно застосувати [7] каскад релейних регуляторів

$$\left. \begin{aligned} u_{R\omega} &= \varepsilon^* = \varepsilon_{max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{Re} &= u^* = u_{max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де ω, ε — відповідно кутові швидкість та прискорення вала двигуна, символом «*» позначено задані значення відповідних змінних, як вхідної, так і формованих регуляторами для підпорядкованих їм елементів системи; індексами «max» позначено рівні обмеження змінних стану; $K_{\omega\varepsilon}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку регулятора швидкості за прискоренням, $u_{R\omega}, u_{Re}$ — сигнали регуляторів швидкості та прискорення.

Замикання гнучким зворотним зв'язком [11] внутрішнього контуру каскаду (2) робить незалежними від дії моменту опору не лише статичні, але й динамічні властивості системи керування. Контур стабілізації прискорення забезпечує однаковий темп протікання перехідних

процесів при будь-якому моменті опору, що не виходить за межі навантажувальної спроможності електроприводу [6].

Параметричний синтез регуляторів (2) вимагає визначення рівнів обмежень прискорення та ривка $\varepsilon_{max}, a_{max}$ шляхом підстановки максимальних значень струму та напруги i_{max}, u_{max} до рівнянь незбуреного руху об'єкта керування (1) при нульових рівнях його внутрішніх зворотних зв'язків

$$\left. \begin{aligned} p\omega = \varepsilon &= \frac{c}{J} \cdot i \\ p\varepsilon = a &= \frac{c}{J} \cdot \left(\frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega}{L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

що призводить до отримання формул

$$\varepsilon_{max} = \frac{c}{J} \cdot i_{max}, \quad a_{max} = \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot u_{max} \quad (4)$$

Якщо при розгоні до швидкості ω_{max} зі значенням ривка a_{max} не може бути досягнуте найбільше прискорення [13, 14], при стабілізації якого формується трикутна діаграма $\varepsilon(t)$

$$\varepsilon_{trg} = \sqrt{\omega_{max} \cdot a_{max}}, \quad (5)$$

це значення необхідно встановити у якості відповідного рівня обмеження

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_{trg} \quad (6)$$

Результатом аналітичного розв'язання [7, 11] задачі синтезу параметрів релейних систем другого порядку методом N-ї перемикачів є вираз коефіцієнта зворотного зв'язку

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}} \quad (7)$$

Звернемося до об'єкта керування (1) з такими параметрами й рівнями обмеження проміжних координат [11, 12]:

$$R = 1 \text{ Ом}, \quad c = 4 \text{ В} \cdot \text{с}, \quad L = 0,1 \text{ Гн}, \quad J = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad \omega_n = 50 \text{ с}^{-1}, \quad i_n = 20 \text{ А}, \quad u_n = 220 \text{ В}. \quad (8)$$

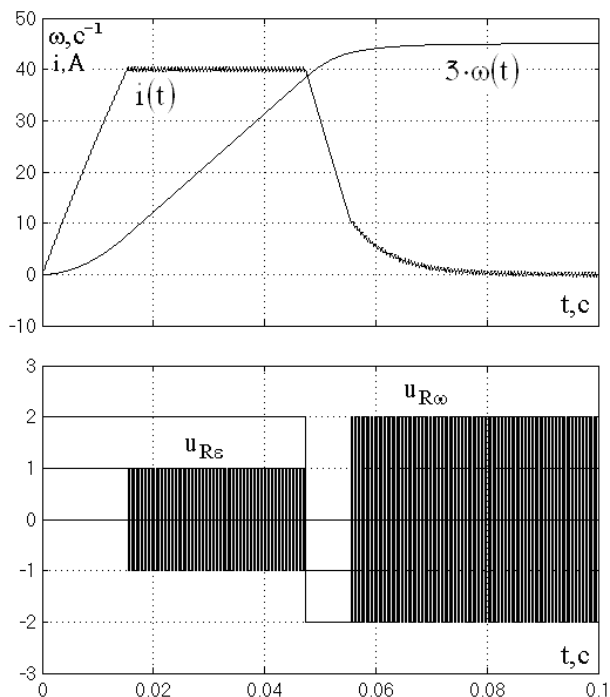


Рис. 1. Перехідні процеси системи керування при базових налаштуваннях

Наведені дані отримані на основі характеристик електропривода із двигуном постійного струму потужністю 4 кВт шляхом округлення параметрів і величин. Крім того, індуктивність якійного кола збільшена приблизно на порядок. Така корекція виконана для зручності аналізу перехідних процесів.

Встановимо обмеження струму та напруги на рівнях

$$i_{max} = 2 \cdot i_n, \quad u_{max} = 1,3 \cdot u_n \quad (9)$$

Підставивши максимуми, визначені згідно з (9), у формули (4), отримаємо граничні значення прискорення й ривка

$$\varepsilon_{max} = 320 \text{ с}^{-2}, \quad a_{max} = 22880 \text{ с}^{-3}, \quad (10)$$

які визначають коефіцієнт (7) зворотного зв'язку регулятора швидкості за прискоренням

$$K_{\omega\varepsilon} = 0,007 \text{ с} \quad (11)$$

при налаштуванні на розгін з трапецієподібною діаграмою $\varepsilon(t)$. Перехідні процеси розгону електропривода до заданої швидкості $\omega^* = 0,3 \cdot \omega_n = 15 \text{ с}^{-1} = \omega_{max}$ наведені на рис. 1. Зауважимо, що графік швидкості з-

бражено у потроєному масштабі, а сигнали регуляторів $u_{R\omega}, u_{R\epsilon}$ показані у відносних одиницях з масштабами, які відповідають їх ролі в ієрархії каскаду (2). Перехідні процеси протікають з дотягуванням, яке виникає внаслідок передчасного входження регулятора швидкості в ковзний режим у момент часу $t=0,055c$. Про передчасність ковзного режиму R_{ω} свідчать скорочення інтервалу стабілізації сигналів регуляторів наприкінці розгону порівняно з початковим та набуття кривими $i(t), \omega(t)$ експоненціальної форми при $t > 0,055c$. Висвітлений у наведеному прикладі характер перехідних процесів є типовим для систем керування електроприводами внаслідок дії їх внутрішніх зворотних зв'язків. Збільшення тривалості керування приблизно на 10% не є критичним з технічних міркувань, але за вимоги оптимізації за швидкодією синтезована система потребує певної корекції динамічних характеристик.

Ключовим чинником, який впливає на характер руху релейних систем, є значення коефіцієнтів зворотних зв'язків за проміжними координатами [5, 6]. Формули (4)–(7) демонструють явний зв'язок коефіцієнта $K_{\omega\epsilon}$ з рівнями обмежень, встановлюваними методом N-і перемикань. Скористаємося цим фактом для пошуку оптимальних налаштувань регуляторів (2) шляхом цілеспрямованого впливу на вихідні дані для синтезу. Не маючи змоги змінювати фактичне значення u_{max} , пов'язане з конструктивними характеристиками силового перетворювача, виконаємо серію чисельних експериментів з варіюванням розрахункових значень амплітуди напруги [8, 9] під час обчислень $K_{\omega\epsilon}$ за формулами (4), (7). Для зручності задаватимемо значення напруги за допомогою коефіцієнта розрахункової напруги K_u

$$u_{max} = K_u \cdot u_{max0}, \quad (12)$$

де u_{max} — розрахункова амплітуда напруги у поточному експерименті, u_{max0} — базове значення амплітуди, встановлене в (9).

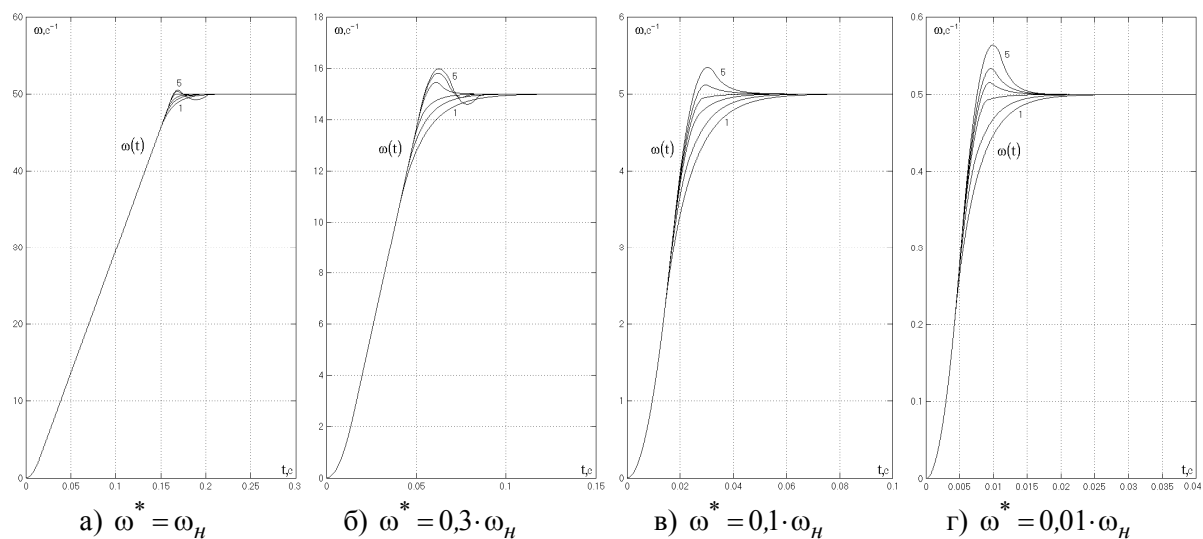


Рис. 2. Сімейства перехідних характеристик

На рис. 2 наведені результати побудови сімейства перехідних функцій $\omega(t)$, отримані в результаті чотирьох серій експериментів для випадків розгону до різних швидкостей при варіюванні напруги керованого перетворювача відповідно до вказаних значень K_u

$$\text{а: } \omega^* = \omega_H, \quad \text{значення } K_u \quad 1)0,5; \quad 2)0,7; \quad 3)1,7; \quad 4)2,4; \quad 5)3,0; \quad (13)$$

$$\text{б: } \omega^* = 0,3 \cdot \omega_H, \quad \text{значення } K_u \quad 1)0,5; \quad 2)0,7; \quad 3)1,7; \quad 4)2,4; \quad 5)3,0; \quad (14)$$

$$\text{в: } \omega^* = 0,1 \cdot \omega_H, \quad \text{значення } K_u \quad 1)0,7; \quad 2)0,85; \quad 3)1,1; \quad 4)1,2; \quad 5)1,4; \quad (15)$$

$$\text{г: } \omega^* = 0,01 \cdot \omega_H, \quad \text{значення } K_u \quad 1)0,7; \quad 2)0,85; \quad 3)1,1; \quad 4)1,2; \quad 5)1,4; \quad (16)$$

з перерахунком a_{max} та $K_{\omega\epsilon}$ за формулами (4), (7).

Діаграми на рис. 2 з більш високим розташуванням відповідають більшим номерам варіантів налаштування у (13)—(16). Зауважимо, що у випадках «а», «б» та «в» формується трапецієподібна діаграма прискорення зі збереженням базових обмежень (10), тоді як у випадку «г» необхідний перерахунок ε_{max} для трикутної діаграми $\varepsilon(t)$ згідно з (5)—(7), а саме

$$\varepsilon_{max} = 107 c^{-2}. \quad (17)$$

Отримані діаграми демонструють розбіжність перехідних функцій системи при різних налаштуваннях на кінцевій стадії розгону, яка виникає через зсув у часі моментів одиничного перемикавання регулятора R_{ω} і подальшого його входження у ковзний режим. Саме у пошуку умов найбільш вчасної реалізації цих ключових подій полягає зміст застосовуваної корекції налаштувань системи керування [7].

На рис. 3 наведені діаграми кінцевої стадії перехідних процесів у збільшеному масштабі, за допомогою яких визначено тривалості керування $t_{кер}$ за критерієм входження швидкості в діапазон $0,995 \cdot \omega^* \leq \omega \leq 1,005 \cdot \omega^*$. Межі вказаного діапазону окреслені на рис. 3 пунктирними лініями. Криві для базового варіанту налаштувань (10), (11) позначені символом «0».

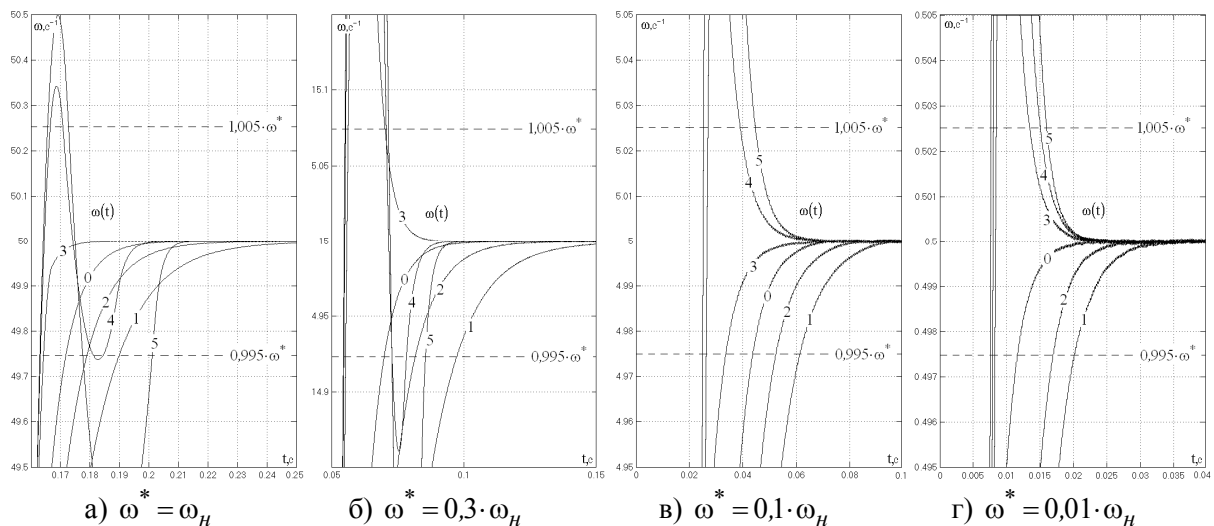


Рис. 3. Діаграми кінцевої стадії перехідних процесів

Графіки залежностей тривалості керування $t_{кер}$ від коефіцієнта розрахункової напруги K_u наведені на рис. 4. Для кожного з розглянутих випадків ці залежності мають виражений екстремум. Точки екстремуму не збігаються для різних серій експериментів, але спостерігається чітка залежність положення точки екстремуму від заданої швидкості (рис. 5). Її монотонно зростаючий характер можна обґрунтувати на підставі другого рівняння системи (3). Це рівняння вказує на існування сильного зв'язку значення ривка з величиною внутрішнього зворотного зв'язку двигуна за швидкістю обертання. Тому при збільшенні швидкості зростає відмінність реального ривка від розрахункового, що вимагає більшого значення коригувального коефіцієнта K_u для наближення руху системи до прогнозованої оптимальної за швидкодією траєкторії.

Діаграма функції $K_u(\omega^*)$ побудована графічно на рис. 5 за дослідними даними, до яких можливе застосування будь-яких методів інтерполяції з метою отримання наближеного аналітичного виразу. Аналітична форма уможливує звернення до такої залежності як до калібрувальної діаграми з метою визначення поточного коефіцієнта K_u у функції заданої швидкості, що забезпечує корекцію налаштувань регуляторів адаптивними алгоритмами синтезу [15] систем оптимального керування методом N-і перемикань у реальному часі.

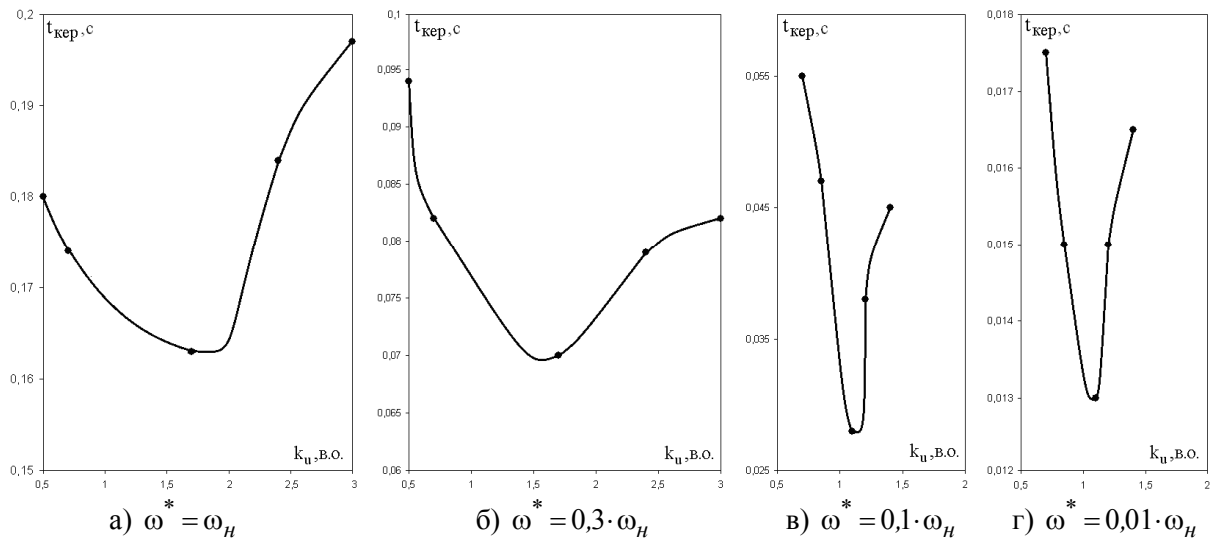


Рис. 4. Залежність тривалості керування від коефіцієнта розрахункової напруги

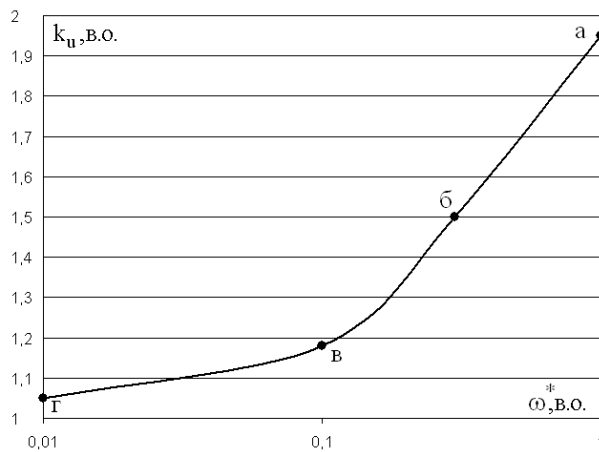


Рис. 5. Калібрувальна діаграма для оптимізації системи керування

Висновки

Встановлена залежність $K_u(\omega^*)$ має суто емпіричне походження і на теперішній час не знайдено її точного аналітичного представлення. Але вона є цілком обґрунтованою, оскільки відображає об'єктивні взаємозв'язки параметрів і характеристик релейних систем керування електроприводами. Отже, використання залежності $K_u(\omega^*)$ при налаштуванні системи на відпрацювання заданої швидкості є засобом вдосконалення математичного апарату метода N-і перемикачів. Слід підкреслити, що емпірична складова запропонованої методики оптимізації полягає не в безпосередньому підборі одного з ключових параметрів системи, а саме в попередньому уточненні вихідних даних, яке має сенс в межах використовуваного метода синтезу.

Список використаної літератури

1. Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. High-speed precision motion control. CRC press, 2017. 324 p.
2. Электротехнический справочник: в 3 т. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т.3: в 2 кн. Кн.2 : Использование электрической энергии / под общ ред. Н. И. Орлова и др. 616 с.
3. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 392 с.
4. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. 624 с.
5. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
6. Садовой А. В., Сухинин Б. В., Сохина Ю. В., Дерез А. Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами : монография. Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. 337 с.

7. Дерещ О. Л., Садовой О. В. Метод N–i перемикачів у задачах оптимізації за швидкістю : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
8. Дерещ А. Л., Садовой А. В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстродействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N–i переключений. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика». Харків, 2019. № 9 (1334). С. 20–23.
9. Дерещ А. Л., Садовой А. В., Дерещ А. А. Моделирование режимов позиционирования оптимизированной по быстродействию релейной системы управления при изменении расчётной амплитуды напряжения. *Сборник научных трудов ДДТУ*. Каменское, 2019. Вып. 2 (35). С. 55–59.
10. Derets O., Sadovoy O. Investigation of the third-order sliding mode control system with different structures of the control objects synthesized by the N–i switching method. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2017. P.100–103. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248861.
11. Derets O., Sadovoi O. Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240852.
12. Derets O., Sadovoi O., Derets Y., Derets H. Criterion for Choosing the Integration Step Size for Simulation of Sliding Modes in Electric Drives. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020. P.796–799. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235544.
13. Садовой А. В., Дерещ А. Л. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N–i переключений. *Вестник КГПУ*. Кременчуг, 2006. Вып. 3/2006 (38). С. 21–22.
14. Садовой А. В., Дерещ А. Л. Ограничение рывка в системе управляемый преобразователь-двигатель при оптимизации по быстродействию. *Электромашиностроение и электрооборудование. Тематический выпуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика»*. Киев : Техніка, 2006. С. 64–65.
15. Derets O., Derets H. Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240832.

STUDY OF DYNAMIC MODES OF THE SPEED-OPTIMIZED ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM UNDER CONDITIONS OF ALTER THE DESIGN VOLTAGE AMPLITUDE

Derets O., Sadovoi O., Derets H.

Abstract

The relevance of the work is due to the need to adapt the methods of the theory of optimal control to modern technical capabilities. The complexity of optimization of control systems by variational methods led to the creation of the N–i switching method. It is characterized by the simplicity of the mathematical apparatus, however, certain methodological aspects encourage research aimed at improving this method with a focus on software implementation. The purpose of this study is to develop the mathematical apparatus of the N–i switching method by developing a technique for correcting the settings of cascade structure relay systems for speed control of electric drives, based on the use of empirically obtained data. To achieve this goal, the following tasks were solved in the work: the parameters of the mathematical model of the electric drive were calculated, on which a series of numerical experiments were performed under the conditions of varying the calculated amplitude of the voltage of the power converter, which made it possible to reveal a stable pattern of changes in the speed of the system depending on the coefficient of the calculated voltage; built a calibration diagram, which is designed to determine the correction factor in the entire range of speed control. The revealed regularity is based on the indirect influence of the varied parameters on the conditions of controllers switching,

the moments of occurrence and the nature of their sliding modes. The result of the work is a method for correcting the parameters of relay controllers, which brings the duration of the speed control of the electric drive closer to the empirically set optimal value. Its implementation does not require the involvement of large additional resources and provides an improvement in the quality of transient processes. The empirical component of the proposed optimization method consists not in the direct selection of one of the key parameters of the system, but in the preliminary refinement of the initial data, which is effective within the used synthesis method. The prospect of this study is an analytical solution to the problem of determining the correction coefficient, which will contribute to the practical application of the proposed optimization algorithm.

References

- [1] Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. (2017). *High-speed precision motion control*. CRC press.
- [2] *Elektrotekhnicheskiiy spravochnik: v 3 t. [Electrotechnical reference book: in 3 volumes]*. (1988). V.3: in 2 books. Book 2: The use of electrical energy. Orlova, N.I. and others. (Eds.). Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
- [3] Pontryagin, L.S., Boltyansky, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F. (1961) *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]*. Moscow: Fizmatgiz [in Russian].
- [4] Feldbaum, A.A. (1966). *Osnovy teorii optimalnykh avtomaticheskikh sistem [Foundations of the theory of optimal automatic systems]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- [5] Emelyanov, S.V. (1967) *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy [Automatic control system with a variable structure]*. Kamyanske: DSTU [in Russian].
- [6] Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V., Sokhina, Yu. V., Derets A.L. (2011) *Releynyye sistemy optimalnogo upravleniya elektroprivodami [Relay systems of optimal control of electric drives]*. Dneprodzerzhinsk: DSTU [in Russian].
- [7] Derets, O.L., Sadovoy, O.V. (2021) *Metod N–i peremykan' u zadachakh optymizatsiyi za shvydkodiyeyu [N–i switching method in speed optimization tasks]*. Kamyanske: DSTU [in Ukrainian].
- [8] Derets, O.L., Sadovoy, O.V. (2019). Korrektsiya parametrov kvazioptimal'nykh po bystrodeystviyu releynykh sistem tret'yego poryadka, sintezirovannykh metodom N–i pereklyucheniya [Parameters correction of quasi-optimal in speed third-order sliding mode control systems synthesized by the N–i switching method]. *Vestnik NTU “KhPI”. Seriya: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice*, vyp. 9 (1334), P. 71–73. Kharkiv: NTU “KhPI” [in Russian].
- [9] Derets, A.L., Sadovoy, A.V., Derets, A.A. (2019). Modelirovaniye rezhimov pozitsionirovaniya optimizirovannoy po bystrodeystviyu releynoy sistemy upravleniya pri izmenenii raschetnoy amplitudy napryazheniya [Simulation of positioning modes of the optimized in speed relay control system when changing the calculated voltage amplitude]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scholarly papers of DSTU*, vyp. 2 (35), P. 55–59. Kamyanske: DSTU [in Russian].
- [10] Derets, O., Sadovoy, O. (2017). Investigation of the third-order sliding mode control system with different structures of the control objects synthesized by the N–i switching method. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. P.100–103. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248861.
- [11] Derets, O., Sadovoi, O. (2020). Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240852.
- [12] Derets, O., Sadovoi, O., Derets, Y., Derets, H. (2020). Criterion for Choosing the Integration Step Size for Simulation of Sliding Modes in Electric Drives. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. P.796–799. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235544.

- [13] Sadovoy, A. V., Derets, A. L. (2006). Ratsionalnoye ogranicheniye uskoreniya elektroprivodov, sinteziruyemykh metodom N–i pereklyucheniya [Rational limitation of acceleration of electric drives synthesized by the method of N–i switching]. *Vestnik KGPU – Bulletin of the KSPU*, 3/2006 (38), 21–22. Kremenchug: KGPU [in Russian].
- [14] Sadovoy, A. V., Derets, A. L. (2006). Ogranicheniye ryvka v sisteme upravlyayemyy preobrazovatel'-dvigatel' pri optimizatsii po bystrodeystviyu. [Restriction of the jerk in the voltage converter – motor control system when optimizing speed]. *Elektromashinostroyeniye i elektrooborudovaniye. Seriya: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Electric machine industry and electrical equipment. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice*, P. 64–65. Kiev: Tekhnika [in Russian].
- [15] Derets, O., Derets, H. (2020). Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240832.