

УДК 621.3

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТІЛОЧНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ОБМЕЖЕННЯМ КІНЦЕВОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕВЕДЕННЯ СТІЛКИ

Кандидати техн. наук В. Ш. Хісматулін, А. А. Прилипко, О. О. Сосунов,
старш. викл. М. В. Ушаков

THE SWITCH ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM WITH LIMITATION OF THE FINAL SPEED OF TRANSMISSION

PhD (Tech.) V. Khismatulin, PhD (Tech.) A. Prylypko, PhD (Tech.) A. Sosunov,
Sr. lecturer M. Ushakov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327161>



Анотація. У статті запропоновано синтез системи керування стрілочним електродвигуном із нульовою швидкістю наприкінці переведення, оптимальної за критерієм мінімуму квадратичного показника якості та комбінованим керуванням. Наведено математичні формулювання мети керування, критерію оптимальності і обмеження на керуючий вплив. Розроблено математичну модель привода з двигуном постійного струму. Проаналізовано керованість об'єкта з розв'язуванням варіаційної задачі. Синтез оптимальної системи керування виконано з використанням принципу максимуму Л. С. Понтрягіна.

Ключові слова: стрілочний електродвигун, гостряк, рамна рійка, квадратичний показник якості, принцип максимуму.

Abstract. The algorithm of operation of switch electric drives (the electric motor together with a reducer and a safety friction clutch) in railway transport is constructed in such a way that at the moment of completion of the working stroke of the tongue, its linear speed has the maximum value, and the braking process is provided only by the mechanical counteraction of the frame rail on the moving tongue. This process is accompanied by increased wear of the contacting parts, the deformation of the tongue, the rods and the elements of the hinged joints. To reduce the intensity of mechanical wear on the parts of the electric drive and the switch it is necessary to reduce the kinetic energy of the moving masses by reducing the velocity at the time the transfer is completed to zero or to a sufficiently small value. On the other hand, from the time of switching tongue depends the time of setting the routes, processing capacity of stations, sorting hills, that is, the efficiency of the transport complex as a whole. The aim of the article is to synthesize the control system of a switch electric motor with zero speed at the end of the translation, optimal by the quadratic quality index. The mathematical formulation of the goal of management, the criterion of optimality and the constraints on the control action are presented. A mathematical model of a drive with a DC motor is developed. The controllability of the object of the variational problem are analyzed. Synthesis of the optimal control system is performed using the maximum principle of L. S. Pontryagin. The analysis of the problem of practical implementation of the optimal control system is briefly analyzed.

Keywords: switch electric drive, tongue, frame rail, quadratic quality index, maximum principle.

Вступ. Алгоритм роботи стрілочного привода складається у виконанні декількох операцій. Після ввімкнення електродвигуна

його вал починає вільне обертання (холостий хід). Одночасно готується коло реверсування. Наступний етап – механічне

вимикання стрілки. Заключний етап – замикання стрілки, отримання сигналу контролю крайнього положення і тільки після цього вимикання двигуна [1].

У момент завершення робочого ходу шибера його лінійна швидкість має максимальне значення, і процес гальмування інерційної системи супроводжується тільки силовим фактором [2]. Робота з поглинання кінетичної енергії наприкінці переведення стрілки зараз здійснюється лише за рахунок сил тертя в кінематичних парах гостряк – повзуни, пружних сил рамної рейки і гарнітури і лише частково поглинається фрикційною муфтою. На практиці це призводить до ударів гостряка об рамну рейку. Це послаблює кріплення деталей і вузлів електропривода і гарнітури, сприяє передчасному зносу механізмів і може призвести до виникнення нештатної ситуації [2].

На сьогодні найбільшу частку ринку України займають стрілочні електроприводи типу СП-6 [1] як базові для подальшого розгляду. Стрілочні електроприводи для високошвидкісних магістралей займають відносно малу частку ринку та мають деякі важливі особливості [3] і в цій роботі не розглянуті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [4] зазначено, що фактичний середній термін служби елементів стрілочних переводів для частини проєктів значно нижче за нормативний термін служби, який має бути забезпечений разом із технологією виробництва, належною експлуатацією і відповідною конструкцією переводу; вихід із ладу стрілочних переводів обумовлений здебільшого технологічними і експлуатаційними факторами. Однак близько 23 % несправностей обумовлено конструктивними факторами.

Одним із шляхів збільшення середнього терміну служби елементів стрілочного переводу і підвищення безпеки руху поїздів [5] є зменшення впливу

гостряка на рамну рейку наприкінці переведення стрілки. З цією метою слід гасити кінетичну енергію рухомих мас наприкінці переведення стрілки шляхом зменшення швидкості в момент завершення переведення до нуля або досить малої величини.

Вимога нульової швидкості в момент завершення переведення стрілки суперечить вимозі мінімальному часу переведення стрілки. Розв'язання цієї суперечності може бути досягнуто з використанням алгоритму керування, оптимального за швидкодією з нульовою швидкістю в момент закінчення керування.

У роботі [6] розглянуто такий підхід. На підставі принципу максимуму Л. С. Понтрягіна [7] синтезовано оптимальну за швидкодією систему керування та запропоновано функціональну структуру такої системи. Однак у цій роботі вказані головні проблеми практичної реалізації оптимальної системи [6]:

- необхідність точного розрахунку моменту перемикавання і його залежність від поточних параметрів привода. Помилка в розрахунку може призвести до недоведення шибера до кінцевої точки і невиконання операції замикання стрілки;

- з реверсивним гальмуванням виникають значні комутаційні струми, що призводить до перевантажень елементів кола живлення;

- за наявності запізнення і неточності формування закону оптимального за швидкодією керування в системі може виникнути змінний режим автоколивань, що призводить до багаторазової комутації напруги живлення і затягування процесу переведення.

Тому оптимальну за швидкодією систему керування стрілочним електроприводом фактично можна використовувати тільки для оцінювання потенційно мінімального часу переведення стрілки з нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення.

Це спонукає до пошуку інших варіантів реалізації схем керування стрілочним електроприводом із нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є синтез алгоритму керування стрілочним електродвигуном із нульовою швидкістю в момент завершення керування та порівняння його з оптимальним за швидкодією.

Вирішити завдання синтезу алгоритму керування стрілочним електродвигуном із нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення пропонувано за допомогою теорії оптимального керування [7, 8].

Як відомо, для постановки завдання синтезу оптимального керування необхідно мати такі вихідні дані [7, 8]:

- 1) інформацію про об'єкт керування;
- 2) інформацію про зовнішні дії;
- 3) інформацію про мету керування;
- 4) інформацію про показник якості та критерії оптимальності керування;
- 5) інформацію про обмеження, накладені на величини вхідних впливів і координати стану об'єкта.

На основі зазначених вихідних даних необхідно знайти закон керування, який реалізує поставлену мету керування за накладених обмежень і забезпечить екстремальне значення заданого показника якості.

Основна частина досліджень. Як об'єкт керування розглянуто стрілочний електропривод типу СП-6 із двигуном постійного струму. З урахуванням того, що інерційність кола живлення якоря значно менше за інерційність рухомих механічних частин, динаміку роботи привода визначають за рівняннями [1]

$$\begin{aligned} \varphi'(t) &= k_p \cdot \Omega(t); \\ \Omega'(t) &= -\frac{1}{T} \Omega(t) + \frac{k_d}{T} u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\varphi(t)$ – кут повороту головного вала;
 k_p – коефіцієнт передачі редуктора;
 $\Omega(t)$ – кутова швидкість обертання якоря;
 T – електромеханічна стала двигуна;
 k_d – коефіцієнт підсилення двигуна за швидкістю;
 $u(t)$ – напруга живлення постійного струму.

Початкові і граничні умови для координат стану $\varphi(t)$ і $\Omega(t)$:

$$\begin{aligned} &\text{– початковий стан} \quad (t_0 = 0) \\ \varphi(0) &= 0, \quad \Omega(0) = 0; \\ &\text{– кінцевий стан} \quad (t = t_k) \\ J_2 \varphi(t_k) &= \varphi_k, \quad \Omega(t_k) = 0. \end{aligned}$$

Обмеження: напруга живлення $u(t)$ не має перевищувати припустимого значення U_m :

$$|u(t)| \leq U_m. \quad (2)$$

Розв'язання задачі синтезу для критерію мінімуму квадратичного показника якості. Розв'язують задачу за допомогою принципу максимуму.

Для зручності розв'язання доцільно перетворити змінні стану так, щоб отримати задачу з нульовим кінцевим станом. Для цього зробимо заміну змінних:

$$\begin{aligned} z_1(t) &= \varphi_k - \varphi(t); \\ z_2(t) &= -\varphi'(t) = -k_p \Omega(t). \end{aligned} \quad (3)$$

За такої заміни рівняння (1) набуває вигляду

$$\begin{aligned} z_1'(t) &= z_2(t); \\ z_2'(t) &= -\frac{1}{T} z_2(t) - \frac{K}{T} u(t), \end{aligned} \quad (4)$$

де $K = k_p \cdot k_d$ – загальний коефіцієнт підсилення (передачі) привода.

Початкові і граничні умови для координат стану $z_1(t)$ і $z_2(t)$:

$$z_1(0) = \varphi_k, \quad z_2(0) = 0, \quad z_1(t_k) = 0, \quad z_2(t_k) = 0. \quad (5)$$

Система (4) може бути переписана у векторно-матричній формі:

$$\vec{z}'(t) = \vec{A}\vec{z}(t) + \vec{B}u(t), \quad (6)$$

де $\vec{z}(t) = |z_1(t), z_2(t)|^T$ – вектор стану;

$$\vec{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{vmatrix} \text{ – матриця стану;} \quad (7)$$

$$\vec{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ -\frac{K}{T} \end{vmatrix} \text{ – матриця входу.} \quad (8)$$

Квадратичний показник якості J_2 для цієї задачі має вигляд

$$J_2 = \int_0^{t_k} (q_1^2 \cdot z_1^2(t) + q_2^2 \cdot z_2^2(t) + u^2(t)) dt, \quad (9)$$

де q_1, q_2 – параметри функціонала, що задовольняють умову $q_1 \geq 0, q_2 \geq 0$;

$t_k = \infty$ – нефіксований момент закінчення керування.

Критерій оптимальності – мінімум квадратичного показника якості J_2 .

Для перевірки умови керованості визначимо матрицю керованості \vec{M} :

$$\vec{M} = \begin{vmatrix} \vec{B} & \vec{A}\vec{B} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Матриця \vec{M} є розширенням рядків матриці \vec{B} шляхом послідовного дописування елементів відповідних рядків матриці $\vec{A}\vec{B}$.

Користуючись формулами (7), (8), одержуємо

$$\vec{M} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{K}{T} \\ -\frac{K}{T} & \frac{K}{T^2} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Матриця \vec{M} квадратна, її визначник

$$\det(\vec{M}) = -\frac{K^2}{T^2} \neq 0. \quad (12)$$

Отже, об'єкт керований, оскільки ранг матриці \vec{M} дорівнює порядку об'єкта.

Відомо, що умова керованості об'єкта є достатньою умовою [7, 8] існування єдиного розв'язку варіаційної задачі для функціонала типу (9).

Розв'язання задачі за відсутності обмежень (2) на величину напруги живлення призводить до такого результату [7]:

$$u^*(t) = -k_1(t) \cdot z_1(t) - k_2(t) \cdot z_2(t), \quad (13)$$

де $k_1(t), k_2(t)$ – коефіцієнти, що залежать від вибору q_1, q_2 параметрів функціонала (9).

У загальному випадку величини коефіцієнтів є функціями часу, їх знаходять з урахуванням розв'язків матричного диференціального рівняння типу Ріккати для

заданих граничних умов [7, 8]. Алгоритм (13) структурно реалізовано у вигляді

лінійної системи зі зворотними зв'язками (рис. 1).

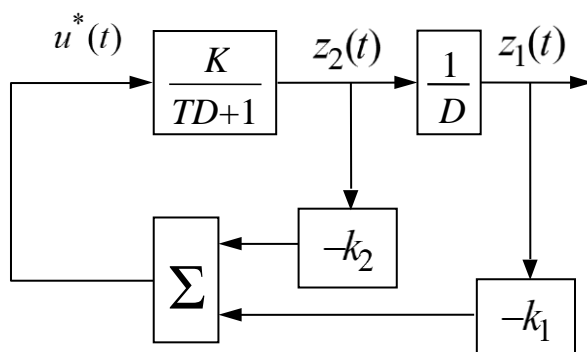


Рис. 1. Схема математичної моделі системи, оптимальної за квадратичним показником якості

У стаціонарному режимі передаточна функція замкненої системи зведена до стандартного вигляду ланки другого порядку з форсуванням:

$$W(p) = \frac{\tau \cdot p + 1}{T_0^2 \cdot p^2 + 2\xi T_0 \cdot p + 1}, \quad (14)$$

$$\text{де } 2\xi T_0 = \frac{k_2}{k_1} + \frac{1}{k_1 \cdot K}, \quad T_0 = \sqrt{\frac{T}{k_1 \cdot K}},$$

$$\tau = \frac{k_2}{k_1}.$$

Вибір параметрів k_1, k_2 може забезпечити задані показники якості перехідного процесу. Однак параметри еквівалентних ланок T_0, ξ, τ мають лише

два ступені свободи, тому їх не можна вибирати довільно.

У лінійній системі малого часу регулювання досягають за наявності невеликих коливань ($\xi = 0,5 \dots 0,8$), що є неприпустимим для стрілочних переводів. Крім того, ні величина керуючого впливу, ні час переведення за лінійного керування не обмежені. Наявність природних обмежень на керування (2) і нелінійностей, зумовлених силами опору, призводить до неможливості (!) практичної реалізації системи, оптимальної за квадратичним показником якості.

Синтез комбінованого керування. Для обмеження величини $u(t)$ і виключення зміни знака керуючого впливу введемо такий алгоритм (рис. 2):

$$u(t) = \begin{cases} U_m \cdot \text{sgn}(u^*(t)), & \text{при } |u^*(t)| \geq U_m, \\ u^*(t), & \text{при } U_m > |u^*(t)| > 0, \\ 0, & \text{після першої зміни знаку } u^*(t), \end{cases} \quad (15)$$

де $u^*(t)$ – керуюча напруга, визначена законом (13).

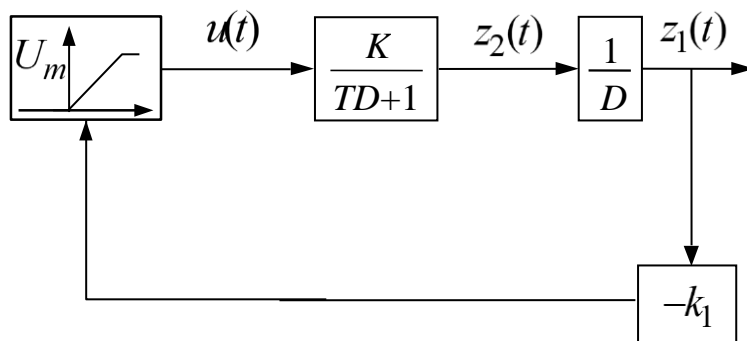


Рис. 2. Схема математичної моделі системи з комбінованим керуванням

На початковій ділянці переводу маємо керування, оптимальне за швидкодією, але на кінцевій – лінійний закон керування. Керування закінчується на момент t_k першої зміни знака $u^*(t)$ (момент першого узгодження).

Коефіцієнти кола зворотного зв'язку доцільно прийняти постійними. Оскільки коливання перехідного процесу виключені, з метою спрощення технічної реалізації доцільно прийняти $k_2 = 0$. У цьому випадку параметри еквівалентної ланки другого порядку дорівнюють

$$T_0 = \sqrt{T/(k_1 \cdot K)}, \quad \xi = 0,5/\sqrt{k_1 \cdot K \cdot T}, \quad \tau = 0. \quad (16)$$

Дослідження систем керування стрілочним приводом. Дослідження проводили на Simulink-моделі двигуна постійного струму МСП-0,15/160 стрілочного переводу СП-6. Модель містить такі основні компоненти (рис. 3):

- повну модель двигуна МСП-0,15/160 з урахуванням інерційності кола живлення якоря (електромагнітної постійної часу) і нелінійностей, зумовлених моментами сил сухого тертя та навантаження $|M_c|$ (субблок DPTN);
- субблок автоперемикача AP1;
- субблок Subsystem, у якому розраховують величини керуючої напруги залежно від закону керування (15), (16) з роботи [6] (оптимальна за швидкодією система) або законів керування (13), (15);
- віртуальні осцилографи Scope U/I, z.

Розрахунки проведені з навантаженням на валу, близьким до номінального ($M_c = 1,67 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Початкові умови $z_1(t) = 280$ град, $z_2(t) = 0$.

Дослідження проведені для керування, оптимального за швидкодією (суцільні лінії), комбінованого керування (дрібний пунктир), а також штатного режиму (пунктир). На рис. 4-7 показані лише кінцеві ділянки від 2,5 до 4 с, оскільки на початковій ділянці керування здійснюється шляхом встановлення максимального значення напруги живлення, тому всі графіки мають однаковий вигляд, максимальний пусковий струм дорівнює 4,3 А.

За оптимального керування за швидкодією відбувається одноразова зміна знака напруги на кінцевій ділянці (реверс) за 0,12 с до моменту удару за штатного

керування. Зі зміною знака перепад струму становив 8,5 А. Тривалість реверсу становила 0,22 с, що призвело до збільшення часу переведення стрілки на 0,1 с.

За комбінованого керування напруга на кінцевій ділянці починає плавно зменшуватися приблизно за 0,6 с до моменту удару за штатного керування, а час керування збільшується на 0,35 с.

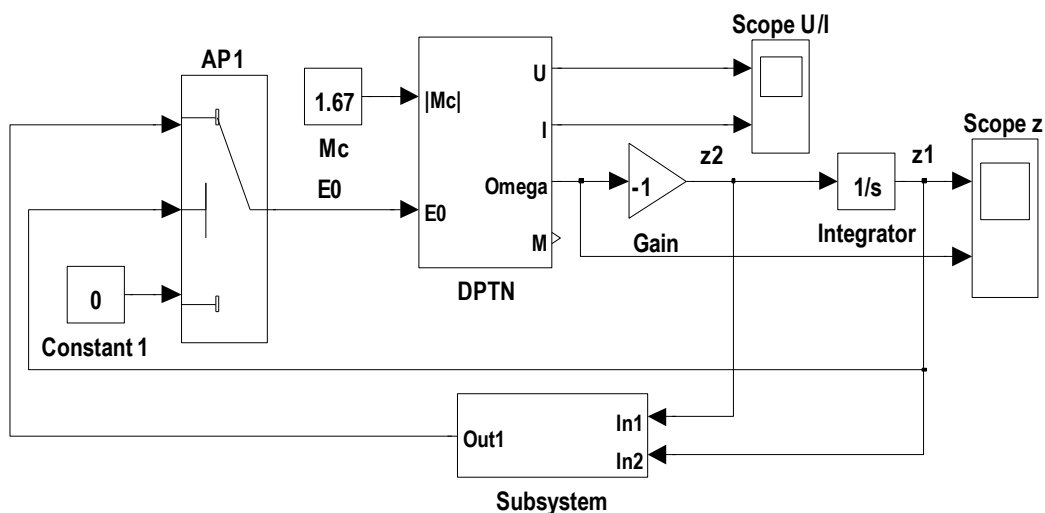


Рис. 3. Simulink-модель системи керування

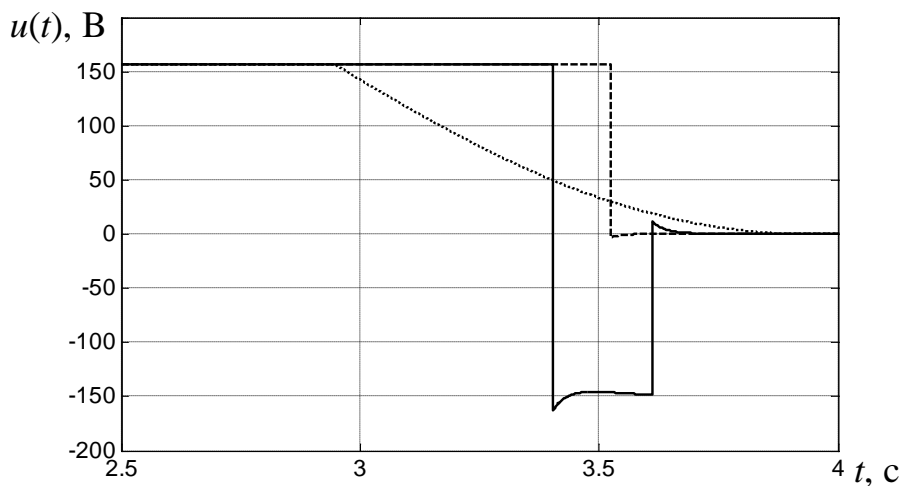


Рис. 4. Залежності напруги на якорі двигуна від часу за різних законів керування

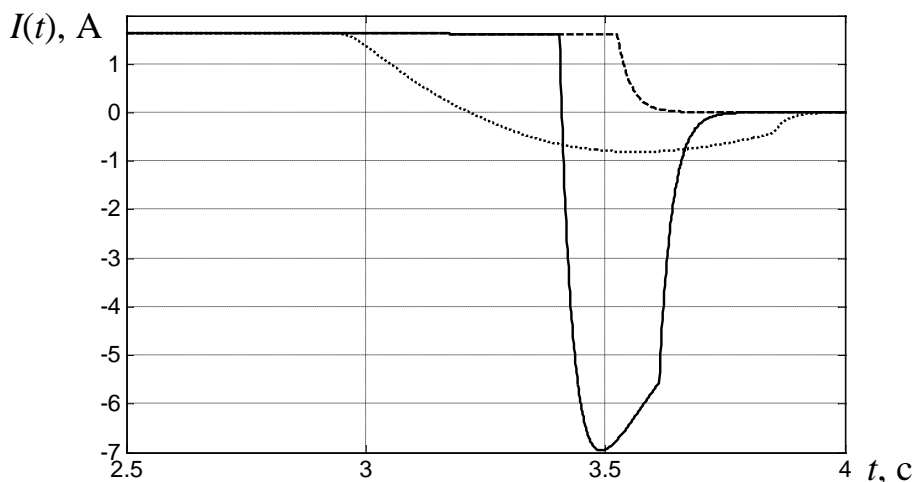


Рис. 5. Залежності струму якоря двигуна від часу за різних законів керування

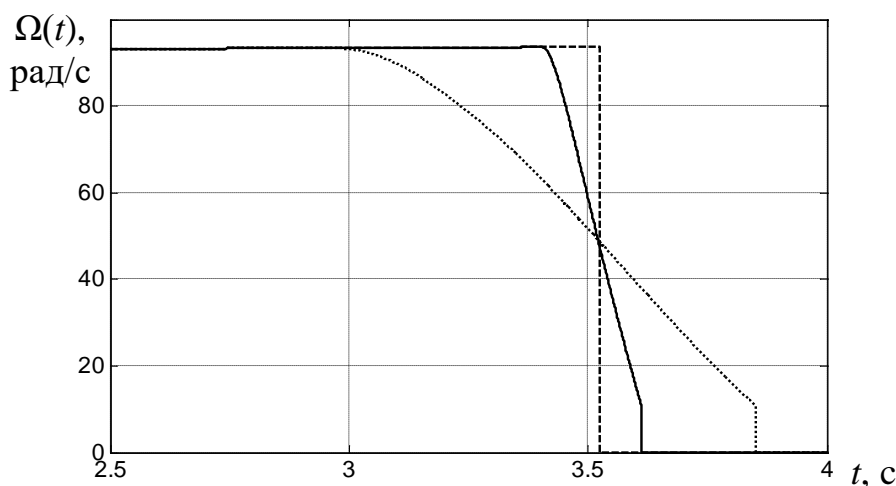


Рис. 6. Залежності кутової швидкості якоря двигуна від часу за різних законів керування

В обох випадках фактична швидкість обертання до зупинки вихідного вала в крайньому положенні знижується з 95 до 12,6 рад/с, а не до нуля. Це можна пояснити невідповідністю моделі (1), прийнятої для синтезу, і повної Simulink моделі двигуна, дослідженої в цій роботі. Досягти

швидкості, що дорівнює нулю, не вдається через наявність зони нечутливості, обумовленої силами сухого тертя. Втім, наявність невеликої залишкової швидкості є позитивним ефектом, що дає змогу забезпечити надійне замикання стрілки в крайньому положенні.

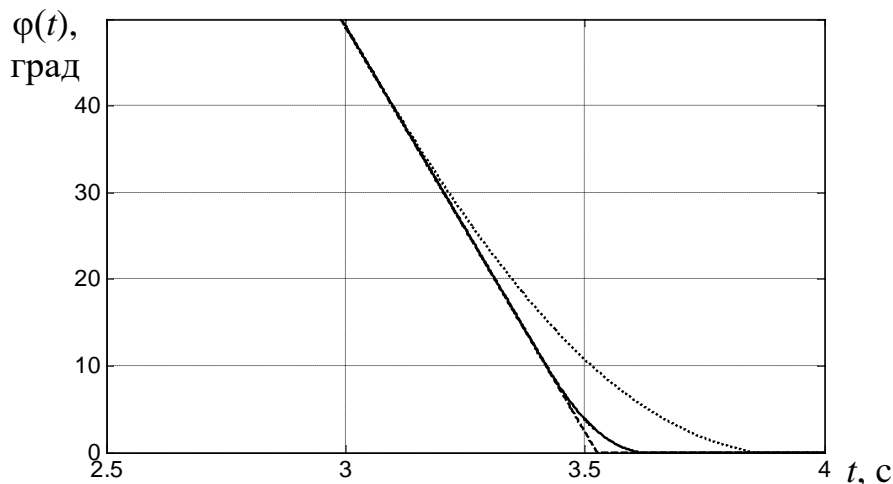


Рис. 7. Залежності кута повороту головного вала від часу за різних законів керування

Слід також зазначити, що за наявності запізнення і неточності формування закону оптимального за швидкістю керування виникає ковзний режим, що призводить до багаторазової комутації напруги живлення і затягування процесу переведення.

Встановлено також, що за комбінованого керування малі значення коефіцієнта k_1 ($\xi > 0,8$) призводять до передчасної зупинки обертання (недоведення шибера до положення замикання), що є неприпустимим. За великих – кінцева швидкість обертання може бути в межах $0,5 \dots 0,6$ від номінальної, що небажано. Тому встановлення величини k_1 має бути виконано дуже ретельно.

Аналіз проблеми практичної реалізації системи керування. Функціональна структура системи керування стрілочним електроприводом має містити блок спостерігача стану та блок керування.

Блок спостерігача стану визначає кут повороту головного вала і кутову швидкість його обертання, перетворює їх у змінні z_1, z_2 . Вимірювання величин φ і φ' може бути виконано шляхом встановлення на

головний вал додаткових елементів – датчиків кута і кутової швидкості обертання. Замість датчика кута повороту можливе використання датчика лінійного положення шибера. У разі використання комбінованого керування достатньо лише датчика кута або положення.

Блок керування може бути реалізований на базі мікроконтролера з програмою обчислень відповідно до рівнянь (13), (15). За комбінованого керування до складу блока керування слід ввести регульований підсилювач для встановлення коефіцієнта k_1 .

Отже, існує важлива можливість практичної реалізації розглянутого комбінованого закону керування.

Висновки:

1. Для завершення робочого ходу шибера з нульовою кінцевою швидкістю запропоновано застосувати систему керування стрілочним переводом, оптимальну за квадратичним показником якості, і систему з комбінованим керуванням.

2. Система з комбінованим керуванням, на відміну від оптимальної системи, за квадратичним показником якості може бути практично реалізована.

3. Проведено порівняльний аналіз трьох систем керування: оптимальної за швидкістю, системи з комбінованим керуванням та штатної системи для стрілочного привода типу СП-6 із двигуном постійного струму МСП 0,15/160.

4. Система з комбінованим керуванням забезпечує невелику залишкову кутову швидкість обертання якоря двигуна

12,6 рад/с і збільшує час переведення на 0,35 с порівняно зі штатною системою, що не є принциповим (не для гіркових переводів!).

5. Запропоновано склад функціональної структури комбінованої системи керування – додаткові блоки спостерігача стану та керування на базі мікроконтролера з регульованим підсилювачем.

Список використаних джерел

1. Резников Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва: Транспорт, 1985. 332 с.
2. Каменев А. И., Минков Е. Ю., Шуваев В. В., Савицкий А. Г. Анализ режима работы быстродействующих стрелочных приводов. *Автоматика, связь, информатика*. 2003. № 12. С. 2–5.
3. Омеляненко В. И., Буряковский С. Г., Любарский Б. Г. Электроприводы стрелочных переводов высокоскоростного электрического транспорта. *Українська залізниця*. 2017. № 9–10. С. 54–60.
4. Рибкін В. В., Баль О. М., Бондаренко І. О. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2011. № 38. С. 127–133.
5. Парфенов В. И., Разгонов В. П., Ковригин М. А. Анализ дефектов и возможности диагностики стрелочных переводов. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2007. № 15. С. 16–18.
6. Нейчев О. В., Сосунов О. О., Садовый К. В., Хісматулін В. Ш. Синтез оптимальної за швидкістю системи керування стрілочним електроприводом. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Вип. 6(24). С. 20–26.
7. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука, 1969. 384 с.
8. Boscaiu U., Piccoli V. Optimal synthesis for control systems on 2-D manifolds. Springer-Verlag, 2004. 262 p.

Хісматулін Володимир Шайдулович, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7578-1217. Тел.: +38 (057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сосунов Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2175-7363. Тел.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Ушаков Михайло Віталійович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6270-4212. Тел.: +38 (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Khismatulin Vladimir, PhD (Tech), professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7578-1217. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Sosunov Aleksandr, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2175-7363. Tel.: +38(068) 607-88-13.
E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Prylypko Andrii, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Tel.: +38(057) 730-10-32.
E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Ushakov Mykhailo, Senior Lecturer, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6270-4212. Tel.: +38(057) 730-10-32.
E-mail: micush@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 24.03.2025 р.