

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМ ПРИСТРОЄМ РОБОТИЗОВАНОЇ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ

Гурко О. Г., Михалевич М. Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Незважаючи на активний розвиток електромобілів, актуальним залишається завдання полегшення процесу керування агрегатами механічної трансмісії. З цієї метою здійснюється їхня автоматизація. У роботі синтезований лінійно-квадратичний регулятор, що є оптимальним для заданої квадратичної цільової функції, яка враховує як вимоги до якості перехідних процесів, так і енергетичні витрати на реалізацію керування. Проаналізовано вплив значень вагових коефіцієнтів в цільовій функції на якість перехідних процесів у системі керування. Комп'ютерне моделювання продемонструвало, що запропонований регулятор забезпечує задану швидкодію за значно меншого (більше ніж 50 %) перерегулювання, як порівняти з системою з ПД-регулятором.

Ключові слова: перемикання передач, електромеханічний привід, оптимальне керування, лінійно-квадратичний регулятор, вагові коефіцієнти.

Вступ

Незважаючи на активний розвиток і впровадження електромобілів, в найближчій перспективі двигуни внутрішнього згоряння залишаються одними з найбільш поширених силових приладів на автомобільному транспорті [1]. Отже, актуальними є дослідження, спрямовані на полегшення процесу керування агрегатами трансмісії, зокрема коробкою передач (КП). Це є важливим для великовантажних автомобілів і автобусів, водії яких змушені часто здійснювати перемикання передач, прикладаючи помітних зусиль [2]. Наприклад, водій міського автобуса натискає на педаль зчеплення до 2000 разів за зміну [3]. Більшість з цих впливів пов'язана саме з перемиканням передач.

Для спрощення процесу керування КП набули поширення різноманітні види автоматизованих й автоматичних КП, зокрема увагу більшості виробників сконцентровано на автоматизації саме механічних КП [4]. Ця робота направлена на здійснення аналізу автоматизації керування механічною КП автомобіля.

Аналіз публікацій

На сьогодні різноманітні виробники пропонують декілька видів автоматизованих КП, які можна поділити на гідромеханічні, роботизовані механічні та варіаторні [2, 4–10]. Кожен з цих видів має як свої переваги, так і недоліки. Наприклад, роботизовані КП мають кращі показники ККД та меншу питому масу [8, 9].

Відповідно до принципу роботи, роботизовані КП мають спільні риси з механічними, проте вибір і вмикання необхідної передачі здійснюються окремими виконавчими пристроями. Такими пристроями можуть бути електрогідравлічні, електропневматичні або електромеханічні приводи. В основі електромеханічних приводів можуть використовуватися крокові двигуни або двигуни постійного струму (ДПС). Зокрема в [10] запропонована конструкція механізму автоматизованого перемикання передач, в якому, крім інших характерних ознак, використовується два ДПС – селекторний і силовий. Селекторний ДПС відповідає за вибір відповідної передачі, а силовий забезпечує безпосередньо її вмикання. Зворотній зв'язок щодо положення валів ДПС реалізований за допомогою потенціометричних датчиків.

Ефективність запропонованого в [10] вирішення цієї проблеми значною мірою залежить від ефективності мікропроцесорної системи керування ДПС, яка повинна забезпечити плавне, але одночасно швидке та точне позиціонування валів двигунів. В [11] з цією метою було застосовано ПД-регулятор. Однак відомо, що класичний ПД-регулятор, хоча і забезпечує задовільні показники якості системи керування, проте не є оптимальним.

У межах сучасної теорії автоматичного керування розроблено низку регуляторів [12, 13], що забезпечують оптимальність системи керування щодо заданого критерію якості. Одним з таких видів оптимальних регуляторів є лінійно-квадратичний регулятор (ЛКР) [13, 14].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є розроблення оптимального регулятора для керування електромеханічними приводами запропонованого в [10] механізму автоматизованого перемикання передач.

Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити математичний аналіз системи керування, вибрати тип регулятора, дослідити вплив параметрів цільової функції на перехідні процеси в системі керування, визначити параметри регулятора й оцінити якість роботи синтезованої системи керування.

Математичний аналіз системи керування

Як вже зазначалося, в механізмі автоматизованого перемикання передач, що розглядається, використовується електромеханічний привід у вигляді ДПС. Математична модель ДПС проаналізована в літературі [15, 16]. У разі керування за ланцюгом якірного обмотування та за умови припущення щодо постійності магнітного потоку математична модель ДПС у просторі станів має такий вид [16]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} & 0 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 1], \quad \mathbf{x} = [i(t) \ \omega(t) \ \theta(t)]^T,$$

де R – опір якірного обмотування ДПС; L – індуктивність якірного обмотування; K_m – постійна ДПС; K_e – постійна проти ЕРС; J – момент інерції вала ДПС; $i(t)$ – значення електричного струму в якірному обмотуванні $\omega(t)$ – кутова швидкість вала ДПС; $y(t)$ – вихідна координата (кутове положення $\theta(t)$ вала); $u(t)$ – керувальний вплив; b – коефіцієнт тертя; n – передавальне число редуктора.

Керування $u(t)$ необхідно знайти в формі

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

де \mathbf{K} – вектор коефіцієнтів зворотного зв'язку за станом (рис. 1), що забезпечує необхідне розташування полюсів замкнутої системи.

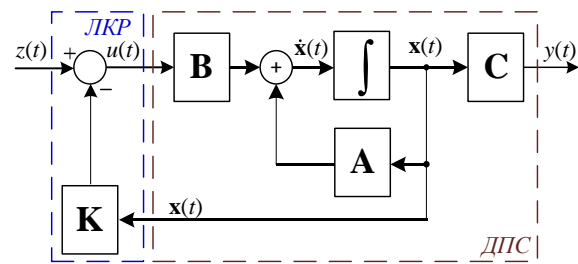


Рис. 1. Блок-схема системи керування

На рис. 1 $z(t)$ наведено положення вала ДПС.

Визначення значень компонентів вектора \mathbf{K} необхідно здійснити згідно з методом ЛКР. Метою закону керування (2) є мінімізація квадратичної цільової функції:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + u^2(t)r) dt, \quad (3)$$

де \mathbf{Q} – діагональна позитивна напіввизначена матриця (3×3); r – скаляр.

Значення діагональних елементів матриці \mathbf{Q} , а також скаляра r встановлюють співвідношення між якістю системи керування та витратами енергії на реалізацію керування $u(t)$.

Мінімізацію цільової функції (3) забезпечує вектор коефіцієнтів \mathbf{K} у виразі (2), що обчислюється у такий спосіб [13]:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}, \quad (4)$$

де \mathbf{P} – позитивно визначена матриця (3×3), що знаходиться під час розв'язування алгебраїчного рівняння Ріккати:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (5)$$

Синтез регулятора

Як об'єкт керування визначено ДПС Julling Motor 3540-2440, що здійснює функції селектора в механізмі автоматизованого перемикання передач, що розглядається. Значення параметрів ДПС наведені в табл. 1.

Відповідно до (1) керуваною координатою $y(t)$ є кутове положення $\theta(t)$ вала ДПС, а керувальним впливом $u(t)$ – напруга $V(t)$ живлення ланцюга якірного обмотування, значення якої визначається ШІМ-сигналом на виході мікропроцесорного блока керування.

Таблиця 1 – Номінальні значення параметрів ДПС Julling Motor 3540-2440 [11]

Параметр	Значення
Напруга живлення, V [В]	24
Частота обертання без навантаження, n_{nl} [об/хв]	4000
Струм без навантаження, I_{nl} [мА]	55
Номінальна частота обертання, n_{rat} [об/хв]	3000
Номінальний крутний момент, T_{rat} [гс·см]	100
Номінальний струм, I_{rat} [мА]	230
Пусковий момент, T_{stall} [гс·см]	400
Пусковий струм, I_{stall} [А]	0,7
Передавальне число редуктора, n	100

Для визначення опору R [Ом] ланцюга якоря, а також постійних двигуна K_e [Вс/рад] і K_m [Нм/А] використовували такі співвідношення:

$$R = V / I_{stall}, \text{ Ом} \quad (6)$$

$$K_e = V / \omega_{nl}, \quad (7)$$

$$K_m = T_{stall} / I_{stall}, \quad (8)$$

де ω_{nl} – кутова швидкість вала ДПС без навантаження, рад/с.

Значення коефіцієнта тертя b [Нмс/рад] в (1) отримано з рівняння (9) в сталому режимі:

$$K_m I = J \dot{\omega}(t) + b \omega(t), \quad (9)$$

$$b = \frac{K_m I}{\omega}. \quad (10)$$

Значення індуктивності L [Гн] обмотування ланцюга якоря і моменту інерції J [кг·м²] ДПС були визначені експериментально.

Синтезування регулятора здійснено із залученням можливостей MATLAB/Simulink®. Відповідна Simulink-модель наведена на рис. 2. Блок «DC Motor» на рис. 2 містить модель ДПС у формі (1). Розв'язування рівняння Ріккати (5) здійснено за допомогою функції MATLAB® *care*.

Значення вагових коефіцієнтів в (3) визначалися у такий спосіб, щоб значення координат стану $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ і керувального впливу $u(t)$ не виходили за межі, зазначені в паспортних даних на ДПС (табл. 1).

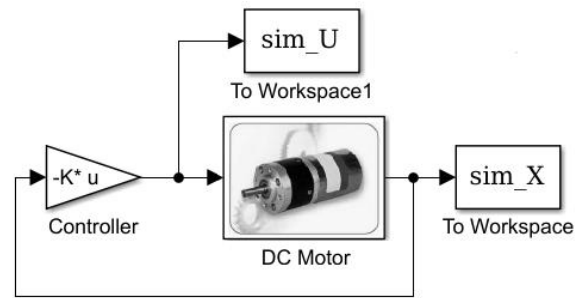


Рис. 2. Simulink-модель системи керування

Початкові значення діагональних елементів матриці Q і коефіцієнта r були розраховані за співвідношеннями (11)–(14). Значення недіагональних елементів матриці Q дорівнювали нулю. На рис. 3 наведено результати моделювання системи керування відповідно до значень вагових коефіцієнтів, отриманих за допомогою (11)–(14) і за початкових умов, коли $x = [0, 0 \pi/2]^T$:

$$q_{11} = \left(\frac{1}{|2I_{stall}|} \right)^2, \quad (11)$$

$$q_{22} = \left(\frac{1}{|\omega_{nl}|} \right)^2, \quad (12)$$

$$q_{33} = \left(\frac{1}{|2\pi|} \right)^2. \quad (13)$$

$$r = \left(\frac{1}{|2V|} \right)^2. \quad (24)$$

Результати моделювання

Згідно з рис. 3а початкове керування $u(0)$ за абсолютною величиною становить 12В, що є напругою бортової мережі автомобіля, тому подальше збільшення керування є неприпустимим. Негативний знак $u(t)$ свідчить про те, що вал ДПС працює в реверсному режимі.

На рис. 3б продемонстровано, що перехідний процес завершується приблизно за 0,65 с. Підвищити швидкодію можна, збільшивши початкові значення пускового струму I (рис. 3б). На це значення впливає значення вагового коефіцієнта q_{11} , а також значення інших вагових коефіцієнтів у критерії (3). Рисунки 4 а–4 в відображають зміну координат $u(t)$, $x_1(t)$ та $x_3(t)$ за значень вагового коефіцієнта $k \cdot q_{11}$, якщо $k = 0,0001; 0,001; 0,01; 0,05; 0,5; 1,0$.

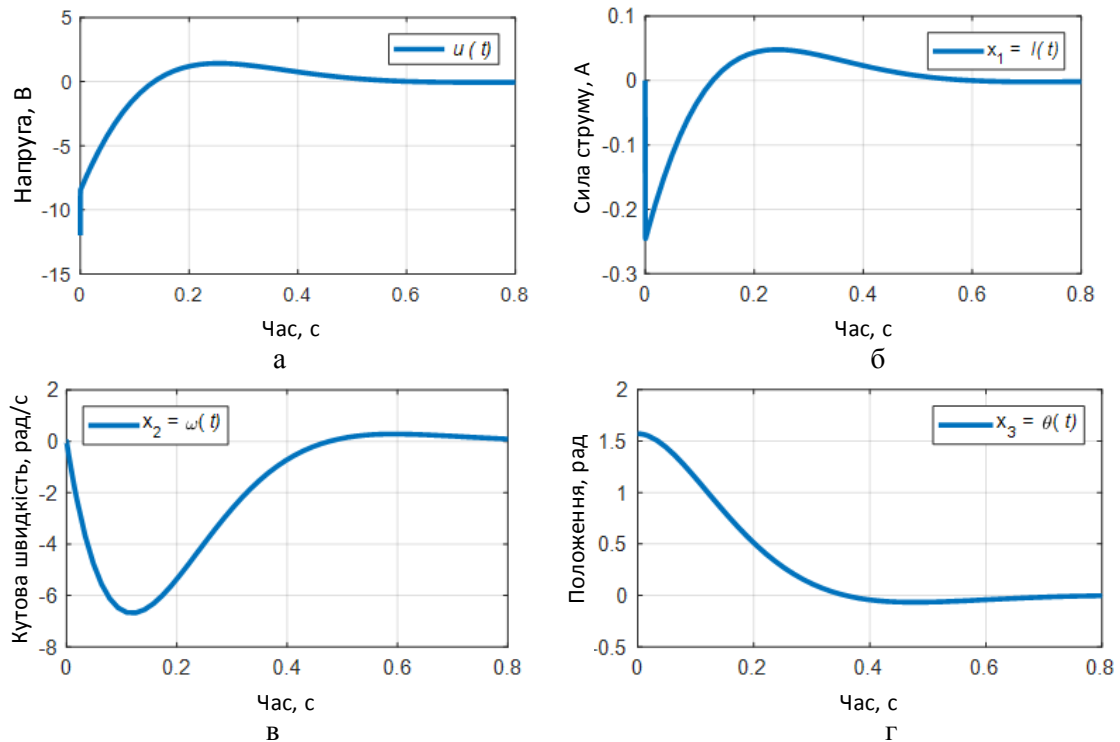


Рис. 3. Результати моделювання поведінки системи керування за початкових значень вагових коефіцієнтів в цільовій функції (3): а – керувальний вплив; б – струм в ланцюзі якоря; в – кутова швидкість; г – кутове положення вала привода КП

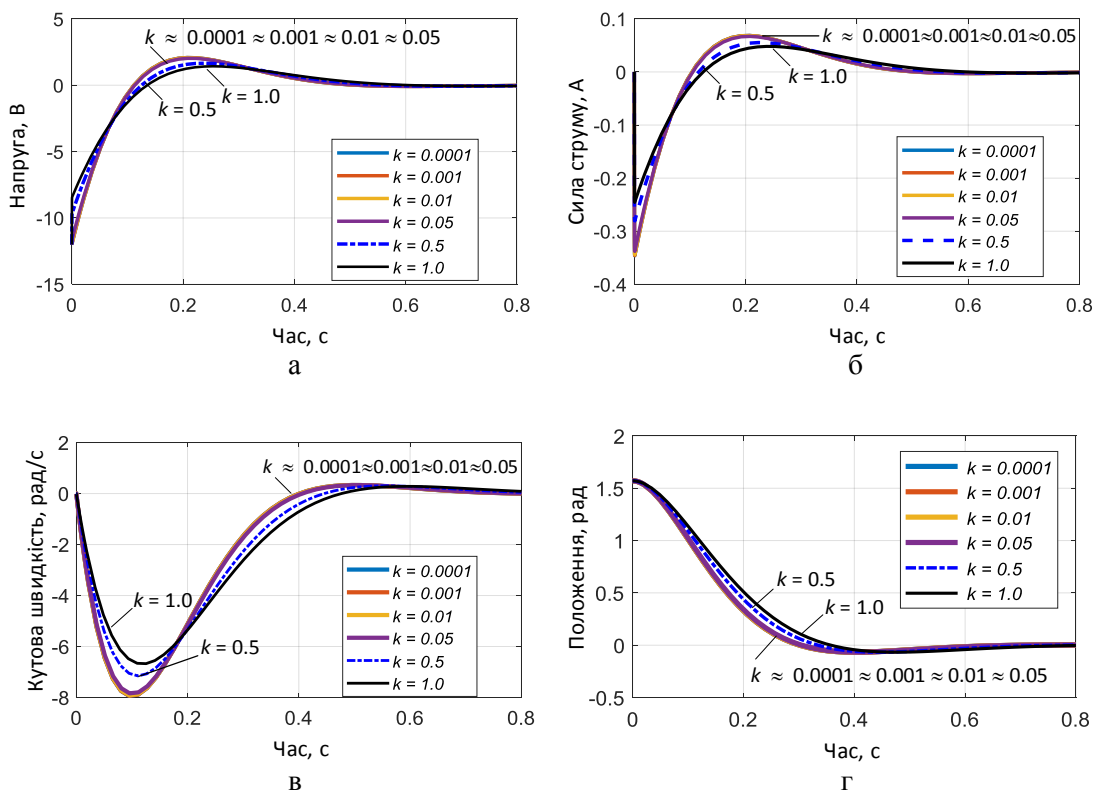


Рис. 4. Зміна керувального впливу (а), струму в ланцюзі якоря (б), кутової швидкості (в) та положення вала (г) привода КП за зменшення значення коефіцієнта q_{11}

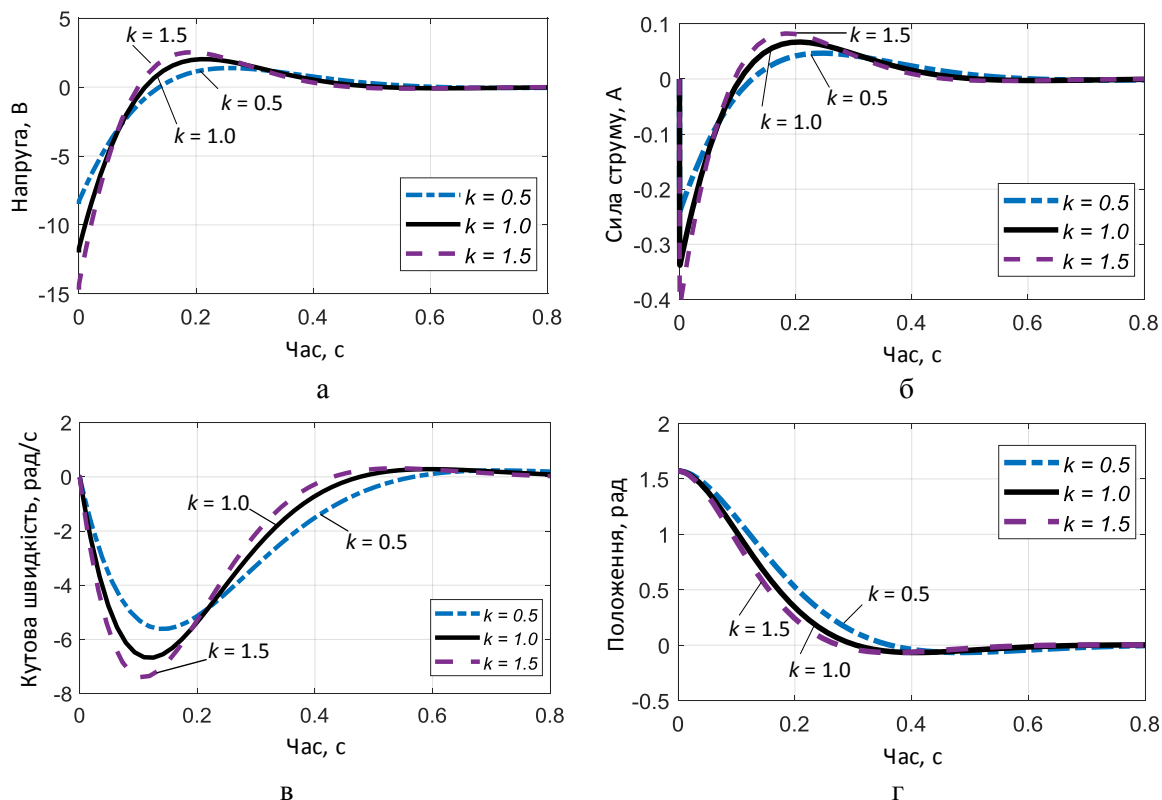


Рис. 5. Зміна керувального впливу (а), струму в ланцюзі якоря (б), кутової швидкості (в) та положення вала (г) привода КП за зміни значення коефіцієнта q_{33}

На рис. 4 продемонстровано, що зменшення значення q_{11} призводить до підвищення абсолютного значення пускового струму i , а отже, і до підвищення швидкодії системи. Перерегулювання у цьому випадку істотно не змінюється. Необхідно зазначити, що перехідні процеси за значень $k = 0,0001$, $k = 0,001$, $k = 0,01$ і $k = 0,05$ відрізняються незначною мірою (рис. 4), тому надалі будемо використовувати значення $0,05 \cdot q_{11}$.

Коефіцієнт q_{22} має досить невелике значення (10^{-8}), це дає можливість не обмежувати швидкість обертання вала двигуна. Моделювання демонструє, що зміна значення q_{22} в незначних межах не впливає на поведінку системи керування, а підвищення q_{22} і вище уповільнює швидкість реакції системи. Тому розглянемо, як на якість системи впливає значення q_{33} .

Ефект від зміни q_{33} відображають рисунки 5 а та 5б. Збільшення значення коефіцієнта q_{33} призводить до підвищення швидкодії системи (рис. 5в). Однак це відбувається внаслідок збільшення керування (понад 12В). Отже, в цьому випадку доведеться збільшувати значення коефіцієнта r .

Таким чином, як остаточні значення вагових коефіцієнтів у (3) прийняті $q_{11} = 0,026$, $q_{22} = 2,778 \cdot 10^{-8}$, $q_{33} = 0,025$ та $r = 4,340 \cdot 10^{-4}$.

Реакція на одиничну ступінчасту функцію, що відповідає цим значенням, надана на рис. 6.

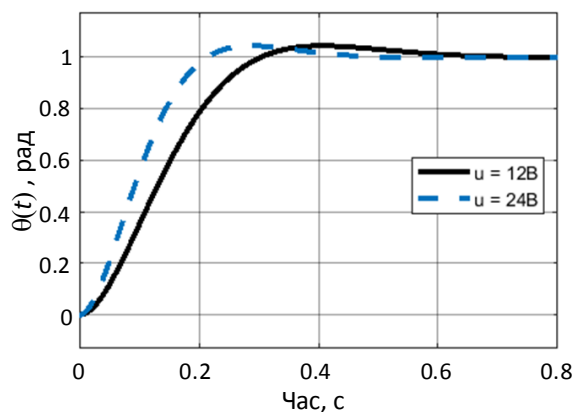


Рис. 6. Реакції системи на одиничний ступінчастий сигнал за різних значень максимальної керувальної напруги

Згідно з рис. 6 за умови максимальної керувальної напруги в 12В перерегулювання в системі становить $\sigma = 4,2\%$, а час встановлення за двовідсотковим критерієм – $t_s = 0,54$ с (суцільна лінія на рис. 6). Ці значення задовольняють вимогам, що висуваються до системи, а перерегулювання як мінімум в 2 рази є меншим, ніж отримане в [11]

за допомогою ПД-регулятора. Підвищення керувальної напруги з 12В до 24В підвищить швидкодню приблизно на 30 % ($t_s = 0,38$ с) за умови такого самого значення перерегулювання (штрихова лінія на рис. 6). У цьому випадку необхідна корекція значень вагових коефіцієнтів у критерії (3).

Висновки

Вирішено завдання оптимального керування положенням електромеханічного привода в роботизованій КП автомобіля. З цією метою синтезовано лінійно-квадратичний регулятор, який є оптимальним для заданої квадратичної цільової функції, що враховує як вимоги до якості перехідних процесів, так і енергетичні витрати на реалізацію керування. Встановлено закономірності в поведінці привода за умови зміни значень вагових коефіцієнтів у квадратичній цільовій функції. За допомогою комп'ютерного моделювання продемонстровано, що запропонований регулятор забезпечує задану швидкодню за значно меншому (більше ніж 50 %) перерегулюванні, як порівняти з системою з ПД-регулятором.

Практична реалізація запропонованого регулятора передбачає наявність даних про зміну всіх координат стану об'єкта керування, в той час як в реальності вимірюється лише одна координата – положення вала привода. Тому надалі необхідно розроблення спостерігача стану, наприклад у вигляді фільтра Калмана. Крім того, оскільки в процесі роботи привода КП значення його параметрів змінюються [11], необхідно забезпечити інваріантність системи керування до цих змін. З вирішенням зазначених завдань пов'язані подальші дослідження авторів.

Література

1. European Roadmap Hybridisation of Road Transport. ERTRAC Expert Group Enabling Technologies. Version June 1. 2011. 45 p. URL: https://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/Roadmap/Hybridisation%20of%20Road%20Transport.pdf (дата звернення 07.10.2020).
2. Пути повышения быстродействия исполнительного механизма электропневматического привода сцепления автомобилей / Богомолов В. А. та ін. *Вісник СевНТУ. Сер. Машинобудування та транспорт*. 2013. № 142. С. 73–75.
3. Вахламов В. К. Автомобили: конструкция и элементы расчета. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 480 с.
4. Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application / Naunheimer H.,

Bertsche V., Ryborz J., Novak W. Springer. 2011. 742 p.

5. Еникеев В. С., Малахов О. С. Мехатронная система автоматической коробки переключения передач. *Энергетические и электротехнические системы*. 2015. С. 283–288.
6. Татарин Д. А. Роботизированные коробки передач в современных автомобилях. *Modern Science*. 2019. № 7-1. С. 241–245.
7. Красневский Л. Г. Состояние и перспективы развития автоматических трансмиссий мобильных машин. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2012. Вып. 1. С. 115–121.
8. Анализ существующих конструкций трансмиссий / Богомолов В. А., Клименко В. И., Михалевич Н. Г., Сильченко Н. Н. *Автомобильный транспорт*. 2010. Вып. 27. С. 17–21.
9. Михалевич Н. Г., Сильченко Н. Н. Анализ современных тенденций в развитии конструкций автоматизированного управления агрегатами трансмиссии. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету*. 2016. Вып. 75. С. 54–57.
10. Механізм автоматизованого перемикання передач: пат. 93788 Україна; опубл. 10.10.2014.
11. Сильченко М. М. Вдосконалення автоматизованої системи керування механічною коробкою передач транспортних засобів категорії N_3 та M_3 : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02 / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2019.
12. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления. 2004. 744 с.
13. Anderson B. D. O., Moore J. B. Optimal control: linear quadratic methods. Courier Corporation, 2007. 394 p.
14. Linear Quadratic Gaussian Control for Robotic Excavator / Gurko A. Kyrychenko I., Yaryzhko A., Kononykhin O.. *The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems: proceedings*. Vol. 2608. 144–155. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper12.pdf>.
15. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Москва: Лаб. базовых знаний, 2002. 832 с.
16. Гурко А. Г. Робастное управление приводом лазера системы технического зрения. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2019. №1. С. 238–246. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-22.

References

1. European Roadmap Hybridisation of Road Transport. ERTRAC Expert Group Enabling Technologies. Version June 1. 2011. 45 p. URL: https://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/Roadmap/Hybridisation%20of%20Road%20Transport.pdf (дата звернення 07.10.2020).

2. Puti povysheniya bystrodeystviya ispolnitelnogo mekhanizma elektropnevmaticheskogo privoda stsepleniya avtomobiley [Ways to increase the operating speed of vehicles clutch electropneumatic actuator power unit] / Bogomolov V., Klymenko V., Mikhalevich N., Yaryta A. *Visnyk SevNTU. Ser. Mashynopryladobuduvannya ta transport*. 2013. No.142. Pp. 73–75 [in Russian].
 3. Vahlamov V. K. *Avtomobili: konstruktsiya i elementy rascheta* [Automotives: construction and elements of calculation]. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. 480 p. [in Russian].
 4. *Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application* / Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. Springer. 2011. 742 p.
 5. Enikeyev V. S., Malakhov O. S. Mekhatronnaya sistema avtomaticheskoy korobki pereklyucheniya peredach [Machanotronic system of automatic transmission]. *Energeticheskiye i elektrotekhnicheskiye sistemy*. 2015. Pp. 283–288 [in Russian].
 6. Tatarinov D. A. Robotizirovannyye korobki peredach v sovremennykh avtomobilyakh [Robotic gearboxes in modern vehicles]. *Modern Science*. 2019. No. 7-1. Pp. 241–245 [in Russian].
 7. Krasnevski L. G. Sostoyanie i perspektivy razvitiya avtomaticheskikh transmissiy mobilnykh mashin [The state and perspectives of automotive automatic transmissions` development]. *Aktualnyie voprosyi mashinovedeniya*. 2012. No. 1. Pp. 115–121. [in Russian].
 8. Analiz sushestvuyuschih konstruktсий transmissiy [Analysis of existing constructions of transmissions] / Bogomolov V. A., Klymenko V. I., Mihalevich N. G., Sylchenko N. N. *Automobile Transport*. 2010. No. 27, pp. 17–21. [in Russian].
 9. Mihalevich N. G., Sylchenko N. N. Analiz sovremennykh tendentsiy v razvitii konstruktсий avtomatizirovannogo upravleniya agregatami transmissii [Analysis of modern trends in developing the design of transmission units automatic control]. *Visnyk Kharkivskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universytetu – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2016. No. 75, pp. 54–57. [in Russian].
 10. *Mehanizm avtomatizovanogo peremikannya peredach* [Automatic gear shift mechanism]: pat. UA No. 93788, 2014. [in Russian].
 11. Sylchenko N. N. *Vdoskonalennyya avtomatizovanoi sistemi keruvannya mehanichnoyu korobkoju peredach transportnih zasobiv kategoriy N₃ ta M₃*: Diss. ...kand. techn. nauk [Improvement of electro-mechanical gear-shift mechanism of automatic transmission. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkiv, 2019. 174 p. [in Ukrainian].
 12. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya, tom. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of Classic and Modern Control Theory, vol. 4. Automatic Control Systems Optimization Theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 744 p. [in Russian].
 13. Anderson B. D. O., Moore J. B. *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation, 2007. 394 p.
 14. *Linear Quadratic Gaussian Control for Robotic Excavator* / Gurko A. Kyrychenko I., Yaryzhko A., Kononykhin O. *The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems: proceedings*. Vol. 2608. 144–155. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper12.pdf>.
 15. Dorf R. C., Bishop R. H., *Modern Control Systems*. 8th ed. Addison–Wesley, 1998. (Rus. ed.: Dorf R., Bishop R. *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002. 832 p.).
 16. Gurko A. G. Robust control of laser actuator for technical vision system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019. No. 1. P. 238–246. [in Russian]. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-22.
- Гурко Олександр Геннадійович**, д.т.н., проф. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, gurko@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0001-9905-8584.
- Михалевич Микола Григорович**, к.т.н., доцент кафедри автомобілів, mkolyag@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9890-3838. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.
- Оптимальное управление исполнительным устройством роботизированной коробки передач**
- Аннотация.** Несмотря на активное развитие электромобилей, актуальной остается задача облегчения процесса управления агрегатами механической трансмиссии. С этой целью производится их автоматизация. В работе рассмотрена автоматизированная коробка передач с электромеханическим управлением. Для оптимального управления позиционированием механизма переключения синтезирован линейно-квадратичный регулятор. Выполнен анализ влияния значений весовых коэффициентов в целевой функции на качество переходных процессов в системе управления. Эффективность предложенных решений подтверждена результатами моделирования.
- Ключевые слова:** переключение передач, электромеханический привод, оптимальное управление, линейно-квадратичный регулятор, весовые коэффициенты.
- Гурко Александр Геннадьевич**, д.т.н., проф. каф. автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, gurko@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0001-9905-8584.

Михалевич Николай Григорьевич, к.т.н., доц. каф. автомобилей, mkolyag@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9890-3838.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, 61002, Украина.

Optimal control of an actuator of a robotic gearbox

Abstract. Problem. Despite the vigorous development of electric vehicles, the task of facilitating the driver to handle with elements of mechanical transmission remains relevant. For this purpose, the automation of mechanical transmission units is performed. For instance, so-called robotic gearboxes are widespread. The principle of operation of such gearboxes is similar to mechanical ones, but special separate actuators carry out the selection and shifting into the desired gear. The design of a robotic gearbox was proposed at the Automobile Department of Kharkiv National Automobile and Highway University. At this gearbox, two DC motors are used as actuators. The efficiency of this gearbox largely depends on the efficiency of the DC motors control system, which should provide smooth but at the same time fast and accurate positioning of their shafts. In previous works, PID controllers were used to controlling the actuator of the gearbox. However, although the PID controller provides satisfactory quality of the control system, it is not an optimal controller. **Goal.** The goal of this paper is to develop an optimal controller for the actuators of the robotic gearbox mentioned above. **Methodology.** To meet

this goal, it was proposed to use a linear-quadratic controller (LQR). The analysis of the impact on transient processes in the control system of the values of the weighting factors in the quadratic performance criterion is performed. **Results.** The LQR synthesized provides high speed of response (within of 0.5 s) at the desired gear selecting and more than two times less overshoot compared to the PID regulator. **Originality.** The regularities in the gearbox drive performance when changing the values of the weighting factors in the performance criterion have been established. An optimal control system for the robotic gearbox actuator has been developed. **Practical value.** The implementation of the designed controller will increase the efficiency of the gearbox under consideration.

Key words: gear shifting, electromechanical drive, optimal control, linear quadratic regulator, weighting factors.

Gurko Alexander, professor, Doct. of Science, Automation and Computer-Integrated Technologies Department, gurko@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0001-9905-8584.

Mykhalevych Mykola, Assoc. Prof., automobile Department named A.B. Gredeskul, mkolyag@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9890-3838.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
