

**АНАЛІТИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО
РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПОДРІБНЮВАЧА
СОЛОМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ МЕТОДУ ПІРСОНА**

А. В. Торопов, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: toropovtosha@ukr.net

Л. В. Торопова, асистент

E-mail: liliaya@ukr.net

***Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені І. Сікорського»***

Анотація. Використання систем керування подачею соломи в подрібнювач за допомогою перетворювачів частоти дозволяє забезпечити стабільність навантаження основного двигуна подрібнювача, забезпечити якісне подрібнення компонентів. У той же час особливістю системи керування є суттєва несиметричність вихідної характеристики регулятора, що в достатній мірі ускладнює процедуру синтезу регулятора. Існуючі регулятори часто не забезпечують можливості регулювання завантаження в широкому діапазоні і потребують переналагодження при зміні параметрів роботи.

Актуальною задачею є здійснення процедури синтезу алгоритму управління, що забезпечує близький до оптимального характер стабілізації завантаження основного електроприводу подрібнювача соломи..

Метою роботи є вирішення задачі аналітичного конструювання квазіоптимального регулятора подачі при наявності суттєвої несиметричної нелінійності в контурі управління.

Для вирішення задачі синтезу регулятора подачі використовувався метод динамічного програмування для лінеаризованих систем і квадратичного функціоналу якості. Для лінеаризації нелінійностей використовувався метод «миттєвої лінеаризації», при якому нелінійна залежність замінювалась лінійною, в якій коефіцієнт лінеаризації є функцією керування. Перехід від лінійної функції керування до адаптивної здійснювався за допомогою методу Пірсона.

Використання концепції методу Пірсона дозволило вихідну нелінійну задачу синтезу замінити лінійною, що вирішується в кожному циклі роботи програмованого логічного контролера. Застосування функціоналу якості, що мінімізується, запропонованого О. А. Красовським, дозволило істотно спростити процедуру знаходження коефіцієнтів оптимального регулятора. При дослідженні динамічних характеристик методом цифрового моделювання проведено порівняння роботи синтезованого регулятора із лінійним, визначені переваги запропонованого

підходу. Сформульовані перспективи подальшого розвитку оптимальних систем керування та вказані особливості практичної реалізації алгоритму управління.

Так, використання синтезованого регулятора дало можливість підвищити якість керування навантаження приводу, запропонований підхід може бути використаний для електромеханічних систем, в яких керування навантаженням приводу здійснюється від програмованих логічних контролерів.

Ключові слова: *стабілізація навантаження; метод Пірсона; функція Беллмана; оптимальне управління; електропривод подачі*

Актуальність. З розвитком напівпровідникової техніки і здешевлення перетворювачів для керування швидкістю асинхронних двигунів все частіше виникає питання оптимізації роботи електрообладнання. Одним з таких напрямів розвитку систем електропривода є використання перетворювачів частоти для регулювання подачі соломи в подрібнювачі. Застосування такої системи автоматизації забезпечує стабільність навантаження основного двигуна подрібнювача, забезпечується якісне подрібнення компонентів [1]. При цьому система регулювання швидкості подачі соломи оцінює завантаження подрібнювача за зворотним зв'язком за струмом статора основного двигуна [2]. У простішому випадку, коли основний привод подрібнювача запускається за схемою «зірка – трикутник» сигналом за навантаженням є струм статора, що дозволяє наближено оцінити крутний момент двигуна. При цьому закон зміни швидкості привода подачі визначається за формулою:

$$U_{пч} = U_3 - K_{п} \cdot I_c, \quad (1)$$

де $U_{пч}$ - сигнал завдання, що надходить на перетворювач частоти, U_3 - сигнал завдання від оператора установки; $K_{п}$ - коефіцієнт пропорційності, що визначається вихідною жорсткістю соломи; I_c - струм статора основного двигуна.

При стабільних параметрах жорсткості соломи така система керування забезпечує високу продуктивність і все ширше використовується в сучасному обладнанні. Проте при зміні параметрів подрібнювального матеріалу, система потребує переналагодження, причому, найчастіше емпіричним шляхом. Використання більш робастних до зовнішніх збурень систем керування, наприклад ПД – регулятора завантаження ускладнюється внаслідок того, що подача може

змінюватись не в межах -100..100%, а обмежена мінімальною та максимальною швидкістю роботи нереверсивного перетворювача частоти. Це в свою чергу, може привести до насичення інтегральної складової ПД – регулятора, погіршення якості стабілізації вихідного параметру [3]. Перспективним напрямом у цьому випадку є використання лінійно – квадратичного регулятора для системи керування навантаженням, що не містить інтегральної складової і може забезпечити мінімум динамічної похибки системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує велика кількість робіт, що присвячено проблемі побудови лінійно – квадратичних регуляторів, що забезпечують досягнення мінімуму функціоналу якості [4]. У випадку наявності суттєвих симетричних нелінійностей в контурі регулювання процедура синтезу значно ускладнюється, однак дозволяє отримати алгоритми керування, що можуть бути реалізовані на основі програмованих логічних контролерів [5,6].

Мета дослідження – розробка оптимальної системи керування подачею соломи, що забезпечує мінімум динамічної похибки відпрацювання завдання за завантаженням з урахуванням нелінійного впливу регулятора швидкості.

Матеріали і методи дослідження. Для вирішення задачі аналітичного конструювання регулятора використовуємо метод динамічного програмування для лінеаризованих систем і квадратичного функціоналу якості. Лінеаризація здійснюється методом «миттєвої лінеаризації», що дозволяє замінити вихідну несиметричну залежність прямою із змінним коефіцієнтом лінеаризації.

Результати досліджень та їх обговорення. Система стабілізації навантаження подрібнювача соломи із врахуванням інерційності приводу подачі та електромагнітної системи основного двигуна представлена на рисунку 1.

На рис. 1 введено такі позначення: $M_z, M_{од}$ - завдання і поточне значення моменту навантаження основного двигуна; $K_{тп}, T_{тп}$ - коефіцієнт підсилення та стала часу технологічного процесу, що в нашому випадку визначається параметрами основного двигуна; $K_{пп}, T_{пп}$ - коефіцієнт підсилення та стала часу приводу подачі соломи; u_n - вихідний сигнал регулятора навантаження; РН – регулятор

навантаження; ω_{\min} , ω_{\max} - мінімальне та максимальне значення завдання швидкості для перетворювача частоти приводу подачі; ω_3 - сигнал завдання швидкості на перетворювач частоти; $f(u_H)$ - нелінійна залежність.

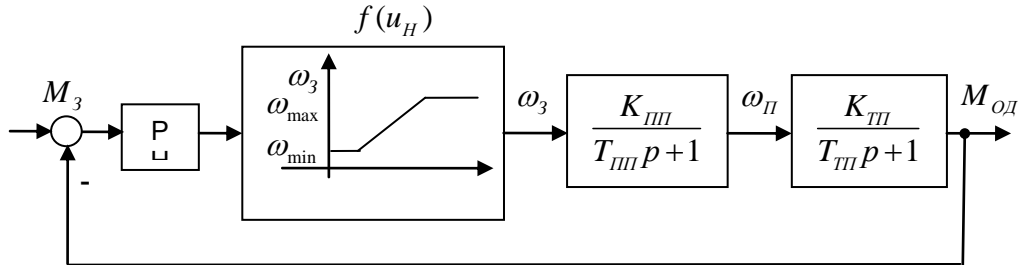


Рис. 1. Схема системи стабілізації навантаження основного електродвигуна подрібнювача соломи

Для здійснення процедури аналітичного конструювання регулятора навантаження переходимо від структурної схеми до моделі об'єкта у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{ОД} &= -T_{ТII}^{-1}M_{ОД} + K_{ТII}T_{ТII}^{-1}\omega_{II}, \\ \dot{\omega}_{II} &= -T_{III}^{-1}\omega_{II} + K_{III}T_{III}^{-1}f(u_H), \end{aligned} \quad (2)$$

При цьому нелінійна залежність $f(u_H)$ може бути описана таким виразом:

$$f(u_H) = \begin{cases} 0, u_H < 0 \\ \omega_{\min}, 0 < u_H < u_{\min} \\ u_H, u_{\min} < u_H < u_{\max} \\ \omega_{\max}, u_H > u_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

де u_{\min} , u_{\max} - значення вихідного сигналу регулятора, при яких забезпечується робота перетворювача із мінімальною та максимальною швидкостями, відповідно.

Перепишемо систему диференціальних рівнянь в нормальній формі Коші:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_1x_1 + a_2x_2, \\ \dot{x}_2 &= -a_3x_2 + bf(u_H), \end{aligned} \quad (4)$$

де $x_1 = M_{ОД}$, $x_2 = \omega_{II}$, $a_1 = T_{ТII}^{-1}$, $a_2 = K_{ТII}T_{ТII}^{-1}$, $a_3 = T_{III}^{-1}$, $b = K_{III}T_{III}^{-1}$.

Недоліком, що не дозволяє використати класичну процедуру аналітичного конструювання лінійно – квадратичного регулятора для даної системи є наявність

суттєво несиметричної нелінійності $f(u_H)$. Слід відзначити, що саме несиметричність не дозволяє використати відомі методи синтезу оптимальних регуляторів при використанні лінеаризації методом «січних».

Іншим підходом до вирішення проблеми аналітичного конструювання регулятора для даної системи є використання концепції методу Пірсона, при якому вирішується не складана вихідна нелінійна задача, а нескічена кількість лінійних задач на кожному циклі обчислення вихідного сигналу регулятора. При цьому нелінійна залежність лінеаризується «в точці», тобто нелінійність $f(u_H)$ замінюється залежністю $f(u_H) = K(u_H) \cdot u_H$, де $K(u_H)$ - коефіцієнт лінеаризації, що обраховується на кожному циклі роботи регулятора [7]. З урахуванням процедури лінеаризації система диференціальних рівнянь, що описує динаміку системи подачі з урахуванням зміни завдання для певної робочої точки, приймає вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -a_1 x_1 + a_2 x_2, \\ \dot{x}_2 &= -a_3 x_2 + b_1 u_H,\end{aligned}\tag{5}$$

де $b_1 = b \cdot K(u_H)$ - модифікований коефіцієнт керування з урахуванням процедури лінеаризації.

Мінімізована функціональна якість формується, виходячи з вимог динамічної точності та мінімуму енергетичних витрат на керування:

$$\min_{u_H} = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + r u_H^2 + u_{omn}^2) dt,\tag{6}$$

де q_1, q_2, q_3, r - вагові коефіцієнти, що визначають обмеження на змінні стану та керуючий вплив, відповідно.

Підінтегральна змінна u_{omn}^2 визначає обмеження на оптимальне керування, що формується на виході керуючого пристрою. Використання цієї складової у функціоналі якості дозволяє суттєво спростити обчислювальну процедуру, оскільки для визначення коефіцієнтів функції Белмана потрібно буде вирішувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь, замість квадратичних рівнянь Ріккати [3]. Для лінеаризованої системи диференціальних рівнянь та вибраного мінімаксного функціоналу якості рівняння Беллмана запишеться:

$$\min_{u_H} = [q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + r u_H^2 + u_{onn}^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} (-a_1 x_1 + a_2 x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-a_3 x_2 + b_1 u_H)] = 0, \quad (7)$$

де V - функція Белмана, що є рішенням вищевказаного рівняння і при знаковизначеній додатності забезпечує мінімум функціоналу якості.

Здійснимо пошук екстремум функціоналу якості за керуючим впливом, при цьому отримаємо керування в явному вигляді:

$$u_H = -\frac{b_1}{2r} \frac{\partial V}{\partial x_2}, \quad (8)$$

Здійснимо замикання системи керування шляхом підстановки отриманого виразу в функціональне рівняння Белмана, отримуємо модифіковане рівняння Гамільтона – Якобі - Белмана:

$$q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} (-a_1 x_1 + a_2 x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-a_3 x_2) = 0, \quad (9)$$

В якості рішення даного рівняння будемо шукати функцію Белмана у вигляді квадратичної форми від всіх змінних стану, тобто $V = K_{11} x_1^2 + 2K_{12} x_1 x_2 + K_{22} x_2^2$. Після прирівнювання коефіцієнтів при однакових степенях, отримуємо систему арифметичних рівнянь Ріккати:

$$\begin{cases} q_1 - 2a_1 K_{11} = 0 \\ q_2 + 2a_2 K_{12} - 2a_3 K_{22} = 0 \\ 2a_2 K_{11} - 2a_1 K_{12} - 2a_3 K_{12} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Розв'язок цієї системи алгебраїчних рівнянь може бути знайдене за умови визначених параметрів a_1, a_2, a_3 , а також вибраних вагових коефіцієнтів, що обмежують відхилення змінних стану та керуючого впливу. Далі отримані коефіцієнти K_{11}, K_{12}, K_{22} можуть бути підставлені у вираз для закону оптимального керування в явному вигляді, при цьому останній запишеться в формі:

$$u_H = -K_{1u} x_1 - K_{2u} x_2, \quad (11)$$

де K_{1u}, K_{2u} - коефіцієнти оптимального регулятора, що є функціями коефіцієнту лінеаризації $K(u_H)$ і перераховуються на кожному циклі роботи контролера.

Дослідження системи керування на основі синтезованого регулятора, що забезпечує мінімум динамічної похибки із врахуванням суттєво несиметричної нелінійності в контурі регулювання здійснювалось в середовищі для програмування контролерів Codesys 2.3. В цьому ж середовищі був реалізований алгоритм керування за мові програмування Structured text. При цьому здійснювалось порівняння синтезованого регулятора із адаптивним перерахунком параметрів для врахування впливу нелінійності та лінійно – квадратичного регулятора, що забезпечує оптимальну поведінку системи лише при середніх значеннях навантаження. При цьому в Codesys 2.3 була реалізована модель об'єкту керування, відповідно до структурної схеми на рис. 1. Графіки перехідних процесів за навантаженням при використанні лінійно –квдратичного та синтезованого регулятора представлено на рис. 2 і 3, відповідно.

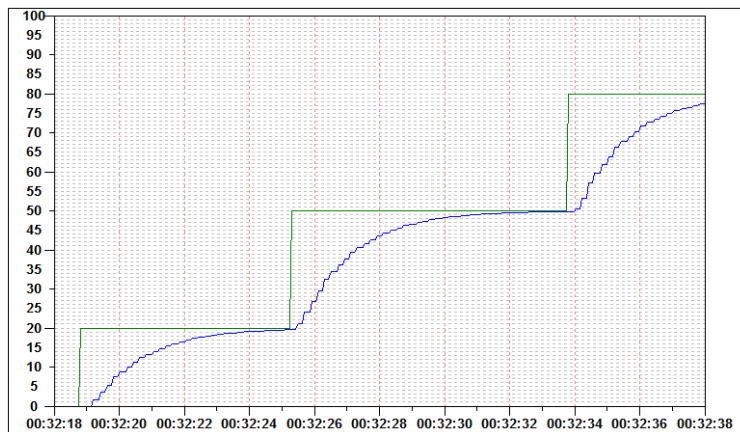


Рис. 2. Графік перехідного процесу за навантаженням при використанні лінійно –квдратичного регулятора

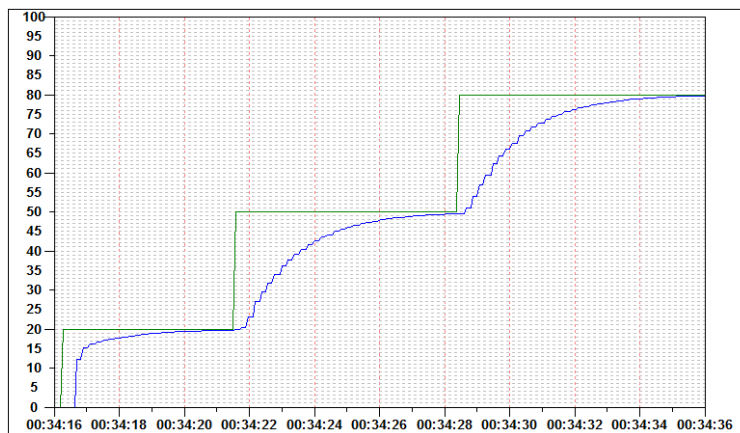


Рис. 3. Графік перехідного процесу за навантаженням при використанні синтезованого адаптивного регулятора

Висновки і перспективи.

1. Можна зазначити, що використання синтезованого адаптивного регулятора, що враховує наявність несиметричної нелінійності в контурі регулювання дозволяє покращити якість перехідних процесів в області завдання малих та великих навантажень, при цьому в області середніх навантажень якість керування майже не змінюється.

2. Практична реалізація запропонованої корекції з використанням перерахунку коефіцієнтів оптимального регулятора не призводить до суттєвого збільшення обчислювального навантаження на контролер і може бути реалізоване на типових мовах програмування МЕК 61131-3.

Список використаних джерел

1. Синявський О.Ю., Савченко В.В., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.: ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.
2. Скиба М.Є., Місяць О.В., Поліщук А.О., В.П. Місяць, М.М. Рубанка Система адаптивного частотного керування швидкістю обертання асинхронного трифазного електродвигуна приводу роторної дробарки. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 2 (295). с. 139-146 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2021-295-2-139-146>
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
4. Александров В. В., Болтянский В. Г., Лемак С .С., Парусников Н. А., Тихомиров В. М. Оптимальное управление движением. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
5. Kudin V .F., Pryymak V. I. [Suboptimal nonlinear control for operation speed criterion on the basis of invariant immersion method](#) *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015. 47 (11). P. 36-47. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i11.30
6. [Голодний И. М.](#), Торопов А.В., Торопова Л.В. Нелинейное квазиоптимальное управление ленточным конвейером комплекса напольного хранения зерна. [Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК](#). 2018. 283. С. 230-239.
7. Pearson J. D. Approximation Methods in optimal control. Suboptimal control. *J.Electronics and control*. 1962, 13 (20). P. 453-467 <https://doi.org/10.1080/00207216208937454>

References

1. Sinyavsky, O. Yu., Savchenko, V. V., Bunko, V. Ya., Ramsh, V .Yu. (2020). Elektropyvod vyrobnychkh mashyn i mekhanizmiv [Electric drive of production machines and mechanisms]. K.: FOP Yamchinsky O.V., 444.

2. Skiba, M. E., Misyats, O. V., Polishchuk, A. O., Misyats, V. P., Rubanka M. M. (2021). Systema adaptivnoho chastotnoho keruvannia shvydkistiu obertannia asynkhronnoho tryfaznoho elektrodvyhuna pryvodu rotornoï drobarky [The system of adaptive frequency control of the speed of wrapping an asynchronous three-phase electric motor to the drive of a rotary shotgun]. Bulletin of the Khmelnytsky National University. Series: Technical sciences, 2 (295), 139-146 <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2021-295-2-139-146>
3. Denisenko, V. V. (2009) Kompyuternoe upravlenie tehnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moskow: Hotline-Telecom, 608.
4. Alexandrov, V. V., Boltyansky, V. G., Lemak, S. S., Parusnikov, N. A., Tikhomirov, V. M. (2005) Optimum motion control. Moskow: FIZMATLIT, 376.
5. Kudin V. F., Pryymak, B. I. (2015). Suboptimal nonlinear control for operation speed criterion on the basis of invariant immersion method. Journal of Automation and Information Sciences, 47 (11), 36-47. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i11.30
6. Golodniy, I. M., Toropov, A. V., Toropova, L.V. (2018) Nelyneinoe kvazyoptymalnoe upravlenye lentochnym konveierom kompleksa napolnoho khranenyia zerna [Non-linear quasi-optimal control of a belt conveyor of a complex for floor storage of grain]. Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Natural Resources of Ukraine. Series: Technics and energy of the agro-industrial complex, 283, 230-239.
7. Pearson, J. D. (1962). Approximation Methods in optimal control. suboptimal control. J.Electronics and control, 13 (20), 453-467. <https://doi.org/10.1080/00207216208937454>

ANALYTICAL DESIGN OF A QUASIOPTIMAL REGULATOR FOR THE ELECTRIC FEED DRIVE OF STRAW CHOPPER

A. Toropov, L. Toropova

Abstract. *The use of control systems for feed drives of straw chopper using of frequency inverters allows to ensure the stability of the load of the main motor of system, to ensure high-quality grinding of components. At the same time, a feature of the control system is the significant asymmetry of regulator output characteristic, which significantly complicates the synthesis procedure of the control law, accordingly. Existing regulators often do not provide the ability to adjust the load in a wide range and require reconfiguration when the operating parameters of straw are changed.*

An urgent task is the realization of the synthesis procedure of the control law, which provides a close to optimal behavior of load stabilization of the straw chopper main electric drive.

The aim of the work is to solve the problem of analytical design of a quasioptimal feed regulator in the presence of significant asymmetric nonlinearity of control output.

The method of dynamic programming for linearized systems and quadratic quality functional to solve the problem of synthesis of the feed regulator was used. To linearize significant nonlinearity, the "instant linearization" method was used. Using this method the nonlinear characteristic was replaced by a linear one, where the linearization

coefficient is a control function. The transition from a linear control function to an adaptive one using the Pearson method was carried out.

Using concept of Pearson's method allowed replacing the original non-linear problem of synthesis with a linear one, which is solved in each calculation cycle of the programmable logic controller. Using of modified minimization quality functional proposed by O.A. Krasovsky, made it possible to significantly simplify the procedure for finding the coefficients of the optimal regulator. Investigation the dynamic characteristics with proposed control system by the method of digital modeling was made. Comparison of the transients performance of the synthesized regulator with a linear one was made, and the advantages of the proposed approach were determined. The prospects for the further development of optimal control systems are formulated and the features of the practical implementation of the control algorithm are defined.

Thus, the use of a synthesized regulator made it possible to improve the quality of drive load control; the proposed approach can be used for electromechanical systems in which the drive load by programmable logic controllers is controlled.

Key words: *load stabilization; Pearson method; Bellman function; optimal control; electric feed drive*