

Особливості компенсації нелінійностей в електричному приводі, пов'язані з погрішностями системи механічної передачі

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

e-mail dmitriy_kalmus@ukr.net

Беднов Є. С., ORCID: [0000-0002-7352-3772](https://orcid.org/0000-0002-7352-3772)

e-mail Bednov@i.ua

Іутін І. О., ORCID: [0000-0002-2931-9651](https://orcid.org/0000-0002-2931-9651)

e-mail iutin.yan@gmail.com

ДВНЗ «Криворізький національний університет»
Кривий Ріг, Україна

Реферат—У статті представлено особливості компенсації нелінійностей в електричному приводі, пов'язані з погрішностями системи механічної передачі. Відзначено, що одною з найпоширеніших операцій сучасних технологічних процесів є позиціонування. Для забезпечення функціонування механізмів, що містять блоки позиціонування, необхідно забезпечити високу швидкість і точність переміщення робочого органу. Зазначено, що ефективними є розробка та синтез позиційних систем електроприводу з компенсаційним принципом керування. Такий принцип керування дає можливість підвищити швидкість при незмінній структурі системи й заданій точності відпрацювання переміщення. Відзначено вплив нелінійностей на точність і динамічні характеристики цифрових систем електроприводу. Розглянуто специфіку нелінійностей в електричному приводі, що пов'язані з похибками системи механічної передачі. Також у статті представлено структуру позиційного електроприводу з корекцією нелінійності механічної передачі, та запропоновано на прикладі представленої структури принцип компенсації зазорів, що викликані люфтами в механічних передачах, розглянуто можливість компенсації дії сил тертя. Розроблено алгоритм компенсації дії сил тертя у механічних передачах електроприводу. Відзначено, що запропонований алгоритм дозволяє програмними засобами компенсувати кінематичні погрішності системи механічної передачі, що викликані пружним деформуванням її частин.

Бібл. 11, рис. 2.

Ключові слова — електричний привод; нелінійності; зазор; сили тертя; керування.

I. Вступ

Одною з найпоширеніших операцій сучасних технологічних процесів є позиціонування. Серед систем позиціонування широке застосування знаходять електромеханічні системи. Системи позиціонування застосовуються в металорізальних верстатах, маніпуляторах, приладах і апаратах точної механіки, а також у вимірювальних пристроях. Для забезпечення функціонування таких механізмів необхідна висока швидкість і точність переміщення робочого органу [1]. При цьому залишається актуальним завдання поліпшення показників якості управління електроприводом (швидкість, точність, величина перерегулювання) [2]. Керування електромеханічними системами позиціонування часто здійснюється за принципом підлеглого регулювання [3]. Перевагою таких

систем є простота налаштування параметрів регуляторів, як в аналоговому, так і в цифровому виконанні. До недоліків слід віднести необхідність підстроювання параметрів регуляторів при зміні характеристик об'єкта регулювання [4]. Для подолання таких ускладнень можна використовувати комбіновані методи керування, або системи зі змінною структурою.

Як показують результати досліджень, ефективним підходом у цьому напрямку виглядає розробка та синтез позиційних систем електроприводу з компенсаційним принципом керування, що забезпечує в замкненій системі необхідні показники якості [5], [6]. Особливість такої структури системи електроприводу з підлеглим регулюванням координат полягає в доповненні контуру керування блоком нелінійної програмної корекції. Такий принцип керування дає можливість підвищити швидкість при незмінній



структурі системи та заданій точності відпрацювання переміщення [7], [8]. Впровадження позиційних систем з програмною корекцією нелінійності дозволить розширити можливості електроприводу та застосовувати їх у різних виробничих механізмах.

Метою роботи є розробка алгоритму керування електричним позиційним приводом при наявності збурень з боку виконавчих органів виробничих механізмів у вигляді зазорів та дії сил тертя в механічних передачах.

II. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Нелінійності, що впливають на точність і динамічні характеристики цифрових систем електроприводу, потребують їх врахування. Можна виділити такі з них, що є найвпливовішими факторами:

- нелінійності виконавчих органів робочих механізмів, що обумовлені наявністю зазорів та дією сил тертя;
- нелінійності системи керування процесами в електроприводі, що пов'язані з процесами перетворення електричної енергії, залежністю від струму якоря моменту двигуна (для двигунів постійного струму) та магнітного потоку (для двигунів послідовного збудження);
- нелінійності, що пов'язані із цифровим представленням інформації, які викликані наявністю квантування за рівнем аналогово-цифрового та цифро-аналогового перетворення [9], [10].

Слід зазначити, що використання мікропроцесорних систем надає більші можливості для програмної компенсації впливу багатьох форм нелінійності на якісні показники. Перевага мікропроцесорів полягає у їх порівняльній простоті реалізації й стабільності, що дозволяє впроваджувати системи, що компенсують нелінійності.

Розглянемо структуру позиційного електроприводу [11]. Ця структура доповнена блоком корекції зазору БКЗ і представлена на рис. 1. Силова частина електроприводу містить перетворювач електричної енергії П з напругою на виході U та двигун постійного струму Д з моментом інерції J та коефіцієнтом потоку $k\Phi$.

Частина системи керування електроприводу виконана за схемою підлеглого регулювання координат. Вона містить у собі внутрішній контур регулювання швидкості ω , а також контур регулювання координати переміщення φ виконавчого органу об'єкта керування з імпульсним перетворювачем положення ІПП та сигналом зворотного зв'язку N_φ . В якості регулятора положення обрано пропорційний регулятор РП. Регулятор швидкості складається з пропорційної РШП та інтегральної РШІ частин. Мікропроцесорна система керування МП за сигналами $S_0 \div S_3$ формує сигнал компенсації N_k .

Для збереження необхідної швидкодії при відпрацюванні бажаного переміщення $N_{z\varphi 0}$ та при наявності факторів, що збурюють, з боку виконавчого механізму, така структура дозволяє компенсувати дію цих факторів.

Так, при необхідності враховувати наявність зазору, БКЗ, що виконано у вигляді релейного регулятора, здійснює корекцію завдання $N_{z\varphi}$.

Принцип компенсації зазору полягає в тому, що зазор попередньо виміряний та дорівнює N_Δ .

Тоді принцип компенсації, що буде покладено у програмну частину реалізації алгоритму роботи мікропроцесорної системи керування, має відповідати системі рівнянь [11]:

$$\begin{cases} N_z \varphi = N_z \varphi_0 + N_\Delta & N_\omega > 0 \\ N_z \varphi = N_z \varphi_0 - N_\Delta & N_\omega < 0 \end{cases}$$

де N_ω – завдання по швидкості.

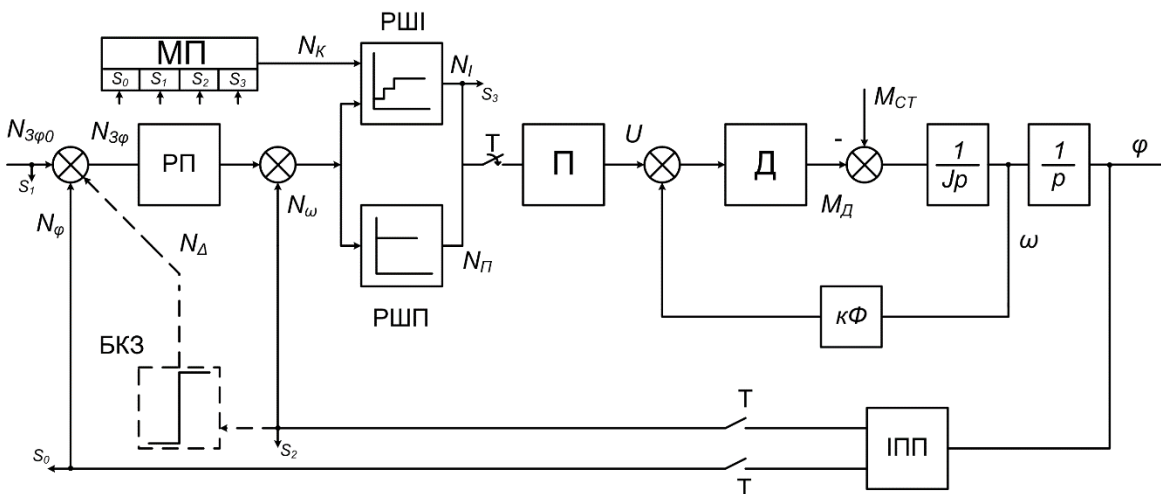


Рис. 1 Структурна схема позиційного електроприводу з корекцією нелінійності механічної передачі

Тепер, на прикладі представленої структури, розглянемо, яким чином можна компенсувати дію сил тертя. Необхідність враховувати дію сил тертя пов'язана з тим, що тертя приводить до додаткової помилки й створює додаткову демпфуючу дію. Ускладнює задачу компенсації сил тертя той факт, що нелінійність сил тертя найбільшою мірою впливає при завданні гармонічного малого сигналу по швидкості з низькою частотою й амплітудою [11].

На рис. 2 наведено алгоритм, що враховує принцип компенсації дії сил тертя у механічних передачах.

Пояснимо дію цього алгоритму на конкретному прикладі. Припустимо, що на вхід системи (виконавчий механізм) діє момент:

$$M = M_{\partial} - |M_{cm}| \text{sign}(\omega),$$

де M_{∂} – крутний момент, що розвиває двигун; M_{cm} – статичний момент опору.

Тоді при $|M_{\partial}| \leq |M_{cm}|$ зміна φ припиняється, момент та струм якоря визначаються інтегральною часткою завдання N_I , тому що пропорційна частка N_{II} мала, через малість завдання N_{ω} . Тоді, для проходження зони застою до входу інтегратора прикладають вплив що компенсує N_K , який діє на протязі періоду T , та повинен забезпечити швидке проходження зони за час:

$$t_3 = \frac{N_I}{N_K} \rightarrow t_{\min}.$$

Тобто, відбувається збільшення N_{ω} на кожному кроці дискретизації N_T .

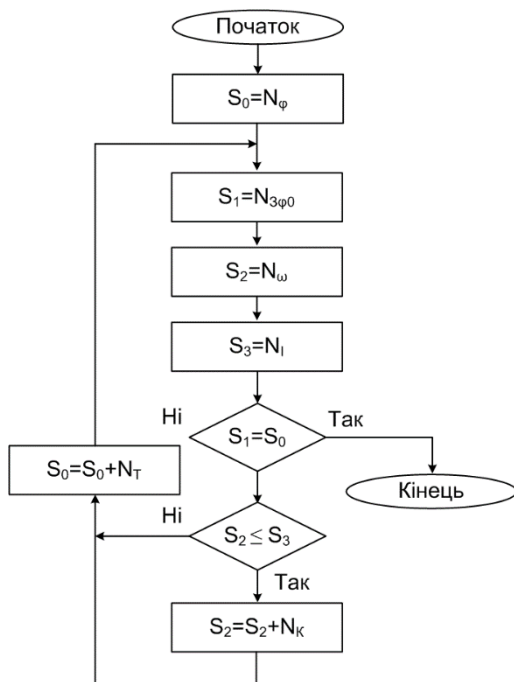


Рис. 2. Алгоритм компенсації дії сил тертя у механічних передачах

Таким чином, запропонований на рис. 2 алгоритм дозволяє програмними засобами компенсувати кінематичні похибки системи механічної передачі, що викликані пружним деформуванням її частин.

ВИСНОВКИ

- 1) Розглянута специфіка компенсації нелінійностей в електричному приводі, що пов'язані з похибками системи механічної передачі, та виявлено фактори, що найбільш впливають на точність регулювання при позиціонуванні.
- 2) Доповнено структуру системи позиційного електроприводу блоком, який дозволяє компенсувати зазори, що викликані люфтами механічних передач.
- 3) Розроблено алгоритм керування електричним приводом при наявності фактору, що збурює, у вигляді дії сил тертя.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] K. Cheng and H. Dehong, *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*. 2013, ISBN: 978-0-470-97287-8.
- [2] V. V.I., "Kompensaciya nelinejnoy petlevoj inercionnosti dlya sistem avarijnogo tormozheniya shahtnyh podemnyh ustanovok [Indemnification of nonlinear loopback inertial properties for emergency braking system of mining hoists]," *Vestn. NTUU «KPI». Seriya Radiotekh. Radioapparatostroenie.*, vol. 48, no. Kiev, pp. 126–133, 2012, DOI: [10.20535/radap.2012.48.126-133](https://doi.org/10.20535/radap.2012.48.126-133).
- [3] С. Березюк and О. Толочко, "Параметричний синтез системи підпорядкованого регулювання положення," *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*, pp. 460–463, 2017, URL: <http://jour.fea.kpi.ua/issue/view/7841>.
- [4] Б. І. Мокін and О. Б. Мокін, *Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації: навчальний посібник*. Вінниця, 2013, URL: http://vetesk.ineem.vntu.edu.ua/files/Mokin_TAK.pdf.
- [5] A. V. Chermalyh, I. Y. Majdanskij, and A. V. Kozachenko, "Sistema pozicionnogo upravleniya elektroprivodom s formirovaniem optimalnogo zadayushogo vozdeystviya po dejstvitelnomu peremesheniyu rabochego organa mehanizma [position control system of electric drive with the formation of the optimum giving im.," *Visn. KDPU Im. Mihajla Ostrogradskogo*, vol. 3, no. Kremenchug, pp. 37–40, 2008.
- [6] Y. O. Yermolayev and G. V. Savelenko, "Sintez regulatoriv pozicijnogo elektroprivoda podachi elektroda-instrumenta na verstatah ROD z vikoristannyam standartnih nalashtuvan [Synthesis of regulators of the positional electric drive of the feeding electrode-tool on the machine tools ROD using s.," *Zb. Nauk. Pr. Kirovogradskogo Nac. Teh. Univ.*, vol. 26, no. Kirovograd, pp. 280–284, 2013.
- [7] E. P. Churakov, *Optimalnyie i adaptivnyie sistemy [Optimum and adaptive systems]*. Moscow: Elektroizdat, 1987.
- [8] V. A. Denisov, *Sistemy pozitsionnogo elektroprivoda s peremennoy strukturoy upravleniya [Variable control structure variable actuator systems]*. Moscow: Sputnik, 2013, ISBN: 978-5-9973-2715-6.
- [9] A. V. Toropov and D. A. Abduramanov, "Osobennosti postroeniya sistem pozicionirovaniya v upakovochnyh avtomaticheskikh ustanovkakh na baze serijnyh preobrazovatelej chastoty Lenze [Peculiarities of the construction of positioning systems in packaging automatic devices based on Lenze series freq.," *Elektromeh. i energo:berigayuchi Sist.*, vol. 3, no. Kremenchugskij nacionalnyj universitet im. Mihajla Ostrogradskogo, pp. 158–160, 2012.
- [10] E. P. Churakov, P. N. Kuninin, and A. I. Rybakov, *NELINEJNYJ ELEKTROPRIVOD TYaNUShEJ KLETI MNLZ [NON-LINEAR*



ELECTRIC POWER DRYER MILL], vol. 1, no. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University. Moscow: Elektroizdat, 2012.

machine tools with numerical control]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, ISBN: 5-217-01027-4.

- [11] E. L. Tihomirov, V. V. Vasilev, B. G. Korovin, and V. A. Yakovlev, *Mikroprocessornoe upravlenie elektroprivodami stankov s ChPU* [Microprocessor control of electric drives of станків з ЧПУ] Надійшла до редакції 08 червня 2018 р.

УДК 621.316.71

Особенности компенсации нелинейностей в электрическом приводе, вызванные погрешностями системы механической передачи

Кальмус Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

e-mail dmitriy_kalmus@ukr.net

Биднов Е. С., ORCID: [0000-0002-7352-3772](https://orcid.org/0000-0002-7352-3772)

e-mail Bednov@i.ua

Иутин И. А., ORCID: [0000-0002-2931-9651](https://orcid.org/0000-0002-2931-9651)

e-mail iutin.yan@gmail.com

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
Кривой Рог, Украина

Реферат—В статье представлены особенности компенсации нелинейностей в электрическом приводе, вызванные погрешностями системы механической передачи. Отмечено, что одной из самых распространенных операций современных технологических процессов является позиционирование. Для обеспечения функционирования таких механизмов необходимо высокое быстродействие и точность перемещения рабочего органа. Отмечено, что эффективным выглядит разработка и синтез позиционных систем электропривода с компенсационным принципом управления. Такой принцип управления дает возможность повысить быстродействие при неизменной структуре системы и заданной точности отработки перемещения. Отмечено, что нелинейности, которые влияют на точность и динамические характеристики цифровых систем электропривода, нуждаются в их учете. Была рассмотрена специфика нелинейностей в электрическом приводе, которые связаны с погрешностями системы механической передачи. Также в статье была представлена структура позиционного электропривода с коррекцией нелинейности механической передачи, и предложен, на примере представленной структуры, принцип компенсации зазоров, которые вызваны люфтами в механических передачах, а также рассмотрены возможности компенсации действия сил трения. Разработан алгоритм компенсации действия сил трения в механических передачах электропривода. Отмечено, что предложенный алгоритм позволяет программными средствами компенсировать кинематические погрешности системы механической передачи, которые вызваны упругим деформированием ее частей.

Библ. 11, рис. 2.

Ключевые слова - электрический привод; нелинейности; зазор; силы трения; управление.



UDC 621.316.71

Features of the Compensation of Nonlinearities in the Electric Drives Associated with the Failure of the Mechanical Transmission System

D. O. Kalmus, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)e-mail dmitriy_kalmus@ukr.netE. S. Bednov, ORCID: [0000-0002-7352-3772](https://orcid.org/0000-0002-7352-3772)e-mail Bednov@i.uaI. O. Iutin, ORCID: [0000-0002-2931-9651](https://orcid.org/0000-0002-2931-9651)e-mail iutin.yan@gmail.comState institution of higher education «Kryvyi Rih National University»
Kryvyi Rih, Ukraine

Abstract—The features of indemnification of nonlinear dependences in an electric drive, that is conditioned by the errors of the system of mechanical transmission, are presented in the article. It is marked that one of the most widespread operations of modern technological processes is positioning. For providing of functioning of such mechanisms, a high fast acting and exactness of moving of working organ are needed. Therefore, the task of improvement of indexes of control quality remains actual by an electric drive. It is marked that development and synthesis of the position systems of electric drive look effective with compensative principle of control. Such principle of control gives an opportunity to promote a fast acting at the unchanging structure of the system and set exactness of working off moving. It is marked that to non-linearity, that influence on exactness and dynamic descriptions of the digital systems of electric drive, need their account. It was distinguished such from them, that is most influencing. To such factors were taken to non-linearity of executive branches of working mechanisms that is conditioned by the presence of gaps and action of forces of friction, to non-linearity of control system by processes in an electric drive, that is caused by the processes of transformation of electric energy, dependence on the current of anchor of moment of engine(for the engines of direct-current) and magnetic stream(for the engines of successive excitation), and also non-linearity, that is related to digital presentation of information, that is conditioned by a quantum on the level of analog-to-digital and digital-to-analog conversion, limiting to the ordinate of bit net of microsystem. It was marked that the use of microsystems gives large possibilities for programmatic indemnification of influence of many forms of non-linearity on quality indexes. Advantage of microprocessors consists in their comparative simplicity of realization and stabilizing, that allows to inculcate the systems that compensate to non-linearity. The specific of nonlinear dependences in an electric occasion, that is related to the errors of the system of mechanical transmission and educed factors that influence on exactness of adjusting at positioning, was considered. Also in the article the structure of position electric drive was presented with the correction of non-linearity of mechanical transmission. Power part of electric drive contains engine of direct-current and transformer of electric energy. Part of the system of electric drive, that manages, executed on the chart of the inferior adjusting of coordinates. It contains the internal contour of speed, and also contour of adjusting of coordinate of moving of executive branch of control object. For maintenance of necessary fast-acting at working off the set moving at presence of factors that revolt, from the side of executive mechanism, such structure allows to compensate the action of these factors. It was therefore offered on the example of the presented structure principle of indemnification of gaps that is caused by a backlash in mechanical transmissions, and it is considered as possible to compensate the action of forces of friction. It was marked that a necessity to take into account the action of forces of friction is related to that over a friction brings to the additional error and renders additional ant vibration an action, and indemnification of forces of friction complicates a task circumstance that non-linearity of forces of friction in a most degree influences at a task harmonically of small signal on speed with LF and amplitude. The algorithm of indemnification of action of forces of friction is worked out in the mechanical transmissions of electric drive. It is marked that the offered algorithm allows programmatic facilities to compensate kinematics errors systems of mechanical transmission, that is caused by resilient deformation of her parts.

Bibl. 11, pic. 2.

Keywords - electric drive; to non-linearity; gap; forces of friction; control.