

Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI:10.37128/2520-6168-2024-3

№3 (126)



2024

Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness

ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК



Науковий журнал

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

№ 3 (126) / 2024

м. Вінниця – 2024

Scientific Journal

**Engineering,
Energy, Transport
AIC**

Vol 126, № 3 / 2024

Vinnytsia – 2024

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».
Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

Науковий журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Токарчук О.А. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2024. № 3 (126). С. 1-92.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.12.2024 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 року №886).

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. №1337 науковому журналу «Техніка, енергетика, транспорт АПК» присвоєно ідентифікатор media R30-05173.

Журналу «Техніка, енергетика, транспорт АПК» присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI).

Журнал включений до міжнародних наукометричних баз і каталогів наукових праць:

- Index Copernicus Value з 2018 року, сайт: <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=47074>;

- Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, сайт: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>;

- Google Академія, сайт: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=A5layLAAAAAJ&hl=uk>;

- CrossRef, сайт: <https://www.crossref.org>.

Головний редактор

Олексій ТОКАРЧУК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Віталій ЯРОПУД – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Відповідальний секретар

Юрій ПОЛЄВОДА – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Олег ЦУРКАН – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний університет

Сергій ШАРГОРОДСЬКИЙ – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Володимир БУЛГАКОВ – д.т.н., професор,
академік НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Валерій ГРАНЯК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ростислав ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ – д.т.н.,
професор, Вінницький національний технічний
університет

Анатолій СПІРИН – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Юлія САЛЕНКО – д.т.н., професор, Кременчуцький
національний університет імені Михайла
Остроградського

Олена СОЛОНА – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ігор КУПЧУК – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ігор ТВЕРДОХЛІБ – к.т.н., доцент,
Вінницький національний аграрний університет

Ярослав ІВАНЧУК – д.т.н., професор,
Вінницький національний технічний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Йордан МАКСИМОВ – д.т.н., професор,
Технічний університет Габрово (Болгарія)

Аудріус ЖУНДА – к.т.н., доцент,
Університет Вітовта Великого (Литва)

відповідальний секретар редакції – Полєвода Ю.А. к.т.н., доцент,

літературний редактор української та іноземних мов – Погранична Н.М.,

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. (0432) 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: pophv@ukr.net

**ENGINEERING,
ENERGY,
TRANSPORT AIC**

Journal of scientific, industrial and educational direction
Publisher: Vinnytsia National Agrarian University

It was founded in 1997 under the name "Bulletin of the Vinnytsia State Agricultural Institute".
Successor publication: Collection of Scientific Works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences.
Certificate of state registration of mass media
KV No. 16644–5116 PR dated 04/30/2010

Scientific journal "Technology, Energy, Transport AIC" / Editorial board: Tokarchuk O.A. (chief editor) and others. Vinnytsia, 2024. Vol. 126, № 3, P. 1-92.

Printed by decision of the Academic Council of the Vinnytsia National Agrarian University (protocol №. 6 dated December 24, 2024)

Certificate of state registration of mass media No. 21906-11806 R dated March 12, 2016.

The journal "Technology, Energy, Transport AIC" is included in the list of technical scientific publications of Ukraine (Category "B", Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated 07.02.2020 No. 886).

According to the decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated 04/25/2024 No. 1337, the scientific journal " Technology, Energy, Transport AIC " was assigned the media identifier R30-05173.

The journal " Technology, Energy, Transport AIC " has been assigned a digital object identifier (DOI).

The journal is included in the international scientometric bases and catalogs of scientific works:

- Index Copernicus Value since 2018, website: <https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=47074>;
- National Library of Ukraine named after V.I. Vernadskyi, website: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>;
- Google Academy, website: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=A5layLAAAAAJ&hl=uk>;
- CrossRef, website: <https://www.crossref.org>.

Chief editor

Olexii TOKARCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Deputy editor-in-chief

Vitalii YAROPUD – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Responsible secretary

Yuriy POLIEVODA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Members of the editorial board

Oleg TSURKAN – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Volodymyr BULGAKOV – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Acad. NAAS, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

Rostislav ISKOVICH-LOTOTSKY – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

Yuliia SALENKO – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (Ukraine)

Igor KUPCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Serhii SHARHORODSKYI – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Valerii HRANIAK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Anatoly SPIRIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Olena SOLONA – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Igor TVERDOKHLIB – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine)

Yaroslav IVANCHUK – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

Foreign members of the editorial board

Jordan Todorov MAXIMOV – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Technical University of Gabrovo (Bulgaria)

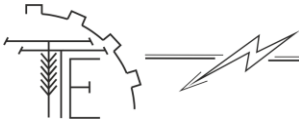
Audrius ŽUNDA – Ph.D., Associate Professor, Vytautas Magnus University (Kaunas, Lithuania)

editor-in-chief – **Yurii POLIEVODA**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
literary editor of Ukrainian and foreign languages – **Natalia POGRANICHNA**

Address of the editorial office: 21008, Vinnytsia, str. Sonyakna 3, Vinnytsia National Agrarian University, tel. (0432)46-00-03

The magazine's website: <http://tetapk.vsau.org/>

E-mail address: pophv@ukr.net



ЗМІСТ

I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>ГОРБЕНКО Олександр Вікторович, ПАДАЛКА Вячеслав Вікторович, ХАРАК Руслан Миколайович</i> ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ З'ЄДНАНЬ ВАЛЬНИЦЬ КОЧЕННЯ.....	7
<i>КУПЧУК Ігор Миколайович</i> СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРОТОТИПУВАННЯ ВИКОНАВЧОЇ ЧАСТИНИ АНГУЛЯРНОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА.....	12
<i>ШВЕЦЬ Людмила Василівна, ЧМИХ Катерина В'ячеславівна</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АК6 НА МОДЕРНІЗОВАНІЙ УСТАНОВЦІ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ПРОКАТУВАННЯ.....	23
<i>ЯРОПУД Віталій Миколайович</i> АЛГОРИТМ РОБОТИ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ СВИНАРСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	36
<i>ЯРОПУД Віталій Миколайович, ДАЦЮК Дмитро Анатолійович</i> ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СЕЛЕКЦІЙНИХ СІВАЛОК.....	48

II. АГРОІНЖЕНЕРІЯ

<i>КОВАЛЬЧУК Юрій Олексійович, ВОЙТІК Андрій Володимирович, КОВАЛЬЧУК Андрій Олексійович</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В АПК.....	58
<i>КОЛЄСНИК Іван Васильович, КАЛІНІН Євген Іванович, КОЛЄСНИК Юліана Ігорівна</i> ВПЛИВ ТИПУ ТЯГОВО-ЗЧІПНОГО ПРИСТРОЮ НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ГАЛЬМІВНИХ МОМЕНТІВ ПРИ ЗМІНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ ПРИЧЕПА.....	65

III. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>ГРАНЯК Валерій Федорович, САФТЮК Ярослав Владиславович</i> ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ СТАТОРНОЇ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД ЙОГО СТАТОРНОГО СТРУМУ.....	75
<i>ПОКРОВСЬКИЙ Костянтин Борисович</i> ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ В УМОВАХ УЧАСТІ У ДОБОВОМУ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	80
<i>ВОЗНЯК Олександр Миколайович, ТИХОНЕНКО Сергій Володимирович, ТИХОНОВ Володимир Костянтинович, КОСАКОВСЬКИЙ Артем Юрійович</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ.....	86



CONTENTS

I. APPLIED MECHANICS. MATERIALS SCIENCE. INDUSTRY MACHINERY BUILDING

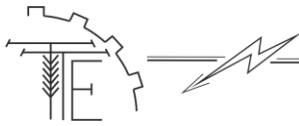
<i>Oleksandr HORBENKO, Viacheslav PADALKA, Ruslan KHARAK</i> RATIONALE FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF RESTORATION OF WORKING SURFACES OF JOININGS OF ROLLING BEARINGS.....	7
<i>Ihor KUPCHUK</i> STRUCTURAL AND FUNCTIONAL PROTOTYPING OF THE EXECUTIVE PART OF THE ANGULAR MANIPULATOR ROBOT.....	12
<i>Lyudmila SHVETS, Kateryna CHMYKH</i> INVESTIGATION OF METAL FLOW FROM AK6 ALUMINUM ALLOY ON A MODERNIZED HOT ROLLING INSTALLATION.....	23
<i>Vitaliy YAROPUD</i> ALGORITHM OF OPERATION OF THE MECHATRONIC SYSTEM FOR PROVIDING MICROCLIMATE OF PIGSTIES.....	36
<i>Vitaliy YAROPUD, Dmytro DATSIUK</i> INNOVATIVE METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF SELECTING PLANTS.	48

II. AGROENGINEERING

<i>Yuriy KOVALCHUK, Andriy VOITIK, Andriy KOVALCHUK</i> RESEARCH ON LASER HARDENING OF AUTOMOTIVE PARTS IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY.....	58
<i>Ivan KOLESNIK, Yevhen KALININ, Yuliana KOLESNIK</i> THE INFLUENCE OF THE TYPE OF TRACTIONAL COUPLING DEVICE ON THE REDISTRIBUTION OF BRAKING TORQUES WHEN THE OPERATIONAL AND DESIGN FACTORS OF THE TRAILER CHANGE.....	65

III. ELECTRICAL ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Valerii HRANIAK, Yaroslav SAFTYUK</i> FEATURES OF THE INFLUENCE OF A SHORT CIRCUIT OF THE STATOR WINDING OF AN INDUCTION MOTOR ON THE SPECTRAL COMPOSITION OF ITS STATOR CURRENT.....	75
<i>Kostiantyn POKROVSKIY</i> EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF WIND GENERATORS IN THE CONDITIONS OF PARTICIPATION IN THE DAILY ELECTRICITY MARKET.....	80
<i>Oleksandr VOZNIAK, Serhii TIKHONENKO, Artem KOSAKOVSKIY, Volodymyr TYKHONOV</i> OPTIMIZATION OF A DIGITAL CURRENT CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR CONVERTER.....	86

**OPTIMIZATION OF A DIGITAL CURRENT CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR CONVERTER**

Oleksandr VOZNIAK, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Serhii TIKHONENKO, Recipient of the Third Educational and Scientific Level
Artem KOSAKOVSKYI, Recipient of the Third Educational and Scientific Level
Vinnytsia National Agrarian University
Volodymyr TYKHONOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University

ВОЗНЯК Олександр Миколайович, к.т.н., доцент
ТИХОНЕНКО Сергій Володимирович, здобувач третього освітньо-наукового рівня
КОСАКОВСЬКИЙ Артем Юрійович, здобувач третього освітньо-наукового рівня
Вінницький національний аграрний університет
ТИХОНОВ Володимир Костянтинович, к.т.н., доцент
Вінницький національний технічний університет

The article is dedicated to optimizing the digital current control loop of a thyristor converter-driven electric drive, essential for ensuring stable, precise, and reliable operation of electric drives in automated and industrial systems. The primary goal of this research is to develop and enhance the digital current regulator (DCR), which enables the drive system to achieve desired performance, including rapid and stable response to current changes without excessive overshoot or oscillations. Optimization of the current loop improves energy efficiency, enhances dynamic properties, and increases resistance to external disturbances, all of which are critical for modern electric drive systems.

The introduction discusses key aspects of digital current loop optimization, specifically dynamic characteristics such as time delays, sampling rate, and bandwidth, which significantly impact the efficiency of digital controllers. Special attention is given to the tuning of proportional-integral (PI) controller parameters, allowing quick and stable response to current changes. The developed model allows preliminary simulation of the current loop's performance, providing an opportunity to test different configurations before actual implementation.

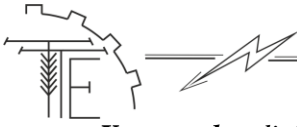
To improve the accuracy and stability of the system, filtering methods are proposed to reduce the impact of high-frequency noise, ensuring the system's precision and robustness against external interference. Optimization criteria are introduced, including minimizing the integral square error (ISE) and reducing energy consumption, which significantly decreases system losses and increases the energy efficiency of electric drives.

In developing the optimized control loop, the following assumptions are considered: 1) the thyristor converter (TC) operates in continuous current mode, 2) the current loop dynamics are studied within a narrow range of TC phase angle changes, and 3) a discrete dynamic TC model is used with averaging of electromotive force (EMF) over the conduction interval. Optimizing the digital current loop addresses several critical tasks, including enhancing control accuracy, reducing overshoot and oscillations, and improving the system's dynamic response, allowing for reduced delays and a faster reaction to load changes.

The optimization results of the digital current regulator (DCR) show reduced energy consumption and significant improvements in control accuracy. The high-speed performance of the digital current loop enables fast transient processes within a single sampling interval of the thyristor converter, which is crucial for systems requiring rapid regulation. Additionally, the digital control loop provides flexibility in control, as it allows for system adjustments to different operating conditions through a software-based approach.

The study's final results demonstrate the potential of digital current loops in modern electric drives. With advances in microprocessor technology, digital regulators enable more complex control algorithms, including adaptive and predictive strategies, which further enhance system efficiency. These approaches are especially relevant for industrial electric drives that require high precision and response speed, making digital current loops a promising solution for contemporary automated control systems.





Key words: digital current regulator, electric drive, thyristor converter, optimization, dynamic characteristics, energy efficiency, noise protection.

Eq. 20. Fig. 4. Ref. 8.

1. Problem formulation

Optimizing the digital current loop of an electric drive is essential to ensure stable operation and high system accuracy. It involves improving the control structure, algorithms, and parameters of the current loop to achieve the desired drive performance. First, dynamic characteristics such as time delays, sampling rate, and bandwidth are analyzed, which affect the performance of the digital loops. Then, the PI controller parameters are tuned to respond quickly and stably to current changes without oscillation or overshoot [1].

Modeling and simulation help to pre-evaluate the current loop performance and test different configurations before implementing them in a real system. To improve accuracy and stability, filtering techniques are often used to reduce the impact of high-frequency noise on current measurements. In addition, optimization criteria such as minimizing the integrated squared error criterion or reducing power consumption are applied, which reduces system losses. The optimization of the digital current loop improves energy efficiency, noise immunity, and drive stability, which is especially important for modern automation systems and industrial equipment [2].

2. Analysis of recent research and publications

Thyristor converter in dynamic modes. In dynamic modes, a thyristor converter is a complex nonlinear pulse system that operates with a variable sampling interval [3-4].

$$T = \frac{(T_{\Pi} + (\alpha_2 - \alpha_1))}{2\pi f_c}, \quad (1)$$

where T_{Π} – the conductivity interval in the steady-state mode, s; α_1, α_2 – are the opening angles of the thyristors, respectively, at the given and the next conductivity intervals, rad; f_c – frequency of the power supply network, Hz.

At the same time:

$$T_{\Pi} = \frac{1}{mf_c}, \quad (2)$$

where m – the number of TP pulsations equal to the number of phases in zero-phase circuits and double the number of phases in bridge circuits.

When α increases, the value of T increases, and when α decreases, it decreases. However, when replacing the real rectified EMF of the converter $e_d(t)$ with the values $e_{d\text{cep}}$ averaged over the intervals T_{Π} , it is possible to supply the TP with a linear pulse link with a variable e_0 with a constant sampling period $T = T_{\Pi}$. The pulse $e_{\Pi}[nT_{\Pi}]$ formulated in this way introduces some inaccuracy $\Delta e_{d\text{cep}}$, into the dynamics, which is smaller, the smaller the range of change in the opening angle α . In the steady-state mode $\Delta e_{d\text{av}} = 0$. Taking rectangular pulses $\Delta e_{d\text{av}} = e_{\Pi}[nT_{\Pi}]$ with a constant sampling interval T_{Π} as the output EMF, it is possible to represent the TP by a pulse linear link with a zero- order extrapolator (Fig. 1) [5-8].

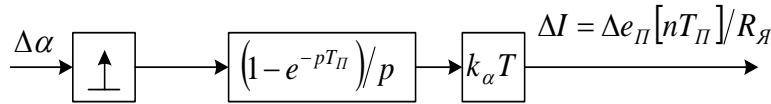


Fig. 1. Block diagram of a thyristor converter as a discrete system in continuous current mode

Transfer function of such a link for small deviations and with an output variable

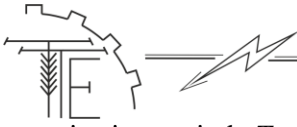
$$\Delta I = \frac{\Delta e_{\Pi}[nT_{\Pi}]}{R_y}, \quad (3)$$

where R_y – the total resistance of the anchor circle, ohms, has the form

$$W(p) = \frac{\Delta I}{\Delta \alpha} = k_{\alpha T} \frac{1 - e^{-pT_{\Pi}}}{p} = k_{\alpha T} \frac{z-1}{zp}. \quad (4)$$

where $k_{\alpha T} = -\frac{U_{d0}}{R_y} \sin \alpha$ is the current transfer coefficient of the TP, A/rad; U_{d0} – the average value of the rectified voltage at $\alpha = 0$, V.

In addition to the discreteness of the thyristor converter (TC), the current loop also contains the discreteness of the digital control system (DCS) with periods T_p and T_p . The operation of the DCC is synchronized with the power supply network of the TS, which ensures the coordination of the two



quantization periods T_p and T_p relative to a certain fixed point of the supply voltage, usually the point of natural opening of the thyristors in the TS. If the current measurement and the control algorithm require T_p to be less than T_p , then T_p is taken as the resulting sampling period of the current loop. The measured current value is usually its average value i_d over the interval T_p , which is transmitted to the microcomputer at the moment of natural opening of the thyristors in the TS. If the time is $t_p = T_p < t_\alpha = \frac{\alpha}{2\pi f_c}$ then the changes in the setpoint angle are worked out without an additional delay of T_p . If $t_p \geq \frac{\alpha}{2\pi f_c}$, then there is a delay in the opening of the TP with anew value of α by the value of T_p . To eliminate this delay, a compensating correction is used [9].

3. The purpose of the article

The purpose of optimizing this control loop is to design a digital current controller (DCC) in accordance with the selected optimization criterion. This includes determining the type and parameters of the DCC that will provide optimal dynamic characteristics of the current loop, such as minimizing overshoot and reducing transient time. The following assumptions are used during the synthesis:

- operation of a thyristor converter (TC) in continuous current mode;
- consideration of the dynamics of the current loop in a small range, i.e., with a slight change in the opening angle of the TP;
- use of a discrete dynamic model of the TS with EMF averaging over the TS conductivity interval.

Optimizing the digital current loop of an electric drive solves a number of important tasks aimed at improving system performance. The main ones are:

- Improved current control accuracy: Loop optimization reduces errors in tracking the required current, which is especially important for precise speed and torque control.
- Reducing overshoot and oscillations: The controller tuning helps to avoid oscillations and overshoots during the control process, which increases system stability and reduces the likelihood of overloads.
- Reducing the impact of interference and noise: the introduction of filtering methods reduces the impact of electromagnetic interference and high-frequency noise, which is especially important for working in industrial interference.
- Improved dynamic system response: optimization helps to reduce delays in responding to changes in the input signal, which allows for faster response to changes in load.
- Improved energy efficiency: By minimizing losses in current circuits, power consumption can be reduced, which is important for reducing operating costs and reducing the heat load on equipment.
- Resilience to changing operating conditions: optimization allows for stable system operation even when the load, temperature, and other external factors change, which is especially important for systems operating in different environmental conditions.

These tasks are aimed at ensuring the stability, reliability and energy efficiency of electric drives in modern automated and industrial systems.

4. Results of the researches

The block diagram of the digital current loop without taking into account the motor's emf is shown in Fig. 2. The input variable of the current loop is the increase in the

opening angle of the TP $\Delta\alpha_{3,T}$, which sets the required change in current, and the output variable is the increase in the average current Δi over the period T_{II} or the corresponding value of the current feedback signal expressed through the opening angle of the TP,

$$\Delta\alpha_{o,T} = k_{A\Pi\Pi} \cdot k_{o,T} \cdot \Delta i = k'_{o,T} \cdot \Delta i, \quad (5)$$

where $k_{o,m}$ – the transfer coefficient of the current sensor, V/A; k_{asp} – ADC transfer coefficient, V^{-1}
 $k_{A\Pi\Pi} = \Delta u^{-1}_0$

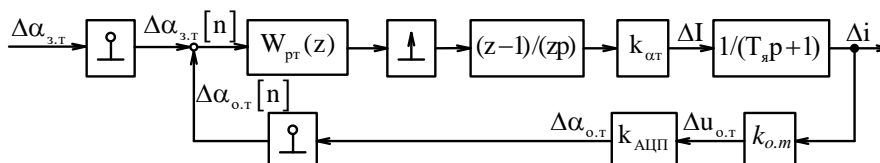


Fig. 2. Block diagram of the digital current loop



Optimizing the digital circuit. The purpose of the loop optimization is to determine the type and parameters of the digital current controller, i.e. to determine its DFC. $W_{pm}(z)$

In accordance with the structural diagram, the transfer function of the above continuous link (CL):

$$W_n(p) = k_{\alpha T} \cdot k'_{0.T} \frac{z^{-1}}{z} \cdot \frac{1}{p(T_y p + 1)}, \quad (6)$$

where T_n – the electromagnetic time constant of the TP-D anchor circuit, s.

$$W_n(z) = k_{\alpha T} \cdot k'_{0.T} \frac{z^{-1}}{z} Z \left\{ \frac{1}{p(T_y p + 1)} \right\} = k_{\alpha T} \cdot k'_{0.T} \frac{z^{-1}}{z} Z \{h[n]\}. \quad (7)$$

Here $h[n]$ is the lattice transition function of a continuous link:

$$h[n] = 1 - e^{-n \frac{T}{T_y}}, \quad (8)$$

where T – the time discretization interval, s, equal to T_n . From the table for lattice function images

$$Z \{h[n]\} = \frac{(1-d_n) \cdot z}{(z-d_n) \cdot (z-1)}, \quad (9)$$

where $d_n = e^{-T/T_n}$.

Then:

$$W_n(z) = k_{\alpha T} \cdot k'_{0.T} \cdot \frac{1-d_n}{z-d_n}. \quad (10)$$

The desired transient of the current loop is an exponential law characterized by the parameter T_m , which corresponds to the modular optimum:

$$\Delta i_b = \Delta I \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right), \quad (11)$$

where $T_r = 2T_\mu$, $T_\mu = T_\pi$.

Expression (8) corresponds to the lattice function from $\Delta \alpha_{0.T}[n] = \Delta \alpha_{3.T} \left(1 - e^{-\frac{nT}{T_r}} \right)$, where

$$h_b[n] = \frac{\Delta \alpha_{0.T}[n]}{\Delta \alpha_{3.T}} y_1 - e^{-\frac{nT}{T_r}}.$$

Since the desired closed-loop:

$$W_b(z) = \frac{z^{-1}}{z} Z \{h_b[n]\} = \frac{1-d_r}{z-d_r}, \quad (12)$$

Where $d_r = e^{-\frac{T}{T_r}}$, is the open-loop DFT:

$$W_{0b}(z) = \frac{1-d_r}{z-1}. \quad (13)$$

Taking into account the assumptions made for optimizing the digital current loop, a digital current controller (DCC) with a discrete transfer function (DFT) corresponding to a digital proportional-integral controller (PI controller) was obtained. The proportional part of the MDG is determined by the coefficient

$$k_{etc} = \frac{1-d_r}{k_{\alpha T} \cdot k'_{0.T} (1-d_n)} \frac{z-d_y}{z-1} = k_{цпр} \frac{z-d_y}{z-1}. \quad (14)$$

The integral part of the MDGs, equal to

$$\frac{k_{etc}(1-d_y)}{z-1}, \quad (15)$$

has a denominator that turns to zero at $z=1$ ($p=0$).

Comparison of analog and digital current regulators. Let's compare the parameters of analog and digital current regulators, adjusting them to the modular optimum. For an analog PI-PT:

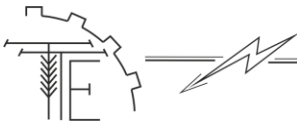
$$W_{pt}(p) = \frac{T_y}{T_t} \frac{R_y}{k_p k_{0.t}} + \frac{1}{T_{rP}} \frac{R_{ay}}{k_p k_{0.t}} = k_{пр} + \frac{k_{пр}}{T_{rP}}, \quad (16)$$

where $T_m = 2T_\mu$.

For digital PI-RT at $T \rightarrow 0$, the proportional part according to (11):

$$k_{etc} \rightarrow \frac{1 - \left(1 - \frac{T}{T_t}\right) R_y}{1 - \left(1 - \frac{T}{T_y}\right) k_p k_{0.t}} = \frac{T_y}{T} \frac{R_y}{k_p k_{0.t}} = k_{пр}, \quad (17)$$

integral part:



$$\frac{k_{etc}(1-d_y)}{z-1} \rightarrow k_{etc} \frac{1-\left(1-\frac{T}{T_y}\right)}{1+pT-1} = \frac{k_{pt}}{T_{tp}} \quad (18)$$

Consequently, only under the condition that $T < T_m$ and $T < T_y$, the parameters of the digital current controller (DCC) are practically the same as the corresponding parameters of the analog current controller (AC). However, when the digital current loop is tuned to the modular optimum ($T_m = 2Tn = 2T$), the condition of the smallness of the parameter T_p relative to T_m ceases to be fulfilled, which leads to the fact that the values of the MDG parameters begin to differ from the parameters of the analog RT. According to the obtained MDG DFT

$$W_{pT}(z) = k_{etc} \frac{z-d_a}{z-1} = k_{etc} \frac{(1-d_a)z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{Y(z)}{X(z)}, \quad (19)$$

a block diagram of this controller can be drawn up (Fig. 3). When a jump input signal $x[n] = X_0 \cdot 1[n]$ is applied to the MDG input, the output signal will be determined by the difference equation:

$$y[n] = k_{etc}x[n] - k_{etc}d_a x[n-1] + y[n-1]. \quad (20)$$

The output signal $y[n]$ increases linearly from the initial value $y_0 = k_{upT}x_0$ with an increase on each subsequent clock cycle $\Delta y = k_{upT}(1-d_y)x_0$ (5). The digital signal of the current regulator $y[n]$ is fed to the input of the SC, which generates digital signals of the opening angle N_α and the number of the next thyristor N_m , to which the control pulse should be applied.

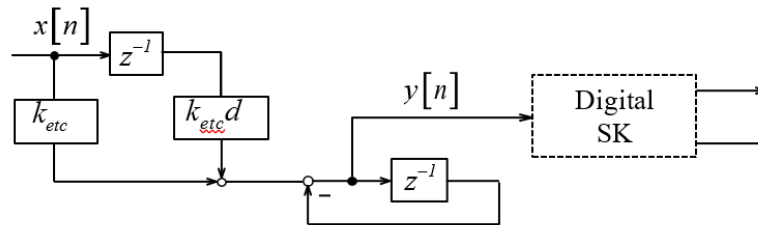


Fig. 3. Block diagram of the PI controller

The advantages of the digital current loop include the ability to achieve high performance with a transient time that fits within one TP sampling interval, provided that the digital computer is fast enough. In addition, the digital loop provides the possibility of direct digital control, which makes it possible to implement all control functions of regulators and the control system (CS) by software on a single unified element base - a microprocessor system.

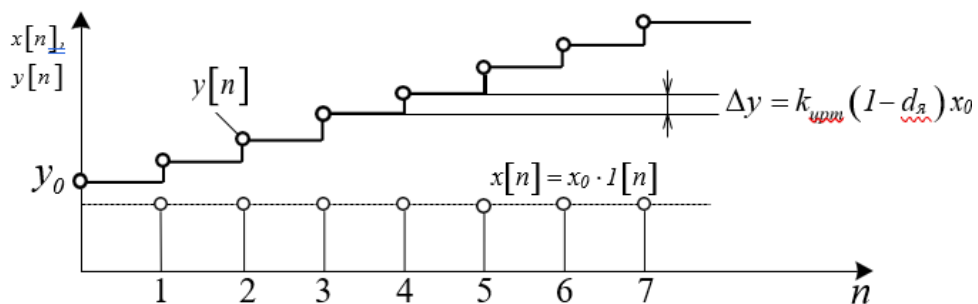
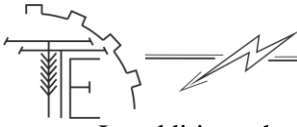


Fig. 4. Testing of the input signal spike by a digital PI controller

5. Conclusions

The digital current loop provides high performance, capable of performing transients within a single TP sampling interval, which is critical for systems requiring rapid regulation. It offers control flexibility with the ability to implement all control functions programmatically, making it easy to customize and adapt the system to different operating conditions.

The use of microprocessor-based systems to implement digital controllers simplifies system architecture by reducing the number of individual components and facilitating their integration. Digital controllers can be fine-tuned to improve system stability, which is an important factor in ensuring reliable operation.



In addition, the digital approach allows for the implementation of complex control algorithms, including adaptive and predictive strategies that can significantly improve system efficiency. Due to the continuous development of microprocessor technology, digital current loops have great potential for further improvement, implementation of new algorithms and energy efficiency. As a result, digital current loops are a promising solution for modern electric drives and automated systems that require high accuracy, flexibility, and speed.

References

1. Popovych, M.H., Lozynskyi, O.Iu. (2005). *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannia ta elektropryvody [Electromechanical automatic control systems and electric drives]*. Textbook for students of higher educational institutions who study in the direction of "Electromechanics". K.: Lybid. [in Ukrainian].
2. Popovych, M.H. (1993). *Teoriia elektropryvoda [Theory of electric drive]: Textbook*. K.: Vyscha shkola. [in Ukrainian].
3. Popovych, M.H., Kostytskyi, V.I. (2008). *Elektromekhanichni systemy avtomatyzatsii ta elektropryvod (Teoriia i praktyka) [Electromechanical automation systems and electric drive (Theory and practice)]*. Site. manual with the stamp of the Ministry of Education and Science of Ukraine. K.: KNUTD. [in Ukrainian].
4. Popovych, M.H., Kostytskyi, V.I. (2011). *Rozrobka ta doslidzhennia elektromekhanichnykh system avtomatyzatsii ta skladovykh elektropryvoda [Development and research of electromechanical automation systems and electric drive components]*. Site. manual with the stamp of the Ministry of Education and Science of Ukraine. K.: KNUTD. [in Ukrainian].
5. Bondarenko, V.I., Krysan, Yu.O. (2013). *Osnovy elektropryvoda [Electric drive bases]: Tutorial*. Zaporizhzhia: ZNTU. [in Ukrainian].
6. Crowder, R. (2006). *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*. Newnes, Published Date. [in English].
7. Popovych, M.H., Havryliuk, V.A., Kovalchuk, O.V., Teriaiev, V.I. (1990). *Elementy avtomatyzovanoho elektropryvoda*. K.: UMYK VO. [in Ukrainian].
8. Hrabko, V.V., Kucheruk, V.Yu., Vozniak, O.M. (2009). *Mikroprotsesorni systemy keruvannia elektropryvodamy [Microprocessor-based electric drive control systems]: Textbook*. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТРУМОМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Стаття присвячена оптимізації цифрового контуру керування струмом електропривода з тиристорним перетворювачем, що має важливе значення для забезпечення стабільної, точної і надійної роботи електроприводів в автоматизованих і промислових системах. Основною метою дослідження є розробка та вдосконалення цифрового регулятора струму (ЦРС), що дозволяє досягти необхідних характеристик роботи приводу, включаючи швидке і стабільне реагування на зміну струму без надмірних перерегулювань та коливань. Оптимізація контуру струму сприяє зменшенню витрат енергії, покращенню динамічних властивостей і підвищенню стійкості до зовнішніх перешкод, що є ключовими факторами для сучасних електроприводних систем.

У вступній частині статті розглянуто основні аспекти оптимізації цифрових контурів струму. Зокрема, обговорено динамічні характеристики таких контурів, включаючи часові затримки, частоту дискретизації та пропускну здатність, які суттєво впливають на ефективність цифрових регуляторів. Також у статті акцентовано увагу на налаштуванні параметрів ПІ-регулятора, що дозволяє швидко й стабільно реагувати на зміни струму. Розроблена модель дозволяє здійснити попереднє моделювання роботи контуру струму, що дає змогу випробувати різні конфігурації перед їх фактичним застосуванням.

Для підвищення точності і стабільності системи запропоновано методи фільтрації для зниження впливу високочастотних шумів, що забезпечує точність і стійкість системи до зовнішніх перешкод. Впроваджено критерії оптимізації, серед яких мінімізація інтегрального квадратичного критерію помилки (ІККП) і зниження енергоспоживання, що дозволяє значно зменшити втрати у системі та підвищити енергоефективність електроприводів.

Під час розробки оптимізованого контуру регулювання розглядаються такі припущення: 1) робота тиристорного перетворювача (ТП) у режимі неперервного струму, 2) дослідження



динаміки контуру струму в малому діапазоні змін кута відкриття ТП, 3) використання дискретної динамічної моделі ТП з усередненням ЕРС на інтервалі провідності. Оптимізація цифрового контуру струму вирішує низку важливих задач, серед яких підвищення точності керування, зменшення перерегулювань і коливань, а також підвищення динамічної реакції системи, що дозволяє зменшити затримки та швидко реагувати на зміну навантаження.

Результати оптимізації цифрового регулятора струму (ЦРС) свідчать про зниження енергоспоживання і значне покращення точності керування. Висока швидкодія цифрового контуру струму забезпечує швидке виконання перехідних процесів у межах одного інтервалу дискретності тиристорного перетворювача, що є критично важливим для систем, які потребують оперативного регулювання. Крім того, цифровий контур надає гнучкість у керуванні, оскільки дозволяє налаштовувати систему під різні експлуатаційні умови завдяки програмному підходу.

Підсумкові результати дослідження показують перспективність використання цифрових контурів струму у сучасних електроприводах. Завдяки розвитку мікропроцесорних технологій цифрові регулятори дозволяють реалізувати більш складні алгоритми керування, включаючи адаптивні і предиктивні стратегії, що ще більше підвищує ефективність роботи системи. Такі підходи є особливо актуальними для промислових електроприводів, які потребують високої точності та швидкодії, що робить цифрові контури струму перспективним рішенням для сучасних автоматизованих систем керування.

Ключові слова: цифровий регулятор струму, електропривод, тиристорний перетворювач, оптимізація, динамічні характеристики, енергоефективність, шумозахищеність.

Ф. 20. Рис.4. Літ. 8.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleksandr VOZNYAK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, Vinnytsia National Agrarian University (VNAU, 3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008; e-mail: voznyak@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Serhii TIKHONENKO – Recipient of the Third Educational and Scientific Level, Vinnytsia National Agrarian University (VNAU, 3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008; e-mail: galtuh@gmail.com)

Volodymyr TYKHONOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physical Education, Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytske Hwy, Vinnytsia, Ukraine, 21021; e-mail: tykhonovvolodymyr@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5116-2890>).

Artem KOSAKOVSKYI – Recipient of the Third Educational and Scientific Level, Vinnytsia National Agrarian University (VNAU, 3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, <https://orcid.org/0009-0003-5028-251X>).

ВОЗНЯК Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: voznyak@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

ТИХОНЕНКО Сергій Володимирович – здобувач третього освітньо-наукового рівня Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: galtuh@gmail.com).

ТИХОНОВ Володимир Костянтинівич – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичного виховання Вінницького національного технічного університету (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, email: tykhonovvolodymyr@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0008-5116-2890>).

КОСАКОВСЬКИЙ Артем Юрійович – здобувач третього освітньо-наукового рівня Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, <https://orcid.org/0009-0003-5028-251X>, <https://orcid.org/0009-0003-5028-251X>).