

Додаток А
Абробація наукових результатів дослідження

Kharkiv National University of Radio Electronics

M&MS 2023, 19-20 October, Kharkiv, UKRAINE



VII International Conference
**MANUFACTURING
&
MECHATRONIC
SYSTEMS**

УДК: 005:004.896:62-65:338.3

Виробництво & Мехатронні Системи 2023: матеріали VII-ої Міжнародної конференції, Харків, 19-20 жовтня 2023 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2023 - 163с.

У збірник включені тези доповідей, які присвячені сучасним тенденціям розвитку технологій та засобів виробництва та мехатронних систем, передовому досвіду та впровадженню їх в галузях систем промислової автоматизації та керування виробництвом; системній інженерії; CAD/CAM/CAE системах; мехатроніці (електро-механічних системах, електронних інструментах систем керування, механічних CAD системах); робототехніці та засобах інтелектуалізації; MEMS (сучасних матеріалів та технологіях виготовлення MEMS) та компонентах і технологіях автоматизації видобутку, переробки та транспортування нафти та газу.

Редакційна колегія: І.Ш. Невлюдов, В.В. Євсєєв.

Manufacturing & Mechatronic Systems 2023: Proceedings of VIIst International Conference, Kharkiv, October 19-20, 2023: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] .- Kharkiv .: [electronic version], 2023. - 163 p.

The collection includes the theses of reports on modern trends in the development of technologies and means of production and mechatronic systems, top experience and implementation of them in fields of: industrial automation and production management systems; systems engineering; CAD/CAM/CAE systems; mechatronics (electrical and mechanical systems, electronic control tools, mechanical CAD systems); robotics and intellectual tools; MEMS (modern materials and manufacturing technologies MEMS) and components and technologies for the automation of oil, gas and oil extraction, processing and transportation.

Editorial board: Igor.Sh. Nevlyudov, Vladyslav.V. Yevsieiev

© Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та робототехніки (КІТАР),
ХНУРЕ,2023

Міністерство освіти і науки України (МОНУ)
Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ)
Варшавський університет сільського господарства (WULS - SGGW)
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості
Національний університет «Львівська політехніка»
Festo Didactic Україна
Jabil Circuit Ukraine Limited
ТОВ «Науково-виробниче підприємство «УКРІНТЕХ»»
Факультет автоматики і комп'ютеризованих технологій (АКТ)
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР),
Державне підприємство «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування»
Державне підприємство «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості»

МАТЕРІАЛИ

VII-ої Міжнародної Конференції
ВИРОБНИЦТВО
&
МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2023
(19-20 жовтня 2023)
Харків, Україна



ОРГАНІЗАТОРИ



Міністерство
освіти і науки
України

Міністерство освіти і науки України (МОНУ)
The Ministry of Education and Science of Ukraine



NURE
Kharkiv National University
of Radioelectronics

Харківський національний університет
радіоелектроніки (ХНУРЕ)

Kharkiv National University of Radioelectronics



**WARSAW UNIVERSITY
OF LIFE SCIENCES
- SGGW**

Варшавський університет сільського
господарства (WULS - SGGW)

Warsaw University of Life Sciences WULS - SGGW



Азербайджанський державний університет
нафти і промисловості

Azerbaijan State Oil and Industry University



Festo Didactic Україна

Festo Didactic Ukraine



ТОВ «Науково-виробниче підприємство
«УКРІНТЕХ»»

Research and Production Enterprise
"UKRINTECH" Ltd



Національний університет «Львівська
політехніка»

National University Lviv Polytechnic

Державне підприємство «Харківський науково-
дослідний інститут технології машинобудуван-
ня», м. Харків, Україна

State Enterprise «Kharkiv Scientific-Research
Institute of Mechanical Engineering Technology»,
Kharkiv, Ukraine



Державне підприємство «Південний державний
проектно-конструкторський та науково-
дослідний інститут авіаційної промисловості»,
м. Харків, Україна

State Enterprise «National Design & Research
Institute of Aerospace Industries», Kharkiv,
Ukraine



Jabil Circuit Ukraine Limited

КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

МІЖНАРОДНИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Ігор Шакирович Невлюдов** голова комітету конференції, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна
- Олександр Іванович Филипенко** заступник голови комітету конференції, доктор технічних наук, професор, декан факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій (АКТ), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна.
- Мурад Анвер огли Омаров** доктор технічних наук, професор, проректор з міжнародного співробітництва, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна
- Владислав В'ячеславович Євсєєв** секретар, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківського національного університету радіоелектроніки, Україна.
- Andrzej Chochowski** доктор технічних наук, професор Варшавського університету сільського господарства (WULS - SGGW), Польща
- Pawel Obstawski** доктор технічних наук, професор Варшавського університету сільського господарства (WULS - SGGW), Польща.
- Сергій Богомолів** лектор/доцент, доктор філософії (комп'ютерні науки), Дослідницька школа комп'ютерних наук, Коледж інженерії та комп'ютерних наук, Австралійський національний університет, Австралія.
- Микола Васильович Замірець** доктор технічних наук, професор, директор Державного підприємства Науково-дослідного технологічного інституту приладобудування, Україна
- Михайло Васильович Лобур** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка», Україна.
- Євген Сергійович Риженко** керівник відділу дидактики ДП «Фесто», Україна
- Сергій Володимирович Демченко** директор ТОВ «Науково-виробничого підприємства «УКРІНТЕХ», Україна.

- Самед Імамалі огли Юсіфов** кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій та управління, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Азербайджан.
- Фарід Гаджі огли Агаєв** кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри управління та системної інженерії, Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Азербайджан.
- Віктор Васильович Косенко** доктор технічних наук, доцент, директор Державного підприємства «Харківського науково-дослідного інституту технології машинобудування», Україна.
- Володимир Вікторович Козирський** доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики та енергозбереження, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.
- Віталій Пилипович Лисенко** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.
- Юрій Францевич Зінковський** доктор технічних наук, професор кафедри радіоконструювання і виробництва радіоапаратури, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.
- Володимир Митрофанович Свищ** доктор технічних наук, професор, радник директора Державного науково-виробничого підприємства «Об'єднання Комунар», Україна.
- Віталій Євгенович Овчаренко** доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Державного підприємства «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування», Україна.
- Лариса Сергіївна Глоба** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних мереж, Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.
- Анатолій Олександрович Андрусевич** доктор технічних наук, професор, начальник Криворізького коледжу Національного авіаційного університету, Україна.
- Роман Володимирович Артюх** кандидат технічних наук, директор Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський інститут авіаційної промисловості», Україна.

- Glen Kurtwitz** генеральний менеджер Titan Machinery Limited, Шотландія.
- Liu Shan** генеральний менеджер Titan Machinery Limited, Китай.
- Володимир Андрійович Павлиш** кандидат технічних наук, професор, перший проректор Національного університету «Львівська політехніка», Україна
- Сергій Іванович Осадчий** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна.
- Анатолій Афанасійович Єфіменко** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних засобів та інформаційно-комп'ютерних технологій, Одеський національний політехнічний університет, Україна
- Анатолій Петрович Ладанюк** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних систем, Національний університет харчових технологій, Україна.
- Володимир Михайлович Решетюк** кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Олександр Михайлович Цимбал** заступник голови конференції з організаційних питань, доктор технічних наук, професор комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Сергій Павлович Новоселов** кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Євген Анатолійович Разумов-Фризюк** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.
- Наталія Павлівна Демська** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР), Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

ЗМІСТ

<i>Vladyslav Yevsieiev</i>	
Modeling of the BEAM robot control system on the basis of a microcircuit L293D	12
<i>Medovkin Mykhailo, Puhach Hanna</i>	
The development of a cryptographically secure pseudorandom number generator	15
<i>Svetlana Sotnik, Anton Andreiev</i>	
QR codes in production	19
<i>Софія Хрустальова, Світлана Вишванюк</i>	
Розроблення структурної схеми модуля автоматизації на базі RFID – технологій	22
<i>Владислав Заїкін</i>	
Моделювання пошуку вибухонебезпечних предметів методом електромагнітної спектроскопії та радіолокації	26
<i>Karetyna Stetsenko</i>	
BEAM Robotics: Combining Biological Principles and Technological Solutions for More Adaptive and Energy-Efficient Robots	30
<i>Svitlana Maksymova, Mykhailo Akopov</i>	
Selection of Sensors for Building a 3D Model of the Mobile Robot's Environment	33
<i>Сергій Новоселов, Єгор Волков</i>	
Завдання автоматичного керування рухом мобільної платформи з застосуванням законів автоматички	36
<i>Сергій Новоселов, Ігор Гладков</i>	
Сучасний промисловий інтернет речей та хмарні технології	40
<i>Дмитро Гурін</i>	
Вирішення задачі зворотної кінематики для рухливих кінцівок роботехнічної платформи	43

<i>Максим Лузан, Дмитро Янушкевич</i>	
Аналіз методів дистанційного знешкодження	46
<i>Михайло Ковальов, Іванов Леонід</i>	
Способи удосконалення частотного перетворювача напруги для блоку управління електричним транспортним засобом	49
<i>Світлана Максимова, Георгій Борисов</i>	
Розробка програми для пошуку й побудови оптимального маршруту мобільного робота у двовимірному просторі	52
<i>Світлана Максимова, Канаєв Владислав</i>	
Розробка підсистеми керування мобільного робота для орієнтації в виробничому просторі	54
<i>Олена Чала, Анатолій Сливка</i>	
Рівні Засобів ПоТ в Інформаційних Технологіях	57
<i>Чала О., Дон Д.</i>	
Розроблення елементів обліку обладнання інформаційних ERP-систем	61
<i>Бронніков А.І., Чернишов Д.І.</i>	
Модернізація модуля керування розсувними конструкціями виробничого приміщення з використанням ІоТ	65
<i>Бронніков А.І., Ницета В.Є.</i>	
Розроблення системи інтелектуального керування кондиціонуванням виробничого приміщення з використанням технології ІоТ	68
<i>Запорізький Валентин, Плахтій Олександр</i>	
Аналіз поточного стану розвитку колаборативних роботів	71
<i>Олег Гуртовий</i>	
Використання автоматизованого випробувального обладнання в системі контролю якості продукції радіоелектронної промисловості	74
<i>Дмитро Лобанов, Леонід Іванов</i>	
Способи удосконалення модуля автоматичного управління перетворювача напруги блоку живлення електророботикара	78

<i>Ілля Лисенко, Леонід Іванов</i>	
Необхідність охолодження акумуляторних батарей автономного ходу електричного транспорту на прикладі тролейбуса PTS-12	81
<i>Редько Денис, Дмитро Янушкевич</i>	
Аналіз конструкції маніпуляторів роботехнічних пристроїв для переміщення вибухонебезпечних предметів	84
<i>Дмитро Янушкевич, Леонід Іванов, Ігор Толкунов</i>	
Комплексний підхід до застосування робототехнічних комплексів у сфері гуманітарного розмінування	88
<i>Viacheslav Korotkov, Igor Nevliudov, Yurii Romashov</i>	
General Approaches to Design Improved Angular Velocity PID Controllers of Automated Electrical Drives	93
<i>Oleksandr Narozhnyi, Yurii Romashov</i>	
Technical State Estimation for Electromechanical Wheeled Platforms with Parametric Identification Using	99
<i>Наталія Демська, Юрій Ромашов, Артем Шевченко</i>	
Розробка підходів щодо використання комп'ютерних технологій для імітаційного моделювання промислового електроприводу	104
<i>І. В. Жарікова</i>	
Автоматичний пристрій для збору вторинної тари з алюмінію та поліетилентерефталату	110
<i>Доронін Павло, Леонід Іванов</i>	
Контроль укладання акумуляторних батарей автономного ходу для електричного транспорту (за зразком тролейбуса PTS-12)	113
<i>Фарзуллаєв Рашад, Леонід Іванов</i>	
Необхідність контролю вихідного сигналу з бортового перетворювача напруги для електротранспорту	116
<i>Сергій Новоселов, Дмитро Шестак</i>	
Класифікація вибухонебезпечних об'єктів, їх візуальні ознаки, методи маскування та ідентифікації	119

<i>Кузьменко Олександр</i>	
Аналіз засобів дистанційного виявлення мінно-вибухових пристроїв ...	124
<i>Дмитро Кухаренко, Богдан Коваленко</i>	
Метод ранньої діагностики ниркових захворювань	128
<i>Олексій Юрко, Дмитро Кухаренко, Михайло Довбня, Микола Мешков</i>	
Програмна реалізація системи керування лабораторним блоком живлення	133
<i>Дмитро Кухаренко, Роман Косюта</i>	
Моделювання процесу розмінування українських територій за допомогою роботизованих комплексів	138
<i>Дмитро Кухаренко, Іван Лукеча</i>	
Моделювання артеріального тромбозу в серцево-судинній системі	142
<i>Дмитро Кухаренко, Владислав Нікітюк</i>	
Розробка моделей та методів комп'ютерного планування оперативних втручань на ШКТ	146
<i>Дмитро Проценко</i>	
Особливості розробки автономного малогабаритного робота	150
<i>Igor Nevliudov, Oleksandr Ratushnyi, Yurii Romashov</i>	
Development of General Approaches for Mathematical Modelling of Heat Exchangers as Automation Objects	153
<i>Олександр Малий, Наталія Фурманова, Вадим Онищенко, Сергій Малий</i>	
Методологічні засади вибору компонентів рушійної установки мультироторних БПЛА	158

General Approaches to Design Improved Angular Velocity PID Controllers of Automated Electrical Drives

Viacheslav Korotkov¹, Igor Nevludov², Yurii Romashov³

1. CITAR department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE, Kharkiv, Nauky Ave. 14, email: viacheslav.korotkov@nure.ua

2. CITAR department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE, Kharkiv, Nauky Ave. 14, email: igor.nevludov@nure.ua

3. CITAR department, Kharkiv National University of Radio Electronics, UKRAINE, Kharkiv, Nauky Ave. 14, email: yurii.romashov@nure.ua

Abstract: The general approaches are developed in this research to design angular velocity PID controllers for electrical drives of different types and purposes. It is built the simplified mathematical model for the automated electrical drive with the angular velocity PID controller, and it is shown that, stability conditions obtained by using the Routh's criteria give to the infinite set for this controller's permissible parameters, and to develop such controllers, it is proposed additionally to provide the wished characteristics of the frequency functions for these automated electrical drives. Application of the proposed general approaches is illustrated on the example of the linear systems representing the wide class of the industrial automated electrical drives.

Keywords: PID-controller; angular velocity; electrical drives.

I. Introduction

Improvement of automation control systems is one effective way to have the more perfect automated electrical drives for different purposes. From this point of view, it is really important to have suitable general approaches allow providing the improve design for PID controllers, because exactly such kinds of controllers are the principal elements used to provide automation for different purposes electrical drives at present. Due to these circumstances, we have a lot of researches like [1-3] for example about improvement of the PID controllers for different kinds of automated electrical drives.

Development of the PID controller for the automated electrical drives is based usually on the mathematical models, represented by means the ordinary differential equations and the Lyapunov's method of characteristic parameters. It is obviously, that such approach leads to the infinite set of the possible PID controller's parameters providing the stability state of the researched electrical drive, so that the parameters of the improved PID controllers must be chosen from this set by using the suitable choosing procedures in agreement with the using area and purposed of the researched electrical drive, as well as in agreement with the wished kind of improvements required for the designed PID controller. Of course, the view of the mathematical model used to represent the researched electrical drive with a PID controller has the significant influence on the results of the PID controller design, so it is necessary also to have the suitable approaches to build the appropriate mathematical models allowing to represent the automated electrical drives as the automation objects, like it was discussed in the research [4] for example to provide the measurements.

The principal purpose of this research is in development of the appropriate general approaches allowing to design the angular velocity PID controllers for the automated electrical drives, so that to have the wished exploitation improvements of such drives. So, this research will cover actually all the principal stages of designing processes for the improved PID controllers of the automated electrical drives from building the appropriate mathematical models to developing the suitable procedures to define the PID controllers' parameters providing the wished exploitation improvements.

II. Theoretical backgrounds

The conventional approach to define the PID controller's parameters is based on using the mathematical model of the considering automated object represented by means the ordinary differential equations, so one of really principal problem is in developing the suitable approach to build such mathematical models for the electrical drives. It is really understandable, that they are a lot of different kinds of the electrical drives, so it is impossible to cover all these kinds by means someone mathematical model. Taking into account this circumstance, we will concentrate further the principal consideration on the general approaches allowing to build the mathematical models for the electrical drives, but only as the automation objects independently from their particularities.

The principal property of the automation objects differencing them from others kinds of systems is in inherent presence of the controlled parameters, which can be changed by means the controls. In the case the electrical drives which must provide the exactly given wished angular velocity during the operation the controlled parameter is naturally the angular velocity, but the control is the electrical voltage supplied to the electric motor. Of course, the angular velocity and the supplied voltage can be changed during the time, so for any kind of the electrical drive considered as the automation object we will have

$$\omega = \omega(t), u = u(t), \quad (1)$$

where ω is the angular velocity; u is the supplied voltage; t is the time.

Taking into account the relation (1), the mathematical model representing the electrical drive as the automation

object must give the correspondence between the control and the controlled parameter. This correspondence is usually defined by means some ordinary differential equation with the necessary initial conditions, and it is suitable to have this equation linear like the following:

$$a_n \frac{d^n \omega}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \omega}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_0 \omega = b_0 u(t), \quad (2)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0, \frac{d\omega}{dt}(t_0) = \omega_0^{(1)}, \dots, \frac{d^{n-1} \omega}{dt^{n-1}}(t_0) = \omega_0^{(n-1)}, \quad (3)$$

where n is the order of the differential equation; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ are the parameters of the mathematical model; t_0 is some given time moment; ω_0 and $\omega_0^{(1)}, \dots, \omega_0^{(n-1)}$ are the given angular velocity and their derivatives at the initial time moment $t = t_0$.

Further, to choose the parameters of the angular velocity PID controller it is suitable to represent the angular velocity (1) in the following view:

$$\omega(t) = \hat{\omega} + x(t), \quad (4)$$

where $\hat{\omega} = const$ is the given wished angular velocity, but $x(t)$ is the deviation of the wished angular velocity of the electrical drive.

Let substitute the relation (4) to the differential equation (2) of the mathematical model representing the electrical drive as the automation object, and as the results of this we will have:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 (\hat{\omega} + x) = b_0 u(t). \quad (5)$$

Further, we will represent the control from (1) as corrected by the angular velocity PID controller in the view:

$$u(t) = \hat{u} - k_p x - k_I \int x dt - k_D \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

where $\hat{u} = const$ – is the given control corresponded to the wished value $\hat{\omega} = const$ of the angular velocity of the electrical drive; k_p, k_I and k_D are the parameters of the PID controller.

Due to the PID controller definition (6), the differential equation (5) will be transformed as the following:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + (a_1 + b_0 k_D) \frac{dx}{dt} + (a_0 + b_0 k_p) x + b_0 k_I \int x dt = b_0 \hat{u} - a_0 \hat{\omega}. \quad (7)$$

To represent the relation (7) in the more suitable view, it is necessary to introduce the new variable:

$$x = \frac{d\tilde{x}}{dt}, \quad \tilde{x}(t_0) = 0, \quad (8)$$

where $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$ is the introduced new variable.

Exactly the introduced new variable (8) allows us to represent the relation (7) in the more suitable view of the ordinary differential equation:

$$a_n \frac{d^{n+1} \tilde{x}}{dt^{n+1}} + a_{n-1} \frac{d^n \tilde{x}}{dt^n} + \dots + (a_1 + b_0 k_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (a_0 + b_0 k_p) \frac{d\tilde{x}}{dt} + b_0 k_I \tilde{x} = b_0 \hat{u} - a_0 \hat{\omega}. \quad (9)$$

The obtained relation (9) gives us the possibility to find the control $\hat{u} = const$ corresponded to the wished value $\hat{\omega} = const$ of the angular velocity:

$$b_0 \hat{u} - a_0 \hat{\omega} = 0 \Rightarrow \hat{u} = \frac{a_0}{b_0} \hat{\omega}. \quad (10)$$

Taking into account the control (10), the differential equation (9), as well as the required initial conditions defined by the relations (3), (4) and (8), we can represent the mathematical model of the automated electrical drive with the angular velocity PID controller in the following final view:

$$a_n \frac{d^{n+1} \tilde{x}}{dt^{n+1}} + a_{n-1} \frac{d^n \tilde{x}}{dt^n} + \dots + (a_1 + b_0 k_D) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (a_0 + b_0 k_p) \frac{d\tilde{x}}{dt} + b_0 k_I \tilde{x} = 0, \quad (11)$$

$$t = t_0 \Rightarrow \tilde{x} = 0, \frac{d\tilde{x}}{dt} = \omega_0 - \hat{\omega}, \frac{d\tilde{x}}{dt} = \omega_0^{(1)}, \dots, \frac{d^{n-1} \tilde{x}}{dt^{n-1}} = \omega_0^{(n-1)}$$

From the mathematical model (11), (12) we can see, that the angular velocity deviation $x(t)$ is due to only the disturbed initial conditions. It is in fully agreement with the ideas of the Lyapunov's stability theory, so the realized approach is actually only the equivalent to those theory. Thus, the parameters of the angular velocity PID controller of the automated electrical drive must provide the stability of the characteristic polynomial:

$$f(z) = a_n z^{n+1} + a_{n-1} z^n + \dots + (a_1 + b_0 k_D) z^2 + (a_0 + b_0 k_p) z + b_0 k_I = 0. \quad (13)$$

We have a lot of different well-known criteria allowing us to formulate the system of inequations for the values $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ as well as k_p, k_I and k_D providing the stability property of the polynomial (13). Using all these well-known criteria is actually the typical task, and it will not be discussed here. At the same time, it is necessary to note, that as the result of using these criteria, we will have the correspondent inequalities for the k_p, k_I and k_D values of the PID controller parameters for the $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ values of the parameters of the electrical drive mathematical model as the automation object. Of course, these inequalities will define the infinite set of the k_p, k_I and k_D values, and to choose those values, it can be recommended in additional to provide the wished values of the frequency functions characteristics of the automated electrical drive through their mathematical model (11), (12). Because of the such way designed PID controllers will provide additionally the wished characteristics of the frequency functions, we can consider such PID controllers as the improved. Using of the frequency characteristics is well-known, so it will not be discussed here, but it is reasonable to note, that it will be suitable to do it the transfer function of the automated electrical drive represented in the view:

$$W(s) = \frac{s}{a_n s^{n+1} + \dots + (a_1 + b_0 k_D) s^2 + (a_0 + b_0 k_P) s + b_0 k_I}. \quad (14)$$

Thus, having the parameters n and $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ of the mathematical model of the automated electrical drive, we can define the angular velocity PID controller parameters k_P, k_I and k_D through the stability conditions of the polynomial (13) and the wished characteristics of the frequency functions corresponded to the system with the transfer function (14). Due to these circumstances, we can see, that the principal problem to design the improved angular velocity PID controller is in building of the differential equation (2) of the suitable mathematical model of the electrical drive as the automation object. Because of they are a lot of different kinds of the electrical drives, it is really impossible in general case to give the universal approach allowing to have the parameters n and $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ of the mathematical model (2) in the direct view of some analytical relations. At the same time, it is possible, and we will give the approach allowing to find the parameters n and $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ of the mathematical model (2) in the implicate view through the intermediate ordinary differential equations, so that this approach will be really uniform for the different kinds of the electric drives.

To have the really general approach, we will consider further only the principal properties inherent for different kinds of the electrical drives. The principal property inherent for any kinds of the electrical drives is the presence of the electric motor as the source of the rotational couple having the electromagnetic nature and depending on the supplied voltage $u = u(t)$ considered as the control of the electrical drive in the mathematical model (2) of the electrical drive as the automation object. The different kinds of the electrical drives due to the possible different kinds of the used electrical motors at least. This rotational couple actually moves the necessary parts of the useful system through the transmission of the electric drive, and different kinds of electric drives are due to the different kinds of transmissions also. We can have the electrical drives with the mechanical, electrical, hydraulic, pneumatic transmissions or with the different mixed types including both mechanical and both hydraulic parts for example. Thus, the electrical drive can be the electromechanical system, the electro-hydro-mechanical or other systems in dependence of the inherent design and the kind. At the same time, the electrical and mechanical parts are presented in any kinds of the electrical drives, so that the electrical drive is the electromechanical system at least in any case, and it is principally important for us, because we want to have the general approaches of mathematical modelling suitable for any kinds of the electrical drives. Form one side, the mechanical parts of the electrical drives can be usually represented as the holonomic mechanical systems. From other side, they are well-known the electromechanical analogies allowing to consider the electrical parts of the electric drives similarly to their mechanical parts. Due to these circumstances, we can have the really generalized representations of the mathematical models of the

electrical drives by means the Lagrange's equations of 2-nd kind:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k(t, q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n, u), \quad (15)$$

$$q_k(t_0) = q_k^{(0)}, \quad \dot{q}_k(t_0) = \dot{q}_k^{(0)}, \quad (16)$$

where n is number of freedom degrees, and $k = 1, 2, \dots, n$; q_k and \dot{q}_k are the generalized coordinated; L is the Lagrange's function (kinetic potential); R is the Raleigh's dissipation function; Q_k are the generalized forces, representing all the forces, which are not potential and are not dissipative; t_0 is the given time moment; $q_k^{(0)}$ and $\dot{q}_k^{(0)}$ are the gives values of the generalized coordinates and velocities at the time moment $t = t_0$.

It is necessary to note that the mathematical model (15), (16) actually represents the processes in the electrical drives as in any electromechanical system, but it not represents the electric drives as the automation objects. To represent the electrical drives exactly as the automation objects it is necessary to use the clear understood circumstance, that the controlled angular velocity $\omega = \omega(t)$ from the relations (1) is defined by the processes in the electrical drive, so we have naturally the following relation:

$$\omega = \omega(q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n), \quad (17)$$

where $\omega(q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n)$ is some given function defining actually the researched electrical drive exactly as the automation object.

Because of both of the generalized coordinates q_k and both of the generalized velocities \dot{q}_k are depended on the time t , so the controlled angular velocity (17) will be depended on the time too, like it was in the relation (1). Thus, the ordinary differential equations (15) with the initial conditions (16) and the relation (17) allow representing in the implicit view the mathematical model (2), (3) of the electrical drive as the automation object. Of course, the relations (15)–(17) cannot give us the values of the parameters n and $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ of the differential equations (2) in general case. At the same time, it will be possible to have these parameters in the analytical view for some particular cases, but to have them in a general case we can recommend to use the identification procedures based on the results of computer simulations of the processes in the researched electrical drive by means the mathematical model (15)–(17). We will not discuss the identification procedures, because they are the traditionally separate knowledges area. So, the generalized approaches are proposed to represent the mathematical models of the electrical drives as the automation objects on the basis of the electromechanical analogies, of the Lagrange's equations of 2-nd kind, and of the identification procedures.

III. Example of application

To illustrate the proposed approaches, we will use the relatively simple ample allowing to exclude the necessity in using the identification procedures, so that we will

have the particular view (2), (3) of the mathematical model of the electrical drive in the direct view. To do it, we will use the simplest schematisation of the processes in the electrical drives as the electromechanical systems.

As it was discussed above, any electrical drive has the electric motor, so the state of the electrical drive must be defined by two generalized coordinates at least:

$$q_1 = \varphi_e, \quad q_2 = \int I_e dt, \quad (18)$$

where φ_e is the rotation angle of the rotor of the electric motor; I_e is the electric current in the winding of the rotor of the electric motor.

It is necessary to note, that the generalised coordinate q_1 has the mechanical nature, but the generalized coordinate q_2 is the electric charge, so it has the electrical nature. The different natures of the generalised coordinates is inherent for the electromechanical systems represented by the Lagrange's equations of 2-nd kind. Of course, that in some cases it will be required to use more than one generalised coordinate q_1 to represent the mechanical parts and to use more than one generalized coordinate q_2 to represent the electrical parts of the electrical drives, but it is obviously, that the simplest case is corresponded to the two generalized coordinates (18).

The electromechanical analogies allow us to see the equivalent between the inertia and the inductance through the kinetical energy, between the rigidity and the capacity through the potential energy, between the viscous damping and the resistance through the Raleigh's dissipation function. So, the values required to be substituted to the Lagrange's equations of 2-nd kind for the simplest representation of the electrical drive with the generalized coordinates (18) will have the following view:

$$L = \frac{1}{2} J \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} L_e \dot{q}_2^2, \quad R = \frac{1}{2} B \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} R_e \dot{q}_2^2, \\ Q_1 = B_e \dot{q}_2, \quad Q_2 = -B_e \dot{q}_1 + u, \quad (19)$$

where J and B are the moment of inertia and the viscous damping parameter of the mechanical parts of the electrical, drive defined relatively the rotation axis of the electric motor rotor; L_e and R_e are the inductance and the resistance of the winding of the rotor of the electrical motor; B_e is the electromechanical characteristic of the electric motor.

Substituting the relations (19) to the Lagrange's equations of 2-nd kind, we will have the following differential equations and the following required initial conditions:

$$J \ddot{q}_1 = -B \dot{q}_1 + B_e \dot{q}_2, \quad L_e \ddot{q}_2 = -B_e \dot{q}_1 - R_e \dot{q}_2 + u, \quad (20)$$

$$q_1(t_0) = \varphi_e^{(0)}, \quad \dot{q}_1(t_0) = \omega_e^{(0)}, \quad q_2(t_0) = \kappa_e^{(0)}, \quad \dot{q}_2(t_0) = I_e^{(0)}, \quad (21)$$

where $\varphi_e^{(0)}$ and $\omega_e^{(0)}$ are the given values of the rotation angle and of the angular velocity of the rotor, but $\kappa_e^{(0)}$ and $I_e^{(0)}$ are the given values of the electric charge and the electric current in the winding of the rotor of the electric motor of the electrical drive at the given initial time moment $t = t_0$.

In the form (20), (21) we have the mathematical model representing the processes in the electrical drives under the simplest schematization. To have the mathematical model of the electrical drive as the automated object we must complement the model (20), (21) by the relation (17), which in this simplest case can naturally have the following particular view:

$$\omega = \dot{q}_1. \quad (22)$$

Actually, the set of relations (20)-(22) gives the indirect form of the mathematical model (2), (3) representing the electrical drive as the automation object. Of course, that in the common case only the identification procedure will allow build the differential equation (2), but in the simplest particular case (20)-(22) it is possible to have the particular view of the differential equation (2) in the direct view. To do it, firstly, we will take into account the relation (22) to represent first equation (20) in the following view:

$$J \dot{\omega} = -B \omega + B_e \dot{q}_2 \Rightarrow \dot{q}_2 = \frac{J}{B_e} \dot{\omega} + \frac{B}{B_e} \omega. \quad (23)$$

Using the obtained relation (23), we will exclude further the generalized coordinate q_2 from second differential equation (20), and after the correspondent transformations we will have the final result:

$$\frac{L_e}{B_e} J \ddot{\omega} + \frac{L_e B + R_e J}{B_e} \dot{\omega} + \left(B_e + \frac{R_e}{B_e} B \right) \omega = u. \quad (24)$$

It is obviously, that the differential equation (24) is actually the particular case of the generalized differential equation with the following parameters:

$$n = 2, a_2 = \frac{L_e J}{B_e}, a_1 = \frac{L_e B + R_e J}{B_e}, a_0 = B_e + \frac{R_e}{B_e} B, b_0 = 1. \quad (25)$$

Due to the results (25), we will can have the particular view of the characteristic polynomial (13) required to formulate the stability conditions to find the parameters of the angular velocity PID controller:

$$f(z) = a_2 z^3 + (a_1 + k_D) z^2 + (a_0 + k_P) z + k_I. \quad (26)$$

Let use the well-known Routh's criteria to formulate the stability conditions for the polynomial (26). In agreement with the Routh's criteria, we must build the following Routh's scheme:

$$\begin{array}{cc} a_2 & a_0 + k_P \\ a_1 + k_D & k_I \end{array} \quad (27) \\ \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_P) - a_2 k_I}{a_1 + k_D}$$

Because of the physical sense of the parameters (25), we have the inequations:

$$a_2 > 0, \quad a_1 + k_D > 0. \quad (28)$$

Taking into account the relations (28) and the Routh's scheme (27), the Routh's criteria will lead to the following condition of the polynomial (26) stability:

$$(a_1 + k_D)(a_0 + k_P) - a_2 k_I > 0 \quad (29)$$

The inequality (29) gives us the opportunity to find the values of the parameters for the angular velocity PID controller of the electrical drive for the simplest schematization of the processes. We can see, that due to the inequality (29), we will have the infinite set of the permissible parameters for the angular velocity PID

controller, but we must choose only one values from this set. Thus, we must propose the way to choose the parameters of the angular velocity PID controller from the infinite permissible values set defining by the inequality (29). To propose this way, it is necessary to formulate the additional conditions, which must be satisfied due to choosing the PID controller parameters. It is naturally to formulate these additional conditions to provide some wished properties of the electrical drive as the automated system. As was discussed above, it is naturally to consider as the improved all PID controllers providing some specific additional properties of the automated systems. It is understandable, that it is actually impossible to imagine all possible additional properties wished for the automated electrical drives and required to find the angular velocity PID controller parameters. At the same time, the natural way to formulate these additional properties can be through the frequency functions of the automated electrical drive, and it is necessary to use the transfer function to do it, as was noted above. In this particular case corresponding to the simplest schematization of the electrical drive, the general view (14) of the transfer function due to the relations (25) will have the particular view:

$$W(s) = \frac{s}{a_2 s^3 + (a_1 + k_D) s^2 + (a_0 + k_P) s + k_I}. \quad (30)$$

They are well-known the approaches allowing to consider the frequency functions for the automated electrical drives with the transfer functions (30), so we will not discuss all it here, because it is not principal from the point of view on the general purpose of this research. In addition to this, it is necessary to note, that the principal results of this research are about the general approaches to build the mathematical models of the electrical drives as the automation objects, as it is required to design the improved angular velocity PID controllers.

IV. Conclusions

This research presents the results noticeable to have further the general approaches to design improved angular velocity PID controllers for the electrical drives. Thus, the presented hire results allow us to formulate the following principal conclusions.

Designment of improved angular velocity PID controllers for the electrical drives are principally based on mathematical modelling of the correspondent electrical drives as the automation objects. This mathematical modelling must provide giving the relation between the supplied electrical voltage of the electric motor and the controlled angular velocity of the researched electrical drive. The ordinary differential equation with the necessary initial conditions is the most suitable view to represent the mathematical model of the electrical drives as the automation objects, because it will give the opportunities to take into account influencing of the angular velocity PID controller, and it will to formulate the condition for this PID controller parameters priding the stability of the angular velocity value. These stability conditions will define actually the infinite set of the values of the parameters of the PID controller providing the stability of the angular velocity value for the electrical drives. To define the parameters of the

angular velocity PID controllers, the stability conditions must be complemented by the additional conditions, and the most general ways to formulate these additional conditions are through using the frequency functions of the electrical drive. Actually, due to satisfy not only the stability conditions, but exactly the additional conditions too, the corresponded developed PID controller can be considered as improved.

To have the mathematical model representing the electrical drive as the automation object, it is necessary to understand that the relation between the controlled angular velocity and the supplied electrical voltage actually is the results of the processes in this electrical drive. To have the general understanding about the processes in the electrical drives, it is necessary to consider that, the electrical drives principally include in any case both the mechanical and both the electrical parts. Due to this circumstance, the general way for mathematical modelling of the processes in the electrical drives is in using the electromechanical analogies and the Lagrange's equations of 2-nd kind, because it gives the opportunities to represent the mathematical model for wide class of the electromechanical systems. It is shown, that the mathematical model of the electrical drive as the automation object can be presented in the implicit form through the mathematical model of the processes inherent for the electrical drive as the electromechanical system with the complementary relation defining the controlled angular velocity through the generalized coordinates of the electrical drive as the electromechanical system. The direct form of the mathematical model of the electrical drive as the automation in general case object can be obtained only through the identification procedure on the basis of the results of the computer simulations of the researched electrical drive.

The considered particular example based on the simplest schematization of the processes in the electrical drive shows, that the mathematical model of the electrical drives as the automation objects must be represented by at least third order differential equation, so the more complicated mathematical model will lead to the higher ordered differential equation. The stability condition limiting the parameters of the angular velocity PID controller for the electrical drives under the simplest schematization has the view of one inequality defining the infinite set of the permissible values of these parameters.

The following researches are planned in the direction of considering the different additional conditions providing the wished characteristics of the frequency functions for the automated electrical drives, as well as in the direction of considering of the more complicated schematizations of the automated electrical drives though taking into account the deformations of the mechanical parts.

References

- [1] R. Baz, K. El Majdoub, F. Giri, and A. Taouni, "Self-tuning fuzzy PID speed controller for quarter electric vehicle driven by In-wheel BLDC motor and Pacejka's tire model", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55 (is. 12), pp. 598-603, 2022.

- [2] V. Rajs, N. Lj. Rašević, M. Z. Bodić, M. M. Zuković, and K. B. Babković, "PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non-Linear Load", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55 (is. 4), pp. 225-229, 2022.
- [3] G. Huang, X. Yuan, K. Shi, and X. Wu, "A BP-PID controller-based multi-model control system for lateral stability of distributed drive electric vehicle", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 356 (is. 13), pp. 7290-7311, 2019.
- [4] A.G. Mamalis, I. Nevliudov, and Y. Romashov, "An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms", *Journal of Instrumentation*, vol.16(is. 10), P10006, 2021.

Наукове видання

**Ігор НЕВЛЮДОВ,
Владислав ЄВСЄЄВ,**

**VII Міжнародна Конференція
«Виробництво & Мехатронні Системи»**
(укр., англ. мовою)

Відповідальний редактор – Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР)
61166, Харків, проспект Науки, 14
корпус "А"
ауд. 162-1
тел .: +38 (057) 702-14-86
e-mail: m_ms@nure.ua

Підписано до друку 16.10.2023
Формат А4 (210x297мм). Папір 80г/м².
[електронний друк]

Додаток Б
Демонстраційний матеріал

