

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 автоматизації та 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



ADNSU
AZƏRBAYCAN DÖVLƏT NEFT
VƏ SƏNAYE UNIVERSITETİ

Азербайджанський державний університет
нафти і промисловості

Azerbaijan State Oil and Industry University



Festo Didactic Україна

Festo Didactic Ukraine



UKRAINIAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES

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



ХНДІМ

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



КОЖТИПРОНИАВІАПРОМ



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 ІоТ 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 Рашид, 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

Development of General Approaches for Mathematical Modelling of Heat Exchangers as Automation Objects

Igor Nevliudov¹, Oleksandr Ratushnyi², Yurii Romashov³

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

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

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

Abstract: This research is about development of the general approaches for mathematical modelling of heat exchange apparatus as the automation objects, so that to provide mathematical support for development of the heat processes automation systems and their components like the PID controllers for example. The principal idea of the developed approaches is in representing the heat exchanger's properties as the automation objects by means of the linear ordinary differential equation built through the parametric identification procedures of the data of computer imitations based on the mathematical modelling of the inherent internal processes. It is shown that the proposed approaches allow considering the typical automation engineering problem about defining the parameters of PID controllers. The example about the plate heat exchanger is considered under the simplest schematisation of processes, so that it allows us to imagine the technique of using the proposed general approaches.

Keywords: Automation; heat exchanger; mathematical modelling.

I. INTRODUCTION

Different kinds of heat exchangers actually are actually the widely used principal parts involved in a lot of industrial [1] and householding [2] systems, so improvement of heat exchangers is in current interests due to many reasons, and it is directed to many purposes. One of principal reasons to improve the heat exchangers is in wishes to provide the minimum of used power during the operation, because it is in the general trends directed to zeroing of carbon emissions [1, 3] from the technical systems to the environment to prevent climate changes. One of the principal ways to provide improvements for the heat exchangers is in implementation the most perfect automation systems [4–6], because exactly these systems actually control the processes during the long-term exploitation. It is really, that designing of the automation systems is principally based on mathematical modelling of processes inherent for the heat exchangers [7], so it is principally impossible to provide the improved designing development without the correspondent mathematical support. Thus, this research is in current interests due to agreement with the general modern trends in heat exchangers improvement.

Do design the suitable automation systems, it is necessary to have the correspondent mathematical models, but all they must provide representing the heat exchangers firstly as the automation objects. All times and today, the most of the existed researches are about development of the improved mathematical models of the specific processes internally inherent for the heat exchangers. Such researchers are really very important,

because the properties of the heat exchangers as the automation objects are actually the results of the internally inherent processes. At the same time, we have no today the conventional approaches allowing us to represent the properties of the heat exchangers as the automation objects through the known properties of the internally inherent processes. Thus, we have no actually the generalized approaches today for mathematical modelling of the heat exchangers exactly as the automation objects. So, the purpose of this research is in development of general approaches for mathematical modelling of the heat exchangers exactly as the automation objects. To do it, the theoretical backgrounds of the developed approaches will be discussed and the suitable example will be shown to represent them.

II. THEORETICAL BACKGROUNDS

To propose the general approaches for mathematical modelling of the heat exchangers as the automation objects, it is necessary to understand the purpose of the automation system in the context of the internally inherent processes.

Processes in any heat exchanger can be represented as the heat sharing from the heating medium to the heated medium by means the heat conduction through the dividing wall to prevent mixing of these mediums, which are usually in liquid or (and) gaseous state. The principal purpose of any heat exchanger is in utilisation of the heating medium for warming of the heated medium, which plays the role of the coolant from the heat exchange processes point of view, so we will name further this heated medium as the coolant. This purpose can be equivalently imagined as increasing the temperature T_C of the coolant from some initial value T_C^{in} to some output value T_C^{out} . Taking into account further utilisation of the coolant in some technological processes, the heat exchanger must provide the exactly given wished value T_C^{out} for the coolant output temperature T_C^{out} . It is obviously, that the coolant output temperature has changes during the operation of the heat exchanger due to different external deviations of the heat exchanging processes, so the value T_C^{out} can be imagined as the function of the time t , and we can represent it in the following view:

$$T_C^{out} = T_C^{out}(t). \quad (1)$$

The deviations of the coolant output temperature due to the relation (1) are not suitable for further utilisation of

the coolant, but it is principally impossible to exclude these deviations. Taking into account all these circumstances, it is actually possible to provide only the following approximate equality:

$$T_C^{out}(t) \approx T_C^w. \quad (2)$$

It is necessary to note, that the coolant is actually the moved medium having the different temperatures in all its points in general, so the temperature T_C^{out} is actually the temperature in some point chosen to have estimation about suitability of the coolant state for further utilisation. Besides, it is necessary to remember, that further utilisation requires not only the wished temperature, but also ant the necessary amount of the coolant, so the relation (2) can be provided for the given volume consumption Q_C of the coolant through the heat exchanger. Some utilisations can require the variable coolant amounts, so the equality (3) must be provided for the values Q_C changing during the time t both due to the possible requirements for further coolant utilisation and both the naturally existed deviations in the coolant supplying systems. It is naturally, that the approximate equality (2) can be realized through controlling of the processes in the heat exchanger, but it is practically impossible to influence on these processes directly. So, controlling of these processes can be only through controlling the characteristics of the heating medium, usually named as the heat carrier from the heat exchange processes point of view. The principal characteristics of the heat carrier are the inlet temperature T_H^in and the volume consumption Q_H through the heat exchanger. It is necessary to note complementary, that the approximate equality (2) must be in all time moments during the heat exchangers operation, but it will be really difficult to control the temperature T_C^{out} and to choose the suitable values T_H^in or (and) Q_H to provide the equality manually by the human operator under the different processes deviations especially in the cases if the changed value Q_C is principally required. Of course, that automation of the heat exchangers is the natural way to provide the approximate equality (2).

The noted above circumstances allow us to imagine the automation of the heat exchangers as continuous providing of the approximate equality (2) through continuous correction s of the values T_H^in or (and) Q_H characterizing the heat carrier under the given value Q_C of the volume consumption of the coolant. Taking into account all these, we can represent the mathematical model of the heat exchanger as the automation object by the mapping:

$$T_H^in(t), Q_H(t), Q_C \rightarrow T_C^{out}(t). \quad (3)$$

It is obviously, that the most general representation of the mapping (3) must be through the ordinary differential equations, and the conventional approaches will lead us the following:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n T_C^{out}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} T_C^{out}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dT_C^{out}}{dt} + a_0 T_C^{out} = \\ = b_1 T_H^in(t) + b_2 Q_H(t) + b_3 Q_C + b_4 T_C^in(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_C^{out}(t_0) = T_C^{out_0}, \quad \frac{dT_C^{out}}{dt}(t_0) = T_C^{out(1)} \dots \\ \dots, \quad \frac{d^{n-1} T_C^{out}}{dt^{n-1}}(t_0) = T_C^{out(n-1)}, \end{aligned} \quad (5)$$

where n is the order of the differential equation; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_1, b_2, b_3$ and b_4 are the parameters of the mathematical model; t_0 is some given time moment; $T_C^{out_0}$ and $T_C^{out(1)}, \dots, T_C^{out(n-1)}$ are the given inlet temperature of the coolant and their derivatives at the initial time moment $t = t_0$.

The mathematical model represented in the view (3), (4) allows us to consider all the principal engineering automation problems for the heat exchangers. Really, we can introduce the new variable and foresee the PID controllers

$$x(t) = T_C^{out}(t) - T_C^w, \quad x = \frac{d\tilde{x}}{dt}, \quad x(t_0) = 0, \quad (5)$$

$$T_H^in(t) = T_H^w - k_p^T x - k_I^T \int x dt - k_D^T \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

$$Q_H(t) = Q_H^w - k_p^Q x - k_I^Q \int x dt - k_D^Q \frac{dx}{dt}, \quad (7)$$

where $x(t)$ and $\tilde{x}(t)$ are the coolant output temperature deviation and their integral; T_H^w and Q_H^w are the values corresponded to the coolant wished temperature T_C^w ; k_p^T, k_I^T and k_D^T are the parameters of the PID controller for the heat carrier inlet temperature, but k_p^Q, k_I^Q and k_D^Q are the parameters of the PID controller for the heat carrier volume consumption through the heat exchanger.

Substituting the relations (5)–(7) to the mathematical model (3), (4), we will have the following:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^{n+1} \tilde{x}}{dt^{n+1}} + a_{n-1} \frac{d^n \tilde{x}}{dt^n} + \dots \\ \dots + (a_1 + b_1 k_D^T + b_2 k_D^Q) \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} + (a_0 + b_1 k_p^T + b_2 k_p^Q) \frac{d\tilde{x}}{dt} + \\ + (b_1 k_I^T + b_2 k_I^Q) \tilde{x} = b_1 T_H^w + b_2 Q_H^w + b_3 Q_C - a_0 T_C^w + b_4 T_C^in, \quad (8) \\ \tilde{x}(t_0) = 0, \quad \frac{d\tilde{x}}{dt}(t_0) = T_C^{out_0} - T_C^w, \quad \frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2}(t_0) = T_C^{out(1)} \dots \\ \dots, \quad \frac{d^n \tilde{x}}{dt^n}(t_0) = T_C^{out(n-1)}. \end{aligned} \quad (9)$$

The mathematical model (9) allows us to define the stationary operational modes of the heat exchanger corresponded to the wished values T_C^w and Q_C by means the condition

$$b_1 T_H^w + b_2 Q_H^w + b_3 Q_C - a_0 T_C^w + b_4 T_C^in = 0. \quad (10)$$

Besides, defining the PID controllers' parameters can be reduced to considering the stability of the polynomial:

$$\begin{aligned} f(s) = a_n s^{n+1} + a_{n-1} s^n + \dots + (a_1 + b_1 k_D^T + b_2 k_D^Q) s^2 + \\ + (a_0 + b_1 k_p^T + b_2 k_p^Q) s + (b_1 k_I^T + b_2 k_I^Q). \end{aligned} \quad (11)$$

Thus, to solve the problem about automation engineering, it is suitable to represent the mathematical models of the heat exchangers as the automation objects in the view (4), (5).

As was noted above, the generalized mathematical model (4), (5) representing the heat exchanger as the automation object must reflect the results of the internally inherent processes. It is really difficult to propose the way to have the direct view of the mathematical model (4), (5) for all different kinds of the heat exchangers, but we will discuss further the common point of view on the different kinds of the heat exchangers. As was discussed above also, the wall separating the heat carrier from the coolant is the principal structural element of the heat exchangers, so that the heat transfer between the heat carrier and the coolant is due to the heat conduction through this wall (fig. 1). The shape of the wall dividing the heat carrier and the coolant actually defines the kind of the heat exchanger and their internally inherent processes.

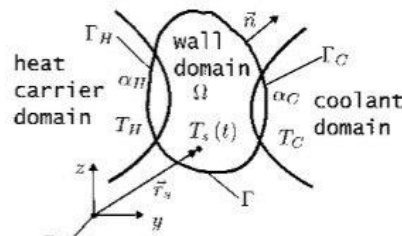


Fig. 1. Heat exchanger general schematization

In general, the wall can be imagined as the set of the points with the coordinates x , y and z forming the domain Ω with the boundary Γ (fig. 1). The temperature T field in the wall must satisfy the heat conduction equation and the initial condition in all internal points of the domain Ω :

$$cp \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), (x, y, z) \in \bar{\Omega}, (12)$$

$$T(x, y, z, t_0) = T^{(0)}(x, y, z), (x, y, z) \in \bar{\Omega}, (13)$$

where c , ρ and λ are the heat capacity, density and the heat conduction of the wall structural material; (x, y, z) is the spatial point with the corresponding coordinates; $\bar{\Omega}$ is the internal part of the domain Ω , i.e. excluding the boundary Γ ; $T^{(0)}(x, y, z)$ is the temperature field at the initial time t_0 .

The heat transfer between the wall and the heat carrier and between the wall and the coolant can be defined by means the correspondent boundary conditions (fig. 1):

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \alpha_H (T_H - T), (x, y, z) \in \Gamma_H, (14)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = \alpha_C (T - T_C), (x, y, z) \in \Gamma_C, (15)$$

where n_x , n_y and n_z are the component of the external unit normal vector \vec{n} to the boundary Γ at the correspondent point; α_H and α_C are the heat transfer coefficients from the heat carrier to the wall and from the wall to the coolant; $\Gamma_H \subset \Gamma$ and $\Gamma_C \subset \Gamma$ are the parts of

the boundary Γ having the heat interaction with the heat carrier and the coolant.

To consider the heat conduction problem for the wall, it is necessary to take into account also the boundary conditions on the others parts of the boundary Γ (fig. 1), but these complementary boundary conditions are significantly defined by the particular design of the heat exchanger, so they not discussed here.

To represent the processes in the heat exchanger, the heat conduction problem (12)–(15) must be complemented also by the heat transfer relations:

$$T_H = T_H(T_H^{in}, Q_H, T), T_C = T_C(T_C^{in}, Q_C, T). (16)$$

It is necessary to note, that having the relations (16) is actually the difficult and relatively independent problem for each kind of the heart exchanger and the motions modes of the heat carrier and the coolant. In a general case these relations (16) are usually represented indirectly by means some complementary differential equations with the initial and boundary conditions like the relation (3) is represented through the initial-boundary-value problem (12)–(15). Nevertheless, the shown relations (12)–(16) give the general imaginations about mathematical modelling of the processes in the heat exchangers, but to have exactly the relation (3), we must have the following relation:

$$T_C^{out} = T_C^{out}(T_C). (17)$$

The relation (17) actually defines the outlet temperature of the coolant. Thus, to have representation about the internally inherent processes in the heat exchangers, it is necessary to solve the initial-boundary value problem (12)–(15) with the additional relations (16) and (17), which is really difficult, and which require numerical methods using in general case. We will not discuss here the particularities of the numerical methods to solve the problem (12)–(17), but we will make some notes about it. The principal idea of the numerical methods application to solve the problem (12)–(17) is in using the discrete representation of the wall temperature field. To have such discrete representation, we will consider the set of predefined points of the Ω domain (fig. 1):

$$\vec{r}_s = x_s \vec{i} + y_s \vec{j} + z_s \vec{k}, s = 1, 2, \dots, n, (18)$$

where $\vec{r}_s \in \Omega$ is the position vector representing the domain Ω point associated with the number s ; x_s , y_s and z_s are the coordinates of the position vector \vec{r}_s ; \vec{i} , \vec{j} and \vec{k} are the unit axis vectors defining the directions of the x , y and z axis; n is the number of the domain Ω points envisaged for the temperature field discrete representations.

The introduced points (18) allow us to have the discrete representation of the wall temperature field by means the finite set of the values:

$$T_s(t) = T(x_s, y_s, z_s, t), s = 1, 2, \dots, n, (19)$$

where $T_s(t)$ is the temperature at the point $\vec{r}_s \in \Omega$.

Of course, that to have the reliable discrete representation (19) of the temperature field in the wall, the number n of the points (18) must be enough big. The idea of the numerical methods is in representing the problem (12)–(17) through the temperatures (19), and

actually the different techniques for making such representations are corresponded to the different kinds of the numerical methods like for example widely used finite differences, semi-discretization, finite elements. The different particularities of the numerical methods using are not principal for this research, but the principal problem is in the ways for transformation of the mathematical model (12)–(17) representing the internally inherent processes in the heat exchanger to the mathematical model (4), (5) generally representing the heat exchangers as the automation objects, because we have no the conventional approaches to do it at present. It is obviously, that building the mathematical model (4), (5) is reduced to defining the parameters of this model, and it is obviously, that it is impossible to have the analytical results in general. So, in general, we can propose to build the mathematical model (4), (5) through the procedures of the parametric identification based on the computer simulations results by means the mathematical model (12)–(17) and numerical methods allowing to represent the internally inherent processes of the heat exchangers. Of course, that to do it, it is necessary to have the suitable identification procedures, but it is the relatively separate problem outside the principal purpose of this research.

III. EXAMPLE OF APPLICATION

To illustrate the proposed approaches, we will consider the example about building the mathematical model of the plate heat exchanger under the simplest schematization (fig. 2) allowing to exclude the identification procedure to have the particular view of the generalized mathematical model (4), (5) in the analytical view. The mathematical model allowing to represent the internally inherent processes under the simplest schematization of the heat exchanger with the plate as the wall (fig. 2) can be represented as:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad T(x, 0) = T^{(0)}(x), \quad 0 < x < h, \quad (20)$$

$$\alpha_H T - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_H T_H^{in}, \quad x = 0, \quad (21)$$

$$\alpha_C T + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_C T_C^{in}, \quad x = h, \quad (22)$$

where all notations are in agreement with the relations (12)–(15) and with the fig. 1 and the fig. 2.

The relations (20)–(21) are actually the particular view of the generalized relations (12)–(16). The principally required complementary relation (17) can be represented for this example in the indirect view:

$$T_C^{out}(t) = T_C^{in} - \frac{\lambda S}{c_C \rho_C Q_C} \frac{\partial T}{\partial x}(h, t), \quad (23)$$

where S is the area of the heat exchanging plane.

Let consider the generally represented points (18) in the particular view:

$$x_0 = 0, \quad x_1 = \Delta h, \quad x_2 = h, \quad \Delta h = \frac{1}{2} h. \quad (24)$$

In agreement with the introduced points (24), we will have the following temperatures representing the plate temperature field:

$$T_0(t) = T(x_0, t), \quad T_1(t) = T(x_1, t), \quad T_2(t) = T(x_2, t). \quad (25)$$

Using the well-known finite differences technique and the introduced values (25), we can represent the relations (20)–(23) as following:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{\lambda}{c\rho\Delta h^2} (T_0 + 2T_1 + T_2), \quad (26)$$

$$\alpha_H T_0 - \lambda \frac{-3T_0 + 4T_1 - T_2}{2\Delta h} = \alpha_H T_H^{in}, \quad x = 0, \quad (27)$$

$$\alpha_C T + \lambda \frac{3T_2 - 4T_1 + T_0}{2\Delta h} = \alpha_C T_C^{in}, \quad x = h, \quad (28)$$

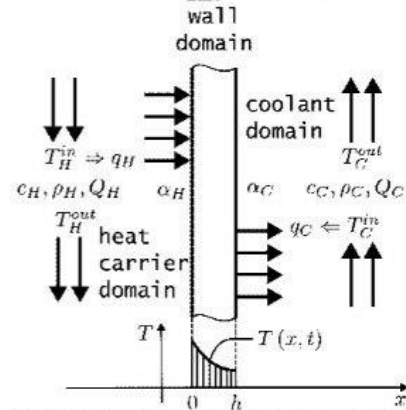


Fig. 2. Heat exchanger simplest schematization

$$T_C^{out}(t) = T_C^{in} - \frac{\lambda S}{c_C \rho_C Q_C} \frac{3T_2 - 4T_1 + T_0}{2\Delta h}. \quad (29)$$

It seems, that transferring of the relations (26)–(29) to the mathematical model (4), (5) representing the heat exchanger as the automations objects is difficult, but all these difficulties are not principal, and they are due to only the cumbersome analytical transformations. Really, the relations (27), (28) can be considered as the system of two linear algebraic equations, and these equations allow us to have the following:

$$T_0 = A_1 T_1 + A_2 T_H^{out} + A_3 T_C^{out}, \quad T_2 = B_1 T_1 + B_2 T_H^{out} + B_3 T_C^{out}, \quad (30)$$

where A_1 , A_2 , A_3 and B_1 , B_2 , B_3 are the notions for some cumbersome analytical expressions representing the solution of the considered system of two linear algebraic equations.

Further, we will take into account the relations (30) in the differential equation (26) and in the relation (29):

$$\frac{dT_1}{dt} = \tilde{A}_1 T_1 + \tilde{A}_2 T_H^{in} + \tilde{A}_3 T_C^{in}, \quad (31)$$

$$T_C^{out} = \tilde{B}_1 T_1 + \tilde{B}_2 T_H^{in} + \tilde{B}_3 T_C^{in}, \quad (32)$$

where \tilde{A}_1 , \tilde{A}_2 , \tilde{A}_3 and \tilde{B}_1 , \tilde{B}_2 , \tilde{B}_3 are the notions for some cumbersome analytical expressions, which are the results of the correspondent transformations.

The relation (32) can be equivalently represented to the following view:

$$T_1 = \frac{T_C^{out} - \tilde{B}_2 T_H^{in} - \tilde{B}_3 T_C^{in}}{\tilde{B}_1}. \quad (33)$$

Substituting the temperature (33) to the relation (31) allows us to have the differential equation representing the heat exchanger as the automation object:

$$\frac{1}{\tilde{B}_1} \frac{dT_C^{out}}{dt} - \frac{\tilde{A}_1}{\tilde{B}_1} T_C^{out} = \left(\frac{\tilde{A}_2 - \tilde{B}_2}{\tilde{A}_2 - \tilde{B}_1} \right) T_H^{in} + \left(\frac{\tilde{A}_2 - \tilde{B}_3}{\tilde{A}_2 - \tilde{B}_1} \right) T_C^{in} + \frac{\tilde{B}_2}{\tilde{B}_1} \frac{dT_H^{in}}{dt} + \frac{\tilde{B}_3}{\tilde{B}_1} \frac{dT_C^{in}}{dt}. \quad (34)$$

The obtained differential equation (34) can be imagined as the particular view of the generalized mathematical model (4), (5) representing the heat exchangers as the automation object, but only with the complementary remark. Really, we can see, that the generally represented differential equation (4) not includes the derivatives of the inlet temperatures of the heat carrier and of the coolant. It illustrates as the necessity in agreement between the mathematical models representing the internally inherent processes in the heat exchanger and representing the heat exchanger as the automation object. Nevertheless, the proposed generalized mathematical model (4), (5) can be imagined at least as the approximation of the heat exchanger as the automation object, if it will be difficult to provide the agreement with the internally inherent processes in the heat exchange.

IV. CONCLUSIONS

This research gives us some noticeable results important for development of the general approaches for mathematical modelling of the heat exchangers as the automation objects. So, these results allow us to formulate the following principal conclusions.

The general approaches for mathematical modelling of the heat exchangers as the automation objects is the principal element of the mathematical maintenance required to provide improved heat exchangers designment. The linear ordinary differential equation is the most suitable form to represent the mathematical model of the heat exchangers as the automation objects, because this form allows us to solve the automation engineering problems like defining the stationary modes or designing the PID controllers parameters.

The most general approach for mathematical modelling of the heat exchangers as the automation objects can be in representing the properties of the heat exchangers as the automation objects through the properties of the internally inherent processes of the heat exchangers. Such approach can be realized by means the parametric identification procedure on the basis of the computer simulations results by using the mathematical model and numerical methods allowing to represent the processes internally inherent for the heat exchangers. The heat conduction and heat transfer are the key processes internally inherent for the heat exchangers, so computer simulations of these key processes are principally required to have the mathematical models representing of the heat exchangers as the automation objects.

The considered particular example about mathematical modelling of the plate heat exchanger under the simplest schematization shows us the principal possibility of the proposed general approach applications to build the mathematical models of the heat exchangers as the automation objects. Due to this particular example, we can see, that the mathematical model representing the heat exchanger as the automation object actually can involve also the derivatives of the control, which make the significantly difficult considering of the engineering

automation problems. Besides, we can see the necessity in agreement between the mathematical models representing the internally inherent processes in the heat exchanger and representing the heat exchanger as the automation object. Such agreement will allow us to simplify significantly the identification procedure to build the mathematical model of the heat exchangers as the automation objects. In addition to all these, such agreement is principally required to exclude the items with the zero coefficients to provide the reliable identification procedure.

The continuations of this research are planned to consider the agreement between the mathematical models representing the internally inherent processes in the heat exchangers and representing the heat exchangers as the automation object. Besides, it is planned to research the parametric identification procedures to build the mathematical model representing the heat exchangers as the automation objects on the basis of the computer simulations of the processes internally inherent for the heat exchangers.

REFERENCES

- [1] Z. Li, Q. Wang, M. Fang, and Z. Luo, "Different cases study on the heating surface layout of a new 600 MWe coal-fired power plant coupled with CaO-based carbon capture system based on heat exchanger network", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 172, 108787, 2022.
- [2] H. Raj Singh, D. Sharma, D.K. Sharma, and S. Chadha, "Low-cost novel designed receiver heat exchanger for household solarized cooking system: development and operationalization", *Materials Today: Proceedings*, vol. 47 (part 11), pp. 3018-3023, 2021.
- [3] D. Li, Y. Li, X. Zheng, J. Wang, and W. Sun, "Synthesis of heat exchanger network with complex phase transition based on pinch technology and carbon tax", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55 (is. 7), pp. 418-423, 2022.
- [4] M. Al-Dhaifallah, "Fuzzy fractional-order PID control for heat exchanger", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 63, pp. 11-16, 2023.
- [5] D. Shah, A. Shah, and A. Mehta, "Higher order networked sliding mode controller for heat exchanger connected via data communication network", *European Journal of Control*, vol. 58, pp. 301-314, 2021.
- [6] Y. Jia, T. Chai, H. Wang, and C.-Y. Su, "A signal compensation based cascaded PI control for an industrial heat exchange system", *Control Engineering Practice*, vol. 98, 104372, 2020.
- [7] S. Alyokhina, I. Nevludov and Y. Romashov, "The Feed Water Level Improved Automated Control for Steam Generators of Nuclear Power Plants", in *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6.

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

