



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ

ЕВРОПЕЙСКИ
СОЦИАЛЕН ФОНД

ЕВРОПЕЙСКИ ФОНД
ЗА РЕГИОНАЛНО РАЗВИТИЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
ИНОВАЦИИ И
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

14 ноември 2023

Пловдив



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

**INTERNATIONAL
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**„MECHATRONIC, ECO- AND
ENERGY SAVING SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES“**

PROCEEDINGS

**14 NOVEMBER 2023
PLOVDIV**

The conference is held on:

Project BG05M2OP001-1.002-0023 Centre of Competence **“Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”**, financed by the Operational Programme “Science and education for smart growth”, co-financed by the European Union through the European Structural and Investment Funds

www.eufunds.bg

© UNIVERSITY PUBLISHING HOUSE “V. APRILOV” – GABROVO, 2023
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

ISSN: 2815-4916



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

СБОРНИК ДОКЛАДИ

**14 НОЕМВРИ 2023
ПЛОВДИВ**

Конференцията се провежда по:

Проект **BG05M20P001-1.002-0023** - **Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“**, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.

www.eufunds.bg

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ МЕЕСТ’23

СБОРНИК ДОКЛАДИ

Формат: 70/100/16

Печатни коли: 8.37

Печат: Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово

ISSN: 2815-4916



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ
СОЦИАЛЕН ФОНД
ЕВРОПЕЙСКИ ФОНД
ЗА РЕГИОНАЛНО РАЗВИТИЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ ПЛОВДИВ 23

по проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност
„Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

Пловдив, 14 ноември 2023 – 16 ноември 23 година

Организационен комитет:

Председател: проф. д-р инж. Вълчо Николов - ТУ-София, филиал Пловдив, България

Членове: доц. д-р инж. Никола Шакев - ТУ-София, филиал Пловдив, България
доц. д-р инж. Севил Ахмед - ТУ-София, филиал Пловдив, България

Програмен комитет:

Председател: проф. д-р инж. Илия Железаров - ТУ-Габрово, България

Членове: акад. Чавдар Руменин - Институт по роботика, БАН, София, България
чл. кор. проф. дхн Тони Спасов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
чл. кор. проф. дхн Красимир Данов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
проф. дн инж. Иван Кралов - ТУ-София, България
проф. д-р инж. Венцислав Вълчев – ТУ-Варна, България
проф. д-р инж. Вълчо Николов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Михаил Петров - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Андон Топалов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Гриша Спасов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Галидия Петрова - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Петя Павлова - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. дфн Румен Каканаков - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. д-р Лиляна Колаклиева - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. дтн Таньо Танев - Институт по роботика, БАН, София, България
доц. д-р Кръстанка Маринова - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
доц. д-р Август Иванов - Институт по роботика, БАН, София, България
доц. д-р Татяна Куцарова - Институт по електроника, БАН, София, България
доц. д-р Стефан Вълков - Институт по електроника, БАН, София, България
доц. д-р инж. Ивайло Неделчев - ТУ-Варна, България
проф. д-р Николай Ганев – Чехия
доц. д-р Егнар Йоздикилилер - Турция
доц. д-р инж. Станислав Немечек - Чехия
проф. дтн инж. Йордан Максимов - ТУ-Габрово, България
проф. дн. инж. Галя Дунчева - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Ирина Александрова - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Звездица Ненова - ТУ-Габрово, България
проф. дн инж. Димитър Дичев - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Николай Маджаров - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Тошко Ненов - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Ангел Анчев - ТУ-Габрово, България

C O N T E N T S

RESEARCH OF THE DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS.....	9
Stanimir Stefanov, Georgi Ganev <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
ANALYSIS OF LOSS OF VISIBILITY IN VIDEO- SEQUENCES.....	15
Petya Em. Pavlova, Boryana K. Pachedjieva, Dobrinka L. Petrova <i>Faculty of Electronics and Automation Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Bulgaria</i>	
RESEARCH CHALLENGES IN MODELING OF ROAD TRAFFIC WITH REAL MEASURED DATA	21
Nikolay R. Kakanakov, Teodora A. Mecheva <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
LABORATORY OF SPECIAL ELECTRIC DRIVES IN ROBOTICS - CURRENT STATE, RESEARCH DIRECTIONS AND PERSPECTIVES	25
Ivan Kostov, Sevil Ahmed, Ivanka Dimitrova <i>Control Systems Department, Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Bulgaria</i>	
DEVELOPMENT OF AN IoT WIRELESS INFRARED ARRAY SENSOR FOR SMART HOME MONITORING.....	33
Galidiya Petrova, Grisha Spasov, Vasil Tsvetkov <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
EXTENDING THE WEATHER INFORMATION SUBSYSTEM WITH AN IoT-BASED ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM	38
Grisha Spasov, Stefan Lishev, Galidiya Petrova <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
ACCREDITATION ACCORDING TO ISO 17025 – POSSIBILITIES AND FIELD OF APPLICATION IN MECHANICAL TESTING OF METALS	42
Angel Petrov Anchev <i>Technical University Gabrovo, Bulgaria</i>	
FIELD OF APPLICATION OF EQUIPMENT FOR X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS.....	49
Vladimir Petrov Dunchev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
RESEARCH OF HYBRID POSITIONING DRIVES.....	54
Prodan Ivanov Prodanov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	

DIGITAL TWINS' DEVELOPMENT USING MODELING AND SIMULATION TOOL ANYLOGIC.....	61
Radoslav Hrishev, Nikola Shakev, Donna Stoyanova, Denis Kulev <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF THE SYSTEM FOR CONTACTLESS CHARGING FOR ELECTRIC VEHICLES WITH DIFFERENT INDUCTANCES IN THE RECEIVER	69
Desislav Iliev, Nikolay Madzharov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EVALUATION OF ELECTRIC MOBILE AIR CONDITIONER OPERATION	76
Lyubomir Dimitrov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EFFICIENT RESOURCE PLANNING FOR MACHINE LEARNING.....	81
Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov <i>Technical University – Sofia</i> <i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
INFLUENCE OF AGEING TEMPERATURE AND TIME ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE ALUMINIUM BRONZE	85
Vladimir Todorov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
INFLUENCE OF AGEING TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION OF A TWO-PHASE ALUMINIUM BRONZE	91
Vladimir Todorov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
INTERACTION BETWEEN CATIONIC AND NONIONIC SURFACTANTS	97
Rumyana D. Stanimirova, Manoela A. Aleksieva, Jordan T. Petkov, Krassimir D. Danov <i>Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, Bulgaria</i>	
WETTABILITY AND MORPHOLOGY OF CATIONIC SURFACTANT LAYERS IN THE PRESENCE OF NONIONIC SURFACTANT ON SOLID SURFACES	103
Veronika Yavrukova, Diana Kovacheva, Krastanka Marinova, Krassimir Danov, Jordan Petkov <i>Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, Bulgaria</i>	
MEASUREMENT CONVERTERS OF PHYSICOMECHANICAL QUANTITIES.....	109
Tsanko Karadzhov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
COMPACT LENSES FOR THE THERMAL INFRARED RANGE OF THE SPECTRUM	115
Dimcho Pulov, Dimitar Dichev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	

FAULT DETECTION ALGORITHM FOR PNEUMATIC MEASUREMENT MODULE.....	121
Albena Taneva, Desislava Atanasova, Krum Kutrynski, Michail Petrov	
<i>Technical University – Sofia</i>	
<i>Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
THE INFLUENCE OF TITANIUM TARGETS CURRENTS ON THE ADHESION OF CRTIALN HARD COATINGS OBTAINED BY UNBALANCED MAGNETRON SPUTTERING.....	129
Ekaterina Zlatareva, Vasiliiy Chitanov, Stefan Kolchev, Tetiana Cholakova, Lilyana Kolaklieva, Roumen Kakanakov, Chavdar Pashinski	
<i>Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences</i>	
<i>Technical University Sofia – Branch Plovdiv</i>	



ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ПОЛЕТА

RESEARCH OF THE DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Stanimir Stefanov
Technical University – Sofia
Plovdiv branch

Georgi Ganev
Technical University – Sofia
Plovdiv branch

Abstract

In this report, an analysis of the characteristics of electromagnetic fields (EMF), their impact on living organisms, the values that should be measured in order to perform an assessment against the basic and reference values regulated in the regulatory framework has been made. EMF measurement was also carried out on electrotechnical elements and workplaces in a teaching laboratory, as well as on a switchboard, floor switchboard and main switchboard on the territory of TU - Sofia, branch Plovdiv, 4th educational building at a frequency of the supply voltage 50Hz. The comparison between the obtained results and the main and reference values according to normative documents shows that the values of the measured EMF parameters are within the safety norms.

Keywords: electromagnetic fields, basic value, reference value, electrical intensity, magnetic induction

ВЪВЕДЕНИЕ

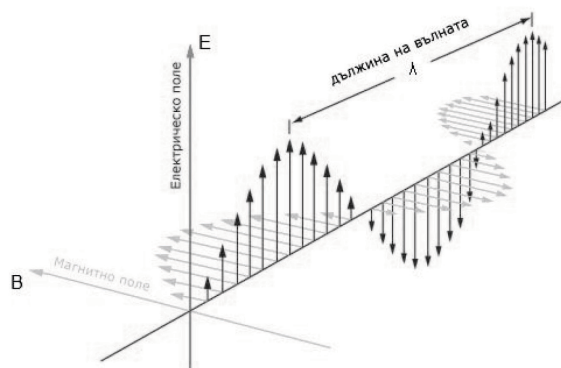
Електромагнитните полета (ЕМП) са неразделна част от съвременните технически устройства, битови и промишлени уреди и ние навсякъде сме заобиколени от тях. Тези полета оказват йонизиращо, нейонизиращо, топлинно и нетоплино въздействие върху живите организми, което въздействие може да има физиологични и психофизиологични последици за живите организми. За да се извърши превенция или за да се гарантира безопасността за здравето при пребиваването на хора в определени зони е необходимо да се изследват някои параметри на електромагнитните полета и в последствие техните стойности да бъдат съпоставени с нормените изисквания.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Същност на електромагнитните полета и тяхното въздействие

Както е известно ЕМП се състоят от електрическо и магнитно поле, като изме-

нението на електрическото поле води до появата на изменящо се магнитно поле, а то от своя страна създава изменящо се електрическо поле, разпространяващи се в пространството от създалият ги източник, дори и той да спре да функционира или съществува – фиг.1. [1].



Фиг. 1.

Тази съвкупност от разпространяващи се електрическо и магнитно поле се нарича електромагнитна вълна, която се характе-

ризира с дължина на вълната и честота на излъчването, свързани посредством скоростта на разпространение на вълната. Тези вълни, също така, се характеризират и с пренасяни импулс и енергия, като обемната плътност на пренасяната енергия е съвкупност от пренасяните от електрическото и магнитното поле енергии.

В зависимост от своята дължина на вълната, респективно честота, електромагнитните вълни се класифицират в така наречения спектър на електромагнитните лъчения – фиг. 2.



Фиг. 2.

С най-малки дължини на вълните, респективно с най-високи честоти са гамма-лъчите и рентгеновите лъчи и те представляват основната група лъчения имащи йонизиращо действие. Групата на оптичните лъчения включва ултравиолетовите излъчвания (10nm – 400nm), видимата за човешкото око светлина (380nm – 780nm) и инфрачервените лъчения попадат в диапазона 800nm – 10 000nm. Следва диапазона на микровълновото лъчение – ултрависоко и свръх ултра високо до 30GHz. В края на електромагнитният спектър, с най-голяма дължина на вълните, респективно с най-малка честота на излъчването се намират радиовълните – УКВ (0,1 – 10m), КВ (10 – 100m), СВ (100 – 1000m) и ДВ (1000 – 10000m).

Лъченията от всеки един от тези диапазони имат физиологично или психофизиологично въздействие върху живите организми и техните тъкани в зависимост от честотата им, дълбочината на проникване в тъканите, и мощностната плътност на излъчването – йонизиращо, топлинно, сензитивно, психосоматично и друго въздействие. В нормативните документи нормите по отношение на тези въздействия на лъченията се делят на две основни групи – лъчения, предизвикващи топлинно въздействие и лъчения, предизвикващи нетоплинни въздействия.

При топлините въздействия температурата на органичните тъкани се увеличава вследствие на преобразуването на енергията вследствие загуби от проводимост при радиовълните и диелектрични загуби при микровълновите излъчвания. Количеството отделяна топлина в тъканите зависи от техните електрически параметри, от честотата на лъчението и от интензивността му. Например, най-силно топлинно въздействие при облъчване с микровълново лъчение, се среща при тъканите, които имат високо съдържание на вода. Така, при ЕМП с едни и същи показатели на ЕМП тъкани с по-ниско съдържание на вода, ще се нагряват по-слабо.

Нетоплинните въздействия се изразяват в стимулация на мускули, нервни или сетивни органи [2] и могат да увредят умственото и физическото здраве, да доведат до поява на преходни симптоми като световъртеж или нарушения в зрението, да предизвикат временно дразнение или засегнат когнитивни способности, мозъчни или мускулни функции, както и да доведат до протичане на електрически ток през тялото или крайниците.

Оценка на параметрите на електромагнитните полета по отношение безопасността на средата и човешкото здраве



Оценката, методите и методиките за оценка на параметрите на ЕМП, и необходимостта от предприемане на мерки се регламентират в национални наредби, възприети европейски стандартни и препоръчани незадължителни ръководства [2][3][4][5]. В европейските документи се дават два вида оценки на ЕМП[3].

Едните са наречени „Основни ограничения“ – ограничения по отношение на излагането на човека на променливи във времето електрически, магнитни и електромагнитни полета, основаващи се пряко на установените ефекти върху здравето на човек стойности. Другите са назовани „Референтни нива“, служещи за практическа оценка, за да се определи дали основните ограничения могат да бъдат превишени, като някои от референтните нива са получени от съответните им основни ограничения, а други в резултат на възприятие и нежелани косвени ефекти от излагане на ЕМП. В нормативните уредби у нас [2] са регламентирани „Гранични стойности на експозиция“ (ГЕС) и „Стойности за предприемане на действия“ (СПД) по отношение на последици за здравето и по отношение на ефектите за чувствителност. СПД са оперативни стойности, установени за да се опрости процеса на доказването на спазването на съответните ГЕС или, когато е приложимо, за да бъдат приети съответните мерки за защита или превенция съгласно наредбата.

Физични величини по отношение на излагането на въздействие от страна на електромагнитни полета

Основните величини, използвани за характеризиране и оценка на влиянието на ЕМП са следните[2][3]:

- Интензитет на електрическото поле E , (V/m);

- Електрически ток в крайниците I_L , (A) в следствие на излагане на ЕМП в честотния обхват 10MHz – 110MHz и в резултат на контакт с предмет, намиращ се в ЕМП,

или на потока от капацитивни токове, индуцирани в тяло, изложено на ЕМП;

- Контактен електрически ток I_C , (A) в следствие на допир на човек до предмет в ЕМП, като при влизането в допир е възможно да възникне и искров разряд;

- Плътност на тока J , (A/m²) през единица напречно сечение, перпендикулярно на посоката на тока в електропроводима среда, като например човешко тяло или част от него;

- Електрически заряд Q , (C);

- Магнитна индукция B , (T). В свободното пространство, в биологични материи, извън магнитопроводящи среди, магнитната индукция и интензитета на магнитното поле H , (A/m) могат да бъдат използвани по един и същи начин, като се използва връзката $H \approx B/4\pi 10^{-7}$ (1A/m $\approx$ 1,25 μ T);

- Плътност на мощността на излъчването S , (Wm⁻²) използвана за много високи честоти, когато дълбочината на проникване е малка. Това е мощността на падащото лъчение перпендикулярно на повърхност, разделена на площта на повърхността;

- Специфична погълнатата енергия СПЕ (SA), (Jkg⁻¹) от единица маса биологични тъкани. Използва се за установяването на ограничения за въздействието на импулсните микрълъчения;

- Специфична погълната мощност СПМ (SAR), (Wkg⁻¹) усреднена за цялото тяло или за някоя част от тялото. Това е величина за оценка на съотношението между вредни топлинни въздействия и излагане на радиочестоти, както и за оценка, и ограничаване на прекомерното поглъщане на енергия от малки части на тялото в резултат на специфични условия на излагане на радиовълни.

От посочените величини могат да бъдат пряко измерени магнитната индукция B , контактният ток I_C , електрическият ток в крайниците I_L , интензитетът на електрическото поле E , интензитетът на магнитното поле H и плътността на мощността S .



В таблица 1 са представени референтните стойности на величините, съгласно [3].

Таблица 1.

Референтни нива за електрически, магнитни и електромагнитни полета (от 0 Hz до 300 GHz, rms стойности)

Честотен обхват	Интензитет на електрическото поле E, V/m	Напрегатност на магнитното поле H, A/m	Магнитна индукция B, μ T	Еквивалентна плътност на мощността на плоска вълна S_{eq} , W/m ²
0 – 1 Hz	10000	3200	4000	-
1 – 8 Hz	10000	3200/f	4000/f	-
8 – 25 Hz	250/f	4000/f	5000/f	-
0,025 – 0,8 kHz	250/f	5	5/f	-
0,8 – 3 kHz	87	5	6,25	-
3 – 150 kHz	87	0,73/f	6,25	-
0,15 – 1 MHz	87/f ^{0,5}	0,73/f	0,92	-
10 – 400 MHz	28	0,073	0,92	2
400 – 2000 MHz	1,375 f ^{0,2}	0,0037 f ^{0,2}	0,0046 f ^{0,2}	f ^{0,2} /200
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

В таблица 2 са показани нормите съгласно Наредба №9 за пределно допустимите нива на електромагнитни полета в населени територии и определяне на хигиенно-защитни зони около излъчващи обекти [4], която наредба регламентира нормите за радиовълни.

Таблица 2.

Пределно допустими нива на напрегатността и на плътността на енергийния поток на ЕМП в населена територия

Честотен обхват в който работи излъчвателя	Пределно допустимо ниво
от 30 до 300 kHz	25 V/m
от 0,3 до 3 MHz	15 V/m
от 3 до 30 MHz	10 V/m
от 30 до 300 MHz	3 V/m
от 0,3 до 30 GHz	10 μ W/cm ²

Съответстващи за описаните по-горе величини, норми, са публикувани и в Наредба № РД-07-5 от 15 ноември 2016г. за минималните изисквания за осигуряване на здравето и безопасността на работещите при рискове, свързани с експозиция на електромагнитни полета [2].

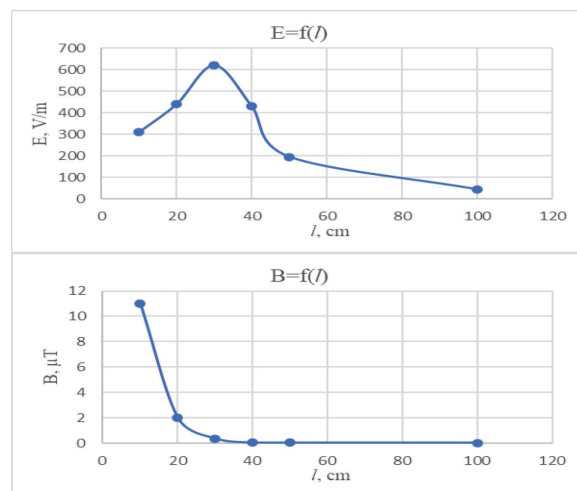
Постановка на изследването и резултати

В измервателната част на изследването са измерени интензитета на електрическото поле E, V/m и магнитната индукция B, μ T на разстояния l съответно 10, 20, 30, 40, 50 и 100 cm от: натриева лампа високо

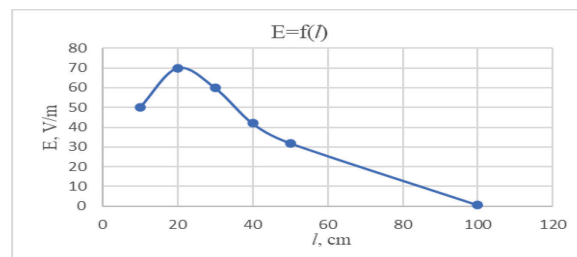
налягане (НЛВН) 70W; автотрансформатор АТЛ – 9; разпределително табло в лаб. 4413, намираща се в 4-ти учебен корпус на ТУ-София, филиал Пловдив; етажно разпределително табло (ЕРТ) на 4-ти етаж в споменатия корпус, западно крило, работещи на промишлена честота 50Hz. Също така, направени са измервания за една позиция на 8 работни места в споменатата лаборатория, и за 3 позиции по височина h, на 30 cm отстояние от килиите на главно разпределително табло (ГРТ), страна ниско напрежение (НН), на споменатия учебен корпус.

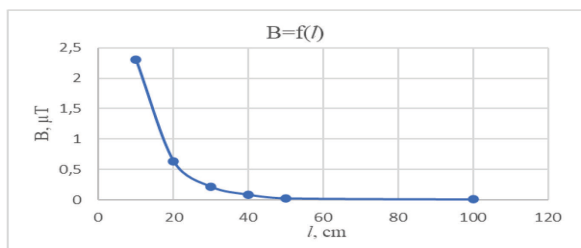
Измерванията на интензитета на електрическото поле E са осъществени посредством измервателен уред Метрикс VХО 10-0 в измервателен диапазон 0 – 100kHz, а на магнитната индукция B посредством измервателен уред РСF EMF 823A в диапазон 0 - 300 Hz.

Получените резултати са представени на фигурите по-долу.

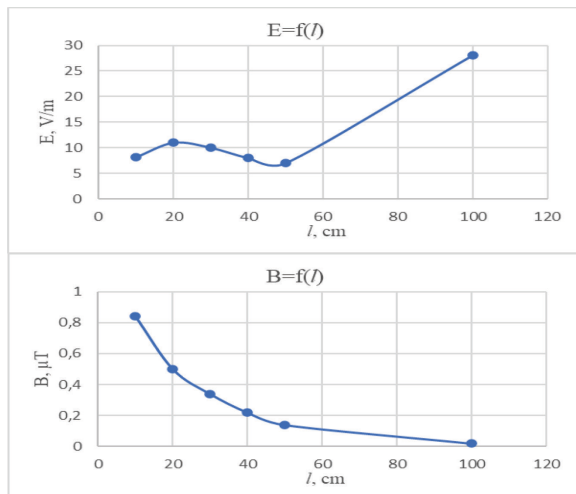


Фиг. 1. Стойности на E и B на НЛВН

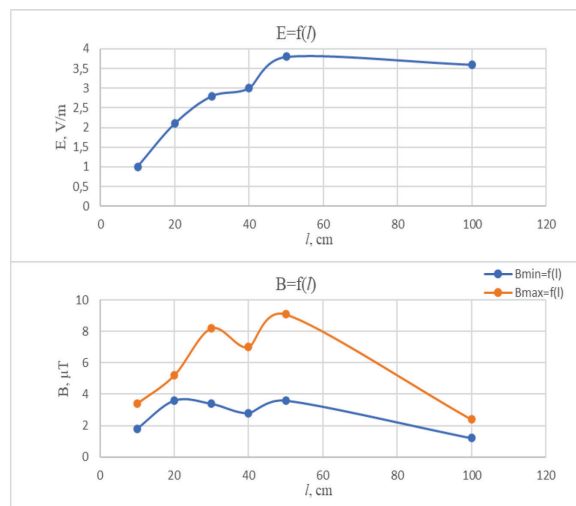




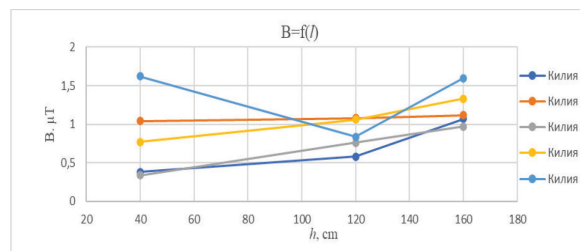
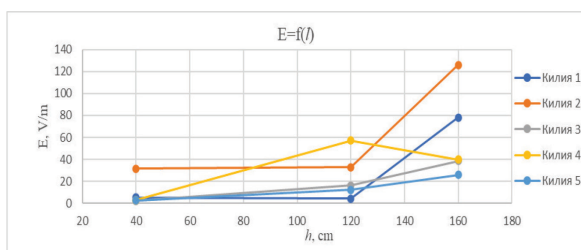
Фиг. 2. Стойности на E и B на АТЛ-9



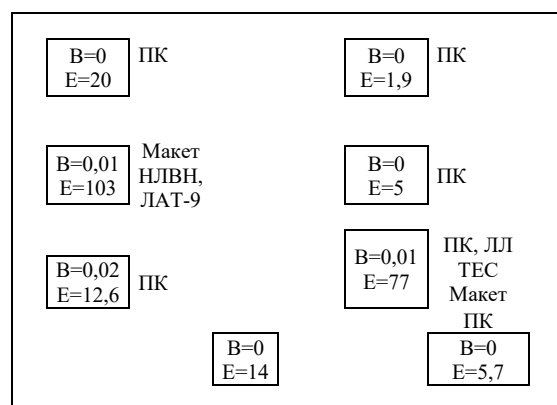
Фиг. 3. Стойности на E и B на ЕРТ в лаб. 4413



Фиг. 4. Стойности на E и B на ЕРТ



Фиг. 5. Стойности на E и B на ГРТ



Фиг. 6. Схема на работните места и измерените стойности на $E, V/m$ и $B, \mu T$ в лаб. 4413 (ПК – персонален компютър, ЛЛ – луминесцентни лампи).

От фиг. 1 и 2 се вижда, че първоначално с отдалечаване от източника на ЕМП има локално нарастване на електрическия интензитет в зоната 20 – 30 cm, което може да се обясни с по-широкия пространствен ъгъл който обхваща сондата от габаритите на източника. От фиг. 3 се вижда, че докато магнитната индукция е в спад, интензитетът, отчитан от уреда, нараства с увеличаването на разстоянието от таблото, което би могло да се обясни с приближаване на сондата към други източници на електрическо поле, намиращи се в лабораторията, тъй като електрическите товари в нея по време на измерването са постоянни по стойност. На фиг. 4, при сравнително постоянни стойности за E , има силно вариране във времето на магнитната индукция между отбелязаните минимални и максимални стойности. От фиг. 5 се вижда, че



разпределението на интензитета на електрическото поле, както и на магнитната индукция по различните килии е различно, както и по височина. Тези разлики биха могли да се обяснят с различните товари по килиите на ГРТ, а във височина освен с различните товари и с подредбата на съоръженията и апаратите в тях.

От фиг. 6 се вижда разположението на ЕМП с промишлена честота спрямо работните места в лабораторията и намиращите се там ПК и лабораторни макети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се каже, че величините за оценка на ЕМП (електрическият интензитет и магнитната индукция) не надхвърлят и са значително под референтните нива за ЕМП с промишлена честота – таб. 1.

В близост до изследваните обекти липсват излъчватели на радиовълни или антени на мобилни оператори и в измерването не е включено изследване за техните честоти.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност към проект BG05M2OP001-1.002-0023, Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Атанасова С. Физика с основи на биофизиката. Физика част 4. Тракийски универси-

тет, Стара Загора. // Atanasova S. Physics with the basics of biophysics. Physics part 4. Thrace University, Stara Zagora. https://edu.uni-sz.bg/book/24.AF_Fizika%20s%20osnovi%20na%20biofizikata-StAtanasova/all-lessons.html 24.10.2023г.

[2] НАРЕДБА № РД-07-5 от 15 ноември 2016 г. за минималните изисквания за осигуряване на здравето и безопасността на работещите при рискове, свързани с експозиция на електромагнитни полета // REGULATION No. RD-07-5 of november 15, 2016 on the minimum requirements for ensuring the health and safety of workers with risks related to exposure to electromagnetic fields

[3] 1999/519/EC Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)

[4] НАРЕДБА № 9 от 14 март 1991 г. за пределно допустими нива на електромагнитни полета в населени територии и определяне на хигиенно-защитни зони около излъчващи обекти // REGULATION No. 9 of march 14, 1991 on maximum permissible levels of electromagnetic fields in populated areas and determination of hygienic and protective zones around radiating objects

[5] Незадължително ръководство за добри практики при прилагане на Директива 2013/35/ЕС за електромагнитните полета Том 1, 2 и 3 // Optional Guide to Good Practice in the Implementation of Directive 2013/35/EU on Electromagnetic Fields Volumes 1, 2 and 3.



АНАЛИЗ НА ЗАГУБА НА ВИДИМОСТ ВЪВ ВИДЕО- ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТИ

ANALYSIS OF LOSS OF VISIBILITY IN VIDEO- SEQUENCES

Petya Em. Pavlova

*Faculty of Electronics and Automation
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv*

Boryana K. Pachedjieva

*Faculty of Electronics and Automation
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv*

Dobrinka L. Petrova

*Faculty of Electronics and Automation
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv*

Abstract

Analyzing the previous studies of surveillance data under different weather conditions, we extracted three main parameters that enter into all methodologies for images visibility estimation: mean value, deviation and correlated color temperature - CCT. The most of these methods use data bases of static images. We propose a dynamic tracking of the occurrence of visibility loss comparing parameters from different fields in a single image. Our approach relies on different distance of the objects in the field of view of the camera. The processing is performed on video-frames transformed into Dark Channel Prior Images. The criteria of an occurrence of loss of visibility have been defined via the values of:

- The lightness deviation;
- A CCT close to the white reference value;
- Magnification of deviation and CCT differences against the same parameters of a fixed area.

There are phenomena that lead to a false indication in the observed values: camera blinding due to the light source falling into the field of view, sunrise and sunset. We derived numerical criteria for the presence of these natural phenomena into an image.

The studies are accompanied by specially developed software and based on video-sequences collected from three different locations.

Keywords: natural phenomena in images, numerical criteria, video sequence analyses, visibility in the images.

ВЪВЕДЕНИЕ

Загубата на видимост в системи, ползващи изображения е сериозен проблем, особено когато става въпрос за задачи свързани с автоматизиран контрол. За основните атмосферни явления има разработени критерии и статистически модели, които са изведени от ограничен брой подходящи изображения [1] някои извлечени от специално създадени бази данни [2,3]. За проследяване на заслепяването при насрещен светлинен източник или силно отражение няма предложени решения. Разработките за филтриране на изображения при загуба на видимост поради мъгла, дъжд и сняг

използват систематично наблюдение на обекти и фиксиране на стойности на избрани параметри при добра видимост. Техниките за откриване на типа на смущаващия фактор и коригиране на изображенията използват – Dark Channel Prior Image (DCPI) – създаване на монохромно изображение от наличното бяло за всеки пиксел в изображение [4-6], набор от еталонни пробни образци с размер на снежинки и дъждовни капки за откриване и отстраняване на снеговалеж и дъжд [1,6], многостепенна обработка и анализ чрез невронни мрежи ползващи много проби за точно определяне на вида на конкретното явление [2,3]. Изчислителните алгоритми



оценяват обща промяна [3], плътност на мъглата [4], загуба на видимост на контурите на обектите [7,8], промените в малки области от цялата картина [6]. Използваните методи се разделят на такива, които правят филтрация и подобряване на видимостта на базата на предварително известен вид на изображението и такива, които ползват едно изображение, но привеждат формата на хистограмата към предварително зададен тип разпределение [9]. Постигането на ефективна корекция неминуемо изисква обработката на големи обеми данни. Използваните в момента техники с невронни мрежи [5] дават добра база за идентификация на метео условията, но работят с ограничени извадки което предполага възможност за грешка при възникване на непозната комбинация от условия. Отчитане на бързите изменения на атмосферните условия предполага обработка на непрекъснат видео поток, което изисква наличие на подходяща база тестови данни.

Цел и задачи

Целта на настоящото изследване е достигане до лесни за определяне параметри и ограничения, които биха позволили да се редуцира количеството обработвана информация и се осигури възможност за корекция на видимостта в реално време.

Задачите, които са поставени за изпълнение на този етап от изследването се свеждат до:

- анализ на съществуващите алгоритми и избор на подходящи параметри;
- разработване на методика за бърза оценка на избраните параметри;
- създаване на софтуер за пресмятане на избраните параметри във видео-последователност;
- създаване на набор от тестови видео записи с достатъчна информация за явленията, водещи до загуба на видимост;
- провеждане на тестове и анализи на получените данни за създаване на числени

критерии за настъпващо събитие със загуба на видимост.

ТЕОРЕТИЧЕН АНАЛИЗ

Анализ и обобщаване на използваните критерии за възпроизвеждане на числен критерии показват, че в основата на всички оценители влизат средна стойност на яркостта в пикселите и неговата девиация. За разработване на алгоритъм за определяне на промени в тях, свързани с настъпване на влошаващи видимостта условия бяха отчетени няколко допълнителни фактора:

-Зрителното поле на външните камери включва участъци на различно разстояние от тях;

-Загубата на видимост за обектите на различно разстояние се получава в различно време (кадър от последователността). По-далечните обекти губят по-бързо видимост.

Така възможността за бързо проследяване на настъпване на конкретно условие се свежда до проследяване на параметрите в различни области на сцената.

Специфичните естествени явления, като изгрев и залез са съпроводени от промяна на оцветяването на низходящата слънчева радиация. Параметърът, който характеризира цвета е корелираната цветова температура (CCT) съответстваща на референтно бяло. В изображението, нейното определяне става на базата на количеството бяло във всеки пиксел и има непосредствена връзка с DCPI.

В провежданите тестове са заложили следните хипотези:

1. Изменението на дисперсията в интензитета на бялото следва изменението на дисперсията на интензитета/яркостта в изображението;
2. Относителните изменения в дисперсията, средната стойност и цветовата температура могат да бъдат използвани за откриване на динамика във видимостта на сцената;



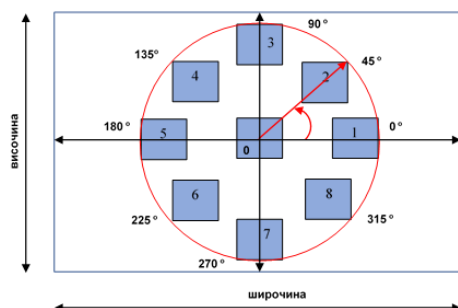
3. Прогресивна промяна във видимостта може да бъде открита чрез определяне на отклоненията на величините за различни пространствени области в сцената.

Извеждането на числени критерии за настъпване на дадено условие засяга серия явления:

- Поява на мъгла;
- Поява на дъжд;
- Поява на снеговалеж;
- Настъпване на мрак,
- Изгрев,
- Попадане на светлинен източник в наблюдавано поле.

ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ И МАТЕРИАЛИ

Разработеният софтуер разделя проекцията на сцената на 9 подобласти (patch) по схемата показана на фигура 1.



Фиг. 1 Разположение и номерация на подобластите в проекцията на сцената

Широчината и височината обозначават размерите на растера на изображението. Подобластите са квадратни с размер и позициониране такова, че да се вмести изцяло в растера. Предвид на ориентация на заснеманата сцена с включване на земя и небе по-близките обекти се разполагат в подобласти с номера 6,7 и 8.

За всяка подобласт се пресмятат минималната компонента от тройката цветообразуващи за всеки пиксел от

изображението; средна стойност в пача за тази компонента, дисперсията ѝ и корелираната цвetoва температура. Пресмятане на CCT цвetoва температура се прави чрез определяне на средна стойност за всяка от трите компоненти от които се създава DCPI. В таблица 1 са описани изходните данни от пресмятанията за всеки пач за всеки кадър във входна видео-последователност, които се извеждат във външен файл. Относителните изменения са фиксирани за определяне към опорно поле с номер 8.

Таблица 1 Извеждани параметри

параметър	значение
YYYY/MM/DD	година/месец/ден
HH:MM:SS	час:минути:секунди
avrage	средна стойност на яркостта на референтно бяло във всеки следен пач от един кадър
deviation	средно квадратично отклонение в референтното бяло във всеки следен пач от един кадър
xCCT, yCCT	координати на цветността на референтното бяло във всеки следен пач от един кадър
CCT	стойност на корелираната цвetoва температура в градуси Келвин всеки следен пач от един кадър
dAv	отклонение на средната стойност за текущ пач спрямо пач с номер 8
dDev	отклонение на средно квадратично отклонение за текущ пач спрямо пач с номер 8
dTc	отклонение на корелираната цвetoва температура за текущ пач спрямо пач с номер 8
patchN=	номер на пач от кадъра

Софтуерът е разработен на базата на библиотеката OpenCV, със съответните дефинирани видове променливи, обработки и налични ограничения. Подробно описание на алгоритъма е направено в публикацията [10].

Изследването на съответствията между едни и същи параметри пресметнати за начално изображение и DSPI е направено



върху общо 308 изображения, заснети с фотоапарат и стационарни камери при различни сцени: градски и планински пейзаж, в условия на слънце, облаци, дъжд, мъгла, мъгла със сняг.

За изследване на динамиката на измененията е създадена база данни от видео-последователности натрупана в продължение на година при различни годишни сезони от едни и същи външни видеокамери

<https://meter.ac/gs/nodes/html/current.html>.

Камерите са локализирани в НАО Рожен – обект Рожен и гр. Варна- обект Варна. Всеки запис е направен в продължение на 24 часа, като кадрите са заснемани през 30 секунди. Всеки кадър е с растер 1920 x 1080 пиксела. Резултатите са получени от анализ на общо 109 последователности. При всяка локализация пачовете с номер 3 обхващат небе, без допълнителни детайли, а тези с номер 7 – най-близките до камерата обекти и включват наземни обекти.

За разграничаване на явления, водещи до еднакви изменения в наблюдаваните параметри са селектирани изображения, с фиксирани условия при изгрев. Описанието им е дадено в таблица 2.

Таблица 2 Брой серии с еднакви условия при изгрев

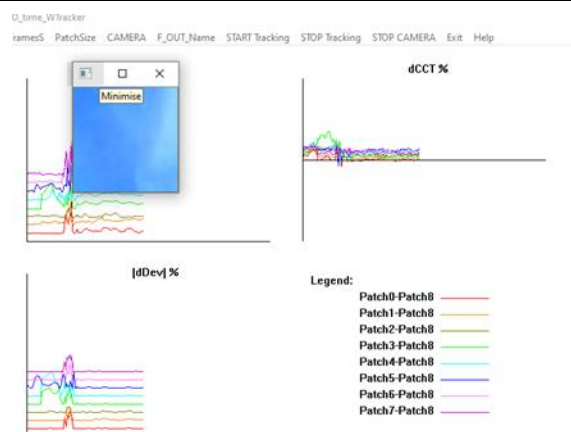
Условия	Ясно време	Лека облачност	Облачно	Наличие на мъгла
Брой	49	11	40	9

РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗИ

Софтуер

Разработеният софтуер позволява паралелно наблюдение на видимата сцена и изменение на проследяваните параметри. Екран на програмата е даден на фигура 2.

Анализ на кода извежда необходимост от редица корекции, които ще позволят данните да се извеждат от процесорна



Фиг.2 Екран на програмата

система, работеща в реално време на превозно или летателно средство. А именно:

- Използване на типове данни съобразени с разрядността на изчисляващия процесор и подходящи оператори осъществяващи необходимите аритметични и логически действия.
- Използване на динамични променливи, динамично заделяне и освобождаване на памет. Наличието на динамични променливи в програмната реализация и на функции за заделяне и освобождаване на памет предполага възможност за оптимизация на кода чрез замяната им.
- Оптимизиране на използваните билиотечни функции откъм бързодействие и създаване на собствена специализирана библиотека обслужваща реалновременна система.

Изследване на съответствие между избраните параметри

На фигура 3 е показан общ вид на изображения в начален вид и преобразувани в DSPI. Както може да се види, трансформацията не води до загуба на детайли в изображенията.

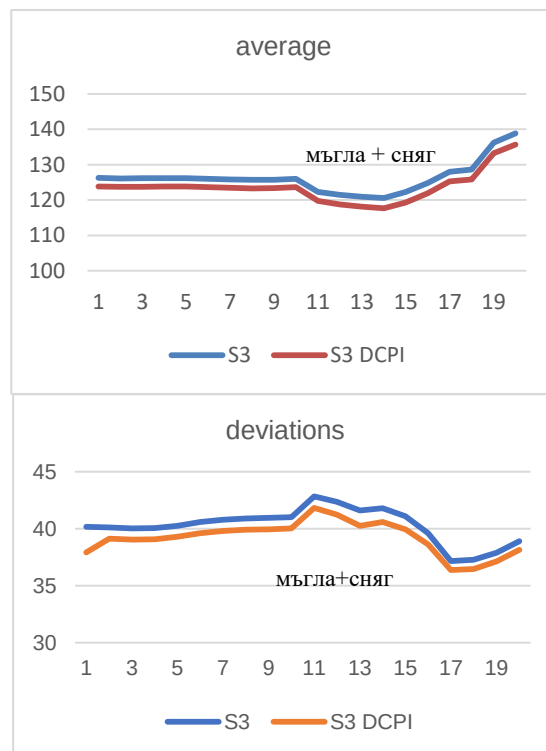
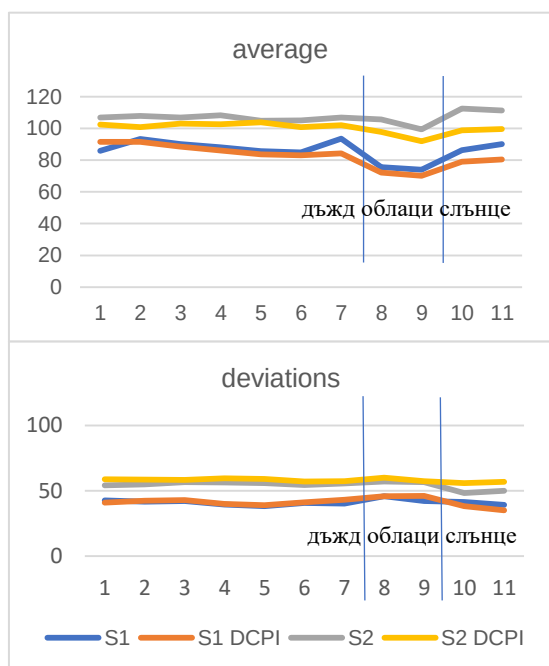
Отклоненията в средната стойност на яркостта и дисперсията ѝ при промени в атмосферните условия са дадени с графиките на фигура 4.



Фиг. 3 Начални изображения – а, и техни производни DCPI – б.

Съпоставка на данни от различни пачове показва синхронност в измененията за различните подобласти и разминаване при настъпване на явление, водещо до загуба на видимост. От получените резултати могат да се направят два полезни изводи:

- Сиво изображение от минималната компонента в цветообразуващите може да бъде използвано за извличане на параметри за следене на условията в сцената;
- В зрителното поле може да се намери област, спрямо която отклонението на параметрите за останалите следва общата промяна на същите във времето.



Фиг. 4 Изменение на параметрите в началните изображения и DSPI

Последното дава възможност да се избегне зависимостта от часа в денонощието и годишното време.

Извличане на числени критерии

Анализ на данните за начално описаните различни явления, дадох възможност да се изведат някои конкретни числени стойности за следените параметри, които указват наличието им. Резултатите са показани в таблица 2.

Таблица 2 Изведени критерии

	average	deviation	CCT	dCCT
мрак	-	-	=5459	=0
луна в кадър	нараства	-	=5459	=0
заслепяване	-	<1	-	≠0
изгрев	-	>1	≠5459	≠0
мъгла	-	<10	-	≠0



Изводите са направени при съпоставяне на пресметнатите стойности в подобластите и относителните изменения спрямо пач 8. В таблицата, заслепяването се отчита само за подобластта, в която попада светлинния източник.

Получените резултати са публикувани подробно в материалите от списъка с литература под номера [10],[11] и [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените изследвания може да се направи едно общо заключение – получените резултати дават база за следващи разработки по динамично следене на видимостта във видео-последователности.

Благодарности

Разработката е на основата на задачите в проекта финансиран от European Regional Development Fund по ОП “Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020”, за изграждане на център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ -№ BG05M2OP001-1.002-0023

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Roser M. and A. Geiger, "Video-based raindrop detection for improved image registration," IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, 2009, pp. 570-577, doi: 10.1109/ICCVW.2009.5457650.
- [2] Roser M. and F. Moosmann, "Classification of weather situations on single color images", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008, pp. 798-803, doi: 10.1109/IVS.2008.4621205.
- [3] J. Yan, J. Li, X. Fu, "No-reference quality assessment of contrast-distorted images using contrast enhancement", arXiv preprint arXiv:1904.08879, 2019.
- [4] Castelli R., P.Frolkovic, C.Reinhardt, C. C Stolk, J. Tomczyk, & A. Vromans. "Fog detection from camera images". In E.Cator, & R. J. Kang (Eds.), Proceedings of the 114th

European Study Group Mathematics with Industry: SWI 6, 2016, pp.25-43

[5] Gu K., D. Tao, J.F. Qiao, and W. Lin, "Learning a no-reference quality assessment model of enhanced images with big data". IEEE transactions on neural networks and learning systems, 29(4), 2017, pp.1301-1313.

[6] Archana H., M. Priya, A. Muthukumaravel, "Rain or Snow Removing in a Single Color Image - A Novel Algorithm", International Journal of Pure and Applied Mathematics 118 (20), 2018, pp.923-933.

[7] Mingming T., F. Tao, F. Yingle, W. Wei, S. Qingshan, and G. Haitao, "Image-Dehazing Method Based on the Fusion Coding of Contours and Colors", 2019

DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2945108,

[8] Domonkos V., "No-Reference Image Quality Assessment with Global Statistical Features", Journal of Imaging vol.7(2):29, February, 2021,

DOI: 10.3390/jimaging7020029

[9] Mohammadi P., A. Ebrahimi-Moghadam and S. Shirani. "Subjective and Objective Quality Assessment of Image: A Survey", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 9, No. 1, 2014, pp 55-83.

[10] Pavlova P., B. Pachedjieva, "Investigation on the possibilities of tracking dynamic visibility changes in images", Proc. XXX International Scientific Conference Electronics -ET2021,2021

DOI:10.1109/ET52713.2021.9579821

[11] Pavlova P., B. Pachedjieva,"Study of Limiting Factors in the Selection of a Learning Sample of Images for Automatic Tracking of Changes in Weather Conditions", Proc. XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, 2022

DOI: 10.1109/ET55967.2022.9920291

[12] Pavlova P., B. Pachedjieva, D. Petrova, "Derivation of numerical criteria for the occurrence of natural phenomena in video sequences", Proc.XXXII International Scientific Conference Electronics - ET2023, 2023

DOI: 10.1109/ET59121.2023.10278841



ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА В МОДЕЛИРАНЕТО НА ПЪТЕН ТРАФИК С ДАННИ ОТ РЕАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ

RESEARCH CHALLENGES IN MODELING OF ROAD TRAFFIC WITH REAL MEASURED DATA

Nikolay R. Kakanakov
*Technical University of Sofia,
branch Plovdiv*

Teodora A. Mecheva
*Technical University of Sofia,
branch Plovdiv*

Abstract

The article describes the experience gained in the extraction and processing of road traffic data from two traffic surveillance systems and building simulation models, based on different characteristics of the traffic flow. It identifies the challenges in extraction and cleansing the data from real traffic measurement units. It also discusses two options for building a road traffic model based on the number of vehicles passing through certain locations - a mathematical model based on theories for queue management and the use of an open source simulator.

Keywords: road traffic simulation; road traffic measurement, data acquisition.

INTRODUCTION

In the near future, the big cities will need to cope with several problems emerging from the expansion of the population. One of the important issues is the traffic jams and traffic safety. This makes road traffic optimization an important research topic. Before proposing some optimization methods, one should analyze the traffic and identify the main parameters that influence the traffic behavior [1].

As the road traffic in the cities is complex, due to the presence of many junctions, traffic lights and interacting parties, mathematical and simulation modeling are the main tools for analysis. As the mathematical models are more often used for more general analysis, the simulation can provide several layers of details, depending on the tools used [2].

Building a road traffic simulation model includes various components – road network, traffic flow data, selection of a simulation tool (traffic simulator), interaction model between agents, the models describing the time-space

coordinates of the vehicles (car-following model). Selecting appropriate data and adapting it to the simulator is one of the difficult tasks in road traffic simulation.

In the application of mathematical and simulation models, the main challenge is to adjust the parameters to reflect the real traffic in the road network under test. Many research activities are based on estimations or theoretical throughput of the roads, but the best results are achieved using real data [3].

As the integration of smart vehicles is not near the final line, the road traffic parameters are measured using: road-side units; sensors, integrated in the road; junctions cameras; and even drones. These methods provide different levels of accuracy and details [4].

The accuracy of the measurements and the processing for too detailed data can be implemented with different sensor fusion techniques. It can be crucial for the quality of the final results [5]

Presented paper will focus mainly on two of **the measuring methods: virtual detectors**



from traffic cameras (which exist in the Municipality of Plovdiv), and specialized road-side units (installed on an avenue in Plovdiv with the support of ongoing research project). It will also discuss the possibilities of using measured data as an input for implementing a simulation model in Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) [6].

VIRTUAL DETECTORS DATA ACQUISITION

This section describes the processing of traffic information from the information system of the municipality of Plovdiv in order to summarize the data from the measurements so that they can be used as input data for a simulation model of road traffic in the central part of the city.

The part of the road network in the city of Plovdiv between Ruski Boulevard (to the east), Osvobozhdenie Boulevard (to the west), Gladstone Street and Princess Maria Louisa Boulevard (to the north) and Hristo Botev Boulevard and Saint Petersburg Boulevard (to the south) is integrated into SUMO (Figure 1).



Figure 1: General map of investigated routes

The data from the data surveillance system of Plovdiv Municipality was chosen due to the fact that there are measurement facilities (cameras) at most key intersections in the city. The data is used by the Municipality to determine the length of green, red and yellow traffic light times in real time, in addition the municipality's database accumulates historical data from the measurements.

Figure 2 shows the position of the detectors at one of the investigated intersections.

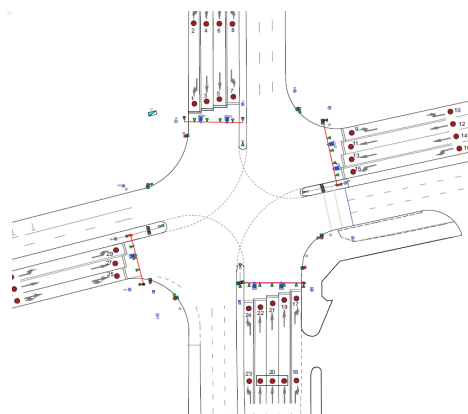


Figure 2: Detector positioning in intersection

For the purpose of the experiment, data for six intersections were used. Each report contains data on the number of vehicles entering each of the lines of the intersection per hour in Excel format.

Data for 8 intersections for the period from 15th January to 27th January 2021 have been processed. An extended dataset was formed, adding reports for the period 19 February to 19 March 2021 for 3 of the intersections to the main reports. Additional experiments were performed with the expanded data set.

Figure 3 depicts the load on one of the examined junctions for the period from 15 January to 27 January 2021. The morning and afternoon peak hours are clearly visible, as well as the difference in loads in working days and weekends.

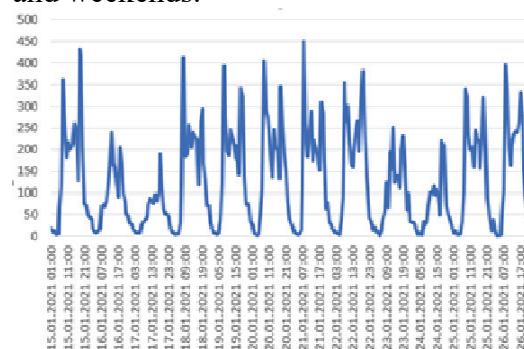


Figure 3: Traffic load distribution for a junction

Due to the cyclic nature of the data, it was divided into two datasets - working days and holidays. In each of the sets, the average values



for each hour of the day for each lane at each of the studied intersections were found.

An attempt was made to clean the data by applying an outlier detection algorithm, described in [7]. This alternative was rejected due to the impossibility of extracting data for longer periods due to limitations in the Plovdiv Municipality database interface. The simulation model was built on the average values of the raw data.

DATA ACQUISITION FROM HETEROGENEOUS MEASURING DEVICES

This section describes the processing of traffic information from the traffic surveillance system of the Technical University of Sofia, Plovdiv branch in order to use it as input data for the traffic simulation model. The advantage is that it contains detailed information about the exact time of passage of vehicles, speed, dimensions, as well as detailed weather data. The disadvantages are that the measurements were made in one location, and there are periods for which records from some facilities are missing.

The information system of Technical University has the following subsystems:

- 6 lines weight-in-motion subsystem with weight on axes detections for trucks;
- subsystem for measuring overall dimensions;
- Automatic Number Plate Recognition (ANPR) subsystem with cameras;
- Variable Message Sign;
- On road weather conditions measuring system, including temperature and thickness of the water film on the asphalt.

Additionally, the systems count traversing vehicles using data from infrared sensors and ANPR cameras.

The data from the information system of the technical university is accessible through a web interface, but also 24 hourly reports can be retrieved in excel format. For the purposes of the study, the data from the system for

measuring weight in motion were used. Reports have been extracted for periods of time for which we have data from the municipality's information system. The data is summarized in order to be in the same format as the municipal reports - number of cars passed per hour for each of the road lanes. Thus, another input data point is added to the simulation model.

IMPLEMENTATION OF TRAFFIC MODEL

Two approaches have been used to create a generalized model based on the real data in the Municipality of Plovdiv. One is to create a fully mathematical model based on theories for queue management and the other is to use an off-the-shelf road traffic simulator.

The investigation which is currently in progress is the application of Network Calculus as a deterministic traffic modeling for Internet in road networks. Network Calculus proposes an alternative to a queuing theory, which works with worst case boundaries [8]. Developing a reliable Network Calculus model for a particular city area will allow the users to predict queue sizes on traffic lights, overall delay for specific routes or traffic types (especially if some prioritization is applied for public transport).

For the development of a simulation model, Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) is used. It is important to find the best way to use the real measurement data as an input for the simulation [9]. The overall behavior of the traffic in the simulator can vary depending on the selected traffic generators [10]. The simulation model can be used to analyze the influence of some road closures to other main routes and to investigate the best traffic signal parameters for specific periods and to optimize preferred routes (e.g. city exit routes, routes to hospitals, schools, etc.) [11].

CONCLUSION AND FUTURE WORKS



The data from the information system of the Technical University could be used to adjust other parameters of the simulation model such as the average speed of the vehicles and dimensions. An interesting direction for future experiments is to build a model of the dependence of the parameters of the car-following model used in the simulator and the weather conditions.

Another important future direction of the research is to apply sensor fusion and/or big data algorithms to the raw data from sensors. It will help benchmarking the measurement tools and sensor and provide better data for further

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the European Regional Development Fund within the OP “Science and Education for Smart Growth 2014–2020”, Project CoC “Smart Mechatronic, Eco- And Energy Saving Systems And Technologies”, № BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCES

- [1] C.C. Okafor, O. Akinradewo, C. Aigbavboa and W.D. Thwala, “The future of smart city. A review of the impending smart city technologies in the world,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, p. 1107, doi: 012228.
- [2] Liu, C.; Liu, Z.; Chai, Y.; Liu, T. “Review of Virtual Traffic Simulation and Its Applications”, J. Adv. Transp. 2020, 9.
- [3] Romanowska, A.; Jamroz, K. “Comparison of Traffic Flow Models with Real Traffic Data Based on a Quantitative Assessment”, Appl. Sci. 2021, 11, 9914.
- [4] A. Kumar, R. Krishnamurthi, A. Nayyar, A. Kr. Luhach, M. S. Khan, A. Singh, "A novel Software-Defined Drone Network (SDDN)-based collision avoidance strategies for on-road traffic monitoring and management, " Vehicular Communications, Volume 28, 2021, 100313, ISSN 2214-2096, doi: 10.1016/j.vehcom.2020.100313
- [5] H. Y. The, A. W. K. Liehr and I. K. Wang, “Sensor Data Quality: a Systematic Review,” in Journal of Big Data 7, 11 (2020).
- [6] Eclipse SUMO—Simulation of Urban MObility. Available online: <https://www.eclipse.org/sumo/> (accessed on 1 November 2023).
- [7] Mecheva T. Outlier detection in traffic data set. AIP Conference Proceedings. Vol 2449. No. 1. AIP Publishing 2022.
- [8] Le Boudec, J.-Y., and Thiran, P. Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet, vol. 2050. 06 2004.
- [9] T. A. Mecheva and N. R. Kakanakov, "Traffic flow model based on real data," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579596.
- [10] Bautista, P. B.; Aguiar, L. U.; Igartua, M. A. “How does the traffic behavior change by using SUMO traffic generation tools”, Comput. Commun. 2022, 18, 8–10.
- [11] W. H. Lee and C. Y. Chu, “Design and implementation of a smart traffic signal control system for smart city applications”, Sensors, Vol. 20, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20020508>.



ЛАБОРАТОРИЯ ПО СПЕЦИАЛНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ В РОБОТИКАТА – СЪСТОЯНИЕ, ИЗСЛЕДВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВИ

LABORATORY OF SPECIAL ELECTRIC DRIVES IN ROBOTICS - CURRENT STATE, RESEARCH DIRECTIONS AND PERSPECTIVES

Ivan Kostov¹⁾, Sevil Ahmed²⁾, Ivanka Dimitrova³⁾

Control Systems Department, Technical University of Sofia,
Branch Plovdiv, 25 Tsanko Dyustabanov Street, Plovdiv, Bulgaria

¹⁾ijk@tu-plovdiv.bg

²⁾sevil.ahmed@tu-plovdiv.bg

³⁾id.dimitrova@tu-plovdiv.bg

Abstract

The paper is devoted to the current state, research directions and authors' view for the future development of the Laboratory of Special Electric Drives in Robotics. Therefore, an overview of the technical equipment in the laboratory is presented. Different technical modules, laboratory setups and research approaches concerning design and development of modern electric drives for the purposes of robotic systems and industrial automation are described. Main research directions are in the field of speed and position control, motion, and trajectory control, as well as production management. The applied approaches use the basic concepts of Control Theory for Linear Systems, implemented in various algorithms via specialised for electric drives modelling and simulation, and microcontroller prototyping softwares provided by Mathworks, Schneider Electric, SMC (Sintered Metal Corporation) and Texas Instruments. Summarising, it is concluded that more efforts are needed to achieve reliable and automated design solutions for the special electric drives which are in use of Robotics and Robotic Process Automation.

Keywords: electric drives, motor control, speed control, motion control, simulation, microcontroller programming, rapid prototyping, robotic systems

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години непрекъснато се увеличава кръгът от функционални изисквания, предявявани към автоматизираните системи за електромеханично преобразуване на енергията (Електрозадвигвания - ЕЗ) в индустрията, транспорта и специалното оборудване, повишават се изискванията към динамичните им характеристики и икономия на енергия, засилва се необходимостта от изграждане на алгоритмично програмно осигуряване, което по един или друг критерий може да бъде наречено „интелигентно“. Синтезът на управляващи алгоритми понастоящем представлява основен проблем в

съвременната теория на автоматичното управление на ЕЗ. Конфликтът, обусловен от липсата на методологична основа за изграждане на „интелигентни“ алгоритми за управление на ЕЗ и разширяващите се възможности на апаратните части (хардуера), става все по-остър, тъй като състоянието на съвременната силова техника и информационна технология вече позволява реализирането на елементи на „интелигентност“ (Intelligent Control) даже в сравнително евтини серийни системи за автоматично управление на ЕЗ (САУЕЗ, СУЕЗ). Признакът „интелигентност“ на управляемите преобразуватели на електрическа енергия в системите за ЕЗ не представлява използването на утвърдени



методи от изкуствения интелект като размита логика, невронни мрежи, генетични алгоритми и т.н. (както често се изтъква), а **функционална пълнота в решението на основните задачи на съвременната теория на управлението при прилагането върху такива сложни обекти като електрозадвижванията.** „Интелигентността“ на сегашния етап още се разглежда в смисъл на обезпечаване на удобен интерфейс между човека и микропроцесорната САУЕЗ, минимум ръчно настройващи се параметри на ЕЗ, но не и способност към самостоятелна постановка и решение на нови и нестандартни задачи.

Вече беше споменато, че структурите на индустриалните системи за управление на координатите на електромеханичните системи съответстват на линейната теория на управлението, изградени са като каскадни, в някои случаи като многоканални и многоконтурни системи.

Изводът е, че съществено развитие през последните 40 години претърпя:

- обогатяването на функционалните възможности;
 - комуникацията с високите нива на йерархичните системи;
 - усъвършенстване на обратните връзки по координатите, включително наблюдатели [5], [6];
 - усъвършенстване на /основно/ управлението на външните контури – за позициониране, следене, траекторно движение, съвместяване на движения /колаборация/
 - въведе се теорията на обобщената електрическа машина в практиката на управлението; (с това се създадох условия за масово приложение на синхронните двигатели)
 - надеждността на ЕЗ;
- Това, което не получи развитие:
- приложение на нови методи на управление на ЕЗ както на полево ниво, така и на системно и мениджърско ниво;

- въвеждане на автоматизираното проектиране на ЕЗ /т.нар. бързо прототипиране/ и функционалното проектиране на системно и мениджърско ниво.

ЛАБОРАТОРИЯ ПО СПЕЦИАЛНИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ В РОБОТИКАТА

Като част от научния проект „Роботика и интелигентни системи за автоматизация“ изградената по проекта лаборатория по специални електрозадвижвания в роботиката (СЕЗР) има за **цел** разработване на методи и алгоритми за интелигентно управление на движението на мехатронни механизми – мобилни, медицински, развлекателни и индустриални роботи с голям брой и специфични обратни връзки, подобрена реакция в условия на неопределена и/или отдалечена околна среда и увеличена надеждност и качество на локалното и отдалечено взаимодействие и управление. По този начин се подпомагат и научните изследвания.

От така формулираната цел произтичат редица задачи, които бяха сведени до следното:

- разработване на нови методи и съвременни технологии за управление на специални ЕЗ за различни изпълнителни механизми (актуатори) с цел повишаване и постигане на ново качество на движението на координатите;
- събиране и изпращане на данни (Cloud data collection) към центровете за данни с цел постигане на ефективна поддръжка на оборудването и елиминиране на потребността от прекъсване на работата на производствените механизми и агрегати. Отдалеченият достъп и статистическите данни ще позволяват на фирмите сигурно и ефективно да управляват, поддържат и подобряват системите за ЕЗ дистанционно. В случай на грешка или повреда системите за управление ще могат да бъдат



отдалечено диагностицирани и в повечето случаи – проблемът да бъде отстранен;

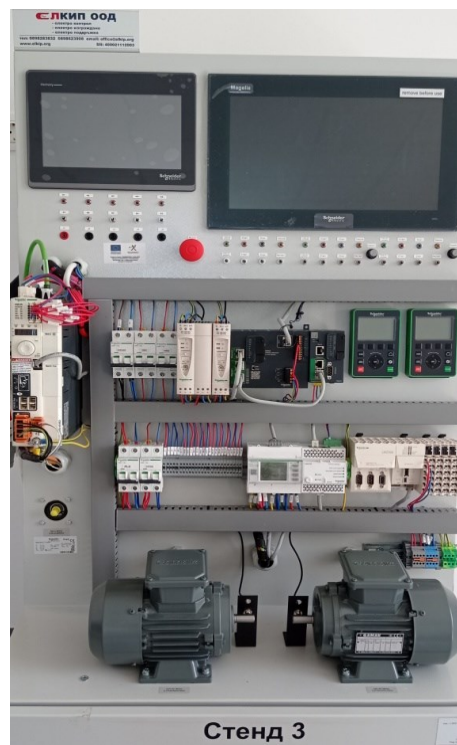
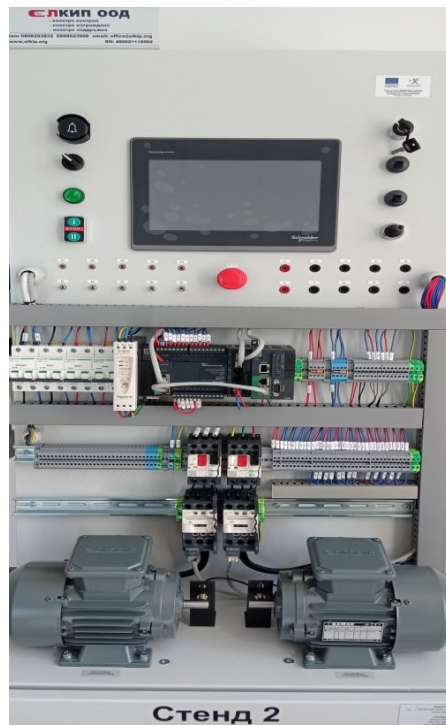
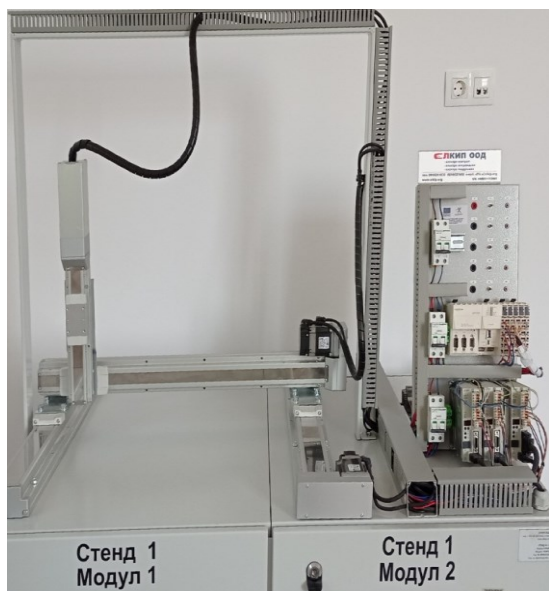
- провеждане на изследвания със съвременните индустриални системи за управление на движенията, свързани с оценка и подобряване на поведението на тези системи в нови и непознати среди и откръжение с цел постигане на функционална пълнота на поведението.

В лабораторията са изградени пет лабораторни стенда за обучение и провеждане на научни изследвания с ЕЗ и намиращи приложение в роботиката и индустриалната автоматизация, включващи:

- управление на движението на променливотокови сервозадвижвания с 3D интерполация - **стенд 1**;

- пускане и защита на електрозадвижвания - **стенд 2**;

- векторно управление на асинхронни двигатели и сервозадвижване със синхронен двигател и индустриални протоколи за комуникация (CANOpen, Modbus, Ethernet) – **стенд 3**;



Фиг. 1. Стендове 1, 2 и 3.

- специални електрически задвижвания за управление на захващащи устройства в роботизирани системи;



- интелигентно управление на автоматизирани системи.



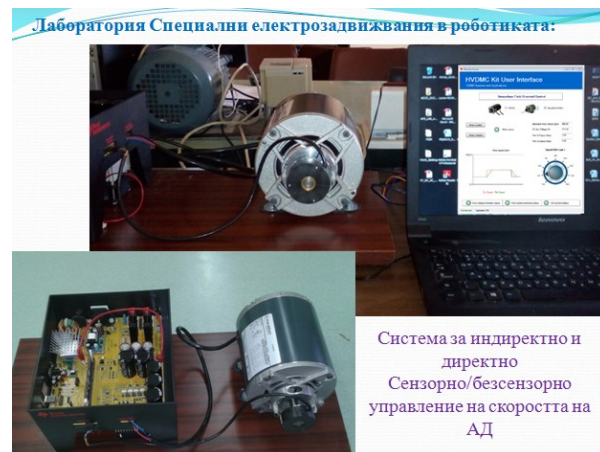
Фиг. 2. Стендове 4 и 5.

Доставени са модули за управление на специални ЕЗ включващи:

- модули за променлив ток – с безчеткови двигатели за постоянен и променлив ток;
- модули с постояннотокови и стъпкови двигатели;
- модули с трифазни асинхронни двигатели.

Стендовете се задвижват основно с фърмуер на фирмата Schneider Electric (SE) – честотни асинхронни електрозадвигвания и сервозадвигване

със синхронен двигател, и отчасти на фирмата SMC – сервозадвигвания на захващащи устройства и траекторни движения, а модулното оборудване – с фърмуер/софтуер на Mathworks (MATLAB) и Texas Instruments (TI).



Фиг. 3. Част от модулите за изследване и проектиране на специални електрозадвигвания в роботиката

ИЗСЛЕДВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИЯТА ПО СЕЗР

За времето на функциониране на лабораторията бяха извършени и публикувани следните изследвания и резултати:

- разработени са модели за настройка системи за управление на типови контури на електрозадвигвания за различни режими на работа и критерии на настройката [1], [3];
- разработен е метод за настройка на многоконтурни каскадни системи за управление на електрозадвигвания [1], [3];



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ ПЛОВДИВ 23



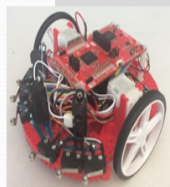
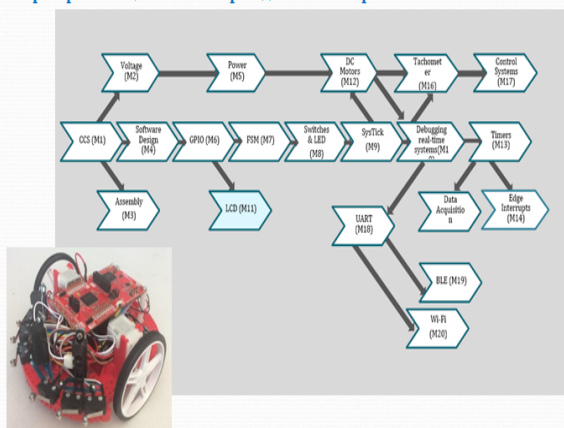
- изследван е модел на векторно асинхронно електрозадвигване /с ориентация по статорното потокосцепление/ за управление на скоростта с фокус определяне на ъгловата скорост на двигателя чрез невронна мрежа в условия на непълна информация за параметрите на двигателя [7], [9].

Проведени са серия научни изследвания, частично публикувани в изследователските отчети:

- Общи въпроси: Интелигентните машини и индустрия 4.0, индустриалните интернет на нещата и интелигентното производство, работни практически семинари, сервозадвигвания, SCADA и Machine Expert в роботиката – състояние и перспективи [8].

- Обучение: План и програма за обучение по електроинженерство за придобиване на знания и умения за управление на СЕЗР - стартиране на код чрез специализиран хардуер и софтуер (Фиг. 10), управление на двигатели за постоянен ток (Фиг. 4, 5 и 6), избор на сервозадвигвания и енкодери в роботиката, софтуер SoMove и SoMachine Expert за настройка, конфигуриране и управление на ЕЗ в роботиката и индустриалната автоматизация [8].

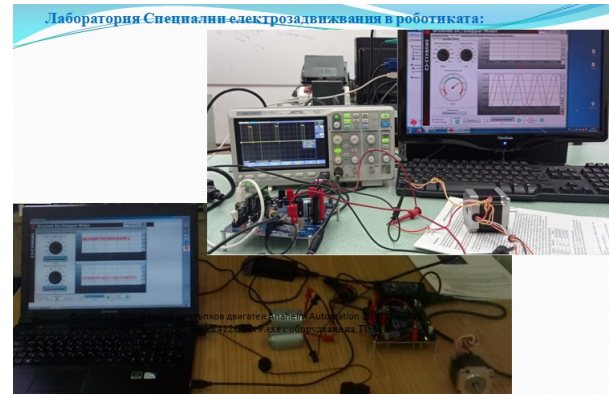
Лаборатория Специални електрозадвигвания в роботиката:



TI-RSLK Maze Robot

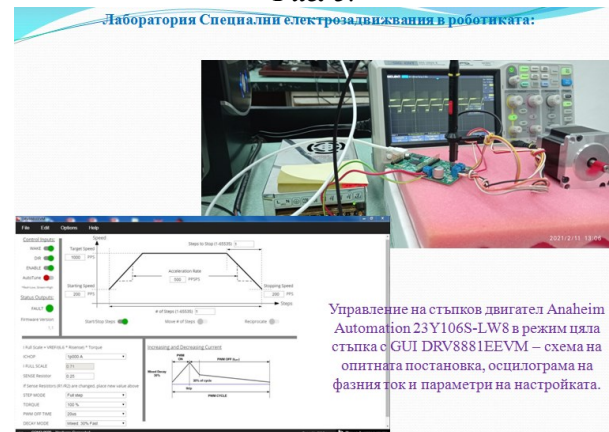
TI-RSLK: Модули за лабораторно обучение и пътна учебна карта

Фиг. 4. TI - Robotics Systems Learning Kit: The Maze Edition



Модул за изследване на постояннотокви и стъпкови електрозадвигвания и за лабораторно обучение

Фиг. 5.



Управление на стъпков двигател Anaheim Automation 23Y106S-LW8 в режим цяла стъпка с GUI DRV8881EEVM – схема на опитната постановка, осцилограма на фазния ток и параметри на настройката.

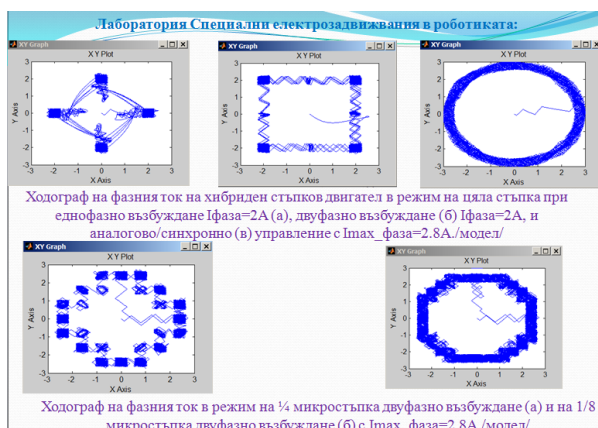


Управление на стъпков двигател Anaheim Automation 23Y106S-LW8 в режим 1/4стъпка с GUI DRV8881EEVM - схема на опитната постановка, осцилограма на фазния ток и параметри на настройката.

Фиг. 6.

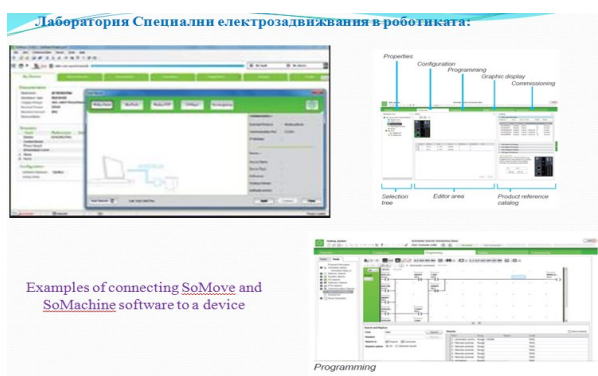
- Анализ и Моделиране: Сравнителен анализ на директно безсензорно и индиректно, сензорно управление на асинхронен двигател, интелигентна настройка на задвигване с хибриден стъпков двигател (Фиг.7), сравнителен анализ на методи за оценка на ъгловата скорост на асинхронни двигатели, сравнителен анализ на система за директно

векторно управление на скоростта на асинхронен двигател с ориентация по статорното, роторното и на намагнитващия контур потокосцепления [8].

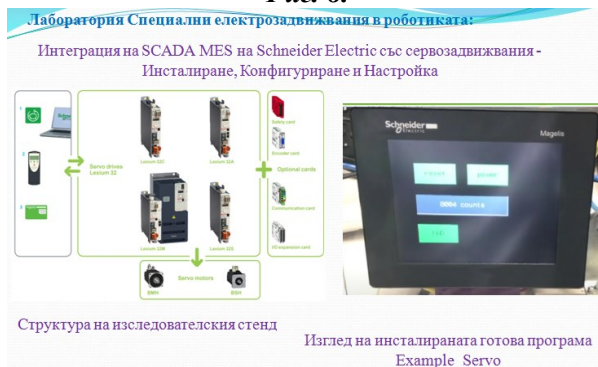


Фиг. 7.

- Разработване на проекти за управление на асинхронни и синхронни ЕЗ: Scada Machine Expert Software, SoMove; (Фиг. 8 и 9) изследване на технологията Smart Auto Tuning на TI за управление на стъпков двигател [8].



Фиг. 8.



Фиг. 9.

ПЕРСПЕКТИВИ НА ЛАБОРАТОРИЯТА ПО СЕЗР

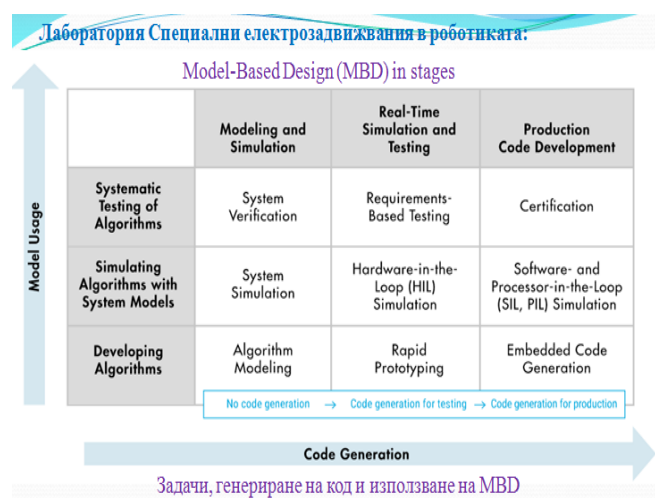
Проектирането на модерни електрозадвижвания с фокус методи за тяхното управление е сложен, многопластов и труден интелектуален процес, който изисква работа в екип на специалисти от различни области на управлението и научни направления. А проектирането и синтезът на управление на силовите преобразуватели се очертават като ключови фактори, които ще позволят да бъдат посрещани изискванията на индустриалната автоматизация - от захранващите източници до комплексно управление на координатите на ЕЗ [4]. Съществуващата технология на обучение по управление на електрически машини се основава на анализ в непрекъснато време, усреднено моделиране на преобразуватели на мощност с импулсен режим и теория на управлението в непрекъснато време. Обаче алгоритмите за управление и функциите за управление на силови преобразуватели се прилагат цифрово, следователно трябва да се разширява областта на изследванията до моделиране в дискретно време и цифрови концепции за управление, специфични за силовата електроника.

Необходимите знания могат да се постигнат чрез комбиниране на специални учебници и курсове по силова електроника и на теория на дискретните системи за управление. Понастоящем студентите и специалистите, които се занимават с проектирането на дискретни системи за управление не разбират напълно проблема именно заради празноти в знанията. Затова трябва да се запълни тази празнота, като се изучават основите и прилагането на дискретното управление на електромеханични системи по задълбочен системен и строг начин.

Фамилията C2000™ микроконтролери на TI е специално проектирана за цифрово



управление на затворени системи за управление на храняващи източници, индустриални електрозадвижвания и соларни инвертори. А средата Simulink® на Mathworks® е в състояние автоматично да генерира код [2], приложим за специфични вградени системи чрез работен процес, базиран на модел (Фиг.10). Като се имат предвид настройките, които позволяват използване във фонов режим на Code Composer™ Studio IDE на TI, модел на Simulink® може да бъде директно компилиран и изпълнен на C2000™ MCU. Следователно, тази автоматизирана и много ефективна процедура за изграждане и изпълнение на алгоритми за управление следва да бъде овладяна, за да се ускорява тестването и внедряването на нови структури на управление.



Фиг. 10.

Методите, техниките и технологиите по проектирането трябва да се изучават от специалностите по електротехника и управляваща техника.

Необходимо е да се обединяват знанията на научни работници от различни направления и уменията на специалисти от индустрията, занимаващи се с внедряване, експлоатация и поддръжка на системи за автоматизация на производството.

Разработването на системи за управление на движенията на полево ниво,

настройката им и оценка на свойствата и качеството на работните процеси извън полево ниво – на системно ниво, ниво мениджмънт, предприятие, облак и интелигентна фабрика също е много сложна задача.

ПРОБЛЕМИ НА ЛАБОРАТОРИЯТА ПО СЕЗР

Трябва да се въведе изучаването на теория на управлението, основана на дискретния характер на процесите, които протичат в системите за управление на движенията.

Необходимо е да се създават нови дискретни модели на обектите и на системите за управление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лабораторията се изпълнява комплекс задачи, които следват от поставената цел. Считаме, че за да се ускорят разработките на нови методи и алгоритми за управление са необходими обединени усилия на екипи от специалисти от университетите, инженеринга и производителите на хардуер в надпревара с времето.

Обединените усилия включват популяризиране и разширяване на изследванията в СЕЗР чрез семинари, обучения, закупуване на оборудване и генериране на интелектуална собственост.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност към проект BG05M2OP001-1.002-0023, Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ivan Kostov, Tuning of Control Loops of Electric Drives in Mechatronic Systems, Journal of the Technical University - Sofia, Plovdiv branch, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 26, 2020, Online ISSN 2603-459X. File Name: 186-Article Text-848-1-10-20200910.pdf//2020



- [2] Ivan Kostov, Nikola Shakev, Application of Texas Instruments Controllers for Electric Drives Control, Journal of the Technical University - Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications”, pp. 12, Online ISSN 2603-459X, File Name: 11263_463-Article_Text-1978-1-10-20230113.pdf//2021
- [3] Ivan Kostov, Tuning of cascade electric drive with current, speed, and position loops control. An example, 10th International Scientific Conference “TechSys 2021” – Engineering, Technologies and Systems/AIP Conf. Proc. 2449, 020015-1–020015-6; Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4397-6/\$30.00, pp. 6, <https://doi.org/10.1063/5.0091129>, File Name: 11260_40_0922_Tuning_of_cascade_electric_drive_An_example.pdf//2022
- [4] Mattia Rossi, Nicola Toscani, Marco Mauri, Francesco Castelli Dezza. Introduction to Microcontroller Programming for Power Electronics Control Applications: Coding With Matlab® And Simulink®, CRC Press; 1st Edition (30 September 2021), ISBN-10: 0367709856, ISBN-13: 978-0367709853, 430pp.
- [5] B. Ufnalski and L. M. Grzesiak, “Selected methods in flux estimation for induction motor drives”, Monograph edited by Teresa Orłowska-Kowalska, Poland, 2007.
- [6] B. Ufnalski, “An application of artificial neural networks to estimate rotor angular speed and stator flux in the cage induction motor drive system (in Polish),” Ph.D. dissertation, Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, 2005.
- [7] I. Kostov, S. Ahmed, Comparative Analysis of Adaptive Speed Estimation Methods of Induction Motor Drives, https://drive.google.com/file/d/11nhOrgFGHsf_cChuGaCNUmKxDIB2n3N8mL/view
- [8] Project_D03_SEZ_Library View: <https://drive.google.com/file/d/1R7cxzT-SZQXoDRo8uaqAiRV0bRO7Vrfo/view>
- [9] G. Ivanov, S. Ahmed, I. Kostov, “Angular Velocity Speed Estimation of Induction Drives Based on Neural Network MRAS Model With Fuzzy Learning Rate Adaptation”, Journal of the Technical University – Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications” Vol. 19, 2013, ISSN 1310 – 8271

Contacts:
BULGARIA
Control Systems Department
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg
sevil.ahmed@tu-plovdiv.bg
id.dimitrova@tu-plovdiv.bg



РАЗРАБОТВАНЕ НА IoT БЕЗЖИЧЕН СЕНЗОР С ИНФРАЧЕРВЕНА МАТРИЦА ЗА МОНИТОРИНГ НА УМЕН ДОМ

DEVELOPMENT OF AN IoT WIRELESS INFRARED ARRAY SENSOR FOR SMART HOME MONITORING

Galidiya Petrova

Technical University of Sofia, Plovdiv branch

Grisha Spasov

Technical University of Sofia, Plovdiv branch

Vasil Tsvetkov

Technical University of Sofia, Plovdiv branch

Abstract

Conceptual implementation of Active and Assistive Living (AAL) systems and monitoring systems in smart homes includes networks of sensors, analyzing modules and actuators that process data to detect events categorized as atypical, e.g. falls, assistance of daily user activities, monitoring and controlling environmental parameters and generating alarms and warnings to prevent incidents. Leading in the use of video мониторинг systems is compliance with ethical and legal norms and the related requirements for preserving confidentiality and non-intrusion into personal space. In this context, low-resolution infrared sensor arrays have become increasingly attractive over the past decade.

This paper presents the development and implementation of a wireless IoT device based on an infrared array sensor and its integration into a smart home monitoring system for detecting human presence, falls, or critical situations. The developed user web interface for configuring the IoT wireless sensor device is shown. A result of the captured raw image by the developed infrared array sensor with detected human presence in the kitchen and the switched-on stove is presented.

Keywords: Active and Assisted Living, low-resolution infrared sensor arrays, smart home monitoring systems, wireless IoT device.

ВЪВЕДЕНИЕ

Технологичните услуги за подпомагане и поддържане на активен начин на живот (Active and Assisted Living) са възможно решение за справяне с предизвикателствата пред здравните и социалните системи, произтичащи от демографските промени в настоящите икономически условия. AAL системите имат за цел да подобрят качеството на живот чрез поддържане на независим и здравословен начин на живот на възрастни и хора с увреждания [1]. AAL концепцията се базира на използване на нарастващото разпространение и ефективност на ИКТ системите, за да предостави

на хората в нужда интелигентна помощ, като отговори на техните нужди от автономност, независимост, комфорт, сигурност и безопасност. Характерно за последните години е развитието на видео-базирани AAL устройства с подобрени възможности за обработка, безжичен трансфер на данни и повишена оперативна съвместимост с други устройства и архитектури, от типа „интернет на нещата“ (IoT) [2].

Цялостната концептуална реализация на AAL система включва мрежи от сензори, анализиращи модули и изпълнителни механизми, които обработват данни с цел:



- откриване на събития категоризирани като атипични, например падания;
- изпращане на съответни аларми до специализирани центрове за здравни грижи;
- подпомагане на ежедневни дейности на потребителите;
- мониториране и контрол на параметрите на околната среда и генериране на аларми и предупреждения за предотвратяване на злополуки и инциденти.

Могат да бъдат посочени множество AAL решения базирани на камери, напр. за анализ на походката, откриване и предотвратяване на падания, рехабилитация, социална комуникация, лични асистенти, популяризиране на здравословен начин на живот, физиологично наблюдение, подкрепа за болногледачи и др [3]. Понастоящем обаче, тяхното широко приложение е ограничено поради трудности свързани със специфичните характеристики на домовете (претрупан интериор и затрудненията при видео анализ), както и заради етични и правни норми и свързаните с тях изисквания за запазване на поверителност и ненавлизане в личното пространство [4]. Безспорен факт е, че използването на камери дава възможност за по-надеждни AAL приложения, но често се възприема като твърде натрапчиво от крайните потребители. Толерансът от страна на потребителите би се увеличил, ако се създадат такива технологични реализации, гарантиращи поверителността при запазване на качеството и надеждността на предоставяните грижи.

През последното десетилетие [5], [6], [7], [8] инфрачервените (IR) сензорни матрици с ниска разделителна способност (8×8, 4×16, 16×16, 24×32 пиксела) стават все по-привлекателни в сценарии фокусирани върху:

- Мониториране на хора в домовете им за откриване на възможни извънредни ситуации;

- Отчитане на присъствието на хора в домовете и сградите;
- Засичане на стационарно положение или проследяване на движещи се хора в стая или сграда;
- Детектиране на падане или откриване на необичайна дейност за възрастни хора в тоалетни, бани, съблекални и др.

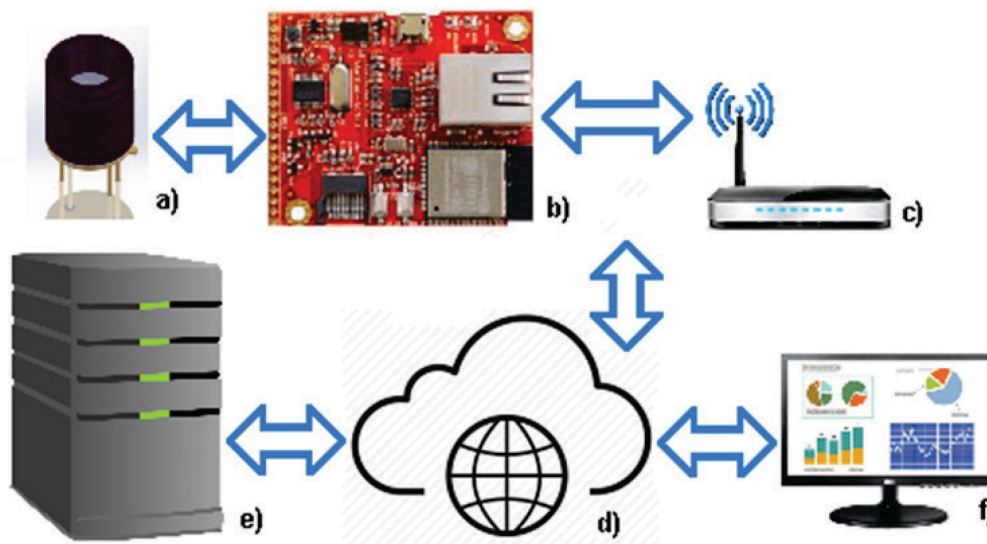
В настоящата статия е представена разработката и изследване на безжично устройство от типа IoT базирано на инфрачервен матричен сензор и интегрирането му към smart home мониторираща система за детекция на човешко присъствие, падане, или критична ситуация.

IoT БЕЗЖИЧЕН СЕНЗОР С ИНФРА-ЧЕРВЕНА МАТРИЦА MLX90640

Разработено е безжично сензорно устройство, което може да се приложи както в областта на AAL системите, така и в интелигентните системи за сигурност в домашна среда като достъпна алтернатива с ниска цена на инфрачервените камери. Основните компоненти на разработеното IoT решение са инфрачервеният матричен сензор MLX90640 с резолюция (32x24 пиксела) [9] и Wi-Fi хардуерен развоен модул с отворен код ESP32-GATEWAY [10], който може да се захранва от LiPo батерия или от адаптер. Развойният модул осигурява захранващо напрежение от 3,3 V към инфрачервения сензор. Възможността за работа с вътрешно батерийно захранване дава допълнителна гъвкавост на устройството за позиционирането му на труднодостъпни места без необходимост от допълнително окабеляване и захранване. Устройството, проектирано като IoT решение, е реализирано на база трислойна архитектура [11], където ESP32-GATEWAY изпълнява функциите както на слоя за събиране на данни (сензорния слой), така и като мрежов слой. Приложният слой е оставен отворен за потребителя, за да се адаптира към специфичните нужди на всяко

конкретно решение. Този подход осигурява възможност за разработване на множество приложения и гъвкава връзка с други смарт устройства чрез уеб интерфейс.

Функционална блок-схема на разработената система и базираното на IoT безжично сензорно устройство е показана на Фиг. 1.

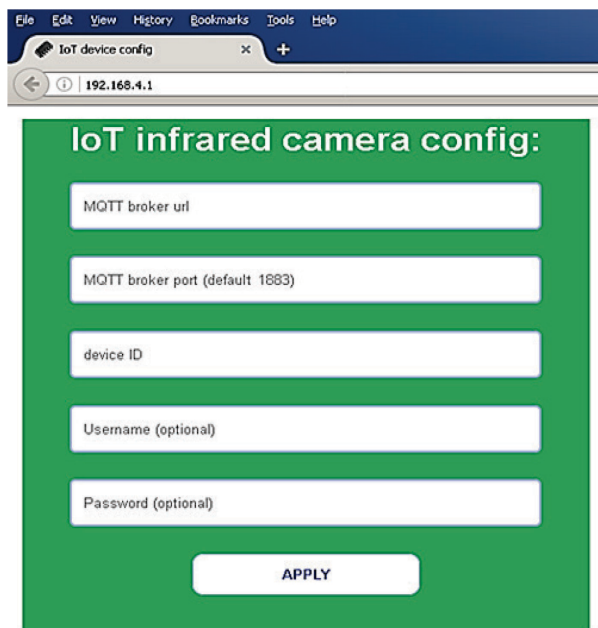


Фиг. 1. Функционална блок-схема на разработената система и базираното на IoT безжично сензорно устройство. а) MLX90640; б) ESP32-GATEWAY; в) рутер; д) интернет връзка; е) MQTT сървър; ф) MQTT клиент.

Модулът ESP32-GATEWAY Wi-Fi трябва да бъде в обхвата на рутер с активиран интернет (фиг. 1в), така че да има достъп до MQTT сървъра (фиг. 1е). MQTT сървърът или брокерът осигурява свързване на потребителя към IoT устройството. Той може да предостави данните от сензорното устройство на всеки клиент, който иска достъп до тях. За обмен на данни между IoT устройството, сървъра и потребителите е избран комуникационен протокол, ориентиран към съобщения MQTT [12], който използва схемата публикуване-абониране за взаимодействие с клиентите.

При стартиране на модула се извършва инициализация на ESP32-GATEWAY, която включва инициализация на енергонезависима флаш памет, където се съхраняват данните за конфигурацията на Wi-Fi и MQTT. ESP32-GATEWAY чете конфигурационните данни и извлича SSID и паро-

ла за точка за достъп (AP), които са предварително съхранени. Ако връзката с AP е успешна, потребителят може да използва SSID "ESP32-test-mqtt" и парола "test1234", за да се свърже временно към ESP32-GATEWAY (работещ в режим AP) чрез компютър или телефон. След това е необходимо да се отвори HTML страницата на IP адреса на ESP32 (192.168.4.1) и да се използва уеб интерфейса, показан на фиг. 2. Той позволява на потребителя да сканира локални AP и да избере желаната. След успешна връзка с желаната AP, ESP32-GATEWAY спира режима на AP и превключва в режим станция. След това съхранява SSID и паролата във флаш памет за по-нататъшна употреба. Уеб интерфейсът се използва също и за задаване на MQTT конфигурация: брокер, порт, потребителско име, парола, идентификатори и т.н.



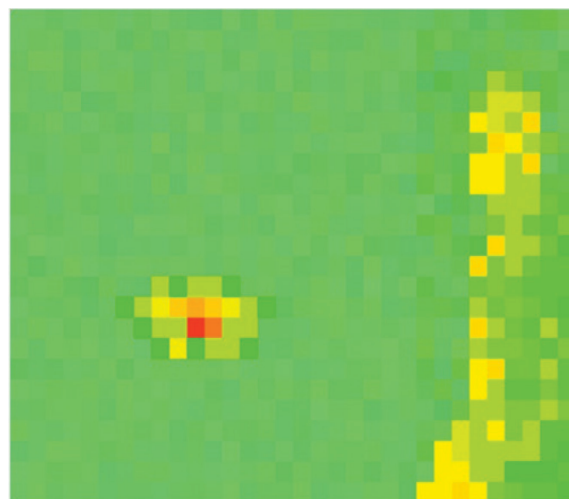
Фиг. 2. Потребителски уеб интерфейс

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Използвайки инфрачервения матричен сензор в реално време за откриване на човешко присъствие или падене е много удобно същият сензор да се използва и за наблюдение на състоянието на критични обекти в помещението. Например, изображението от определен обект (печка, котлон или др. домакински уред) може да бъде обработено и оценено, за да се установи дали има потенциално прегряване, включена печка или ютията, запалване на пожар. Такъв тип приложения са полезни и могат да бъдат интегрирани към системи за автоматизацията на интелигентния дом или системи за сигурност на дома. Ако се случи такъв сценарий, системата ще уведоми потребителя или пожарната служба, в зависимост от разработените топ приложения.

На фиг. 3 е показан пример за откриване на потенциална опасност от пожар - IR матричният сензор се намира в кухнята и е насочен към печката. Ако сензорът не засече присъствие на човек за определен период

от време, а регистрира включения котлон, се генерира предупредително съобщение до потребителя или оторизиран орган. Тези специфични подробности са описани в бизнес логиката на приложния слой на решението.



Фиг. 3. Изображение (без обработка) снето от IR матричен сензор със засечено човешко присъствие и включен котлон в кухнята.

На база разработеното IoT безжично устройство базирано на инфрачервен матричен сензор последващите изследвания са насочени към:

1. Реализиране на мрежа изградена от няколко IoT безжични устройства с IR матрични сензори, които са разположени на различни, определени като критични, места в жилището. Основната идея е устройствата с максимален брой на пикселите (32x24) да се разположат в помещенията, където типично присъстват хората – всекидневна и кухня. Устройствата с по-малък брой на пикселите (24x16) да се поставят на места където: има топлинни източници, например в спалнята, ако там има поставена отоплителна печка, радиатор, духалка и за евентуално хващане на запалена цигара в леглото и около леглото, което е типична критична ситуация при пушачи; за детектиране на падане в тоалетни, бани, съблекални, където изискването за запазване на



поверителност и ненавлизване в личното пространство е водещо; на преходните места – вход на баня/тоалетна, вход на спалнята или входната врата на жилището. 2. Устройствата да се сканират през 1-2 мин и изображенията да се съхраняват със записани датата и текущото време в Sensor Cloud за да се съберат достатъчно реални данни за тестване на различни алгоритми за разпознаване и категоризиране на критичните ситуации в дома, които са потенциално опасни за възрастните обитатели. Примери за опасни ситуации са: забравен включен котлон със/ без съд върху него; забравено спиране на водата в кухня/баня; при пушачите запалена и забравена (или паднала) цигара и т.н.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази статия е описано разработено решение на IoT безжично инфрачервено сензорно устройство, което може да се интегрира в системи от здравеопазването, AAL и интелигентни системи за сигурност в домашна среда. То е много удобно за проследяване на човешко присъствие, например в медицинско заведение, където пациентите могат да бъдат наблюдавани дори в банята, без да се нарушава личното им пространство.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработката е част от изпълнението на задачите в проекта финансиран от European Regional Development Fund по ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020“, за изграждане на център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ - BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Blackman, C. Matlo, C. Bobrovitskiy, et al., “Ambient Assisted Living Technologies for Aging Well: A Scoping Review”, J. Intell. Syst.; vol. 25 n.1, pp. 55–69, 2016.

- [2] G. Marques, “Ambient Assisted Living and Internet of Things in Harnessing the Internet of Everything (IoE) for Accelerated Innovation Opportunities”, IGI Global 2019.
- [3] “Active and Assisted Living: Technologies and Applications” F. Florez-Revuelta; A.A. Chaaraoui Eds EIT ISBN: 9781849199872, 2016.
- [4] Chaaraoui A., Padilla-López J., Ferrández-Pastor F., Nieto-Hidalgo M., Flórez-Revuelta F., “A vision-based system for intelligent monitoring: human behaviour analysis and privacy by context”, Sensors, vol. 14 no. 5, pp. 8895–8925, 2014.
- [5] Maaspuro M., “Infrared Occupancy Detection Technologies in Building Automation - a Review”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 13, No. 19, OCTOBER 2018, ISSN 1819-6608, p.8055-8068.
- [6] Karayaneva Y., Baker S., Tan Bo, Jing Y., “Use of Low-Resolution Infrared Pixel Array for Passive Human Motion Movement and Recognition”, British HCI 2018, ACM, UK, <http://dx.doi.org/10.14236/ewic/HCI2018.143>
- [7] Tao L., Volonakis T., Tan Bo, Jing Y., Chetty K., and Smith M., “Home Activity Monitoring using Low Resolution Infrared Sensor Array”, arXiv:1811.05416v1 [cs.CV], 13 Nov 2018, p.1-8.
- [8] Trofimova A., Masciadri A., Veronese F., Salice F., “Indoor Human Detection Based on Thermal Array Sensor Data and Adaptive Background Estimation”, Journal of Computer and Communications, 2017, 5, pp. 16-28, ISSN Online: 2327-5227.
- [9] <https://www.melexis.com/en/product/MLX90640/Far-Infrared-Thermal-Sensor-Array>
- [10] <https://www.olimex.com/Products/IoT/ESP32/ESP32-GATEWAY/open-source-hardware>
- [11] Ala Al-Fuqaha et al., “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”, IEEE Communication Surveys & Tutorials, VOL. 17, No 4, 2015, Page(s): 2347–2376, ISSN: 1553-877X, DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095
- [12] Kashyap M., Sharma V., Gupta N., “Taking MQTT and Node Mcu to IOT: Communication in Internet of Things”, 2018 Elsevier Procedia Computer Science 132, pp.1611–1618, DOI: 10.1016/j.procs.2018.05.126



РАЗШИРЯВАНЕ ПОДСИСТЕМА ЗА МЕТЕОРОЛОГИЧНА ИНФОРМАЦИЯ С IoT БАЗИРАНА СИСТЕМА ЗА НАБЛЮДЕНИЕ НА ОКОЛНАТА СРЕДА

EXTENDING THE WEATHER INFORMATION SUBSYSTEM WITH AN IoT-BASED ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM

Grisha Spasov

TU-Sofia, Plovdiv branch

Stefan Lishev

TU-Sofia, Plovdiv branch

Galidiya Petrova

TU-Sofia, Plovdiv branch

Abstract

Traffic measurement systems are an essential part of Intelligent Transportation Systems (ITS). In addition to the traffic monitoring subsystems, another important subsystem is the meteorological information measurement system. In this article a novel hybrid dual-band IoT system based on LoRa and LoRaWAN for environmental monitoring is presented. It has extended range due to the use of specific architecture, which consists of LoRaWAN end devices that create custom LoRa networks. The paper shows the design, implementation and the initial results of the proposed system, tested in a real-world scenario. Different environmental parameters are monitored such as temperature, humidity, atmospheric pressure, volatile organic compounds and ionizing radiation. It could be used also for indoor as well as outdoor city air pollution monitoring as a supplement to intelligent transport systems.

Keywords: intelligent transport systems; environmental monitoring; IoT system; LoRa and LoRaWAN.

INTRODUCTION

Intelligent transportation systems help better organization of traffic in big cities and optimize traffic behavior. One very important part of them is the weather monitoring subsystem. It helps to make correlations between traffic intensity, environmental pollution and weather conditions. Different solutions for environmental monitoring can be found in the literature. In [1] the authors use sensors of the MQ family such as MQ-135, MQ-9 for sensing, controlled by Arduino Mega 2560, and data are stored on SD card for processing. The essential drawback of this solution is the use of sensors that have high energy consumption. In [2] the used sensors are MQ-135, MQ-136, MQ-9, DHT11, PMS3003, MiCS-4514 and some others but

again the major drawback of these solutions is the higher power consumption.

The presented work aims to overcome these drawbacks with using digital sensors and LoRaWAN modem with low power consumption and real time response. On the other hand, LoRaWAN gateways could be flooded with too much traffic when too many devices are used in small urban area. For this reason, new communication architectures are needed to overcome this problem.

There are different solutions in the literature like multihop networks, that extend the coverage area and improve energy efficiency [3]. Because of the Aloha-like nature of LoRaWAN there are some efforts made for improving reliability under large scale deployments [4].

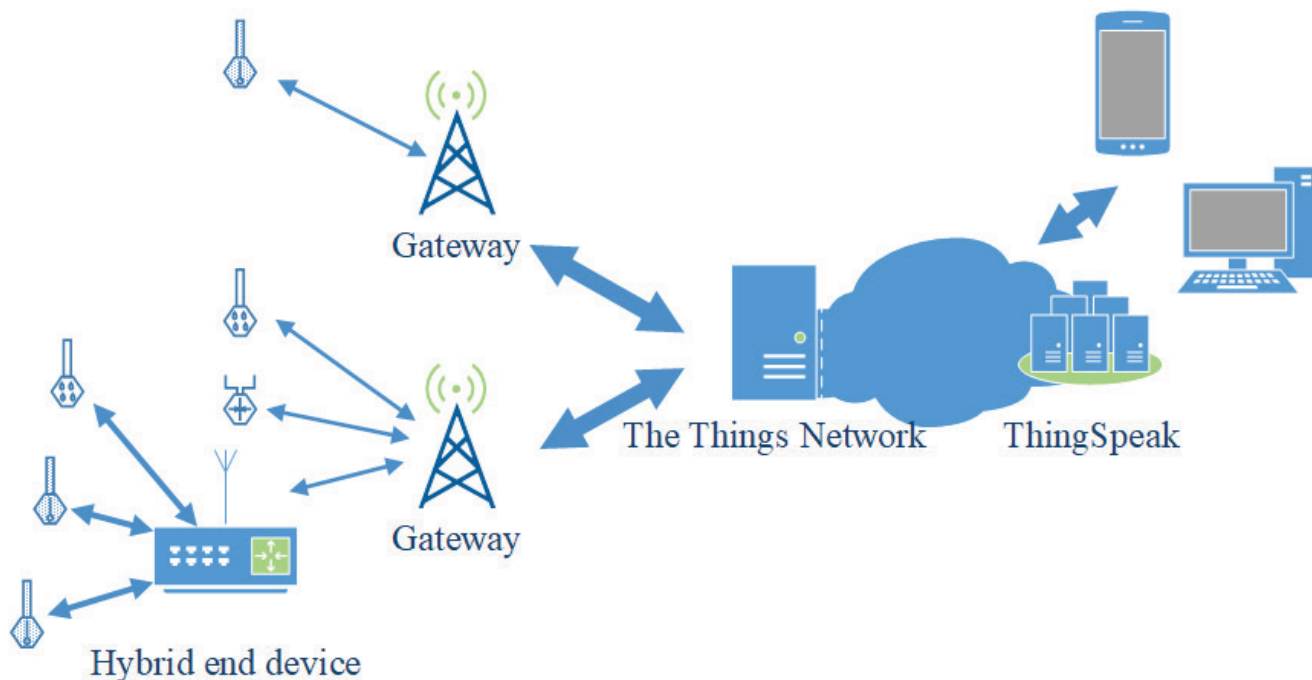


Fig. 1. The proposed system architecture

SYSTEM ARCHITECTURE

The proposed system architecture is presented on Fig. 1. It uses as basis the classical LoRaWAN architecture, that consists of end devices connected to gateways, network server and application server. In this case the role of network server plays The Things Network (TTN) cloud service. It communicates with ThingSpeak, which is an open IoT platform with MATLAB analytics and is used as integration for TTN.

The developed hybrid end device creates a custom LoRa network for end devices with environmental sensors, which operate in the 433MHz band.

The developed device operates as master and the end devices that communicate with it are slaves. The master sends at regular intervals requests to a selected end device and relays the data to the upper layers of the LoRaWAN network. This allows the network to cover much broader area of interest without collisions with the 915MHz LoRaWAN radio band and without traffic data overload.

END DEVICE CIRCUIT DIAGRAM AND COMPONENTS

The electric diagram of the proposed end device is presented on Fig. 2. It is powered by Lithium polymer battery with capacity of 6600mAh. It is the main power source of the device together with two photovoltaic cells for charging the battery. They are rated as 6V nominal voltage, 1W power each cell. The end device is controlled by system on module (SoM) CubeCell Dev-Board Plus (HTCC-AB02). The microcontroller is based on ARM® Cortex® M0+ Core processor, operating at 48MHz. It has 16Kbytes of SRAM and 128Kbytes FLASH memory for the program. The module has integrated lithium management system with SH1.25-2 battery interface as well as solar energy management system that allows direct connection of solar panels. The end device performs acquisition of several environmental parameters with its sensors – SCD40, AHT21 and ENS160. They are connected with I²C interface bus operating at 3.3V.

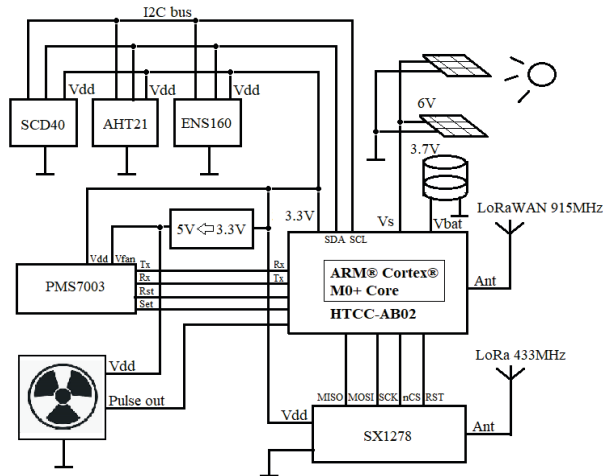


Fig. 2. Block diagram of the developed hybrid end device

The SCD40 is CO₂ sensor from Sensirion Corp. It uses technology for sensing CO₂ called photoacoustic non-dispersive infrared spectroscopy [5]. This method uses infrared light with 4260nm, which is absorbed by the carbon dioxide molecules, causing excited molecular vibrations. They increase translational energy and this causes periodic change in pressure of the measuring cell, that translates into sound waves, measured by micro-electromechanical systems (MEMS) microphone.

The sensor AHT21 is used for temperature and humidity measurement of the ambient air. The two sensors are paired for temperature and humidity compensation and are integrated into one module.

The sensor ENS160 measures total volatile compounds (TVOC) and equivalent CO₂ (eCO₂) using MEMS hotplate coated with metal oxide semiconductor (MOx). It has broadband sensitivity for both reducing and oxidising gases – H₂, ethanol, methane, toluene, acetone, n-octane, CO and formaldehyde.

For particulate concentration measurement is used the sensor PMS7003. It uses the Rayleigh scattering effect [6],[7]. The sensor uses laser to radiate suspended particles in the

air. It gives the concentration of particles in three ranges as follows: between 0.3 – 1.0, 1.0-2.5 and 2.5-10µm in µgr per cubic meter volume of air. The sensor communicates with the microcontroller via serial interface.

The gamma ray detector module is based on J305 tube, which supports ionising radiation measurement from 20mR/h to 120mR/h. The output is in the form of pulses. The required supply voltage for the fan as well as the supply voltage of the particulate matter sensor is 5V. Because of this is added an impulse step-up voltage converter from 3.3V to 5V as shown on the figure. All measured parameters by the sensors are summarized in Table 1.

Table 1.

Sensor	Parameter	Range	Unit	Accuracy
ENS160	TVOC	0 ÷ 65 000	ppb	-
ENS160	eCO ₂	400 ÷ 65 000	ppm	-
AHT21	Temperature	- 40 ÷ 120	°C	±0.3
AHT21	Relative Humidity	0 ÷ 100	%	±2
SCD40	CO ₂	400 ÷ 2000	ppm	±50
PMS7003	Particulate matter 0.3 - 10µm	0 ÷ 500	µg/m ³	±10
J305	Gamma radiation	20 ÷ 120	mR/h	-

The microcontroller module has integrated SX1262 on board and supports LoRaWAN v1.0.2 connection. It is added additional LoRa module SX1278, that is used for the custom LoRa network in the 433MHz band. It is connected to the microcontroller using SPI interface.

RESULTS

The developed system is tested in a real-world scenario. The measured data is sent by the developed hybrid end device to The Thing Network, which acts as a network server. A connection is made to ThingSpeak platform, where the data is visualized and further processed in MATLAB. The test results of the air

temperature measurement can be seen on the ThingSpeak chart, as shown on Fig. 3.

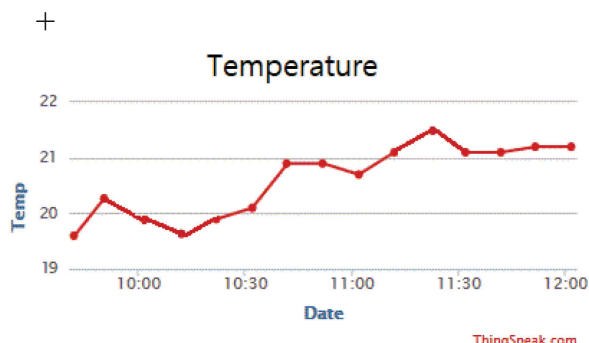


Fig. 3. The test results of the air temperature measurements

CONCLUSION

This paper presents the architecture and implementation of a novel hybrid dual-band IoT system based on LoRa and LoRaWAN, along with the developed hybrid LoRaWAN device. Initial tests were carried out to measure the air temperature as a proof of concept. Future work includes designing and testing more end devices connected to the developed hybrid LoRaWAN device and creating a network that can be evaluated in terms of system latency and reliability. One limitation of this study is the use of inexpensive sensors that have not yet been calibrated, and this is a further issue in future investigations.

This work is supported by the European Regional Development Fund within the framework of the Operational Program \Science and Education for Smart Growth 2014-2020, project CC\ Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies, No BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCES

- [1] Todorov, A.; Gicheva, P.; Stoykova, V.; Karapetkov, S.; Uzunov, H.; Dechkova, S.; Zlatev, Z. Environmental Monitoring in Bus Transportation Using a Developed Measurement System. *Urban Sci.* **2023**, *7*, 90, <https://doi.org/10.3390/urbansci7030090>
- [2] Waheb A. Jabbar, Thanasrii Subramaniam, Andre Emelio Ong, Mohd Iqmal Shu'Ib, Wenyan Wu, Mario A. de Oliveira, LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring, *Internet of Things*, vol. 19, 2022, 100540, ISSN 2542-6605.
- [3] Jeferson Cotrim, J. Kleinschmidt, An analytical model for multihop LoRaWAN networks, *Internet of Things*, Vol. 22, 2023, 100807, ISSN 2542-6605
- [4] C. Garrido-Hidalgo, L. Roda-Sanchez, F. Ramirez, A. Fernandez-Caballero, T. Olivares, Efficient online resource allocation in large-scale LoRaWAN networks: A multi-agent approach, *Computer Networks*, vol 221, 2023, 109525, ISSN 1389-1286.
- [5] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7248969/>
- [6] David L. Andrews, Rayleigh Scattering and Raman Effect Theory, Editor(s): John C. Lindon, George E. Tranter, David W. Koppenaal, *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Third Edition)*, Academic Press, 2017, pp. 924-930, ISBN 9780128032244
- [7] Tang, D.; Ju, Z.; Wang, L., Simulation and Experimental Research on the Charged Characteristics of Particulate Matter in the Sensor under Different Exhaust States, *Sensors* **2020**, *20*, 6226.



АКРЕДИТАЦИЯТА ПО ISO 17025 – ВЪЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТ НА ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИ МЕХАНИЧНИ ИЗПИТВАНЯ НА МЕТАЛИ

ACCREDITATION ACCORDING TO ISO 17025 – POSSIBILITIES AND FIELD OF APPLICATION IN MECHANICAL TESTING OF METALS

Angel Petrov Anchev
Technical University Gabrovo

Abstract

Part of the activities in the implementation of the Competence Center project "Intelligent mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies" was to accredit a group of laboratories according to the international standard ISO 17025. The report presents the possibilities of the equipment in connection with the accreditation of the sector "Energy-saving technologies for extension of the life cycle and increasing operational security", as part of the laboratory complex. The possibilities of the equipment and the field of application of the machine for dynamic and static tests ZWICK Vibrophore 100 and the semi-automatic microhardness tester ZWICK/Indentec - ZHV μ -S are presented. By means of the results obtained from the calibration of the machines and the participation of the laboratory in an inter-laboratory international comparative test, the accuracy of the obtained results in the determination of the stated mechanical quantities has been proven.

Keywords: Mechanical testing of materials; ISO 17025.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременната индустрия все повече се нуждае от разнообразни по своята същност, точни - като резултат и бързи - по време експерименти. Резултатите от тях осигуряват доказателства за високото качество на вложените материали в получените изделия, както и на самите тях във всички сфери на индустриалното производство. Повишените изисквания, както към качеството така и към количеството на произведената продукция води до необходимостта от въвеждането на стандартизирани процедури за работата на лабораториите за изпитване и калибриране, които са основния инструмент за доказване на постиганото качество на създадения продукт или материал.

Международната организация по стандартизация въвежда преди повече от 30 години поредица от международни стандар-

ти за управление на процесите в лаборатории за изпитване и/или калибриране, първоначално ISO 45001, впоследствие, през 2001, ISO 17025. За осигуряването на получаваното качество са необходими и стандарти за изпитване на материали и изделия, които формират обхвата на една лаборатория притежаваща система за управление в съответствие с изискванията на международният стандарт ISO 17025 [1].

Целта на настоящия доклад е представяне на обхвата на лаборатория „Енергоспестяващи технологии за удължаване на жизнения цикъл и повишаване на експлоатационната сигурност“ (ЕТУЖЦПЕС), като част от лабораторния комплекс изграден към Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" в Технически университет – Габрово.



ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Обхват на лабораторията

В изпълнение на изискванията на органът по акредитация в Република България

– Българска служба по акредитация, лабораторията е заявила обхват представен в таблица 1.

Таблица 1. Обхват на лаборатория ЕТУЖЦПЕС

№ по ред	Изпитвани продукти	Вид на изпитване/ характеристика	Обхват на изпитването, съгласно изискванията на метода	Методи за изпитване (стандартизирани/ валидирани)	Използвани технически средства
1	2	3	4	5	6
1	Метали и метални сплави	Якост на опън;	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Граница на провлачване;	1÷4000 МПа	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Относително удължение при разрушаване;	0 ÷ 100 %	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Относително свиване при разрушаване;	0 ÷ 80 %	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Ъгъл на огъване	0÷100 ⁰	БДС EN ISO 7438	Vibrophore 100
		Изпитване на твърдост по Vickers	0,01÷2 Kgf	БДС EN ISO 6507-1	ZHVμ-S
2	Заварени съединения от метални материали	Якост на опън – надлъжно на заваръчния шеф	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Граница на провлачване - надлъжно на заваръчния шеф	1÷4000 МПа	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Относително удължение - надлъжно на заваръчния шеф	0 ÷ 100 %	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Относително свиване - надлъжно на заваръчния шеф	0 ÷ 80 %	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Ъгъл на огъване	0÷100 ⁰	БДС EN ISO 5173	Vibrophore 100
		Якост на опън – напречно на заваръчния шеф	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 4136	Vibrophore 100
		Максимална сила – напречно на заваръчния шеф	100÷100000 N	БДС EN ISO 4136	Vibrophore 100

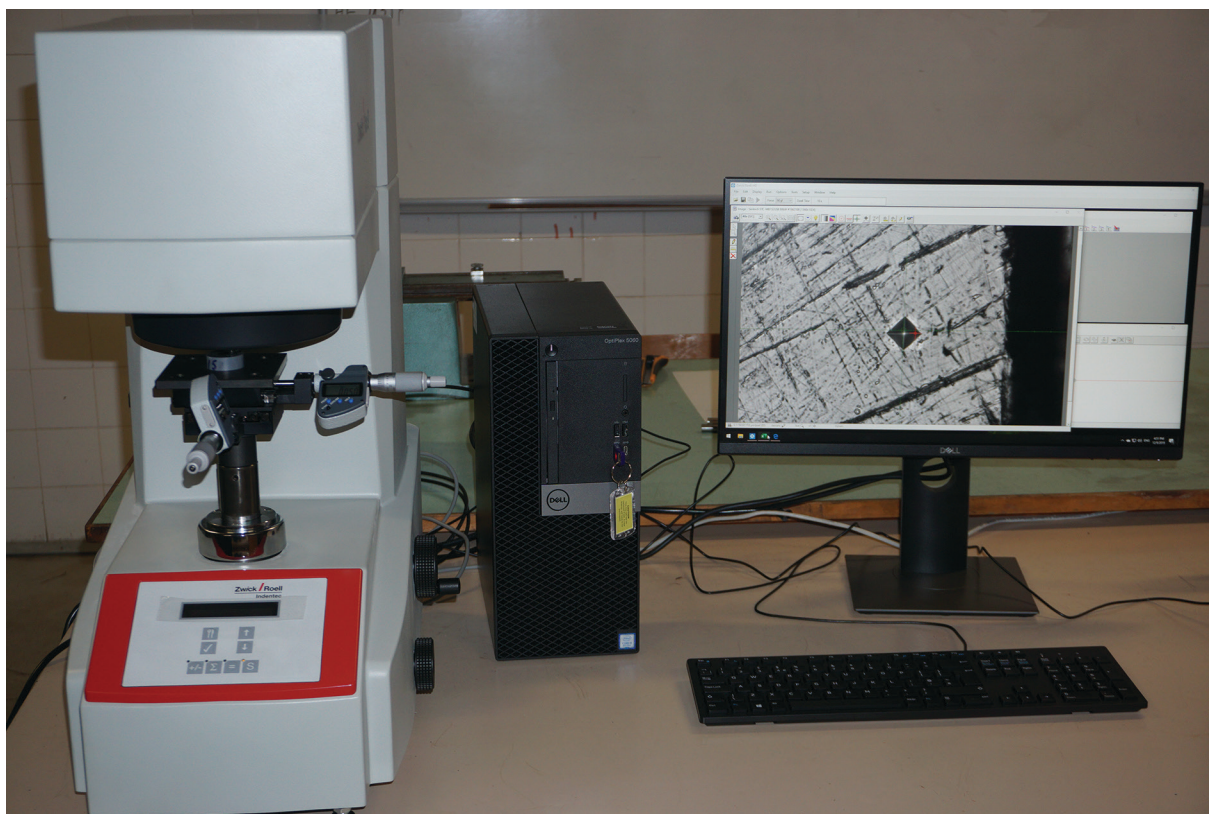
2. Възможности на изпитвателното

Лаборатория ЕТУЖЦПЕС притежава следните технически средства за изпитване на метали и метални сплави:

Полуавтоматичен микротвърдомер ZWICK/Indentec ZHV μ -S (фиг. 1). Измерването на микротвърдостта се извършва в полуавтоматичен режим. Начина на натоварване е с реални тежести в диапазона от 10 g до 2 kg разделени в 8 стъпки. Резултатите се определят в съответствие с международния стандарт ISO 6507-1:2018 [2].

оборудване

Използвания метод е Викерс. Микротвърдостта се измерва върху образци с цилиндрична или призматична форма. Максималния обем в който може да бъде поставен измервания образец е с височина 60 mm, ширина 60 mm и дължина 60 mm. Изображението от монтираната CCD камера постъпва в софтуера на уреда, чрез който се определя стойността на измерената стойност на микротвърдост по Викерс.



Фиг.1. Микротвърдомер ZWICK/Indentec ZHV μ -S

Машина за статични и динамични изпитания ZWICK/Roell Vibrophore 100 (фиг. 2).

Статичните изпитвания се извършват според изискванията на международния стандарт ISO 6892-1 [3]. Максималния обхват за измерване на сила е 100000 N.

Скоростта на натоварване може да се променя в границите от 0,0001 mm/min до 600 mm/min; Окомплектована е със захвати за плоски образци с дебелина от 0,2 mm до 10 mm и за цилиндрични образци с диаметър от 5 mm до 15 mm. За определяне на модула на линейни деформации е предвиден

екстензометър с измервателен обхват 50 mm. Машината е оборудвана и с приспособление за 3 точково огъване за извършване на изпитвания съгласно изискванията международния стандарт ISO 7438 [4].

Машината извършва и динамични изпитания на същите по форма образци, с максимален товар $\pm 50\,000\text{ N}$. Динамичният товар се реализира посредством електродинамично възбуждане в честотния диапазон мин. 30 Hz, макс. 300 Hz.

Съгласно заявения обхват върху машината са статични и динамични изпитания ще се реализират и механични изпитания на заварени съединения. Те ще се осъществяват в съответствие с международните стандарти ISO 5178 [5] – за изпитване с прилагане на сила надлъжно на заваръчния шев, ISO 4136 [6] – напречно на заваръчния шев и

ISO 5173 [7] – заварени съединения подложени на огъване.

Въз основа на провежданите динамични тестове, може да се оцени уморното поведение на изпитваните образци – граница на умора, дълготрайност на умора, напрежение при разрушаване.

Софтуерът към машината реализира повече от 100 различни програми изпълнявани в съответствие с различни международни стандарти за изпитване в статичен режим. Предвидена е възможността към нея да бъдат добавяни допълнителни измервателни сензори, сигналите от които постъпват в софтуера за управление. Осигурени са възможности за експортиране на данните от измерването в различни файлови формати – PDF, ASCII, docx и.xlsx.



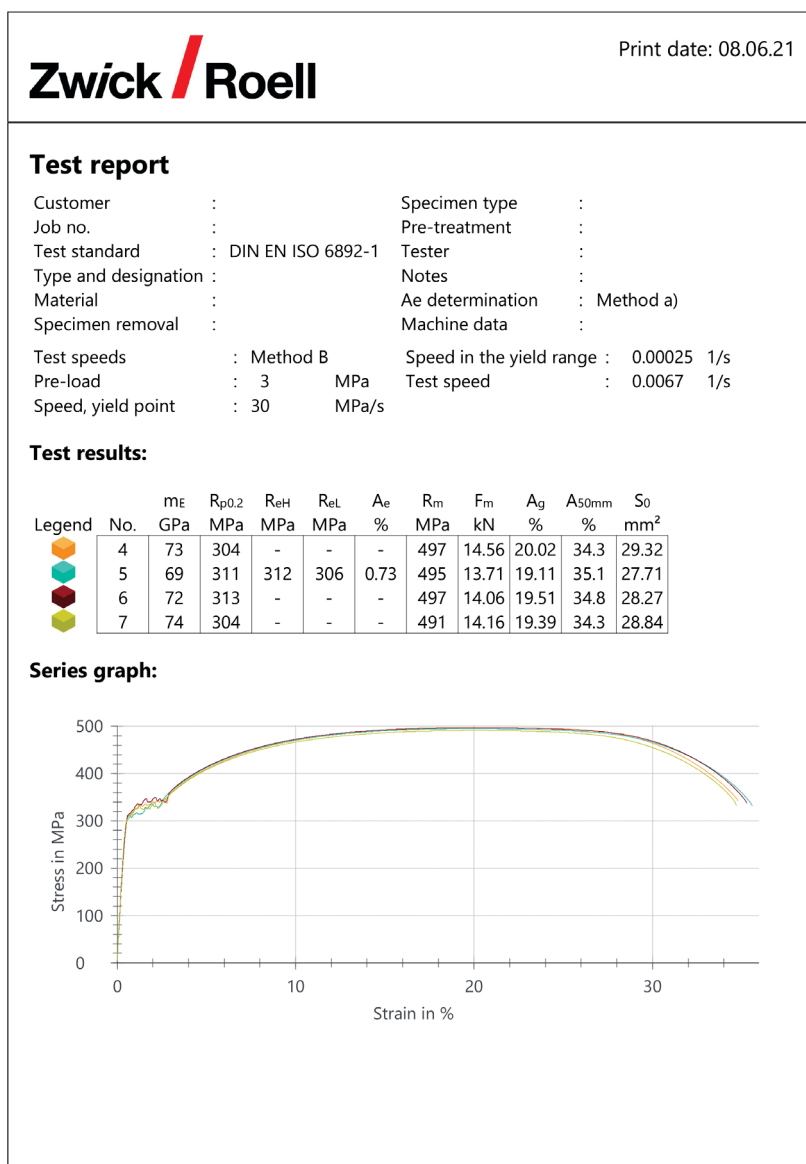
Фиг.2. Машина за статични и динамични изследвания ZWICK/Roell Vibrophore 100



3. Участие в международно сравнително изпитване

Основен критерий за доказване качеството на извършваните дейности по определяне на механични характеристики, съгласно изискванията на международния стандарт ISO 17025, е регулярното участие на лаборатория ЕТУЖЦПЕС в международни сравнителни изпитания. През лятото на 2021 г. взехме участие в сравнително изпитване, организирано от „РТ провайдер ССЛСБ“ под номер 21042. Фиг.3 съдържа

данните от първичния протокол получен от софтуера на машината за изпитване при определяне на механичните характеристики на образци от стомана S235. След допълнителна статистическа обработка на резултатите в таблици 2 и 3 са показани получените резултати на всички девет лаборатории участващи в изследването. Получените резултати показват стойности с добро съвпадение с медианите за граница на якост ($R_m=486.2$ MPa) и относително удължение след разрушаване ($A_{50}=29.1\%$).



Фиг.3. Първичен протокол от изпитване



Таблица 2. Резултати за граница на якост (R_m) на лаборатория 21042

№ по ред	Идентичност на участващия, кодирана стойност	Докладван резултат, МПа	Неопределеност, МПа	Отклонение (bias) от приетата стойност Pass ≤ 100 МПа	Z value (bias/σ) Pass < 2	ζ value Pass < 2
1	2	3	4	5	6	7
1	21010	550.3	11.006*	64.3	1.29	2.96
2	21013	438	5	-48	-0.96	-2.27
3	21023	504	12	18	0.36	0.82
4	21030	449.96	10.6	-36.04	-0.72	-1.66
5	21032	499.2	1.22	13.2	0.26	0.63
6	21033	519	3	33	0.66	1.57
7	21042	496.33	3.07	10.33	0.21	0.49
8	21049	510	25	24	0.48	0.98
9	21064	409	0.36	-77	-1.54	-3.67

Таблица 3. Резултати за относително удължение (A_{50}) на лаборатория 21042

№ по ред	Идентичност на участващия, кодирана стойност	Докладван резултат, %	Неопределеност, %	Отклонение (bias) от приетата стойност Pass ≤ 16.2 %	Z value (bias/σ) Pass < 2	ζ value Pass < 2
1	2	3	4	5	7	8
1	21010	25.1	1.004*	-4.000	-0.49	-1.16
2	21013	35.0	0.5	5.900	0.73	1.73
3	21023	31.0	3	1.900	0.23	0.51
4	21030	39.02	5.29	9.920	1.22	2.30
5	21032	18.52	0.21	-10.580	-1.31	-3.11
6	21033	31.7	0.7	2.600	0.32	0.76
7	21042	34.57	1.23	5.470	0.68	1.58
8	21049	28.0	0.1	-1.100	-0.14	-0.32
9	21064	18.7	1.4	-10.400	-1.28	-3.00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведеното международно сравнително изпитване доказват възможностите за провеждане на механични тестове с необходимата точност, която е основна предпоставка за успешно акредитиране на лаборатория ЕТУЖЦПЕС в съответствие с международния стандарт ISO 17025.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият доклад е свързан с изпълнението на задачи по проект BG05M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN ISO/IEC 17025:2018. Общи изисквания за компетентността на лаборатории за изпитване и калибриране (ISO/IEC 17025:2017)
- [2] БДС EN ISO 6507-1:2018. Метални материали. Изпитване на твърдост по Vickers. Част 1: Метод за изпитване (ISO 6507-1:2018)
- [3] БДС EN ISO 6892-1:2020. Метални материали. Изпитване на опън. Част 1: Метод за изпитване при стайна температура (ISO 6892-1:2019)
- [4] БДС EN ISO 7438:2021. Метални материали. Изпитване на огъване (ISO 7438:2020)



- [5] БДС EN ISO 5178:2019. Изпитвания с разрушаване на заварени съединения на метални материали. Изпитване на опън, надлъжно на метала на шева на заварени чрез стопяване съединения (ISO 5178:2019)
- [6] БДС EN ISO 4136:2022. Изпитвания с разрушаване на заварени съединения на

- метални материали. Изпитване на опън, напречно на шева (ISO 4136:2022)
- [7] БДС EN ISO 5173:2023. Изпитвания с разрушаване на заварени съединения на метални материали. Изпитвания на огъване (ISO 5173:2023)



ОБЛАСТ НА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОБОРУДВАНЕ ЗА РЕНТГЕНОСТРУКТУРЕН АНАЛИЗ

FIELD OF APPLICATION OF EQUIPMENT FOR X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS

Vladimir Petrov Dunchev
Technical university of Gabrovo

Abstract

This article presents the capabilities of the D8 Advance X-ray diffractometer for qualitative and quantitative phase analysis of metal alloys and powders, and software products for conducting qualitative and quantitative analysis of various materials with a crystalline structure. Through the Difrac.Eva software product, a qualitative and semi-quantitative analysis of the distribution of the different phases observed for a specific sample can be performed. The Difrac.Leptos program is presented to determine residual stresses for various polycrystalline specimens that have been subjected to mechanical or thermal treatments. The Difrac.Dquant software product for estimating the amount of retained austenite after heat treatment of different steel classes is also presented.

Keywords: X-ray diffractometer; qualitative and quantitative phase analysis; residual stresses; retained austenite.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременният процес на производство на черни и цветни метали и сплави, започващ от руди през първични и вторични металургични процеси до заготовки, пръти, плочи, телове и различни други крайни продукти, е един от най-сложните, непрекъснати процеси, прилагани в съвременните широкомащабни индустрии. В същото време производителите на стомана са изправени пред икономически предизвикателства със сложна и конкурентна програма. Един ключов фактор за успех е пълен контрол на качеството от суровините до крайния продукт във всяка стъпка от процеса.

Първоначалното качество и последващата обработка на металните прахове, използвани за адитивни производствени процеси, играе важна роля за качеството и свойствата на крайния продукт. Параметри като размер на частиците, разпределение и морфология на частиците са установени, но те представляват само „механичната“ част от

характеризирането, пренебрегвайки металургичните и химичните ефекти, въпреки че химията на частиците влияе върху фундаменталното представяне на крайните отпечатани или формовани части. За да се гарантира, че крайните части, направени с тези техники, отговарят на строгите изисквания на медицинските, автомобилните и космическите приложения, металните прахове, използвани като суровини, трябва да бъдат напълно характеризирани и наблюдавани през производствения цикъл.

Целта на представения доклад е да представи възможностите на рентгенов дифрактометър *Bruker D8 Advance* за качествен и количествен анализ на метални прахове и реални метални детайли.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Рентгенов дифрактометър *D8 Advance* е дифрактометър от ново поколение, с който може да се извършва фазов анализ на прахове и метални обекти, да се определят



остатъчните напрежения в повърхностните и подповърхностните слоеве на различни метални сплави. Също така има възможност за точно определяне на количествено-то разпределение на остатъчен аустенит, в

стомани подложени на механични или термични въздействия.

Общ изглед на рентгеновия дифрактометър е показан на *фиг. 1*.



Фиг. 1. Общ изглед на рентгенов дифрактометър Bruker D8 Advance

Провеждането на рентгеноструктурен анализ на прахове и твърди тела се извършва посредством софтуерния продукт *Diffraction Measurement* [1], специално интегриран за конкретното оборудване. Чрез него могат да се извършат широк набор от различни програми, в зависимост от поста-

вената задача. Крайният резултат е получена дифрактограма за пробното тяло.

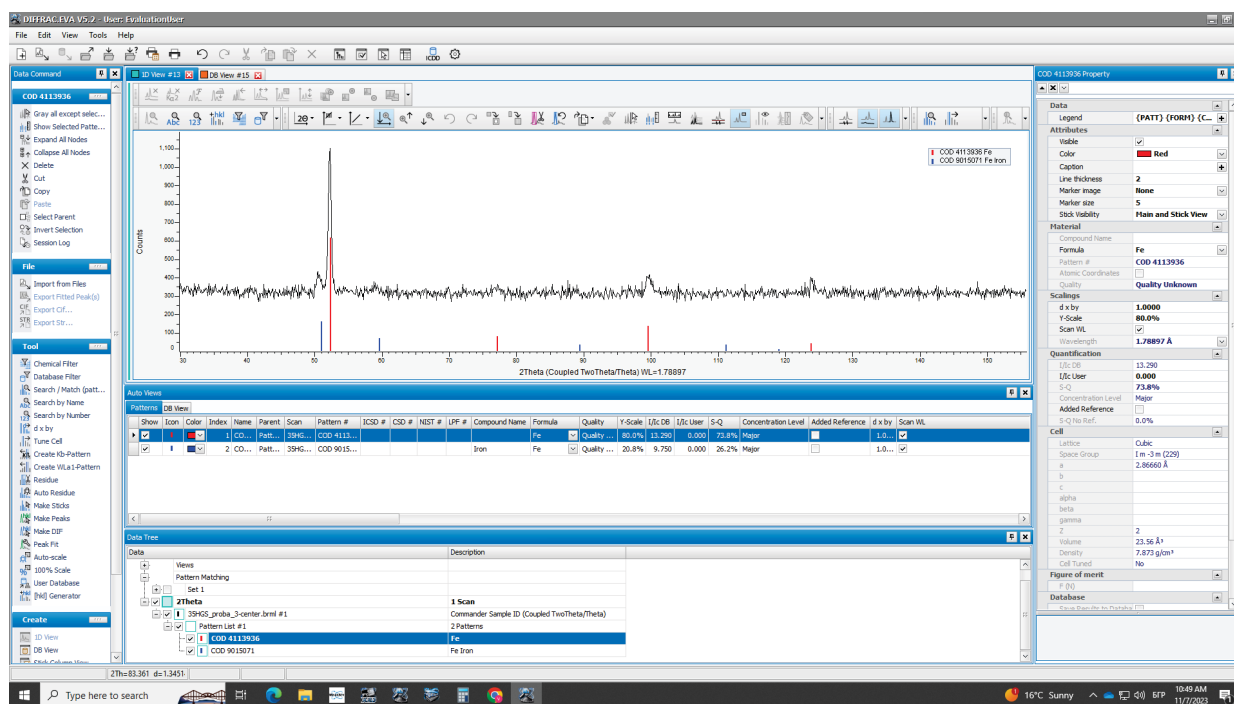
При извършване на качествен и количествен фазов анализ получената дифрактограма се импортира в софтуерния продукт *Diffraction Eva* [2], който е специализиран за качествено определяне на фазовия състав.



В зависимост от химичният състав са различни набор от различни рентгенови тръби (Cu , Co и Cr), които излъчват гама лъчи с различна дължина на вълната. За най-голям обхват на получената дифрактограма е целесъобразно да се използва рентгенова тръба с медно лъчение, поради късата дължина на вълната на медното лъчение $\lambda = 1.54\text{\AA}$. На *фиг. 2* е показана дифрактограма на нисколегирана средновъглеродна стомана подложена на термообработка.

За конкретния случай, поради факта, че при фазов анализ на стомани и сплави на основата на Fe използването на медно лъ-

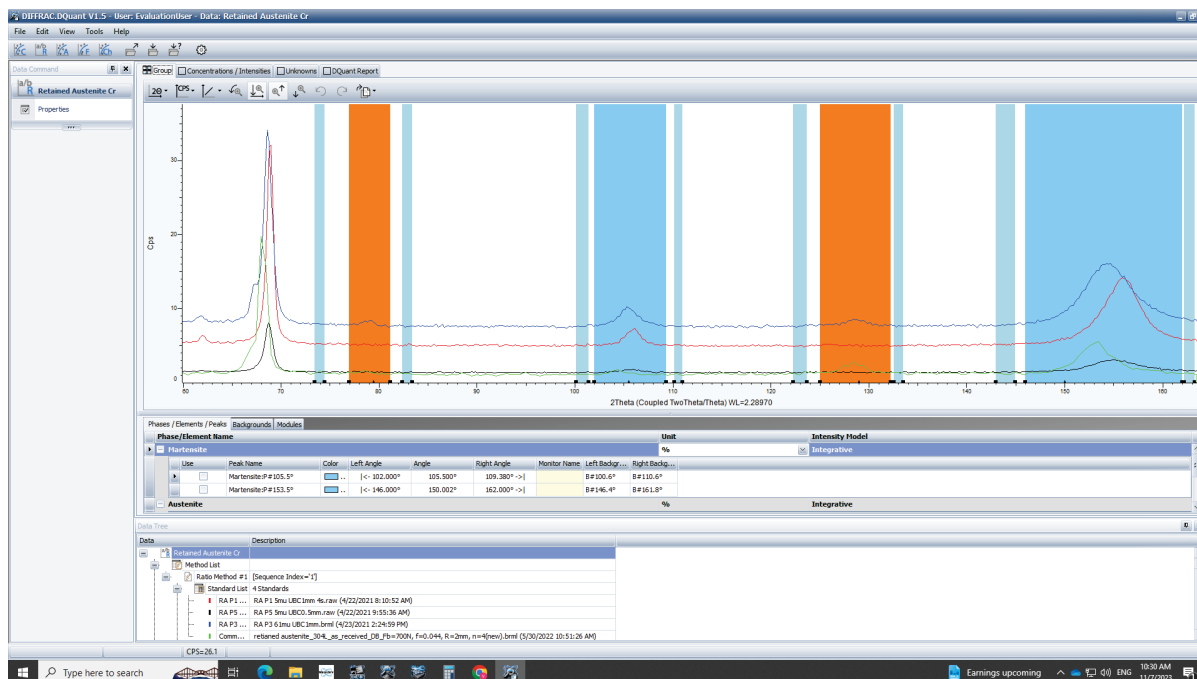
чение води до голямо разсейване на сигнала, следствие на което получената дифрактограма не е с достатъчно добро качество, е необходимо използването на рентгенова тръба с друг източник на γ – лъчение. Тръбата с Co лъчение е най-добра за фазов анализ на стомани. От гледна точка на определяне на остатъчни напрежения, използването на тръба с различна дължина на вълната е необходима в зависимост от фазата, за която се прави изследването. Например за стомани с основна фаза $\alpha - Fe$ е целесъобразно използването на тръба с Cr лъчение, а за $\alpha - Ti$, тръба с Cu лъчение.



Фиг. 2. Рентгенова дифрактограма обработена чрез софтуер - Diffrac.Eva

На база на направения анализ е получена двуфазна структура – ферит и аустенит. Получената дифрактограма, показва пикове и на двете фази, като тези на $\alpha - Fe$ са с по-голяма интензивност, докато тези на $\gamma - Fe$ са с много малка интензивност. Софтуерът *Diffrac.Eva* дава възможност на полуколичествен анализ на разпределението на фази-

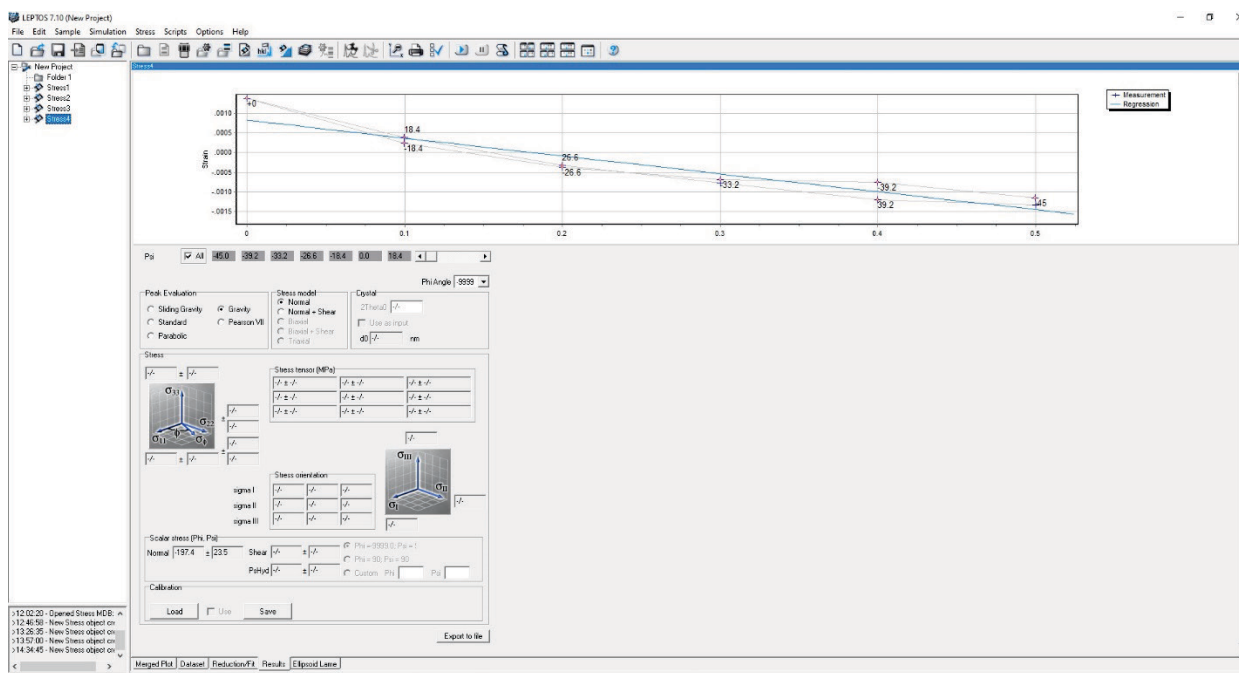
те, където се отчита само интензивността на пиковите. За конкретния случай $\alpha - Fe$ е 80 %, докато $\gamma - Fe$ е 20 %. За по-точно определяне на количественото разпределение на остатъчен аустенит ($\gamma - Fe$) е наличен допълнителен софтуер (*Diffrac.Dquant*), даващ възможност за точно определяне на количеството остатъчен аустенит.



Фиг. 3. Рентгенова дифрактограма обработена чрез софтуер - Diffrac.Dquant

На фиг. 3 са показана дифрактограми импортирани в софтуерния продукт Diffrac.Dquant [3]. На фигурата се забелязват четири дифрактограми за четири различни стомани. Количествения ана-

лиз се прави на база отношенията между площите за два пика на $\alpha - Fe$ и два на $\gamma - Fe$, показани съответно в оранжев и светлосин цвят, а самите резултати се представят в табличен вид.



Фиг. 4. Визуализация на получени резултати за остатъчни напрежения - Diffrac.Leptos



За определяне на остатъчни напрежения в поликристални образци е инсталиран специализиран софтуер – *DiffraC.Leptos* [4]. В неговата база данни са представени голям обем от различни еластични константи за различни фази на метали и сплави, в зависимост от кристалната им решетка и кристалографска плоскост. Софтуерът позволява допълване на базата данни, с нови за конкретни сплави, с определени по експериментален път – коефициент на *Poisson* и модул на *Young*. На *фиг. 4* са показани стойности на остатъчни напрежения в повърхностния слой на високолегирана аустенитна стомана, подложена на повърхностна пластична деформация. Софтуерът позволява определяне на остатъчни напрежения в различни фази за един същ образец, в който се наблюдават повече от една. Измерването е на база няколко дифрактограми за положителни и отрицателни ъгли относно симетричното разположение на излъчвателя и детектора. Възможни са два кинематични режима за създаване на програма за измерване на остатъчни напрежения:

1) кинематика, при която се движат излъчвателя и детектора за дискретен брой от измервания, докато пробното тяло е неподвижно;

2) кинематика, при която се завърта пробното тяло, докато при всяка точка от измерването, излъчвателя и детектора се придвижват в симетричен режим.

Кинематиката, при която се придвижват в симетричен режим излъчвателя и детектора, позволява определянето на остатъчните напрежения с по-голяма точност, даже и при малки ъгли на из-

следваните фази, поради факта, че измерването на всички точки е при едни и същи начални и крайни ъгли.

При измерване на остатъчни напрежения, в режим на преместване на излъчвателя и детектора, при много малки ъгли се повишава грешката от измерването. Поради това, измерването на остатъчни напрежения е добре да се извършва при относително големи ъгли на дифракция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представени са възможностите на рентгенов дифрактометър D8 Advance за качествен и количествен фазов анализ на метални сплави и прахове, определяне на остатъчни напрежения и остатъчен аустенит.

Чрез софтуерен продукт *DiffraC.Eva* може да се извърши качествен и количествен анализ на разпределението на различните фази в метални образци и прахове.

Представена е програма *DiffraC.Leptos* за определяне на остатъчните напрежения за различни поликристални образци, които са подложени на механична или термична обработка.

За точно определяне на остатъчен аустенит, след термична обработка на различни класове стомани, е представен софтуерен продукт *DiffraC.Dquant*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящите изследвания са свързани с изпълнението на задачи по проект BG05-M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *DiffraC.Suite Measurement Center Version 7.5.0.*
- [2] *DiffraC.Eva Version 5.2.03 Release 2020.*
- [3] *DiffraC.Dquant Version 1.5.1.*
- [4] *DiffraC.Leptos Version 7.10.0.12 Release 2018*



ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХИБРИДНИ ПОЗИЦИОННИ ЗАДВИЖВАНИЯ

RESEARCH OF HYBRID POSITIONING DRIVES

Prodan Ivanov Prodanov

*Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics
Technical University of Gabrovo
4 Hadji Dimitar str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
pprodanov@tugab.bg*

Abstract

Modern advances in the technology of positional electric drive systems help to significantly reduce operating costs and make them an increasingly preferred solution for a wide range of tasks requiring precise and fast positioning. These two basic types essentially contain an electronic control system (the so-called driver), a position motor and many feedback loops, the main one of which is the one for monitoring the current position (encoder). In the construction of stepper motor systems, there are solutions both with the presence of position feedback (hybrid stepper drives) and without current position feedback (conventional stepper drives). In the recent years, a hybrid stepper driver increases their applications in industrial positional systems and many of the leading manufacturers use a different type of positional feedback and controllers to design a combination between stepper motor driver and positional feedback. Considering their application and parameters, the following question arises: what are the boundary parameters and the possibility of application of such type of drives. The presented paper includes practical investigation of two types of hybrid stepper motor drives – high power and low power positional drives and their main parameters – boundary speed, operating temperature, waveform of output current and output microsteps.

Keywords: hybrid stepper motors, positioning systems and drives, hybrid stepper drivers, servo controllers.

ВЪВЕДЕНИЕ

Хибридните стъпкови позиционни задвижвания използват стъпков двигател и сервоконтролер, както и система за обратна връзка по ток и по позиция за да се установи устойчива работа на двигателя в широк диапазон на изменение на оборотите на въртене [1, 2 и 3]. При този тип задвижване се комбинират предимствата на два типа позиционни задвижвания – стъпково, отличаващо се със своята лесна настройка и ниска цена и сервозадвижването със своята твърдост на характеристиката, прецизност и наличната обратна връзка за следенето на текущата позиция. Една такава позиционираща система има поведение по-близо до сервозадвижваща система, като шумовите и резонансните процеси са намалени до минимум. По този начин се търси компромисен вариант „цена-качест-

во“ на задвижващата система при задвижващи системи, където изискванията по отношение на скорост, динамика на позициониране и прецизност не са толкова високи.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Основните предимства на едно хибридно позиционно задвижване могат да бъдат обобщени до: затворена система за управление, без пропускане на стъпки до нива на максималния въртящ момент на използвания двигателя; осигуряване на определена твърдост на скоростна и механичната характеристики, намалени загубите в двигателя, съответно намаляване на работната температура на стъпковия двигател и увеличава ефективността на задвижването; отсъствие на механични резонанси при различни обороти, типично за класическото управление на стъпковия двигател; отсъст-

вие на сложни настройки както при серво-задвижващите системи и въпреки това висока стабилност на параметрите на задвижването; ниска цена и компактност на задвижващата система. Приложението на този тип задвижващи системи е при механизми, към които се поставят изисквания за компактност, ниска цена и сравнително лесна настройка на параметрите. В сравнение със сервозадвижващите системи, този тип задвижвания отстъпва по отношение на максималните обороти на въртене, както и по отношение на динамичните процеси.

В настоящата публикация се изследват два вида хибридни позициониращи системи: мощна, базирана на стъпков двигател с номинален въртящ момент 8N.m; маломощна, базирана на стъпков двигател с номинален въртящ момент 0,6 N.m.

А. Изследване на маломощен хибридно позиционно задвижване

Външния вид на драйвера за хибридно управление на мощен стъпков двигател е показан на фиг. 1.



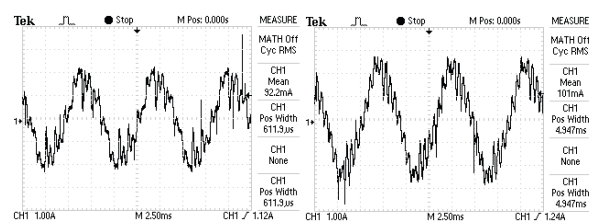
Фиг. 1. Външен вид на изследваното мощно хибридно позиционно задвижване

Драйвера, който се изследва е мощен драйвер тип CWDS860H [4], предвиден да работи с мощен стъпков двигател с номинален въртящ момент от 6N.m. Изследвания драйвер работи със следните номинални параметри: захранващо напрежение в диапазона (30 – 110)V_{DC} или (20 – 90)V_{AC},

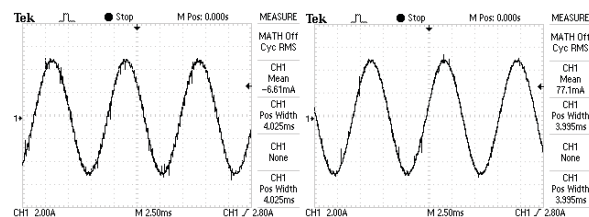
изходен ток до 8А, максимална входна честота до 200kHz, микростъпков режим на двигателя в следните диапазони: от 1:2 до 1:256 и от 1:5 до 1:200. Управлението може да се извършва по стандартен STEP/DIR интерфейс. Драйвера работи с ARM Cortex процесор и оптичен сензор за позиция (оптичен енкодер). Драйвера управлява стъпков двигател [5] с размер NEMA42 и има следните номинални параметри: ток – 6,0А, въртящ момент – 8N.m, съпротивление и индуктивност на намотката – 0,5Ω и 0,7mH. Направени са изследвания за формата на изходния ток при различно делене на стъпката, скоростна и механична характеристика, както и топлинни режими на двигателя.

Първата част от изследването на тази задвижваща система се състои в заснемане на работните режими на тока на през намотките на двигателя при различни микростъпкови режими – от 1:2 до 1:16.

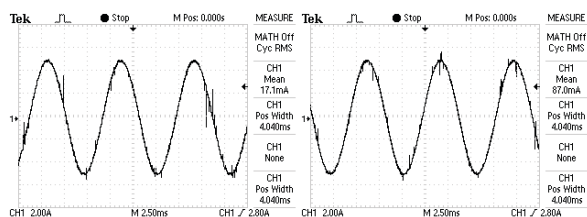
На фиг. 2, 3 и 4 са показани тези осцилограми, като се вижда, че токът през намотките на двигателя става все по близък по форма до синусоидалната при увеличаване на микростъпките, което е предпоставка за намаляване на шумът и вибрациите на двигателя.



Фиг. 2. Изходен ток на драйвер CWDS860H в режим на 1:2 и 1:4 микростъпки



Фиг. 3. Изходен ток на драйвер CWDS860H в режим на 1:8 и 1:16 микростъпки

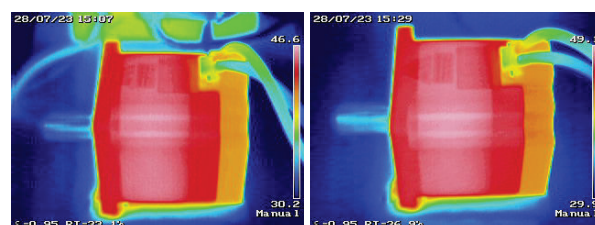


Фиг. 4. Изходен ток на драйвер CWDS860H в режим на 1:32 и 1:64 микростъпки

В табл. 1 са представени данните за получаване на основните характеристики, при работа с двигателя със серводрайвер CWDS860H и класически мощен драйвер тип SH-1108 [6]. Двата драйвера осигуряват идентична функционалност и електрически режими и за това са избрани за сравнение. От графиката на фиг. 5 се вижда, че хибридният драйвер осигурява константен ток през целия интервал на управление, както и осигурява с 30% по-висок скоростен интервал на движение. От графиката на фиг. 6 се вижда, че хибридният драйвер осигурява константен въртящ момент през целия интервал на управление, както и осигурява многократно по-висок въртящ момент при високи обороти на движение.

Друго изследване е свързано с топлинните режими на двигателя, които по-казват температурното разпределение по повърхността на двигателя, което е в следствие на неговата вътрешна температура, генерирана по време на работа, в следствие загубите в намотките и магнетопровода.

На фиг. 7а и фиг. 7б са показани заснетите с термовизионна камера топлинни режими на стъпковия двигател при работа с двата вида драйвери. От графиките се вижда, че температурата на стъпковия двигател при работа с хибридният серводрайвер е по-ниска с около 3°C при еднакъв работен режим в сравнение с класическия стъпков драйвер.

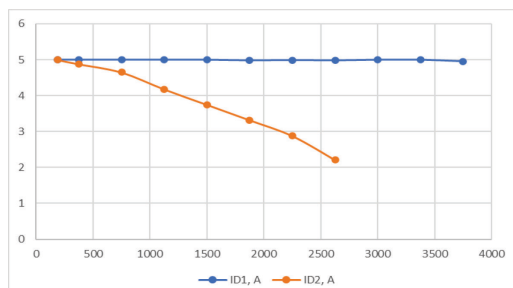


а) драйвер CWDS860H б) драйвер SH-1108

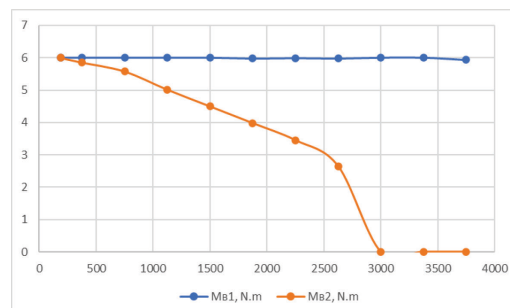
Фиг. 7. Топлинен режим на двигателя в номинален работен режим

Табл. 1. Ток и въртящ момент на изследвания двигател при работа с хибриден и конвенционален драйвер

F _{STEP} , kHz	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
I _{D1} , [A] за CWDS860H	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,98	4,99	4,98	5,00	5,00	4,95
I _{D2} , [A] за SH-1108	5,00	4,78	4,21	3,62	3,05	2,21	1,80	1,50	x	x	x
n _D , об/мин	187,5	375	750	1125	1500	1875	2250	2625	3000	3375	3750
M _{B1} , [N.m] за CWDS860H	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,98	4,99	4,98	5,00	5,00	4,95
M _{B2} , [N.m] за SH-1108	5,00	4,78	4,21	3,62	3,05	2,21	1,80	1,50	x	x	x



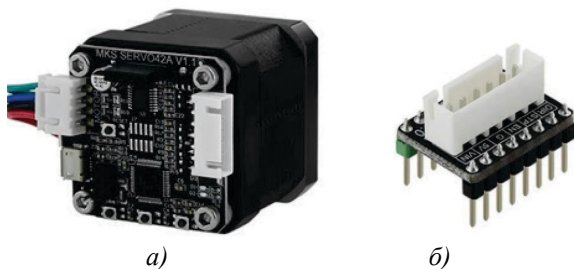
Фиг. 5. Скоростна характеристика на мощен стъпков двигател управляван от хибридно задвижване (в син цвят) и конвенционален стъпкови драйвер (в червен цвят)



Фиг. 6. Механична характеристика на мощен стъпков двигател управляван от хибридно задвижване (в син цвят) и конвенционален стъпков драйвер (в червен цвят)

Б. Изследване на маломощен хибридно позиционно задвижване

Външния вид на драйвера за хибридно управление на маломощен стъпков двигател е показан на фиг. 8.



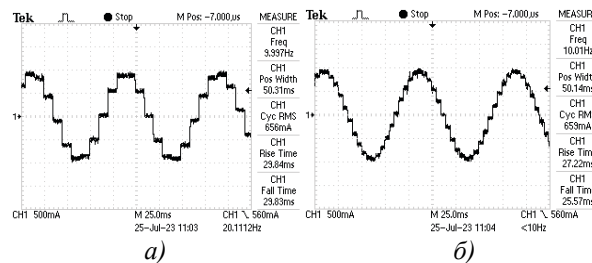
Фиг. 8. Външен вид на изследваното маломощно хибридно позиционно задвижване

Изследвания драйвер (модел MKS SERVO42C) [7] работи със захранващо напрежение до 36V, изходен ток до 2.5A, максимална входна честота до 200kHz, микростъпков режим на двигателя в диапазон от 1:2 до 1:256. Управлението може да се извършва по стандартен STEP/DIR интерфейс или посредством UART протокол. Драйвера работи с ARM Cortex процесор и магнитен сензор за позиция (магнитен енкодер). Освен това е предвидена възможност за поставянето му върху всеки един стъпков двигател с размер NEMA17 (фиг. 8а). Драйвера, също така има приставка за осигуряване на пълна съвместимост със стандартизирани драйвери от други водещи фирми, като например Trinamic, Texas Instruments, Allegro и др (фиг. 8б). За целите на настоящото изследване, драйвера управлява стъпков двигател с размер NEMA17 и има следните номинални параметри: ток – 2,0A, въртящ момент – 0,6N.m, съпротивление и индуктивност на намотката – 1,2Ω и 2,3mH.

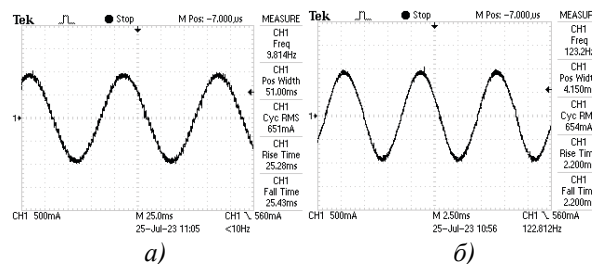
Основните параметри и характеристики, които се изследват са: форма на изходния ток, скоростна и механична характеристика, както и температура на драйвера и двигателя. В настоящия доклад, функционалността на това позиционно задвижване е

сравнена с функционалността и параметрите на масово използваните драйвери на фирми Trinamic (модел TMC2209) [8, 9] и Allegro (модел A4988) [10].

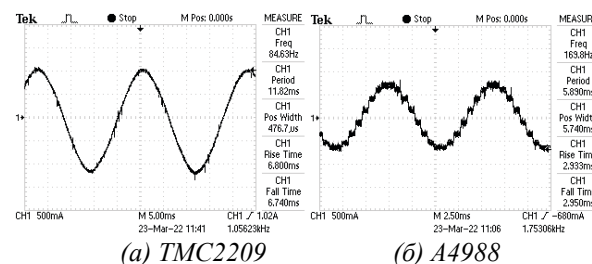
Първата част от изследването на тази задвижваща система се състои в заснемане на работните режими на тока на през намотките на двигателя при различни микростъпкови режими – от 1:2 до 1:16. На фиг. 9 и фиг. 10 са показани тези осцилограми, като се вижда, че токът през намотките на двигателя става все по-близък по форма до синусоидалната, което е предпоставка за намаляване на шумът и вибрациите на двигателя.



Фиг. 9. Изходен ток на драйвер MKS SERVO42C в режим на: а) 1:2 и б) 1:4 микростъпки



Фиг. 10. Изходен ток на драйвер MKS SERVO42C в режим на: а) 1:8 и б) 1:16 микростъпки



Фиг. 11. Изходен ток на конвенционалните драйвери в режим на 1:4 микростъпки



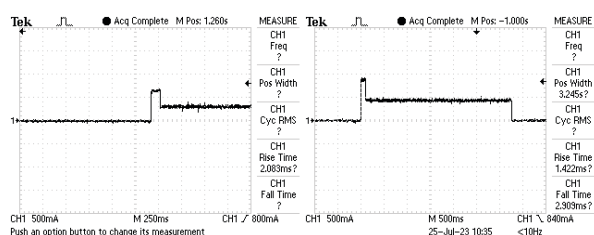
ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ
СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ПЛОВДИВ 23



Направена е съпоставка на тези работни режими с работните режими при идентични напрежение, ток и натоварване на двигателя, когато той работи с драйвери TMC2209 и A4988 – фиг. 11. От осцилограмата се вижда, че при режим 1:4 микростъпки, драйвер TMC2209 осигурява пълна синусоидална форма, за разлика от хибридният серводрайвер и драйвер A4988.

На фиг. 12 са показани осцилограми по време на пускови процес на двигателя при работа с драйвер MKS SERVO42C, като пика на пусковия ток който се вижда осигурява голям пусков момент при пускане, функция която отсъства при конвенционалните драйвери.



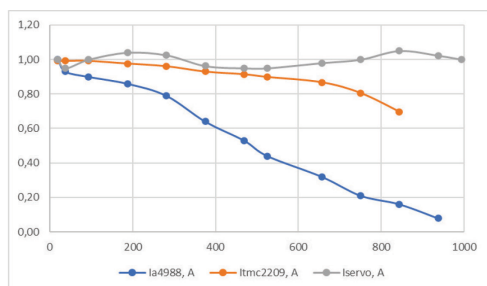
Фиг. 12. Ток по време на пусковите процеси през драйвера и намотките на двигателя

Изследванията на скоростната и механичната характеристики са свързани с измерване на тока и въртящия момент на двигателя. В табл. 2 са обобщени данни за работата на стъпковия двигател с хибридният стъпков драйвер и с конвенционалните драйвер за стъпков двигател без обратна връзка за позициониране и ПИД регулатори). Трите изследвани драйвера работят при работни електрически и функционални режими. Данните в табл. 2 са заснети при захранващо напрежение от 24V, изходен ток от 1A и делене на стъпката 1:16.

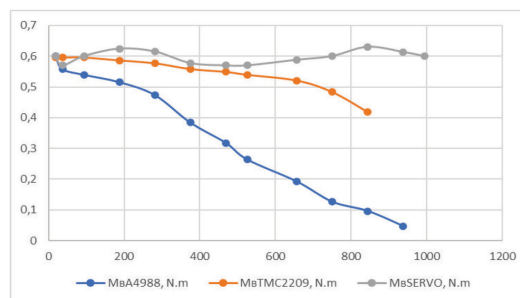
От графиката на фиг. 13 се вижда, че хибридният драйвер осигурява константен ток през целия интервал на управление, както и осигурява с 20% по-висок скоростен интервал на движение в сравнение с драйвер TMC2209 и с 60% с 20% по-висок скоростен интервал на движение в сравнение с драйвер A4988. От графиката на фиг. 14 се вижда, че хибридният драйвер осигурява константен въртящ момент през целия интервал на управление, както и осигурява многократно по-висок въртящ момент при високи обороти на движение.

Табл. 2. Ток и въртящ момент на изследвания двигател при работа с различни по вид драйвери

Frequency FSTEP, kHz	1	2	5	10	15	20	25	28	35	40	45	50	53
I _д , [A] за TMC2209	1,00	0,93	0,90	0,86	0,79	0,64	0,53	0,44	0,32	0,21	0,16	0,08	x
I _д , [A] за A4988	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96	0,93	0,91	0,90	0,87	0,81	0,70	x	x
I _д , [A] за MKS SERVO42C	1,00	0,95	1,00	1,04	1,03	0,96	0,95	0,95	0,98	1,00	1,05	1,02	1,00
n _д , об/мин	18	37	93	187	281	375	468	525	656	750	843	937	993
M _в , [N.m] за TMC2209	0,60	0,56	0,54	0,52	0,47	0,38	0,32	0,26	0,19	0,13	0,10	0,05	x
M _в , [N.m] за A4988	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,56	0,55	0,54	0,52	0,48	0,42	x	x
M _в , [N.m] за SERVO42C	0,60	0,57	0,60	0,62	0,62	0,58	0,57	0,57	0,59	0,60	0,63	0,61	0,60

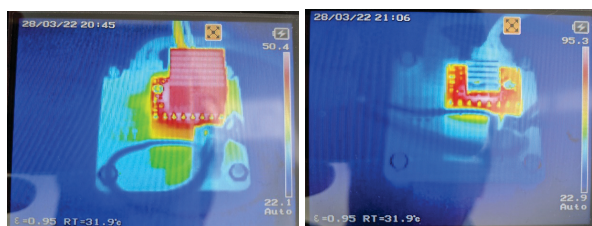


Фиг. 13. Скоростна характеристика на маломощен стъпков двигател управляван от хибридно задвижване и конвенционални стъпкови драйвери



Фиг. 14. Механична характеристика на маломощен стъпков двигател при хибридно задвижване и конвенционални стъпкови драйвери

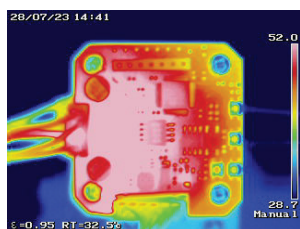
На фиг. 15 (а, б) [11] и фиг. 15в са показани и сравнени топлинните режими на драйверите, а на фиг. 16 (а, б) [12] и фиг. 16в са показани и сравнени заснетите топлинните режими на стъпковия двигател при работа с двата вида драйвери (хибриден и конвенционални).



а) драйвер TMC2209

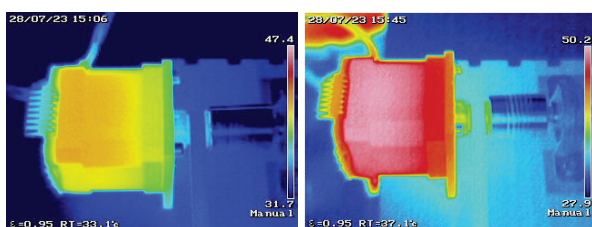


б) драйвер A4988

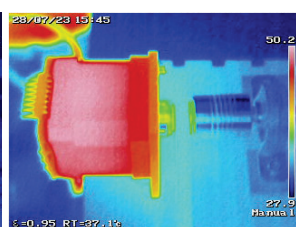


в) драйвер MKS SERVO42C

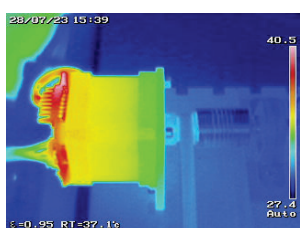
Фиг. 15. Топлинен режим на драйверите в номинален работен режим



а) драйвер TMC2209



б) драйвер A4988



в) СД с класически драйвер TMC2209

Фиг. 16. Топлинен режим на двигателя в номинален работен режим

Това изследване е свързано с топлинните режими на двигателя, които показват температурното разпределение по повърх-

ността на двигателя, което е в следствие на неговата вътрешна температура, генерирана по време на работа, в следствие загубите в намотките и магнетопровода. От графиките се вижда, че температурата на стъпковия двигател при работа с хибридният серводрайвер е по-ниска с (7 до 10)⁰C при еднакъв работен режим в сравнение с класическия стъпков драйвер (модел TMC2209 и A4988).

В табл. 3 са обобщени параметрите на двигателя при работа с трите драйверни схеми. Направената съпоставка е по описаните функционални параметри и характеристики, основни за позициониращите системи.

Табл. 3. Параметри на изследваното позиционно задвижване при работа с хибриден драйвер и конвенционални стъпкови драйвери [11, 12]

Параметри на изследваните драйвери			
Тип на драйвера	Максимална работна честота f, [kHz]	Макс. честота с константен ток f, [kHz]	Синусоидален ток
TMC2209	36	15	при всички микростъпкови режими
A4988	22	5	след 1:16 микростъпки
SERVO42C	53	53	след 1:16 микростъпки
Параметри на двигателя при работа с различните драйвери			
Тип на драйвера	Максимални обороти на въртене n, [min ⁻¹]	Температура на драйвера T, [°C]	Температура на СД T, [°C]
TMC2209	675	50,4	47,4
A4988	375	95,3	50,2
SERVO42C	1000	52	40,5

От таблицата се вижда, че при работа със серводрайвер MKS SERVO42C, позиционното задвижване има най-добри параметри по всички показатели с изключение на синусоидалния ток. Работата със синусоидален ток при всички микростъпкови режими е едно от водещите достижения на фирма Trinamic и серията драйвери TMCxxxx, което на този етап все още не



може да бъде достигнато при други разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направено е експериментално изследване на електрическите и топлинните режими, както и на механичните и скоростни характеристики на два вида хибридни стъпкови задвижвания. Резултатите показват, че хибридните стъпкови задвижвания притежават по-добри параметри, като увеличават работния диапазон на скоростната и механичната характеристика на двигателя с около 30%. Освен това, работейки с хибриден сервоконтролер, двигателя има по-добри топлинни режими, както и по-добра форма на изходния ток, което води до по-ниски нива на шум и вибрации. Използването на хибридни стъпкови задвижвания прави възможно усъвършенстването на съществуващи решения със стъпкови задвижвания и подобряване на тяхната ефективност и функционалност. Също така, добавянето на обратна връзка по позиция гарантира запазването на текущата позиция и предотвратява пропускането на стъпки при позициониране.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът изказва своята благодарност към всички рецензенти за техните съвети и предложения за подобряване на тази публикация. Авторът изказва своята благодарност на проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни,

еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/drives/stepper/p8000>
- [2] Lv Y., Xu C., Guo H., Liu Y., “Research on Sliding Mode Control of Two-phase Hybrid Stepper Motor Based on New PI Current Algorithm”, Journal of Physics: Conference Series, 1449 (1), art. no. 012043, 2020, DOI: 10.1088/1742-6596/1449/1/012043
- [3] <https://en.nanotec.com/knowledge-base/article/closed-loop-technology>
- [4] <https://en.cwmotor.cn/product/29.html>
- [5] <http://www.sihengmotor.com/phase-stepper-motor/219-2-phase-stepper-motor.html>
- [6] <http://www.sihongmotor.cn/userfile/productPic/20200512142720.pdf>
- [7] https://makerbase3d.com/product/makerbase-mks-servo57d-pcba-nema23-closed-loop-stepper-motor-driver-cnc-3d-printer-for-gen_1-foc-quiet-and-efficient/
- [8] <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/>
- [9] <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/>
- [10] <https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/stepper-drivers>
- [11] Prodanov, D. Dankov, “Reliability of low-power stepper motor drivers”, XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, 13 - 15 September 2022, Sozopol, Bulgaria, pp. 1 – 4
- [12] P. Prodanov, M. Floreva, D. Dankov, “Research of low-power stepper motor drivers”, XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, 13 - 15 September 2022, Sozopol, Bulgaria, pp. 1 – 4.



РАЗРАБОТКА НА ЦИФРОВИ ДВОЙНИЦИ С ПОМОЩТА НА ИНСТРУМЕНТА ЗА МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ ANYLOGIC

DIGITAL TWINS' DEVELOPMENT USING MODELING AND SIMULATION TOOL ANYLOGIC

Radoslav Hrishev, Nikola Shakev, Donna Stoyanova, Denis Kulev

Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Control Systems Department

Abstract

AnyLogic is a powerful modeling and simulation platform suitable for Digital Twin development of processes and systems. This software tool integrates modeling methods into one multi-method approach, which allows models to be designed, built, dynamically simulated, and optimized. AnyLogic can build models using external databases and simulation can generate information for effective process control. Examples of effective use AnyLogic for the development and deployment Digital Twins of business processes for educational purposes are presented.

Keywords: Digital Twin, modeling, simulation, AnyLogic, education.

INTRODUCTION

The development of Digital Twin of a real object is a modern approach not only for the investigation of systems and objects but also increasingly for the effective management and optimization of complex technical objects, systems, and business processes. One of the methods for building Digital Twins is the use of specialized modeling and simulation software platforms. The models are built using data for the objects, and also in the process of simulation created data, which are on the basis of the effective management.

Billions of sensors collect information for the functioning of the real objects and using new communication technologies transfer them to the cloud databases. Big data generated by IoT devices has many utilities. This includes data on physical and virtual objects with a variety of uses, from smart products such as autonomous cars and spacecraft, manufacturing systems to smart cities. Common for all of them is that management goes through the creation of models of managed objects.

Modeling and simulation are one of the ways to investigate real objects, their interaction with their surroundings and attempts to solve problems that arise when they exist in the real world. Especially when we can't afford to experiment with real objects to find the right solutions. Sometimes creating, researching, and making changes can be too impossible, or just too expensive [1]. It is often necessary to study the behavior of systems under conditions that will lead to their destruction. In these cases, models come to the rescue, from simple models, product prototypes to Digital Twins of real objects. Modern science and powerful computer technology allow building a twin of a real system by representing it using specialized modeling languages and with the help of specialized software tools. This process implies a certain level of abstraction, which means that we must reduce the details that are not essential to the study of the object for a specific purpose, but we retain the important elements for our study [2].



Digital Twin is a simulation and executable model; running it builds a trajectory of system state changes. Operating rules can be described by complex mathematical methods, including systems of differential equations, experimental state diagrams of observed or generated databases of real objects and processes. The twin's outputs are produced and observed as the model runs [3]. Simulation modeling requires special software tools that use simulation-specific languages [3]. The training to build Digital Twin of real object, time and effort are rewarded when the model offers a high-quality dynamic system analysis and opportunity for optimization. Therefore, the development and deployment of Digital Twin of a real system are important knowledge and skills for scientists and engineers.

Any Logic platform as an intelligent tool for process modeling and optimization is a perfect tool for student education because it integrates most modern modeling approaches and provide opportunity to use external databases.

MODELING AND SIMULATION APPROACH

The simulation model gives the opportunity to analyze complex objects and systems and find optimization solutions when the methods used to, for example, analytical calculations and linear programming due to the complexity of the systems, do not give the necessary results.

Knowing the modeling methods and specialized tools for this and having specific skills, it is usually not so difficult to develop a simulation model of the studied object. As a rule, the capabilities built into specialized platforms require less thinking but more skill, and the development process is predictable, scalable, incremental, and modular [4]. The structure of the simulation model reflects the structure of the system at certain levels of abstraction. In the simulation model, we can

observe and measure key parameters of the object, add new measurements, accumulate data internally or in external database, and conduct statistical analyses when it's necessary.

Simulation models developed with modern tools such as AnyLogic allow the creation of 2D and 3D models and the ability to reproduce and animate the behavior of the modeling object over time. This is a key advantage of simulation over the use of typical mathematical models [4]. Animation is useful for object observation, behavior demonstrations, checking and debugging of object design errors.

In simulation modeling, the modeling method is the framework which use to map a real-world object to its model [5]. Modeling tools are software platforms, but they are not only a programming language; they offer rules and conditions for building a model and simulating the behavior of the object in real-world conditions. On the base of this process is a information for the object. Last years thanks of computer and communication technologies growing this information is represent as Big Data and modern data analysis approaches.

Simulation modeling tools are usually based on three main methods - System Dynamics, Discrete Event Modelling, and Agent-Based Modeling. Modern platforms increasingly offer tools that combine these three methods in one additional mix - a Multi-method approach.

Each method reflects a certain range of abstraction levels. System dynamics implies a very high level of abstraction and is typically used for strategic modeling. Discrete event modeling supports medium and medium-low abstraction, such as for small businesses or simple control systems. In the middle are agent-based models, which can range from very detailed models where agents represent physical objects to highly abstract models. Often, this is subjective because it also



depends on the user's knowledge and skills with the modeling and simulation tools.

Agent-based modeling is a newer and more modern method compared to system dynamics and discrete event modeling. In fact, agent-based modeling was largely an academic topic until software tool developers made practical simulations possible 20 years ago.

It was driven by advances in modeling technology made possible by computer science, such as object-oriented modeling, and the rapid growth in processing power and memory capacity of computing systems.

There is no standard language for agent-based modeling, and the structure of an agent-based model comes from graphical editors or scripts [3]. There are many ways to define the behavior of an agent. When we have an idea of the actions and state of the model, then the behavior is best defined with state diagrams. In these cases, the internal dynamics of the agent are important and a system dynamics or discrete event approach is used and then a stock-flow diagram or process diagram is constructed in the agent. This is why many agent-based models are multi-method models.

Agents in an agent-based model can represent many different objects - real and virtual: people, vehicles, units of equipment, projects, products, ideas, companies, and organizations.

System dynamics is a methodology for studying dynamic systems, as the name implies.

The system dynamics method was created in the 1950s by MIT professor Jay Forrester and is the first known modeling method. Forrester applies the laws of physics to study economic, financial, and social systems. Today, many software systems enable the application of the method without special mathematical and computer skills, for example, Vensim.

Discrete event modeling emerged shortly after system dynamics. In 1961, IBM

engineer Jeffrey Gordon introduced the GPSS software system, considered the first software tool for discrete event modeling using this method. Many different discrete event modeling programs are in use today, including modern versions of GPSS.

This type of model is defined graphically as a process flowchart, where the blocks represent different sequential operations. As a typical flowchart, the model usually starts with source blocks that generate agents and implement them in the process and ends with sink blocks that remove them.

Agents, originally named transactions in GPSS or entities in other simulation software, can represent customers, employees, physical and electronic documents, parts, products, and more. Resources are groups of agents, for example staff, libraries, servers, warehouses, equipment, etc. Agent service times and arrival times are typically stochastic, and since they are drawn from a probability distribution, discrete event models are themselves stochastic. Or, to have a result, the model must run for a certain period of time or complete a certain number of iterations of the cycles of operations. This type of modeling and simulation provides information useful for optimizing the operation of the real facility, such as resource usage time, waiting time, queue lengths, system throughput and identifying process bottlenecks.

The multi-method modeling is a mix of abovementioned modeling paradigms. There's a significant synergy between different simulation methods, and this means the capabilities of multi-method models are greater than the sum of their parts. Often the "hybrid modeling" is interchangeably with multi-method modeling.

Combining the three modeling methods and the use of a programming language creates a hybrid model, which allows the scientists and engineers to model different aspects of a system at different levels of detail. This multi-method simulation



modeling was first introduced by Any Logic and, till today, remains the only software that has that capability on the market.

THE PLATFORM ANYLOGIC

Any Logic platform is a versatile tool for process modeling and optimization. It has been used in many fields like supply chain management, cargo terminal optimization, automated packing systems, unit-assembly production, etc. The software is widely used in simulation and optimization experiments like unit-assembly production and technological lines. One of the key factors allowing Any Logic to be used worldwide is its capability for hybrid modeling [6].

What makes the software such a powerful tool for the industry is that for more than 20 years after its release, the platform proved its potential among 40% of Fortune 100 companies [6]. The software was designed by The Any Logic Company to support all the most common situation methodologies, including system dynamics, process centrality, and agent-based modeling. The interface of the software is designed so it's user-friendly with drag-and-drop functionality, thinking about both beginners and experienced modelers. Claiming its position as a one-of-a-kind tool and operating from the United States and Europe, the company has gained a global network of partners [6].

The software enables users to develop models using all three simulation methodologies [6]. They can be used in combination with other software to create complex simulations to optimize business processes and improve decision-making. Additionally, the software Any Logic supports the use of common programming languages like Java.

Any Logic is built and optimized in such a way that users can have a hands-on, unique suite of industry-specific tools called “Process

Modeling Libraries”. Each library is a powerful instrument for developers to model at a detailed level in logistics, banking, manufacturing, and many other businesses and services [6]. With the modeling library, any user can visualize every kind of business process easily. The results of business processes can also be validated using Any Logic's animation capabilities.

The platform also offers a wide range of 2D and 3D visualization options, including charts, animation, and GIS mapping capabilities. An important part of Any Logic is that the software incorporates optimization and experimentation capabilities, allowing modelers to analyze multiple scenarios and identify optimal solutions. By running different experiments with the best possible outcome, users can evaluate different factors and make informed decisions to improve efficiency and productivity.

Knowing modeling capabilities, Any Logic supports real-time data to improve the realism and accuracy of simulations. The platform allows users to import data from different resources, such as databases and external applications. Any Logic's flexibility and scalability have made it a leading tool for problem-solving in diverse industries. These unique capabilities of the platform make it an ideal tool for building software Digital Twin on various systems, including control systems.

The digital twin contains two different parts - a dynamic simulation model and data that reflect the current state of a living system [7], but they are two integrated elements of one object. With the model and data, it is possible to build a powerful software counterpart that serves for experimentation and analysis to understand the behavior of the system. On the Fig. 1 is illustrates the ratio between real system and Digital Twin of this system (object).

Digital twin technology helps the optimization and development of business

processes, and its application is practically unlimited. Which tool to build the particular twin is a complex question due to the combination of personal approach and choice of software tool, which in turn is determined by the knowledge and skills of the researchers and the financial costs of acquiring and maintaining the software platform.

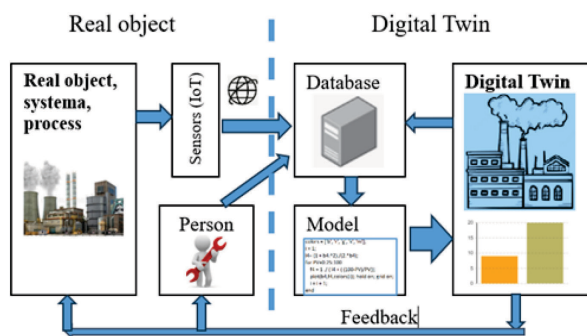


Fig. 1. The ratio between real object and Digital Twin of this object.

The AnyLogic platform provides multiple benefits. It provides insights that are easy to understand and communicate. In addition to being a powerful modeling tool and widely used software, the company has developed a private cloud so that users and companies can have full control over their data and processing. Any Logic's private cloud infrastructure is hosted in the user's data center by an external PaaS provider. In this way, it can be incorporated into the company's work process and the models can be implemented throughout the company. It is good to mention the benefits of the software, which have been crucial to the business industry since its release. Some of them are:

- Leverage a risk-free environment to test and explore – The opportunity to test and

explore various ideas and strategies puts forward the idea of taking advantage of situations where there are no risks involved.

- Save money and time in the real world – Allowing companies to protect themselves from unexpected expenses helps them achieve long-term financial goals. Companies save time by running simulations and benefit from being more informed when making crucial decisions.

- Ensure the quality of processes, products, and services, etc. – The companies are allowed to ensure an accurate representation of real-world systems in a simulation model, involving results based on available data or expert knowledge. This includes appropriate modeling constructs and organization, while documenting the model design and assumptions.

- Some of the suppliers of such systems (AnyLogic, Vensim) allow use of a free PLE (Personal Learning Edition) license for training purposes.

Therefore, AnyLogic is perfect tool for student education.

DIGITAL TWIN OF THE ELECTRIC VEHICLES' BATTERIES MANUFACTURING

The Green Deal is the EU's response to the ongoing climate crisis. One of the important directions for its realization is the increase in the number of electric vehicles (EV), and the most important part of an EV is the batteries.

To keep up with expanding trend of using of EV, an increasing number of automakers are investing in the research and development of electric vehicles and components.

Our student developed [8] Digital Twin of the manufacturing process of batteries for electric cars. The research and optimization of such a complex and responsible production

can be carried out using a digital twin, and the advantages of this approach we have already discussed.

AnyLogic is a perfect tool for this purpose. On the Fig. 2 is present logical flowchart of manufacturing process, developed in AnyLogic.

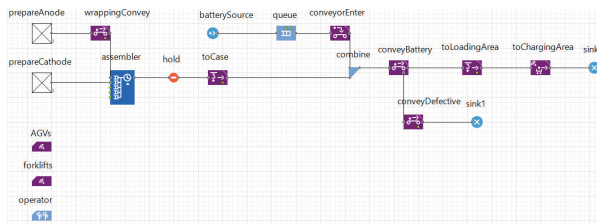


Fig. 2. Logical flowchart of manufacturing process.

The proposed layout of the manufacturing shop is shown on Fig. 3 and 3-D simulation plan on Fig. 4.

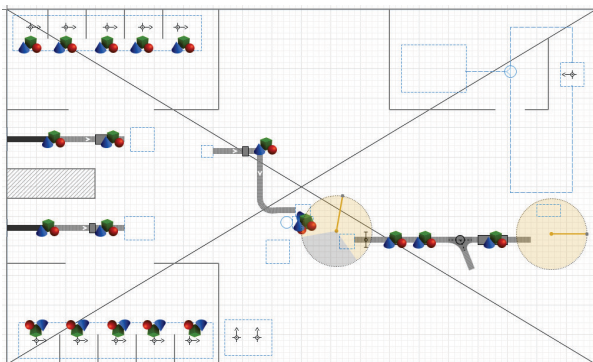


Fig. 3. Layout of manufacturing.

AnyLogic allows users to construct 3D animations from a set of standard geometric shapes: rectangle, line, oval, polyline, image, text, and group. All of these shapes now support the third dimension, height, and appear in 2D and 3D presentation scenes. Standard shapes are usually used to draw simple objects (roads, walls, boxes). More complex objects (people, forklifts, airplanes, etc.) are usually not drawn in AnyLogic, but rather imported from outside using the special

3D object element. This allows the creation of realistic 3D models of objects and processes.

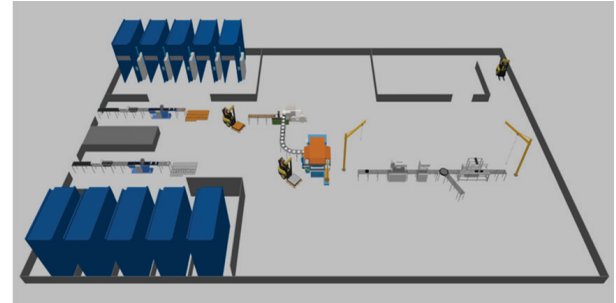


Fig. 4. 3-D simulation plan.

Digital Twin is technology tool for investigating industrial processes, evaluating the effects of system changes, and producing arguments for conclusions. This minimizes the cost of testing in the real world, enables effective analysis, and provides a useful way of experimenting. AnyLogic helps to make production processes more efficient. With a specially created Material Handling Library, it is a powerful process simulation tool that makes it simpler to simulate complex manufacturing systems and processes.

DIGITAL TWIN OF THE BICYCLE ASSEMBLY FACTORY

In today's hyper-competitive business world, the preliminary research and improvement of the efficiency of companies is a key factor for their survival. Therefore, the creation of a model of small business project is extremely relevant.

Our student developed [9] Digital Twin of the manufacturing process of bicycle assembly in small factory using AnyLogic platform. The idea of researching such production is a logical continuation of the course Introduction to SAP, based on the real company Global Bikes Incorporation (GBI).

This model covered bicycles assembly area, packaging, store, and expedition processes in small, specialized assembly

factory. On the Fig. 5 is shown logical flowchart of the processes.

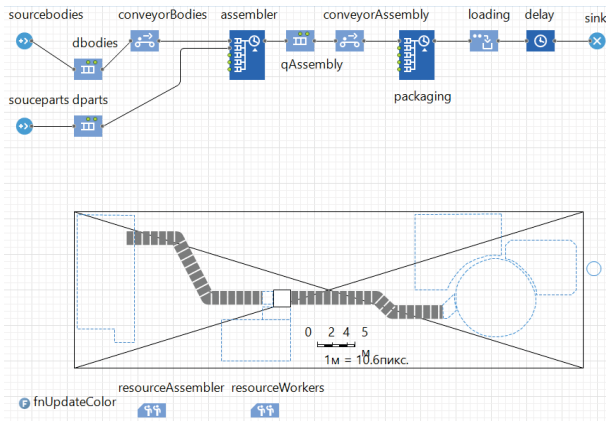


Fig. 5. Logical flowchart and plan of bicycles assembly, packaging, and expedition.

The simulation is present on Fig. 6.

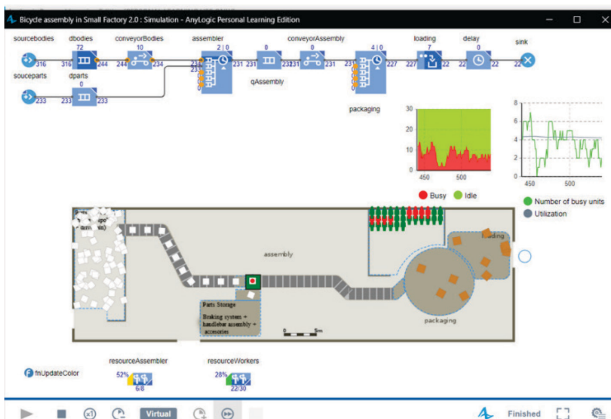


Fig. 6. Workday simulation of the developed model.

The development Digital Twin allows monitoring of the resources used in the small enterprise - the units (parts and bicycles) and the workload of the workers.

The results of the real time simulation in AnyLogic are presented on Fig. 7.

The obtained results in graphical view can serve to optimize production processes (assembly and packaging), resources planning and utilization, and, finally, increase the business efficiency.

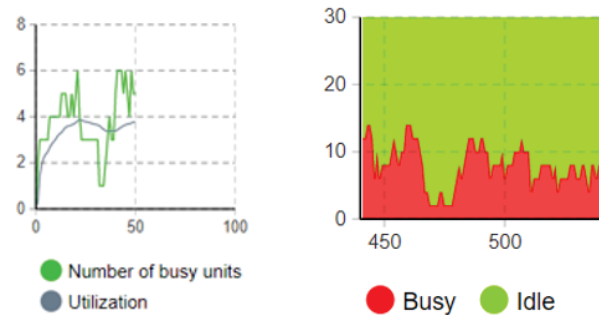


Fig. 7. Real time simulation results for resources using in the factory.

In this work our students are using examples of production, provided in AnyLogic cloud [10].

CONCLUSIONS

In conclusion, with the present thesis examples, we considered the possibility of developing a Digital Twin for different types of production using the AnyLogic company's modeling and simulation platform.

Any Logic is a comprehensive simulation software that enables the creation of complex and multi-method based models. The flexibility and power of the software enables the development of ideas in a wide range of fields. By providing appropriate input and guidance, this software allows us to tackle a variety of projects and tasks, expanding the boundaries of what can be achieved using known popular mathematical methods to study real systems. The user-friendly interface and intuitive features, the ability to use it for free for educational purposes, make it accessible and enjoyable for students and suitable for learning.

The use of such modern tools for modeling objects and their simulation study, learning new scientific methods, combined with the acquisition of practical skills, is an innovative approach to the training of specialists from various fields at universities.



ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the European Regional Development Fund within the framework of the Operational Program \Science and Education for Smart Growth 2014-2020, project CC\ Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies, No BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCES

- [1] A. Borshchev, The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6, Published by AnyLogic North America, 2013, p.612.
- [2] Simulation and modeling, Study notes for Mathematical Modeling and Simulation, Online book. <https://www.docsity.com/en/simulation-and-modeling-2/5894484/>
- [3] Ilya Grigoryev, Front cover image for AnyLogic 7 in three days : a quick course in simulation modeling AnyLogic 7 in three days : a quick course in simulation modeling. Print Book, English, 2015, p. 256.
- [4] Henriette Schoen. Modeling the innovation ecosystem and development of a dynamic innovation index. Published 2018, p. 303.
- [5] Ali Ertürk. System Dynamics for Aquatic Ecosystem Modelling, Istanbul University, Faculty of Aquatic Sciences. 2020. http://www.bio.bsu.by/hydrobio/files/news/seminar_models_2020/Minsk_Keynote_Lecture_2020.pptx.
- [6] AnyLogic Simulation Software. Online: <https://www.indx.com/en/product/anylogic-simulation-software>.
- [7] Arash Mahdavi, The Art of Process-Centric Modeling with AnyLogic. Online: <https://www.anylogic.com/resources/books/the-art-of-process-centric-modeling-with-anylogic/>
- [8] Donna Stoyanova, Modeling and simulation of the manufacturing process of batteries for electric vehicles. Final year project, TU - Sofia, Plovdiv Branch, 2023.
- [9] Denis Kulev, Development of model for bicycle assembly in small factory using AnyLogic platform. Final year project, TU - Sofia, Plovdiv Branch, 2023.
- [10] Web platform AnyLogic Cloud, 2023, <https://cloud.anylogic.com/models?public=true>.



ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН АНАЛИЗ НА СИСТЕМА ЗА БЕЗКОНТАКТЕН ЗАРЯД НА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ С ПРОМЯНА НА ИНДУКТИВНОСТИТЕ В ПРИЕМНИКА

ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF THE SYSTEM FOR CONTACTLESS CHARGING FOR ELECTRIC VEHICLES WITH DIFFERENT INDUCTANCES IN THE RECEIVER

Desislav Iliev

Technical University of Gabrovo, BG

Nikolay Madzharov

Technical University of Gabrovo, BG

Abstract

This paper presents a contactless charging system for electric vehicles where matching load values is done by means of an additional resonant circuit and introducing a bundle inductance and capacitors in receiving coil. A computer-simulated model of the system shows the distribution of the magnetic field around the transmitting coil, the resonant circuit and the receiving coil.

Keywords: Wireless Power Transfer, Contactless Charging System, Magnetic Resonance, Inductance, Efficiency

ВЪВЕДЕНИЕ

Към днешна дата методите за безконтактен пренос на енергия могат да се разделят на няколко основни групи:

- микровълнов;
- оптичен;
- капацитивен;
- индуктивен.

Технически най-целесъобразен при зареждането на електромобили е индуктивният метод и в частност индуктивно-резонансния за прехвърляне на електрическа енергия на разстояние по-голямо от $\frac{1}{4}$ от диаметъра на предавателната намотка [1-3]. Едно от основните му предимства е, че енергия се прехвърля само тогава, когато имаме активна приемна страна, за разлика от микровълновия и оптичния метод, при който енергията се предава постоянно от източника и се излъчва в пространството, без значение дали е налице приемна част.

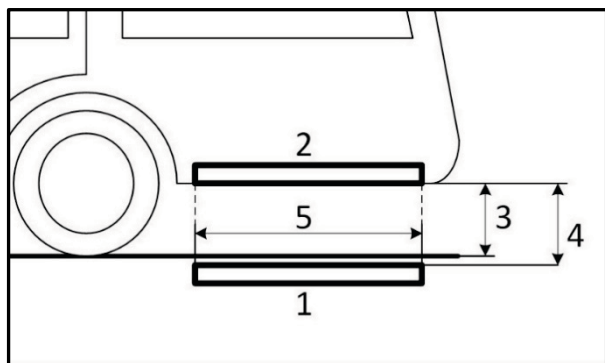
На Фиг. 1 са представени основните гео-

метрични параметри при безконтактен заряд на електромобили, имащи отношение към получаване приемливи технико-експлоатационни параметри.

Основните проблеми, които възникват при реализирането на този метод са:

- при увеличаване на разстоянието между предавателната и приемна намотка зареждане на автомобили над $\frac{1}{4}$ от диаметъра на намотките (D), коефициентът на магнитна връзка (k) между тях намалява под 0.2 и общият КПД на системата спада. Това разстояние е индивидуално за всеки различен автомобил - зависещо от производител, марка, модел на електромобила и др.

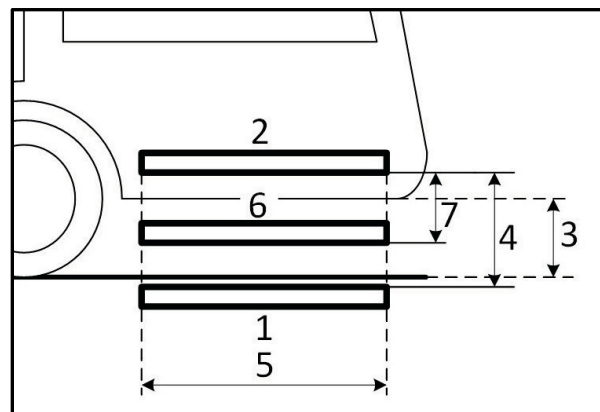
- също така това разстояние зависи и от моментното натоварване на автомобила, дори и от амортизацията на носещите елементи, от окачването по време на експлоатация на автомобила, моментното състояние на гумите и други експлоатационни фактори.



Фиг. 1. Електроавтомобил по време на зареждане: 1- предавателна намотка; 2- приемна намотка; 3- клиренс на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d) и 5- диаметър на предавателната и приемната намотка (D).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Значително подобрение на системата за безконтактен пренос на енергия при заряд на електромоби (и намаляване на изложениите по-горе недостатъци) може да се постигне, като се въведе допълнителен резонансен кръг, който да се монтира в електромоби (позиция 6 от Фиг. 2). Чрез промяна на разстоянието (7), на което той се позиционира от електромоби и пътната настилка, може да се постигне по-добро съгласуване и от там да се осъществи ефективно прехвърляне на електрическа енергия при удовлетворителен КПД и увеличено разстояние между предавателната и приемна част на безконтактната система. Допълнителната намотка е със значително по-малка маса и габарити поради липсата на магнитопровод и екрани. Въвеждането на допълнителната намотка и възможността за лесното ѝ позициониране във вертикална посока решава един много важен проблем, свързан с настройването на цялата система при различни разстояния между електромоби и пътното платно [4].



Фиг.2. Електроавтомобил по време на зареждане с въведен допълнителен резонансен кръг: 1- предавателна намотка; 2- приемна намотка; 3- клиренс на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d); 5- диаметър на предавателната, приемната намотка и допълнителния резонансен кръг (D); 6- допълнителен резонансен кръг и 7- разстояние между приемната намотка и допълнителния резонансен кръг.

При изчислението на характеристиките на подобен вид системи за безконтактен пренос на енергия е целесъобразно да се работи с матрица от Z - параметри, защото коефициента на магнитна връзка (k) между предавателната и приемната намотка е много малък и практически е нула (1) [5].

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_2 & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

където:

- L - индуктивност на системата;
- L_1 - собствена индуктивност на предавателната намотка;
- L_2 - индуктивност на резонансния кръг;
- L_3 - индуктивност на приемната намотка;
- $L_{12} = L_{21}$ - взаимна индуктивност между предавателната намотка и резонансния кръг;
- $L_{13} = L_{31}$ - взаимна индуктивност между предавателната и приемната намотка;
- $L_{23} = L_{32}$ - взаимна индуктивност между резонансния кръг и приемната намотка.

При изчисляване на ефективността на система с въведени N - брой резонансни кръгове се използва метод за изчисления, при който резонансните кръгове се разглеждат като филтри (Bandpass filter theory). На базата на тази теория ефективността на системата може да се изчисли с помощта на (2) [6]:

$$\eta_{max} = (1 - \frac{r_n}{R_{load}})(1 - \frac{\sum_{i=1}^N r_i - 1}{R_s}) \quad (2)$$

където:

η_{max} - максималната ефективност на системата;

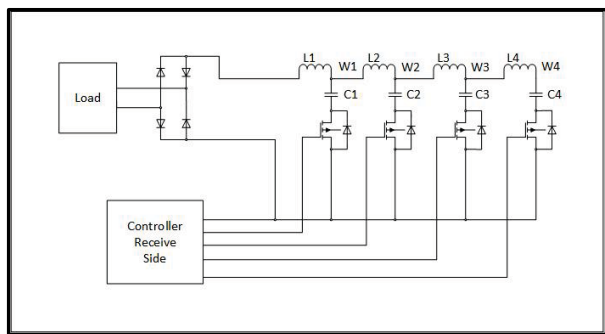
r_n - съпротивление на последния резонансен кръг;

R_{load} - съпротивление на товара;

r_i - съпротивление на i -тия резонансен кръг;

R_s - съпротивление на източника.

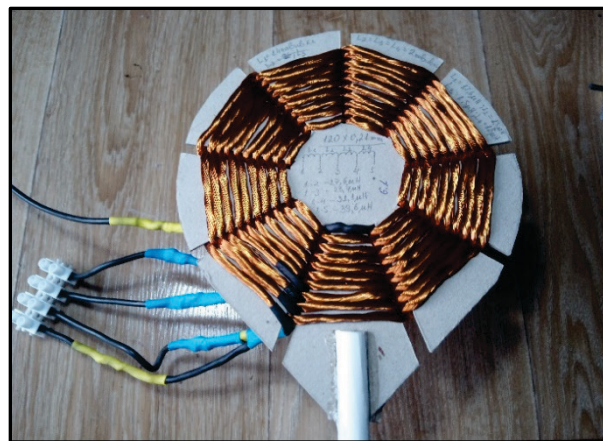
Тази система за безконтактно зареждане на електромобили [4] беше усъвършенствана, като в нея се въведе нов тип приемна намотка, при която посредством превключването чрез транзисторни ключове могат да се активират отделни части от приемната намотка (Фиг. 3).



Фиг.3 Схема на приемната част с електронните ключове и четирите резонансни кръга

По този начин системата може да работи с четири различни стойности на индуктивностите в приемната намотка, но при една и съща резонансна честота. Тези стойности могат да се превключват чрез системата за

управление. Индуктивности са с общо начало и четири края (Фиг. 4). Целта е да се получи оптимално съгласуване при различно позициониране в хоризонтално и вертикално направление между предавателната и приемна част.



Фиг. 4 Външен вид на индуктивностите, използвани в приемна намотка.

Броя на навивките са: $W1$ - 14 навивки, $W2$ -16 навивки, $W3$ - 18 навивки и $W4$ - 20 навивки. Индуктивностите съответно са: $L1$ - 17.6 μH , $L2$ - 23.7 μH , $L3$ - е 31.1 μH и $L4$ - е 39.6 μH . Стойността на капацитетите е: $C1$ - 2.26 μF , $C2$ - 1.68 μF , $C3$ - 1.28 μF и $C4$ - 1.0 μF . Изчисленията са направени за резонансна честота на кръга 25 kHz (3).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Където:

- f -честота;

- L -индуктивност

- C - капацитет

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

За сравнение на резултатите, за база се използват данните от предишно изследване [4], като ефективността на системата (в зависимост от разстоянието на предавателната (TX) и приемната (RX) намотка и положението на резонансния кръг (RC) (Таблица 1) са дадени на по-долната фигура (Фиг. 5).



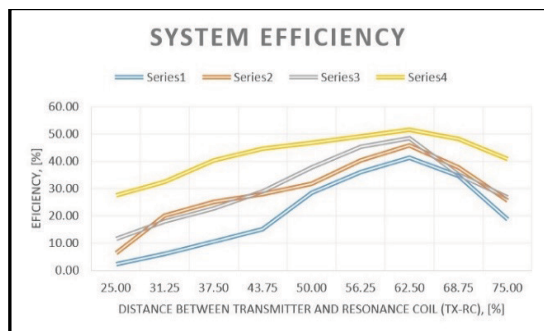
ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ
СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ПЛОВДИВ 23



Табл. 1 Нормализирано разстояние и реално разстояние TX-RX и TX-RC на макета.

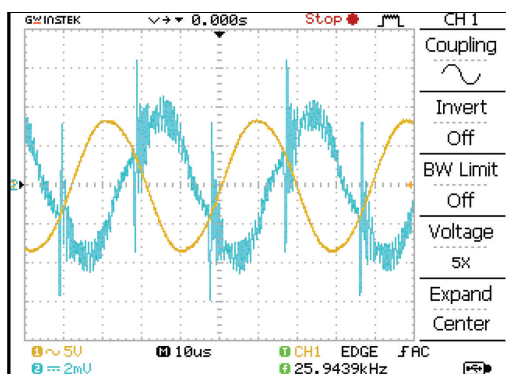
TX-RX		TX-RC								
100%	25.00%	31.25%	37.50%	43.75%	50.00%	56.25%	62.50%	68.75%	75.00%	
140 mm	35.00mm	43.75mm	52.50 mm	61.25 mm	70.00 mm	78.75 mm	87.50 mm	96.25 mm	105.00 mm	
120 mm	30.00 mm	37.50 mm	45.00 mm	52.50 mm	60.00 mm	67.59 mm	75.00 mm	82.50 mm	90.00 mm	
100 mm	25.0 mm	31.25 mm	37.50 mm	43.75 mm	50.00 m	56.25 mm	62.50 mm	68.75 mm	75.00 mm	
80 mm	20.00 mm	25.00 mm	30.00 mm	35.00 mm	40.00 mm	45.00 mm	50.00 mm	55.00 mm	60.00 mm	



Фиг. 5 Ефективност на системата при четирите различни разстояния между предавателната и приемната намотка (TX- RX): series1-140 mm; series2- 120 mm; series3 – 100 mm и series4- 80 mm.

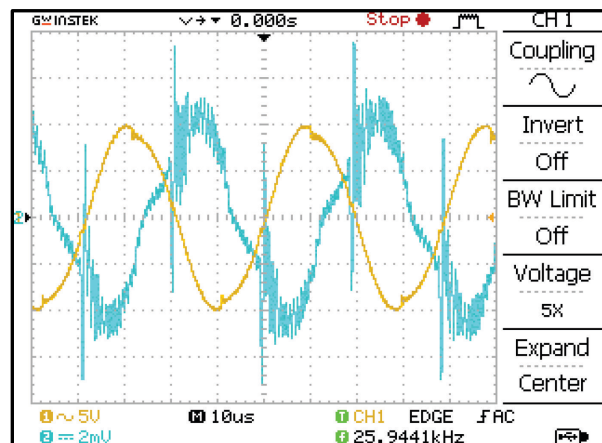
На следващите четири фигури са представени осцилограмите на напрежението и тока в приемната намотка на системата при разстояние между предавателната и приемна намотка (TX-RX) от 80 mm и разстояние между предавателната намотка (TX) и резонансния кръг (RC) от 50 mm.

На Фиг. 6 е показана осцилограма на напрежението и тока в приемната намотка, когато са включени индуктивност L4 и капацитет C4.



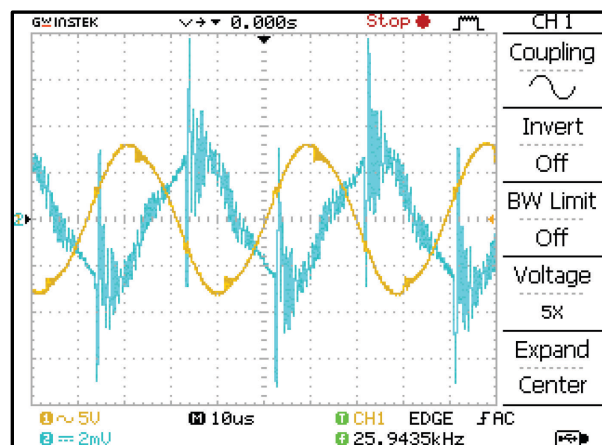
Фиг. 6 Осцилограма на напрежението (жълт цвят) и тока (син цвят) в приемната намотка, когато са включени индуктивност L4 и капацитет C4.

На Фиг. 7 е показана осцилограма на напрежението и тока в приемната намотка, когато са включени индуктивност L3 и капацитет C3.



Фиг. 7 Осцилограма на напрежението (жълт цвят) и тока (син цвят) в приемната намотка, когато са включени индуктивност L3 и капацитет C3.

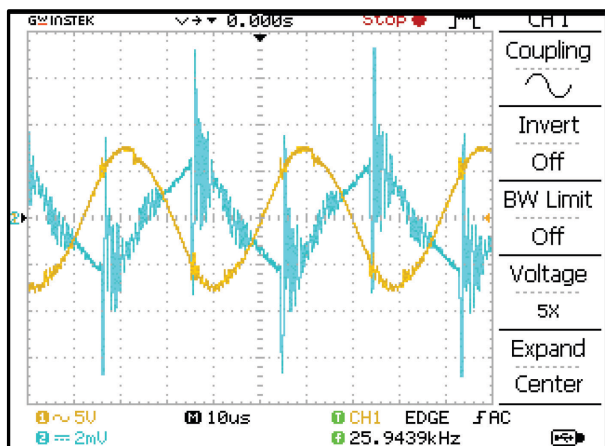
На Фиг. 8 е показана осцилограма на напрежението и тока в приемната намотка, когато са включени индуктивност L2 и капацитет C2.



Фиг. 8 Осцилограма на напрежението (жълт цвят) и тока (син цвят) в приемната намотка, когато са включени индуктивност L2 и капацитет C2.

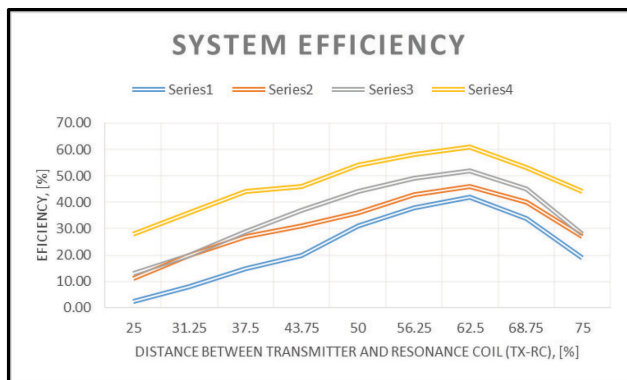


На Фиг. 9 е показана осцилограма на напрежението и тока в приемната намотка, когато са включени индуктивност $L1$ и капацитет $C1$.



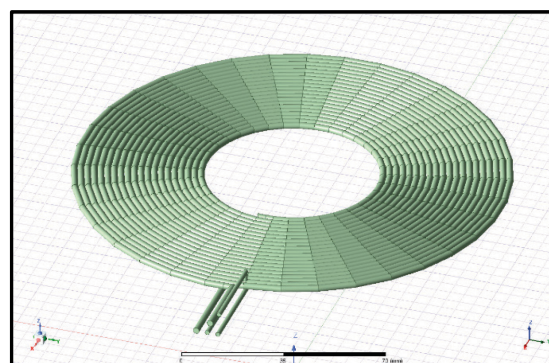
Фиг. 9 Осцилограма на напрежението (жълт цвят) и тока (син цвят) в приемната намотка, когато са включени индуктивност $L1$ и капацитет $C1$.

На по-долната фигура (Фиг.10) е представена в графичен вид ефективността на системата, когато единичната приемна намотка е заменена с разработения пакет от индуктивности и капацитети.



Фиг. 10. Ефективност на системата с използване пакет от индуктивности при четирите различни разстояния между предавателната и приемната намотка (TX- RX): series1-140 mm; series2- 120 mm; series3 – 100 mm и series4- 80 mm.

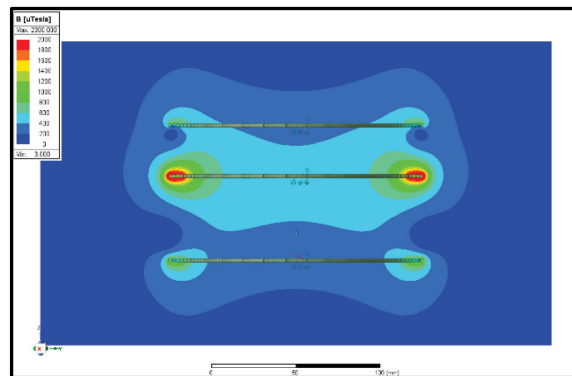
Получените по време на изследването стойности на токовете и напреженията в предавателната намотка (TX), резонансният кръг (RC) и приемната намотка (RX) бяха въведени в модел на системата, направен чрез софтуер за симулиране на електромагнитното поле. На по-долната фигура (Фиг.11) е представен модела на приемната намотка, който е използва в симулацията.



Фиг. 11 Компютърен модел на приемната намотка.

Симулацията е извършена при разстояния между предавателната и приемната намотка (RX- TX) от 80 mm и разстояние между предавателната намотка и резонансният кръг (RX- RC) от 50 mm, което отговаря на най- голямата ефективност на системата.

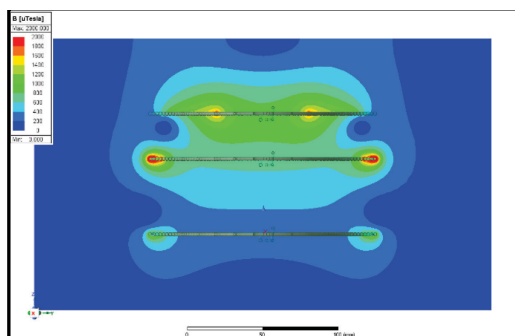
На по-долната фигура (Фиг. 12) е представено разпределението на магнитното поле в системата при използване на индуктивност $L4$ и капацитет $C4$.



Фиг. 12 Разпределение на магнитното поле в системата при използване на $L4$ и $C4$.

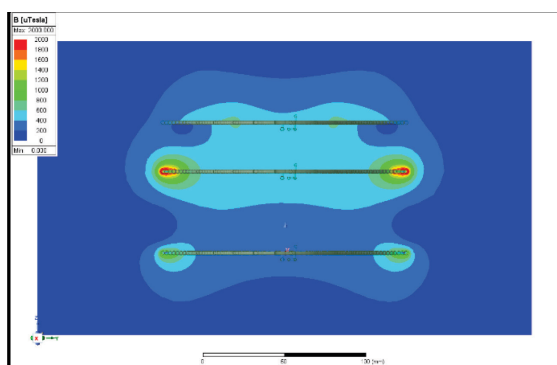


На следващата фигура (Фиг. 13) е представено разпределението на магнитното поле в системата при използване на индуктивност L3 и капацитет C3.



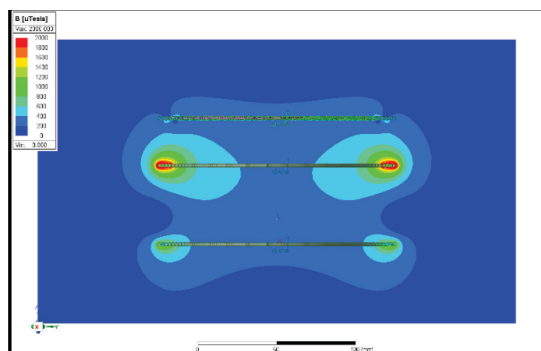
Фиг. 13 Разпределение на магнитното поле в системата при използване на L3 и C3.

На Фиг. 14 е представено разпределението на магнитното поле в системата при използване на индуктивност L2 и капацитет C2.



Фиг. 14 Разпределение на магнитното поле в системата при използване на L1 и C1.

На Фиг. 15 е представено разпределението на магнитното поле в системата при използване на индуктивност L1 и капацитет C1.



Фиг. 15 Разпределение на магнитното поле в системата при използване на L1 и C1.

Скалите на разпределението на магнитното поле, представени на по-горните фигури (Фиг. 12- 15) е една и съща - от 0 μ T до 2000 μ T. По този начин много ясно се вижда, че при използване на индуктивност L3 и капацитет C3 интензитета на полето е най-голяма около приемната намотка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От изложеното по-горе могат да се направят следните изводи:

- посредством промяна използваните пакети от индуктивности и капацитети в приемната намотка може да се постигне съгласуване на системата за безконтактно зареждане на електромобили спрямо товара;

- при съществуване на физически ограничения при използването на допълнителен резонансен кръг, ефективността на системата може значително да се подобри чрез превключване на части от приемната намотка чрез електронни ключове.

В бъдеще изследванията ще продължат, като предавателната намотка и резонансният кръг ще бъдат заменени със същите пакети от индуктивности и капацитети, както в приемната част на системата.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Kurs, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, A. Karalis, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances" in Science, Vol. 317, 6 July 2007.
DOI:10.1126/science.1143254M.
- [2] Budhia, G. Covic and J. Boys, "A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems" in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010. DOI:10.1109/IECON.2010.567530
- [3] N. Madzharov, "Contactless power transmitters for electric energy", Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria. 2017, conference on advances in steel structures, vol. II, 2002, p. 1111-1118.
- [4] N. Madzharov, D. Iliev, E. Ozdikikiler, "Contactless Charging System for Electric



Vehicles With Resonant Circuit”, Мехатронни, еко и енергоспестяващи системи и технологии, Габрово, България, 2023.

- [5] T. Imura, “Wireless Power Transfer Using Magnetic and Electric Resonance Coupling Techniques”, Springer, 2020, ISBN 978-981-15-4579-5
- [6] N. Shinohara, “Wireless Power Transfer-Theory, technology and applications”, The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2018, ISBN 978-1-78561-347-0

ПРИЗАТЕЛНОСТ

Тази работа е финансирана по Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“ финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие.



ОЦЕНКА НА РАБОТАТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МОБИЛЕН КЛИМАТИК

EVALUATION OF ELECTRIC MOBILE AIR CONDITIONER OPERATION

Lyubomir Dimitrov

Technical University – Gabrovo

Abstract

Paper deals with results of research carried out on the indicators of the quality of electrical energy in the operation of an electric mobile air conditioner. The goal is to analyze the operation of the selected electrical appliance and to draw reasonable conclusions about its influence on the power supply network. A METREL MI 2892 measuring device has been used to perform the measurements and analyze the quality of electrical energy. The measurements have been carried out in laboratory conditions and operating modes corresponding to the technical specifications of the device.

Keywords: mobile air conditioner, electricity, power quality, power quality analyzer.

ВЪВЕДЕНИЕ

Врхлетялата света пандемия COVID-19 принуди всички да прекарват повече време у дома. Отоплението през зимата и охлаждането през лятото са важна част от постигането на най-добър комфорт в дома, без значение от сезона на годината. Сред предназначенията за целта електроуреди най-подходящи и най-икономични са климатиките.

Климатиките не замърсяват околната среда. Произвежданата от тях енергия е за отопление и охлаждане. Това е разумна инвестиция в бъдещето, защото тяхната изходна мощност е приблизително три пъти по-голяма от входната. Това води до минимизиране на разхода на енергия и повишаване на коефициента на трансформация (преобразуване) – EER/COP. Освен удобно и икономично, отоплението с климатик е и най-екологично. Всички серии понастоящем са с екологичен сертификат, удостоверяващ, че използваните фреони не замърсяват околната среда.

Климатиките обаче се предлагат в различни видове и изборът на обикновения потребител понякога е трудна задача.

В тази връзка на пазара са налични и т.нар. мобилни климатици.

Има много видове мобилни климатици, сред които да се избира, без дори да се споменават отделните модели от всяка марка. Някои превъзхождат останалите в едно или друго направление, а много от тях са тясно специализирани. Изборът на подходящ тип на първо място зависи от това с какъв проблем искаме да се справим. И в крайна сметка трябва да се намери висококачествен модел с функциите, които желаем.

Когато температурата навън започва да се повишава, много хора търсят прохлада, осигурявана комфортно от климатик. Подобно на водните кули и електропроводите, климатиките са едно от тези неща, които се виждат всеки ден, но рядко им се обръща много внимание.

Най-общо казано, всеки климатик премества енергия във вид на топлина от едно място на друго. В природата нормалното движение на топлината е от по-студеното към по-топлото място, подчинявайки се на втория закон от термодинамиката. Тъй като, в доста моменти от живота, това не ни удовлетворява (например през зимата бих-



ме искали да вземем топлина от околната среда, която да преместим вътре в стаята, но при всички случаи навън е по-студено, отколкото вътре), тогава е необходим друг подход и съответно използване на друг физичен закон.

Процесите, които протичат много наподобяват процесите в хладилника или фризера с тази разлика, че топлинните мощности в климатика са сравнително по-големи, а също и че температурните интервали са чувствително по-широки.

Основният принцип на работа на климатика е описан в т. нар. "Цикъл на Карно" (Carnot). Същността на цикъла използва поведението на флуидите (газове или течности) при промяна на налягането и температурата, като по принцип тези два параметъра са свързани помежду си по следния начин: при повишаване на налягането на флуида при един и същи обем се повишава пропорционално температурата и обратно.

Както се вижда, основна роля за работата на един климатик играе флуидът, който циркулира в системата. Количеството, и най-вече качествата му са много важни. Един от качествените му параметри е температурата на кипене, т.е. когато флуидът се разширява (изпарява) каква е минималната температура, при която все още има изпарение в топлообмения. Това е така, защото, за да може да се отнеме енергия от околната среда и да се спазва вторият закон на термодинамиката, той трябва да се изпарява при температура, по-ниска от околната. И тъй става дума за отопление с климатик, то това означава, че когато през зимата навън е минус 10°C , този флуид трябва да се изпарява поне на минус 11°C или още по-ниски температури. В климатиките този флуид има събирателното име фреон (между другото, това е запазена търговска марка). Фреоните са много видове, всеки със своите предимства и недостатъци, но за ефективната работа на един климатик фреонът е един от трите важни фактора (останалите два са видът на компресора и качествата на топлообменниците), който

то оказва съществено влияние на работата на съответния климатик.

Другият важен компонент на климатика е компресорът. Той е този, който върши работа, необходима за да работи климатикът по желания начин. Компресорите, които се използват в съвременните климатици се делят по различни критерии. Като например по технологията, която използват, по вида на електромотора, който ги задвижва и т.н. Някои от тях са по-ефективни, други по-малко, като ефективността тук се мери в това каква част от подадената енергия е използвана за свиване на работния фреон и каква част се е превърнала в нежелана топлина. Целта тук е не компресорът чрез навивките от меден проводник да отдава топлина, а топлината да се отдава от фреона на вътрешното тяло. Това означава, че енергията, която компресорът черпи от електрическата мрежа, трябва изцяло да се използва за увеличаване на налягането на фреона – въпреки, че идеална машина няма, целта е доближаване до идеалната [1].

Изборът на подходящ мобилен климатик зависи от няколко фактора. На първо място са размерът на помещението и на бюджета. Основното при избора е да е ясно каква е големината на пространството, в което устройството ще се използва. Ако не се знае площта, в която ще работи устройството, или ще се използва в различни помещения, е по-добре да се избере по-мощен уред от този, който е необходим, стига да е в рамките на разполагаемия бюджет.

Също от значение е размерът на устройството, като някои са по-леки и мобилни от други.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Широкото приложение на устройства с нелинеен характер на товара налага необходимостта за установяване на изменението на показателите за качеството на електрическата енергия в електрическата



мрежа на обществен обект, представляващ дерматологична клиника.

Осигуряването и поддържането на качеството на електрическата енергия е основно задължение на електроснабдителните предприятия. От друга страна, потребителите са в правото си да изискват и получават качествена електрическа енергия, като имат задължението чрез своите консуматори и режимите им на работа да не влошават показателите за качество на електрическата енергия в електроснабдителните системи [2].

Имайки предвид използването на голям брой климатични системи с електронни компоненти и устройства в тях, генериращи висши хармоници, могат да окажат съществено влияние върху показателите за качество на електрическата енергия. Освен това тези електронни компоненти и устройства служат за сигурно надеждно управление на климатичните системи [3].

Имайки изложеното до тук, както и фактът, че изборът на конкретен вариант винаги е свързан с преценка на техническите параметри (напр. мощност, икономичен режим на работа и ниски нива на шум), които неминуемо имат и икономическо изражение, бе избран мобилен климатик за конкретните измервания на показателите за качество на електрическата енергия.



Фиг. 1. Мобилен климатик "Нота", модел: HMCH-8419R

Избраният мобилен климатик – е на фирмата "Нота", модел: HMCH-8419R с номинални технически данни:

- номинално напрежение: $U_{\text{ном.}} = 220-240\text{VAC}$;
- номинална честота: $f = 50\text{ Hz}$;
- номинална мощност: $P_{\text{ном.}} = 2000\text{ W}$.

За реализиране на измерванията и анализ на качеството на електрическата енергия е използван измервателен уред METREL, модел MI 2892 – фиг. 2. Измервателният уред разполага с редица функционални възможности, като измерване на ефективната стойност на електрическите величини (true RMS) и възможност за анализ на качеството на електрическата енергия (измерване по стандарт 50160).

Важна функционална възможност на уреда е възможността за запис на протичащите преходни процеси в изследваните електрически вериги, определяне наличието на дисбаланси, отчитане наличието на фликери и изобразяване на фазова диаграма и измерване на температура. Притежава честота на сканиране 49 kSamples/s.

Притежава висок клас на точност, както и графично и таблично представяне на резултатите. Схемата на свързване на измервателния уред е дадена на фиг. 3.

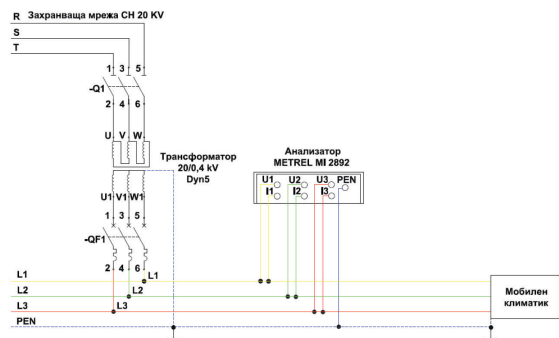


Фиг. 2. Анализатор на качеството на електрическата енергия METREL MI 2892



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

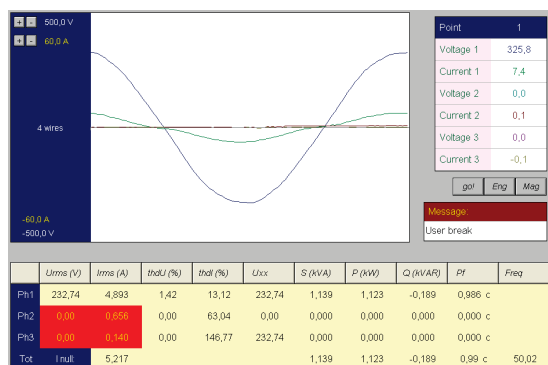
МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ
СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ПЛОВДИВ 23



Фиг. 3. Електрическа схема на свързване

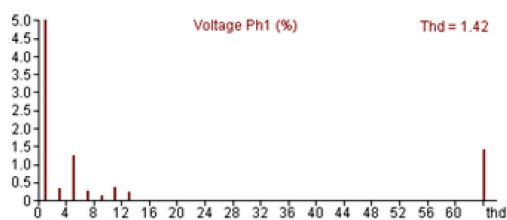
След провеждане на измерванията са получени резултати представени с помощта на софтуерния продукт Metrel Power View в табличен и графичен.

На Фиг. 4 са изобразени измерените електрически величини и формата на напрежението и тока, при работа на мобилния климатик в режим на отопление и натоварване 50%.

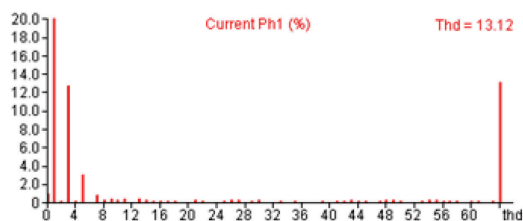


Фиг. 4. Визуализация на измерените електрически величини при натоварване 50%

Графично представяне на висшите хармоници на напрежението и тока в режим на отопление и натоварване 50% са представени на Фиг. 5 и Фиг. 6.



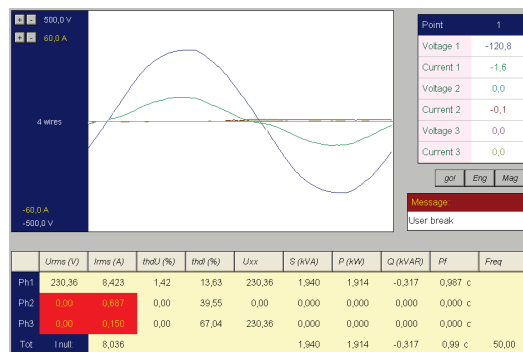
Фиг. 5. Графично представяне на висшите хармоници на напрежението



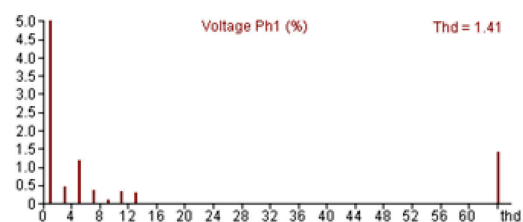
Фиг. 6. Графично представяне на висшите хармоници на тока

На фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9 са дадени получените резултати в табличен и графичен вид при работа на мобилния климатик в режим на отопление и 100% натоварване.

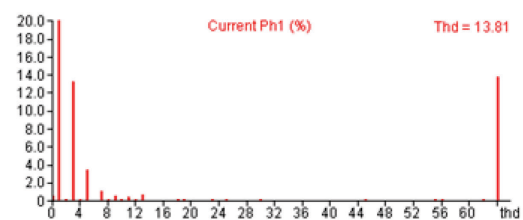
Тъй като консуматора е еднофазен, се отчитат само показанията на уреда за фаза L1 (Ph1).



Фиг. 7 Визуализация на измерените електрически величини при натоварване 100%



Фиг. 8 Графично представяне на висшите хармоници на напрежението при 100% натоварване



Фиг. 9 Графично представяне на висшите хармоници на тока при 100% натоварване



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от измерванията представят разглеждания мобилен климатик като надежден уред. В известна степен се превишава декларираната от производителя консумирана мощност 2000 W – отчетена е стойност 2055,33 W.

Стойностите на висшите хармоници на тока и напрежението са в допустимите граници на изменение. Общо хармонично изкривяване на напрежението по време на измерването – $\text{Thd}_U = 1.42\%$ при 50% натоварване на мобилния климатик, докато при 100% натоварване е $\text{Thd}_U = 1.41\%$ (Фиг. 5 и Фиг. 8). Стойностите отговарят на заложените нормите дадени в стандарта БДС EN 50160, който регламентира големината на общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение да не превишава 8% [4].

Стойностите на общото хармонично изкривяване на тока при 50% натоварване е: $\text{Thd}_I = 13,12\%$, а при 100% натоварване е: $\text{Thd}_I = 13,81\%$ (Фиг. 6 и Фиг. 9).

Измерените стойности на общото хармонично изкривяване на тока е по-ниско от допустимата стойност от 25% дадена в стандарта БДС IEC 61000-3-4 – Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16 A [2].

Тоест, мобилния климатик не генерира висши хармоници на тока и напрежението

и отговаря на декларираните номинални технически данни.

БЛАГОДАРНОСТ

Реализирането на този доклад е благодарение на подкрепата от: Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ на Европейския фонд за регионално развитие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Списание Енерджи ревю, Издателство ТЛЛ Медиа, брой 1, 2017 // Spisanie Enerdji Revyu, Izdatelstvo "TLL Media", broi 1, 2017.
- [2] Цанев Ц., С. Цветкова. Качество на електрическата енергия. Издателство "Авангард Прима", София, 2011 // Canev C., S. Tzvetkova. Kachestvo na elektricheskata energiya. Izdatelstvo "Avangard Prima", Sofiq, 2011.
- [3] Списание Енерджи ревю, Издателство "ТЛЛ Медиа", брой 4, 2011 // Spisanie Enerdji Revyu, Izdatelstvo "TLL Media", broi 4, 2011.
- [4] Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни системи, БДС EN 50160:2003 // Karakteristikiki na naprejenieto na elektricheskata energya, dostavyana ot obshtestvenite razpredelitelni sistemi, BDS EN 50160:2003.



ЕФЕКТИВНО ПЛАНИРАНЕ НА РЕСУРСИ ЗА МАШИННО ОБУЧЕНИЕ

EFFICIENT RESOURCE PLANNING FOR MACHINE LEARNING

RADOSLAV FURNADZHIEV

*Faculty of Electronics and Automation
Technical University Sofia branch Plovdiv*

MITKO SHOPOV

*Faculty of Electronics and Automation
Technical University Sofia branch Plovdiv*

Abstract

Kubernetes has emerged as a powerful tool for managing and orchestrating containerized applications, including those related to machine learning (ML). Resource management role in cloud container services is played by the scheduler's component. The Kubernetes scheduler is an effective tool for managing containerized workloads. It uses a variety of techniques to spread the load between nodes. It considers resource availability, node affinity and anti-affinity rules, topology spread constraints and tries to balance out the resource utilization of nodes. However, it is not perfect and can sometimes make suboptimal decisions. The default scheduling strategy selects node based on a single criteria like number of running pods or available resources. Thus the execution of burstable workloads could lead to degraded performance and bad QoS. This paper analyzes previous studies on scheduling in kubernetes and an evaluation of features recently provided by the new scheduling plugins and scheduler framework for kubernetes.

Keywords: cloud computing, kubernetes, machine learning, scheduling

INTRODUCTION

Cloud computing has transformed the way organizations handle their IT infrastructure by offering a paradigm for managing computing resources on a large scale. Cloud computing is a multi-tenant service model that provides on-demand access to computing resources.

Containers have emerged as a transformative technology in the cloud-native era. They provide a lightweight and portable way to package applications and their dependencies, enabling them to run consistently across different environments.

Kubernetes, an open-source container orchestration platform, has become the de-facto standard for managing and orchestrating containerized applications. It automates the deployment, scaling, and management of containers across clusters of machines, ensuring that applications are running reliably and efficiently. One of the key components of Kubernetes is the scheduler, which is responsible for assigning pods, which are groups of one or more containers, to nodes in the cluster. Researchers have pointed out the advantages of adopting Kubernetes in training and running ML models at a scale [1].

In recent years, the relation between resource utilization, efficient energy consumption, performance, and latency has been widely researched [1, 2, 3, 4, 5].

Our focus is on researching and optimizing the execution ML workloads inside a kubernetes cluster using scheduling tools and frameworks introduced in the newer versions of kubernetes.

BACKGROUND

One of the key challenges in Kubernetes is scheduling, the process of assigning containers to physical or virtual machines within a cluster. The scheduler must consider various factors, such as resource requirements, application constraints, and system-wide performance goals, to make informed decisions that balance resource utilization and application performance.

Multiple publications [1, 2, 3, 4] have researched problems related to resource scheduling. The distributed nature of the cloud and on-demand allocation of computing resources raises problems that can be classified in broad categories:



- Efficient resource utilization
- Allocating resources in heterogeneous environments
- Dynamic workloads
- Interference in the multi-tenant environment

Scheduling algorithms play a crucial role in ensuring that applications are placed on nodes with sufficient resources, minimizing contention, and optimizing overall system throughput.

The default scheduler in Kubernetes is a two-step algorithm consisting of filtering and scoring. It will assign a Pod to a Node in a static procedure executed each scheduling cycle. Figure 1 shows the Kubernetes scheduler workflow.

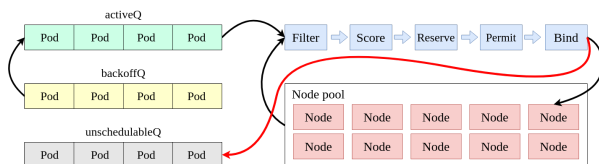


FIGURE 1. Scheduling process

The scheduling mechanism relies on three queues:

- active (activeQ): providing pods for immediate scheduling
- unschedulable (unschedulableQ): for parking pods which are waiting for certain condition(s) to happen
- backoff (podBackoffQ): exponentially postponing pods which failed to be scheduled but are expected to get scheduled eventually.

In the first step the default scheduler filters out Nodes that do not meet the Pod's resource requirements or affinity or anti-affinity constraints. Each Node could have assigned multiple taints and Pods can have an affinity that attracts them to a certain set of nodes. This allows a small subset of nodes to have specialized hardware (for example FPGAs or GPUs) and pods that don't require the specialized hardware can be kept off those nodes.

After filtering out ineligible Nodes, the scheduler scores the filtered nodes based on the active plugins and their scoring strategy. The highest scoring node is chosen for the pod placement.

The inflexibility of this static algorithm has brought up several developments allowing the scheduler to be extended or replaced.

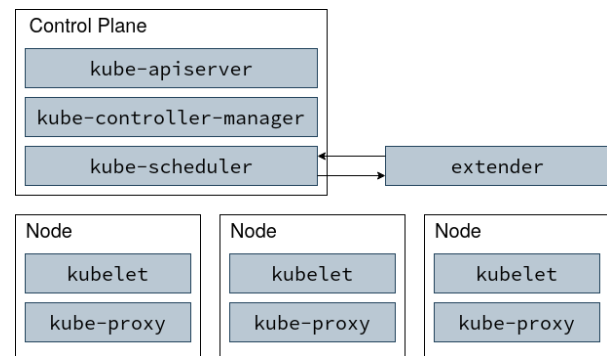


FIGURE 2. Extender process

Scheduler extender is the initial proposal for extending the scheduler [6]. An extender is an external service that registers hooks that can custom logic to each step of the scheduling process. When a scheduling decision is made, the scheduler sends a HTTP request calling a webhook registered by an extender process to execute custom logic and make additional decisions. This way, the scheduling decision made in the step can be changed.

Extender processes, however, can present some difficulties. They can make the scheduling process more complex, and lower performance. Having extension logic called by sending HTTP requests decreases performance and increases latency compared to local function calls. Also extension can be made only in fixed locations, which lowers flexibility.

A custom scheduler on the other hand runs alongside the default Kubernetes scheduler [7].



Some problems may occur when running two or more schedulers simultaneously. The schedulers may schedule different pod on the same node and as a result a resource conflict may occur.

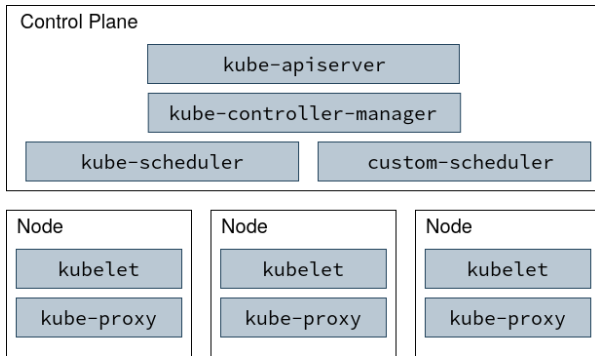


FIGURE 3. Custom scheduler

The most recently developed extension called Scheduler framework [8] provides a set of pluggable APIs for extending the default scheduler. Plugins are compiled into the scheduler giving the best of both worlds. Being the most recent development and providing the greatest amount of control and flexibility.

PURPOSE AND TASKS OF THE STUDY

In this paper we introduce our methodology capturing, analyzing and better understanding patterns in scheduling and resource usage in kubernetes. The variability of workloads makes it difficult for the Kubernetes scheduler to converge on a stable state. To solve this problem, we need to first understand the nature of this variability. We can achieve this by observing arrival patterns and runtimes of workloads on different system configurations.

We focus on online analytical processing and machine learning workloads and analyze what are the challenges in achieving better utilization efficiency.

Our initial goal is to test novel (for kubernetes) scheduling algorithms:

- Coscheduling scheduling pods together on the same node to achieve specific performance or availability goals.
- Preemption Toleration allows pods to specify whether they can tolerate being preempted.
- Capacity Scheduling algorithm, which greedily assigns tasks to workers that have more available resources.
- Trimaran Load Aware Scheduling - taking into account the gap between resource allocation and actual resource utilization.

METHODOLOGY

The experiments are run on a Openstack private cloud.

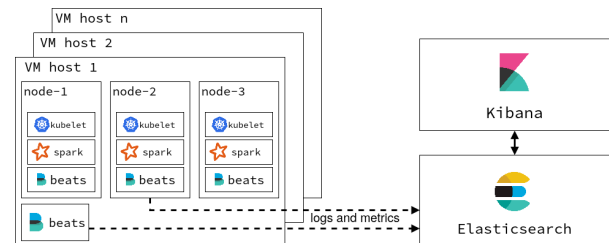


FIGURE 4. Monitoring and data collection

The Elasticsearch agent is deployed to each node in the cluster and VM host in the cloud environment. The agent collects logged metrics to an off-cluster Elasticsearch instance.

By collecting and analyzing logs, metrics, and traces from Kubernetes pods and nodes in Elasticsearch valuable insights can be gained. We mainly monitor utilization efficiency of computing resources and job metrics like completion time and makespan. We also monitor logs related to scheduler events and status of the scheduler queues.

The following workloads are chosen as representation of common problems:

- TPC-H [9] decision support benchmark implemented in Apache Spark using dataframe API representing typical business oriented analytical workload.



- Logistic regression and Random Forest regression in Apache Spark representing a typical machine learning workload
- PageRank in Apache Spark representing a graph analytics workload

By collecting metrics and building models describing workloads and their variability we can utilize another tool created by the kubernetes community.

Kubernetes scheduler simulator[10] is a community project designed to allow testing of different scheduler configurations. By generating various workload patterns and simulating the scheduling process, we can better assess the impact of scheduling decisions over a vastly larger scale.

CONCLUSION

The deployed system provides an in-depth view of the planning process and provides complete information on the utilization of computing resources. The future work includes adopting the proposed environment to study utilization patterns, methods and algorithms and to identify potential areas for improvements to achieve more efficient utilization of resources and cost-effectiveness. And research the application of machine learning techniques to build models that evolve over time or provide users with generated models for specific situations.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the European Regional Development Fund within the framework of the Operational Program \Science and Education for Smart Growth 2014-2020, project CC\ Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies, No BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCES

- [1] Cox, C., Sun, D., Tarn, E., Singh, A., Kelkar, R., & Goodwin, D. (2020). Serverless inferencing on Kubernetes. arXiv preprint arXiv:2007.07366.
- [2] Zhang, W., Ma, X., & Zhang, J. (2018). Research on Kubernetes' Resource Scheduling Scheme. *International Conference on Communication and Network Security*.
- [3] Ahmed, G.E., Gil-Castiñeira, F.J., & Costa-Montenegro, E. (2020). KubCG: A dynamic Kubernetes scheduler for heterogeneous clusters. *Software: Practice and Experience*, 51, 213 - 234.
- [4] Carrión, C. (2022). Kubernetes Scheduling: Taxonomy, Ongoing Issues and Challenges. *ACM Computing Surveys*, 55, 1 - 37.
- [5] Townend, P., Clement, S.J., Burdett, D., Yang, R., Shaw, J., Slater, B., & Xu, J. (2019). Invited Paper: Improving Data Center Efficiency Through Holistic Scheduling In Kubernetes. *2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, 156-15610.
- [6] Kubernetes community. KEP-1819: Scheduler extender. Retrieved 11.2023 from: <https://github.com/kubernetes/enhancements/tree/master/keps/sig-scheduling/1819-scheduler-extender>
- [7] Kubernetes community. Configure Multiple Schedulers. Retrieved 11.2023 from: <https://kubernetes.io/docs/tasks/extend-kubernetes/configure-multiple-schedulers>
- [8] Kubernetes community. Scheduling Framework. Retrieved 11.2023 from: <https://github.com/kubernetes/enhancements/tree/master/keps/sig-scheduling/624-scheduling-framework>
- [9] Hogan, T. (2009). Overview of TPC Benchmark E: The Next Generation of OLTP Benchmarks. TPC Technology Conference.
- [10] Kubernetes community.: Scenario-based simulation. Retrieved 11.2023 from: <https://github.com/kubernetes-sigs/kube-scheduler-simulator/tree/master/keps/140-scenario-based-simulation>



ВЛИЯНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА И ВРЕМЕТО НА ОТВРЪЩАНЕ ВЪРХУ МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВУФАЗЕН АЛУМИНИЕВ БРОНЗ

INFLUENCE OF AGEING TEMPERATURE AND TIME ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE ALUMINIUM BRONZE

Vladimir Todorov

Technical University of Gabrovo

e-mail: v_todorov@tugab.bg

Abstract

Aluminium bronzes possess a unique combination of high strength and wear and corrosion resistance in aggressive environments; thus, these alloys find wide application in marine, shipbuilding, aviation, railway, offshore platform applications and other fields. Iron-aluminium bronzes are the cheapest and most widely used. When the aluminium content is above 9.4 wt%, Iron-aluminium bronzes is biphasic (i.e. it undergoes β -transformation) and can be subjected to all heat-treatment types depending on the desired operating behaviour of the bronze component. This article presents correlations between the primary mechanical characteristics (yield limit, tensile strength, elongation, hardness and impact toughness) and the ageing temperature and time of quench at 920°C in water Cu-11Al-6Fe bronze, obtained using the centrifugal casting method.

Keywords: Aluminium bronze with β -transformation; Cu-11Al-6Fe bronze; heat treatment; mechanical characteristics.

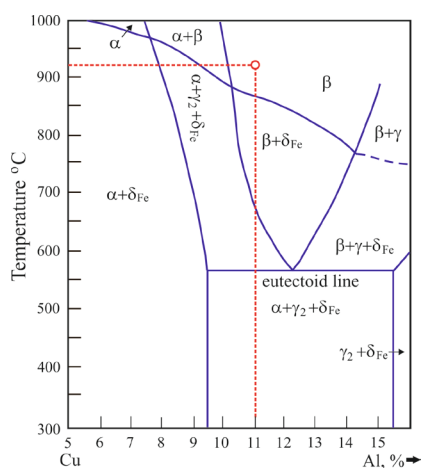
ВЪВЕДЕНИЕ

Алуминиевият бронз е известен със своята висока устойчивост на корозия и окисление, съчетани с изключително добри механични свойства. Тези сплави са лесни за получаване и също така добре се заваряват, поради което са били използвани за направата на някои от най-големите съществуващи ляти конструкции от цветни метали и сплави. Наличието на желязо в тях води до издребняване на зърната, което придава допълнителна якост на тези сплави. Поради това, тези бронзи са предпочитани конструкционни материали за различни приложения: зъбни колела, гайки, водачи, корпуси и уплътнения в клапани и помпи, втулки, бутала, елементи в оръжейната промишленост, тръби за офшорни платформи, в корабни двигатели и корабни вилгела.

Желязо-алуминиевите бронзи Cu-Al-Fe

са въведени в индустрията през 1870 г [1,2]. Те обикновено съдържа до 11% алуминий, при което медта образува α -твърд разтвор с алуминият. Повишеното съдържание на алуминий в бронза води до пониска плътност в сравнение с чистата мед, което е важно да се има предвид за практическото му приложение. С увеличаване количеството на алуминий до 4 – 5%, якостта, твърдостта и пластичността се повишават. С по-нататъшното увеличаване съдържанието на алуминий пластичността намалява, но якостта и твърдостта продължават да се повишават. Освен това от диаграмата на фазово равновесие Cu-Al-5Fe – фиг. 1. следва, че желязо-алуминиевия бронз със съдържание на алуминий под 9,4% има еднофазна структура (α -фаза). Тези бронзи обикновено не се подлагат на термична обработка, с цел повишаване на тяхната якост и твърдост. Такова увеличе-

ние може да се постигне, чрез студена пластична деформация. Термичната обработка на еднофазен желязо-алуминиев бронз е ограничена до хомогенизиращо или рекристализационно отгряване. Въпреки това, желязо-алуминиевите бронзи с β -трансформация (съдържание на Al над 9,4%) могат да бъдат подложени на различни видове термична обработка. В този



Фигура 1. Равновесна фазова диаграма Cu-Al-Fe с 5% съдържание на желязо

двуфазен бронз при стайна температура липсва β -фазата, той съчетава висока якост с добра корозионна устойчивост и е особено подходящ за термична обработка. Промяна в микроструктурата, чрез термична обработка на тези бронзи, ще води и до промяна в механичните им свойства [3,4]. Твърдостта е най-често изследваното механично свойство. Останалите свойства са изследвани спорадично и липсва информация за други (напр. граница на провлачване).

Целта на настоящото изследване е да се установи влиянието на температурата и времето на задържане при отгряване върху механичните характеристики на желязо-алуминиев бронз Cu-11Al-6Fe.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследваният желязо-алуминиев бронз Cu-11Al-6Fe е получен по метода на центробежно леење под формата на цилиндрични втулки, със следните номинални размери: външен диаметър 116 мм, дължина 180 мм и дебелина на стената 13 мм - фиг. 2.



Фиг. 2. Цилиндрична втулка за изработване на пробни тела за изпитване на механичните характеристики

Химичния състав на сплавта е определен с помощта на оптичен емисионен спектрометър. Концентрацията на легиращите елементи е дадена в проценти, измерена с разделителна способност 0,001% - табл. 1.

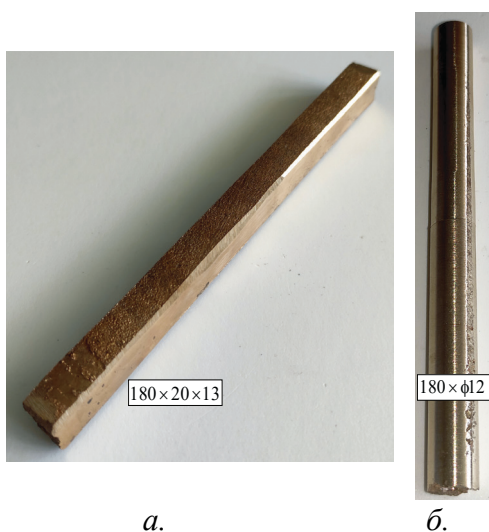
Таблица 1. Химичен състав на Cu-11Al-6Fe бронз

Cu	Al	Fe	Mn	Ni	Pb
80.95	11.0	6.26	0.905	0.391	0.028
Zn	Si	Sn	Mg	S	Други
0.280	0.022	0.071	0.005	0.010	В норма

За изработване на образци за механични изпитания втулките се нарязват чрез механична ножовка по техните оси на 17 заготовки – фиг. 3.а. Час от тях, предназначени за изработване на образци за опън, се струговат за да се получи цилиндрична форма с диаметър 12 мм – фиг. 3.б.

Всички заготовки (с изключение на три ротационни и три призматични) се нагряват до 920°C в продължение на един час и бързо се охлаждат във вода при 20°C .

Температурата от 920°C е избрана от равновесната фазова диаграма Cu-Al-Fe с 5% съдържание на желязо [1], въз основа на химичния състав на сплавта – фиг. 1.

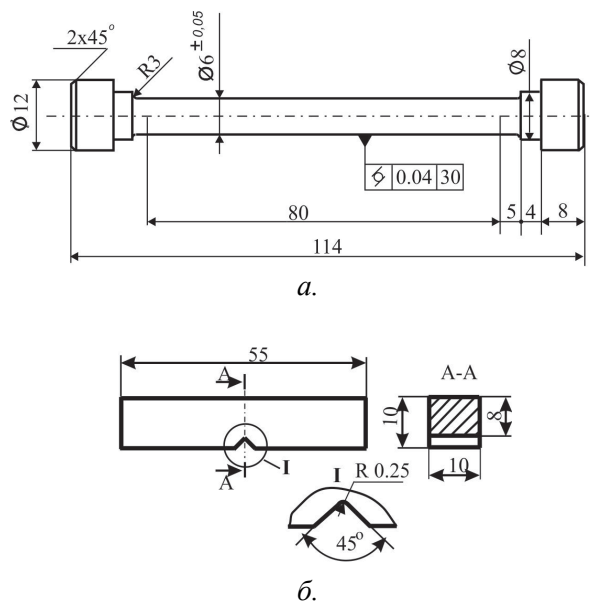


Фиг. 3. Етапи за изработване на образци за опън

Ефектите от температурата и времето на отвярщане върху механичните характеристики на бронза са изследвани на 8 групи образци:

- 1 гр. – след отливане;
- 2 гр. – закалени при 920°C във вода;
- 3 гр. – закалени и отвярнати при 200°C със времена на задържане от 1 до 4 часа;
- 4 гр. – закалени и отвярнати при 300°C със времена на задържане от 1 до 4 часа;
- 5 гр. – закалени и отвярнати при 400°C със времена на задържане от 1 до 4 часа;
- 6 гр. – закалени и отвярнати при 500°C със времена на задържане от 1 до 4 часа;
- 7 гр. – закалени и отвярнати при 600°C със времена на задържане от 1 до 4 часа;
- 8 гр. – закалени и отвярнати при 700°C със времена на задържане от 1 до 4 часа.

За всяка експериментална точна от съответната група са изработени по три образца за изпитване якостта на опън и ударната жилавост – фиг. 4. Резултатът за всяка група е установен с помощта на средната аритметична стойност, получена от три проби.



Фиг. 4. . Вид на образца (размерите са в mm):
а. изпитване на опън; б. Тест на Шарпи
(ударна жилавост);

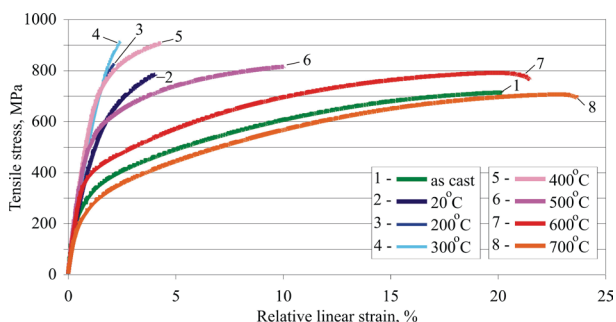
Якостта на опън, границата на провлачване и удължението се определят от тестове за опън при стайна температура, като се използва машина за изпитване Zwick/Roell Vibrophore 100 със скорост на деформация 10^{-3} s^{-1} . Размерите на образците са показани на фигура 4.а, съгласно [ISO 6892-1:2019, 2019].

Ударната жилавост е оценена съгласно [ISO 148-1:2016, 2016] с помощта на универсален чук на Шарпи с максимална енергия на удара 300 J. Размерите на образците са показани на фигура 4.б.

Твърдостта е измерена върху образците за ударна жилавост съгласно [ISO 6506-1:2014, 2014] с помощта на уред за изпитване на твърдост ZWICK/Indentec - ZHVμ-S със сферичен индентор ($D=2,5\text{ mm}$), натоварване $F=63\text{ kg}$ и време на задържане

10 s. На всеки образец са извършени по пет измервания и е взета за резултат получената средна аритметична стойност.

На фигура 5. е показана диаграмата напрежение – деформация получена при различните температури на отвързване. От нея се получава информация за границата на провлачване, якостта на опън и удължението в зависимост от температурата на отвързване.

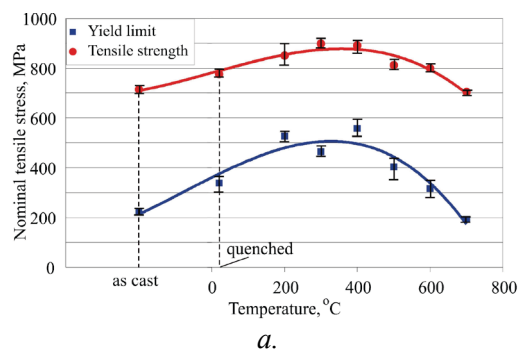


Фиг. 5. Влияние на температурата на отвързване върху диаграмата напрежение – деформация на Cu-11Al-6Fe бронз (време на задържане 3 часа)

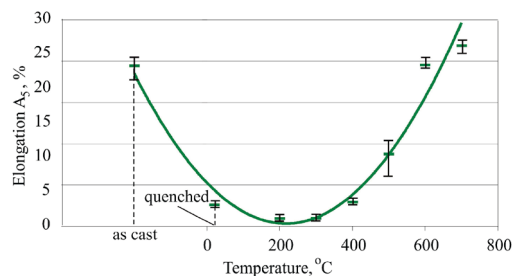
Температурата на отвързване оказва съществено влияние на статичната якост и пластичността на бронза. От тези диаграми е получена информация за границата на провлачване, якостта на опън и удължението в зависимост от температурата на отвързване.

На фиг. 6 е показан ефекта от температурата на отвързване върху механичните характеристики. Границата на провлачване и якостта на опън – фиг. 6.а. показват сходна тенденция на промяна: те се увеличават с повишаване на температурата до $350 - 400^\circ\text{C}$, след което намаляват. Скоростите на нарастване и намаляване на границата на провлачване са по-големи от тези на якостта на опън. Относителното удължение характеризира пластичността на материала и показва обратна тенденция: тя се увеличава с повишаване температурата на отвързване – фиг. 6.б. На фиг. 6.в. е показана промяната на твърдостта в зависимост от температурата на отвързване. Тенденцията на промяната на твърдостта е

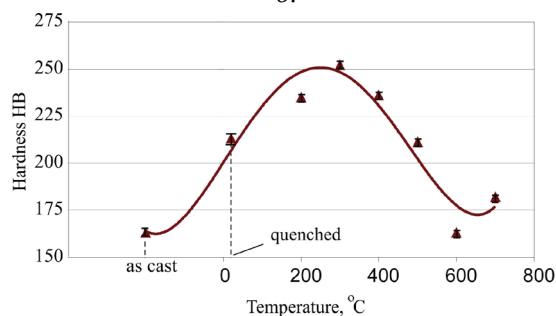
аналогична на тази за границата на провлачване и якостта на опън. Влиянието на температурата на отвързване върху ударната жилавост е показано на фиг. 6.г.



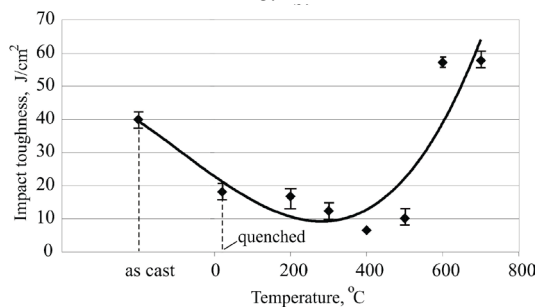
а.



б.



в.

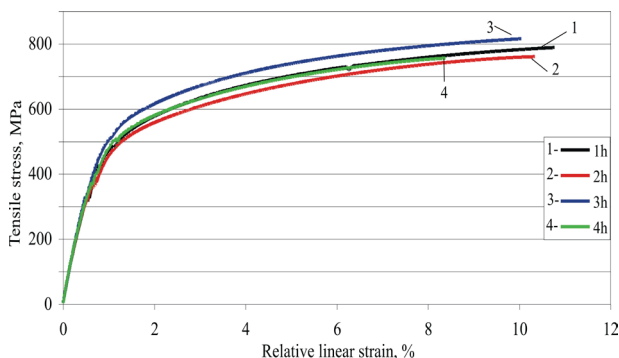


г.

Фиг. 6. Влияние на температурата на отвързване върху основните механични характеристики на Cu-11Al-6Fe бронз (време на задържане 3 часа): а. граница на провлачване и якост на опън; б. удължение; в. твърдост и г. ударна жилавост

Очаквано тук тенденцията на промяна е аналогична с тази на удължението и противоположна на тенденциите на промяна в якостта и твърдостта.

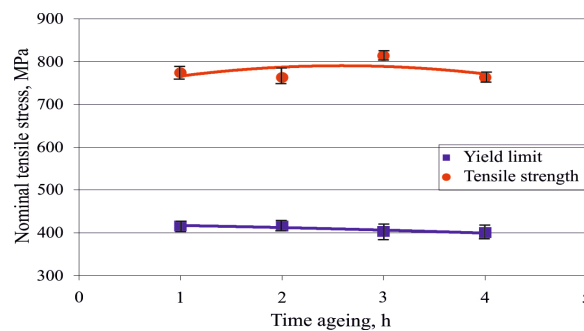
На фигура 7. е показана диаграмата напрежение – деформация получена при различни времена на отвяряване.



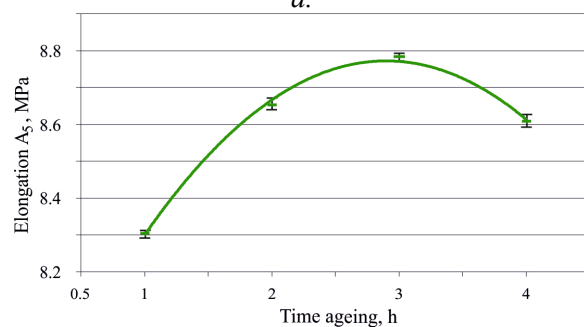
Фиг. 7. Влияние на времето на отвяряване върху диаграмата напрежение – деформация на Cu-11Al-6Fe бронз (температура на отвяряване 500° C)

В сравнение с диаграмата от фиг. 5. се вижда, че влиянието на времето на отвяряване в рамките на изследвания интервал от време е значително по-слабо от влиянието на температурата на отвяряване. Влиянието на времето на задържане при отвяряване може да бъде по-значимо при други температури на отвяряване.

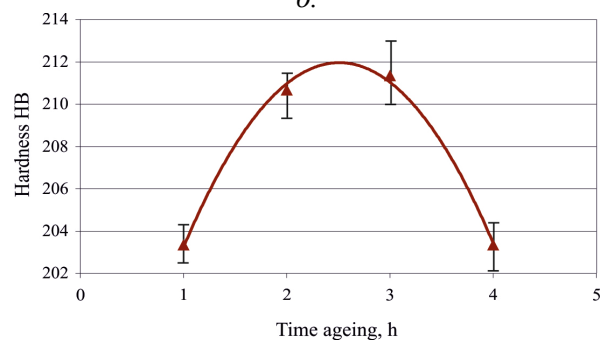
На фиг. 8. е показан ефекта от времето на задържане при отвяряване върху механичните характеристики. Границата на провлачване показва слаба тенденция към намаляване с увеличаване времето на задържане, докато якостта на опън достига максимална стойност при около 3 часа. Удължението и твърдостта показват аналогична тенденция (в тесен интервал на изменение) с тази на якостта на опън. Обратно ударната жилавост (аналогично на границата на провлачване) намалява с увеличаване времето на отвяряване.



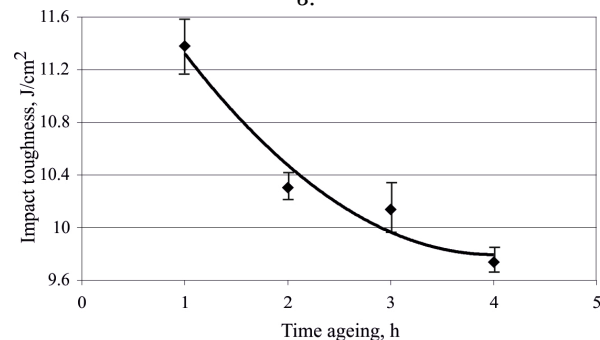
а.



б.



в.



г.

Фиг. 8. Влияние на времето на отвяряване върху основните механични характеристики на Cu-11Al-6Fe бронз: а. граница на провлачване и якост на опън; б. удължение; в. твърдост и г. ударна жилавост



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Като резултат от това изследване са представени значимите нови открития относно термичната обработка (закаляване и отвяряне) на желязо-алуминиев бронз Cu-11Al-6Fe с β -трансформация, получен по метода на центробежно леење.

Механични характеристики (граница на провлачване, якост на опън, удължение, твърдост и ударна жилавост) на желязо-алуминиевите бронзи с β -трансформация варират в широки граници в зависимост от режимите на термична обработка. Следователно, техните характеристики могат да бъдат подходящо контролирани, чрез температурата и времето на задържане при отвяряне, според функционалното предназначение на изделията от тези сплави. От двата определящи фактора (температура и време), значително по-голяма тежест има температурата на отвяряне. Температурният интервал от 600 до 700°C максимизира пластичността и динамичната якост, докато твърдостта и статичната якост достигат максимална стойност в интервала от 300°C до 500°C.

Зависимостите на механичните характеристики от твърдостта са нелинейни. С увеличаването на твърдостта статичната якост се увеличава до определена стойност на твърдост (приблизително 230 HB за границата на провлачване и 210 HB за якостта на опън) и впоследствие намалява. Удължението и динамичната якост непрекъснато намаляват, когато твърдостта се увеличава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият доклад е свързан с изпълнението на задачи по проект BG05M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brezina, P. Heat treatment of complex aluminium bronzes. *International Metals Reviews* **1982**, 27(2), 77-120.
- [2] Alam, S.; Marshall R.I.; Sasaki, S. Metallurgical and tribological investigations of aluminium bronze bushes made by a novel centrifugal casting technique. *Tribology International* 1996, 29(6), 487-492.
- [3] Mi, G., Zhang, J.; Wang, H. The effect of ageing heat treatment on the mechanical properties of Cu-Al-Fe-(x) alloys. *Key Engineering Materials* 2011, 467-469, 257-262
- [4] Chau, M.Q.; Vu, A.T.; Le, T.S.; Mai, V.T.; Nguyen, D.N.; Doan, X.T.; Do, H.C.; Nguyen, D.T. Influence of tempering time on microstructure and mechanical properties of CuAl9Fe4 alloy. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* **2021**, 44(7), 75-85.
- [5] Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Argirov, Y.; Todorov, V.; Mechkarova, T. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue and wear of Cu-10Al-5Fe bronze. *Materials* **2022**, 15, 8905.

ВЛИЯНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА ОТВРЪЩАНЕ ВЪРХУ ЕВОЛЮЦИЯТА НА МИКРОСТРУКТУРАТА НА ДВУФАЗЕН АЛУМИНИЕВ БРОНЗ

INFLUENCE OF AGEING TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE EVOLUTION OF A TWO-PHASE ALUMINIUM BRONZE

Vladimir Todorov

Technical University of Gabrovo

e-mail: v_todorov@tugab.bg

Abstract

In the present article, the influence of heat treatment on the microstructure of iron-aluminum bronze Cu-11Al-6Fe is investigated. The microstructure was studied on castings obtained by the centrifugal casting method. The samples for microstructural analysis were quenched at 920°C in water and then aged for 3 h at temperatures of: 200, 300, 400, 500, 600 and 700°C.

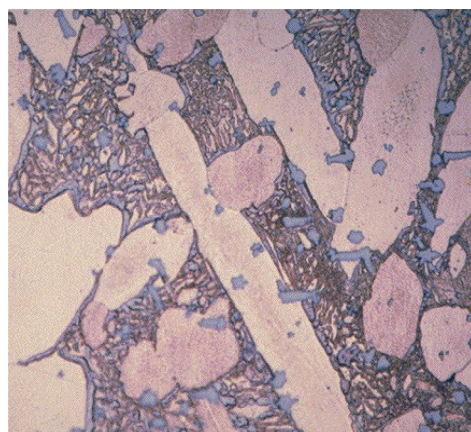
Keywords: Aluminium bronze with β -transformation; Cu-11Al-6Fe bronze; heat treatment; microstructure.

ВЪВЕДЕНИЕ

Бинарната сплав Cu-Al е известна, като алуминиев бронз. В практиката се използват комплексни алуминиеви бронзи, които се означават с общата формула Cu-Al-X, където X = Fe, Ni, Mn, Be, Co, Si и Sn [1]. Тези сплави се характеризират с висока якост, износоустойчивост и устойчивост на корозия в агресивни среди, включително морска вода. Ето защо тези бронзи са предпочитани конструкционни материали за различни приложения: зъбни колела, гайки, водачи, корпуси и уплътнения във вентили и помпи, втулки, бутала, тръби за офшорни платформи, корабни двигатели, корабни витла, елементи в оръжейната промишленост и втулки за плъзгащи лагери, които са свързани с механичен удар и циклично натоварване. Ефектите на различни елементи върху специфичните свойства и експлоатационното поведение на алуминиевите бронзи са описани в [1].

Високолегираните двуфазни бронзи, съдържат Al в интервала от 8 до 11% и добав-

ки на желязо и никел, осигуряващи по-висока якост – фиг. 1. По-високото съдържание на Al рефлектира в по-голяма якост вследствие на наличието на по-твърдата обемноцентрирана кубична бета фаза, което прави тези бронзи по-подходящи за термообработка и леене [2].



Фиг. 1. Микроструктури на алуминиев бронз съдържащ от 10 до 11,5% Al, след отливане и отгряване

Целта на настоящото изследване е да се установи влиянието на температурата на отвърщане върху микроструктурата на желязо-алуминиев бронз Cu-11Al-6Fe, получен по метода на центробежно леење.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследваният желязо-алуминиев бронз Cu-11Al-6Fe е получен по метода на центробежно леење под формата на цилиндрични втулки, със следните номинални размери: външен диаметър 116 мм, дължина 180 мм и дебелина на стената 13 мм - фиг. 2.



Фиг. 2. Цилиндрична втулка за изработване на пробни тела за изпитване на механичните характеристики

Химичния състав на сплавта е определен с помощта на оптичен емисионен спектрометър. Концентрацията на легиращите елементи е дадена в проценти, измерена с разделителна способност 0,001% - табл. 1.

Таблица 1. Химичен състав на Cu-11Al-6Fe бронз

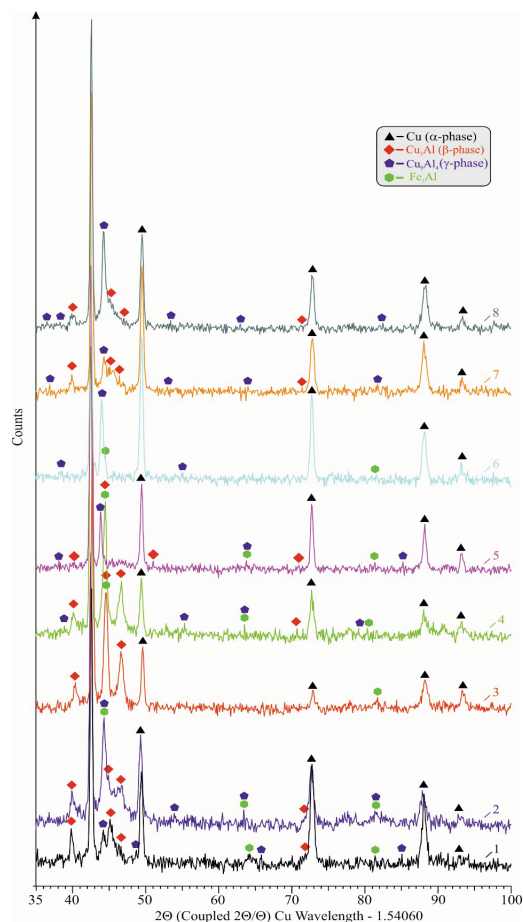
Cu	Al	Fe	Mn	Ni	Pb
80.95	11.0	6.26	0.905	0.391	0.028
Zn	Si	Sn	Mg	S	Други
0.280	0.022	0.071	0.005	0.010	В норма

За установяване влиянието на температурата на отвърщане върху микроструктурата на бронза са изследвани 8 групи образци:

- 1 гр. – след отливане;
- 2 гр. – закалени при 920° С във вода;
- 3 гр. – закалени и отвърнати при 200° С;
- 4 гр. – закалени и отвърнати при 300° С;
- 5 гр. – закалени и отвърнати при 400° С;
- 6 гр. – закалени и отвърнати при 500° С;
- 7 гр. – закалени и отвърнати при 600° С;
- 8 гр. – закалени и отвърнати при 700° С.

Всички образци с изключение на тези от 1 група са закалени при 920° С във вода.

Фазовият анализ е проведен чрез рентгенов дифрактометър (XRD, Bruker D8 Advance diffractometer). За определяне позициите на пиковите е използвана Crystallography Open Database. Микроструктурата на изследваните образци се наблюдава чрез сканираща електронна микроскопия (SEM, LYRA I XMU, Tescan), след предварителното им полиране и ецване с помощта на 20% разтвор на FeCl₃.



Фиг. 3. Резултати от фазов анализ в зависимост от температурата на отвърщане: 1 – отливка; 2 – закален; 3 – отвърнат при 200°С; 4 – при 300°С; 5 – при 400°С; 6 – при 500°С; 7 – при 600°С и 8 – при 700°С

На фиг. 3 са показани резултатите от фазовия анализ. Структурата след центробежно леене се характеризира с добра хомогенност – фиг. 3. Обогащените с мед α -фазови зърна имат удължена форма (50–60 μm), която е характерна за дендритните структури, получени чрез леене. Желязото не се разтваря в медта и образува с алуминия интерметалното съединение Fe_3Al – фиг. 3. Това съединение се отлага в медния твърд разтвор под формата на диспергирани и по-големи коагулирани утайки. Фазите - γ' и β са разположени между зърната на α -фазата и се наблюдават като евтектоидни зони $\text{Eв}(\alpha+\gamma')$ и игловидни кристали, получени чрез бездифузионна (подобна на мартензит) трансформация $\beta \rightarrow \beta'$. Мартензитната трансформация при центробежно леене се дължи на бързото охлаждане, характерно за леенето на цветни сплави в метални форми. Количеството от β' - фаза (Cu_3Al) и γ - фаза (Cu_9Al_4) е значително по-малко от основния α -твърд разтвор – фиг. 3.

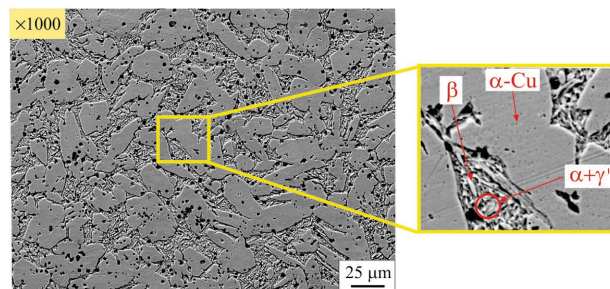
На фигури от 4 до 11 са показани получените микроструктури след отливане – фиг. 4 и след различните режими на термична обработка за групи от 2 до 8.

След закаляване при 920° C във вода (2гр.) се образува едрозърнеста структура – фиг. 5. На границата на зърната се наблюдават диспергирани игли от мартензитен тип образували се поради наличие на бездифузионна трансформация $\beta \rightarrow \beta'$. Между иглите се разполагат диспергирани зони в следствие на евтектоидно разпадане $\text{Eв}(\alpha+\gamma')$. Желязото се разтваря частично в β -фазата и се отделя като интерметално съединение Fe_3Al в дисперсна форма.

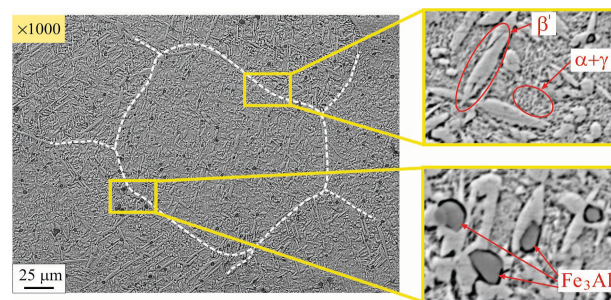
След отвърщане при 200° C (3гр.) се наблюдава увеличение на игловидните зърна по отношение на размера и количеството им – фиг. 6. Този ефект е предизвикан поради обратната трансформация $\gamma' \rightarrow \beta_1$ – фиг. 3. в следствие на температурно ускорена дифузия. β – фазата е най-твърдата от

всички регистрирани фази на фиг. 3., което ще доведе до значително повишаване на твърдостта на изследвания бронз. Между игловидните β -зърна се образува механична смес от обогатени с мед α -зърна и интерметалното съединение Fe_3Al . Изразени граници на α -зърната не се наблюдават.

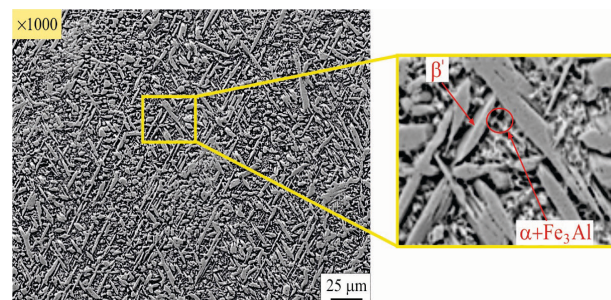
С повишаване температурата на отвърщане до 300° C (4гр.) дифузията се увеличава причинявайки частично разпадане на игловидните β' -зърна: $\beta' \rightarrow \beta_1 + \gamma'$ – фиг. 7. Като следствие от коагулацията на дисперсната фаза на Fe_3Al се наблюдават относително големи зърна от това интерметално съединение.



Фиг. 4. Микроструктура след отливане

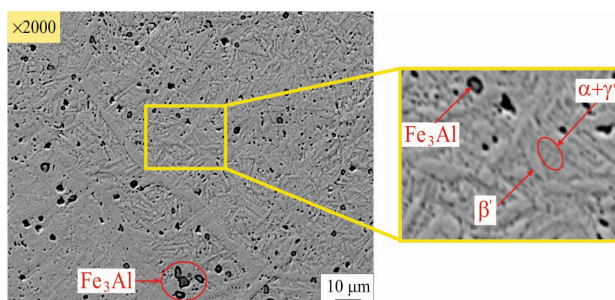
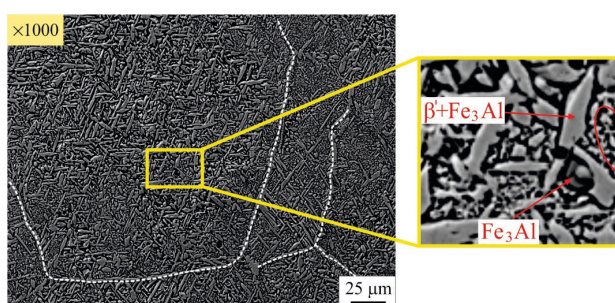
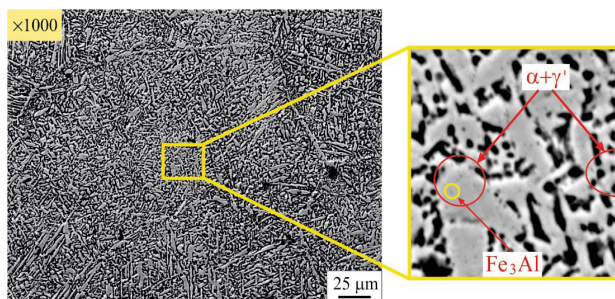
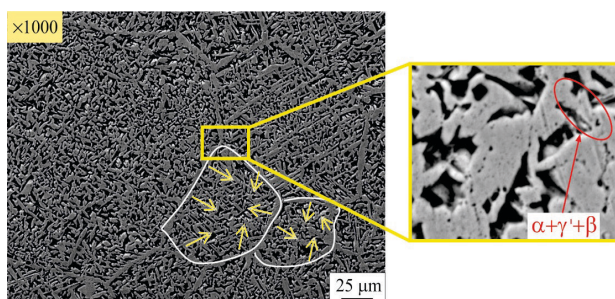
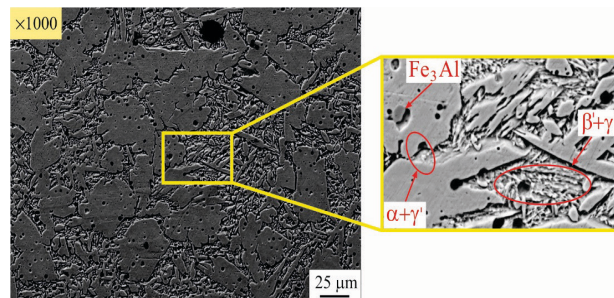


Фиг. 5. Микроструктура след закаляване



Фиг. 6. Микроструктура след отвърщане

при 200° C

**Фиг. 7.** Микроструктура след отвяряне
при 300° C**Фиг. 8.** Микроструктура след отвяряне
при 400° C**Фиг. 9.** Микроструктура след отвяряне
при 500° C**Фиг. 10.** Микроструктура след отвяряне
при 600° C**Фиг. 11.** Микроструктура след отвяряне
при 700° C

След отвяряне при 400° C (5гр.) се наблюдават зърна, чиито граници представляват мрежа от ивични издребнени α -зърна, маркирани с пунктирна линия на фиг. 8. На места се забелязват зони с частично разкъсване на границите. Индуцираната от температурата дифузия ускорява нуклеацията на мрежата от α -твърд разтвор и трансформацията на $\beta' \rightarrow \text{Ев}(\alpha+\gamma') + \beta_1$. В останалите β' -зърна разтвореното желязо се отделя под формата на диспергирани частици от Fe_3Al .

На фиг. 9 е показана микроструктурата след отвяряне при 500° C (6гр.). Процесът на фазово разделяне $\beta' + \beta_1 \rightarrow \text{Ев}(\alpha+\gamma')$ е завършил. Не са открити метастабилни фази – фиг. 3. В зърната на α -твърдия разтвор се наблюдават утаени диспергирани частици от Fe_3Al . Поради наличието на дифузионни процеси се наблюдава изтъняване на ивичните α -зърна. Хомогенната и рафинирана структура, както и диспергираните частици на Fe_3Al дават предпоставка за получаване на високи стойности за якостта на опън на изследвания материал.

Структурата на отвярнатият при 600° C (7гр.) бронз е показана на фиг. 10. Тук нагряването е реализирано над евтектоидната линия (565° C) според равновесната фазова диаграма Cu-Al-Fe с 5% съдържание на желязо [1]. В тази област α -фазата, γ_2 -фазата и β_{Fe} са в равновесие. И трите фази са стабилни под евтектоидната линия. За разлика от диаграмата в зоната на нагрява-



не ще се съдържа β -фаза поради първоначално закалената структура (виж позиция 2 на фиг. 3). Метастабилната β' -фаза се образува по време на охлаждане на спокоен въздух, следствие от частичната мартензитна трансформация $\beta \rightarrow \beta'$ и част от зърната претърпяват дифузионен разпад $\beta \rightarrow \alpha + \gamma'$. При тази температура на отвърщане се образуват зони с ламеларни издребнени α -зърна (очертани с бяла линия).

При температура на отвърщане 700°C се създават условия за групиране и последваща коагулация на обогатената с мед α -фаза – фиг. 11. Механизмът на групиране и растеж на равноосни α -зърна вероятно е подобен на процеса, протичащ при по-ниска температура (виж фиг. 10). По-високите температури ускоряват процесите на дифузия и предизвикват нарастване на по-едрите зърна за сметка на по-малките. По този начин получената структура е нехомогенна – образуват се зони с едрозърнеста α -фаза и затворени зони, съдържащи механична смес от частични мартензитни и дифузионни трансформации $\beta \rightarrow \beta' + \alpha'$. Частичната мартензитна трансформация се дължи на по-високата скорост на охлаждане на въздух. С повишаване температурата на нагряване се увеличава хомогенността на β -фазата. Проучване [4] установи, че β -фазата частично разтваря железни атоми. Това може да е причината да не се наблюдава пик на Fe_3Al в рентгеновия анализ от фиг. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвано е влиянието на температурата на отвърщане върху еволюцията на микроструктурата на желязо-алуминиев бронз с β -трансформация.

Изследванията са проведени върху образци получени по метода на центробежно леене. Подготвени са 8 групи образци на който е извършен рентгенофазов и микроструктурен анализ.

Установено е, че образците след отливане се характеризират с хомогенна микроструктура. Обогадените с мед α -фазови зърна имат удължена форма ($50\text{--}60\ \mu\text{m}$), която е характерна за дендритните структури, получени чрез леене. Също така в пробите след отливане е установена мартензитна трансформация, дължаща се на бързото охлаждане в металната форма при центробежното леене. Установеното количество от β' (Cu_3Al) и γ -фази (Cu_9Al_4) е значително по-малко от основния α -твърд разтвор.

Образуваната след закаляване при 920°C във вода структура е едрозърнеста. Наблюдават се диспергирани игли от мартензитен тип образували се поради наличие на бездифузионна трансформация $\beta \rightarrow \beta'$.

Отвърщането при 200°C води до увеличаване на игловидните зърна по отношение на размера и количеството им.

При температурата на отвърщане 300°C се получава частично разпадане на игловидните β' -зърна във $\beta' \rightarrow \beta_1 + \gamma'$.

След отвърщане при 400°C се наблюдават зърна, чиито граници представляват ивични издребнени α -зърна. На места се забелязват зони с частично разкъсване на границите. Индуцираната от температурата дифузия ускорява нуклеацията на мрежата от α -твърд разтвор и трансформацията на $\beta' \rightarrow \text{Ев}(\alpha + \gamma') + \beta_1$.

При температура 500°C е установено, че липсват метастабилни фази. В зърната на α -твърдия разтвор се наблюдават утаени диспергирани частици от Fe_3Al .

Отвърнатият при 600°C бронз съдържа β -фаза поради първоначално закалената структура. Метастабилната β' -фаза се образува по време на охлаждане на спокоен въздух, следствие от частичната мартензитна трансформация $\beta \rightarrow \beta'$ и част от зърната претърпяват дифузионен разпад $\beta \rightarrow \alpha + \gamma'$. При тази температура на отвърщане се образуват зони с ламеларни издребнени α -зърна.



При температура на отвързване 700°C се създават условия за групиране и последваща коагулация на обогатената с мед α -фаза. Получената структура е нехомогенна с образувани зони на едрозърнеста α -фаза и затворени зони, съдържащи механична смес от частични мартензитни и дифузионни трансформации $\beta \rightarrow \beta' + \alpha'$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящият доклад е свързан с изпълнението на задачи по проект BG05M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brezina, P. Heat treatment of complex aluminium bronzes. *International Metals Reviews* **1982**, 27(2), 77-120.
- [2] www.copper.org/resources/properties/microstructure/al_bronzes.html
- [3] Slama, P.; Dlouhy, J.; Kövér, M. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of aluminium bronze. *Materials and Technology* **2014**, 48(4), 599-604.
- [4] Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Argirov, Y.; Todorov, V.; Mechkarova, T. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue and wear of Cu-10Al-5Fe bronze. *Materials* **2022**, 15, 8905.



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА КАТИОННИ И НЕЙОННИ ПОВЪРХНОСТНО АКТИВНИ ВЕЩЕСТВА

INTERACTION BETWEEN CATIONIC AND NONIONIC SURFACTANTS

Rumyana D. Stanimirova, Manoela A. Aleksieva, Jordan T. Petkov, Krassimir D. Danov

Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia 1164, Bulgaria
KD@LCPE.Uni-Sofia.Bg

Abstract

In recent years, the surfactants that exhibit antibacterial and bactericidal properties have attracted great interest. These substances are used in commercial formulations in combination with conventional surfactants, which are widely used in various industries. The study of surfactant mixtures is of great interest to the manufacturers of final formulations. The complex mixtures include different types of surfactants which can form complex mixed micelles with specific structures. The aim of this study is to find optimal conditions under which both types of surfactants form stable micelles with the desired structure. The critical micelle concentration (CMC) is the point at which micelles begin to form in solution. It is an important parameter that affects the physicochemical micellar properties and the applications of such compositions in the formulations of various cosmetic formulations, household cleaners, pharmaceuticals and other industrial products. Using the Rubingh regular solution theory, the interactions of different surfactants are analyzed and the conditions under which they will create micelles of a given structure are predicted. From the obtained results one can understand what factors influence the formation of micelles, how a given system will be affected under different conditions, and how one can optimize processes and formulations that incorporate one cationic and two nonionic surfactants.

Keywords: quaternary ammonium salts, Qats, interaction parameter, critical micelle concentration.

INTRODUCTION

In the recent years, the surfactants that exhibit antibacterial and bactericidal properties have been of great practical interest [1,2]. The surfactants with a proven antibacterial effect are from the group of cationic surfactants (especially quaternary ammonium salts) [3-5]. Quats penetrate the cell membranes of bacteria and disrupt their structures leading to the destruction of the bacteria. This effect makes them extremely useful in various consumer applications such as detergents and disinfectants, in addition to fabric softeners and hair conditioners, etc. Most of the detergents on the market contain mixtures of ionic and nonionic surfactants and different salts added to control the viscosity and elasticity of the products. The surfactant adsorptions and the

critical micelle concentrations (CMC) of mixed solutions are of decisive importance.

The aim of the study is to characterize the micellar properties of one cationic and two nonionic surfactants and their mixing (ideal or non-ideal) in micelles.

Processing the obtained experimental data in accordance to the Rubingh regular solution theory [6], we calculated the interaction parameter, β , between the studied cationic and nonionic surfactants. It is demonstrated that the mixing of surfactants is ideal or synergistic depending on their molecular structure.

MATERIALS AND METHODS

The studied cationic surfactant was Dioctyldimethylammonium chloride (2C₈-DAC): $M_w = 361$ g/mol; 40% active; product of

Biosynth. The used nonionic surfactants were second ethoxylated alcohol with 7 EO groups Tergitol 15-s-7 ($M_w = 508$ g/mol; 100% active; product of Sigma) and linear ethoxylated alcohol with 7 EO groups Pareth-7 ($M_w = 500$ g/mol; 100% active; product of KLK-Oleo). The structural formulas of all used surfactants are illustrated in Fig.1. All aqueous solutions were prepared with deionized water (Elix 3 purification system, Millipore, USA). All experiments were made at room temperature at the natural pH of solutions. The static surface tension was measured by the Du Noüy ring method on force tensiometer K100 (Krüss, Germany).

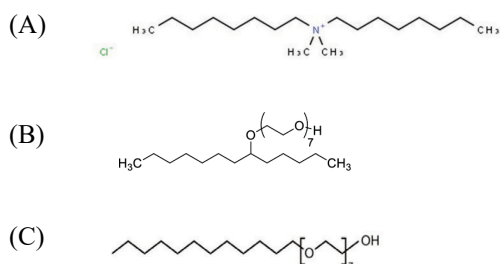


Fig. 1. Structural formulas of the used surfactants:
(A) Dioctyldimethylammonium chloride - 2C₈-DAC;
(B) Tergitol 15-s-7; (C) Pareth-7

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of individual surfactants. The CMCs of used surfactants are low, so that the relaxation of the surface tension, $\sigma(t)$, with time, t , is relatively slow. In the case of diffusion-controlled adsorption, the expression for the long-time asymptotic of $\sigma(t)$ reads [7]:

$$\sigma(t) = \sigma_{eq} + \frac{a}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Here: a is a constant, which depends on the experimental conditions; σ_{eq} is the equilibrium value of the surface tension. All original experimental data for the relaxations of surface tension are interpolated with eq. (1), as it is shown for example in Fig. 2, to obtain the most probable values of σ_{eq} and to construct the respective surface tension isotherms. The dashed lines in Fig. 2 are the best fit lines.

The determined surface tension isotherms of 2C₈-DAC, Tergitol 15-s-7 and Pareth-7 are shown in Fig.3. The positions of the kink points in the isotherms define the critical micelle concentration for each surfactant. The determined values are shown in Table 1.

Close to the CMC, the saturation adsorption is reached and the Gibbs thermodynamic relationship predicts that the change of the surface tension is proportional to the logarithm of concentration. From the slopes of the lines through the points below CMC in Fig. 3, we estimated the respective values of the saturation adsorptions, Γ_{sat} , also shown in Table 1. The area per adsorbed molecule at the CMC, A_{CMC} , is equal to $1/(\Gamma_{sat}N_A)$, where N_A is the Avogadro number.

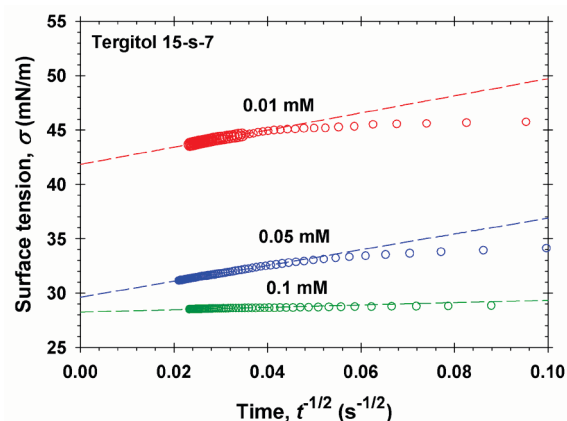


Fig. 2. Surface tension vs one over the square root of time for three different concentrations of Tergitol 15-s-7.

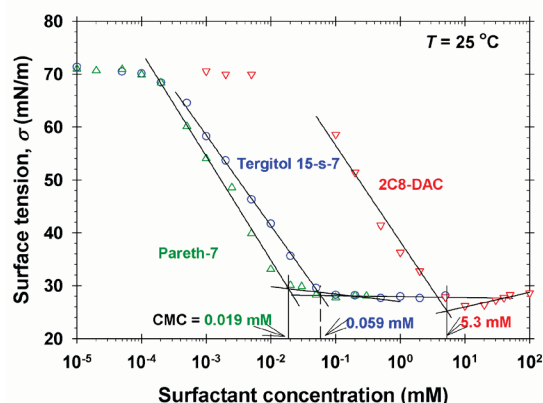


Fig. 3. Surface tension isotherms of 2C₈-DAC, Tergitol 15-s-7, and Pareth-7 solutions measured at 25 °C.



The highest value of the CMC is for cationic surfactant 2C₈-DAC (5.3 mM) because of its ionic nature. The CMCs of the nonionic surfactants are about 90 and 280 times lower (Table 1). In the literature [8], the measured CMC of Pareth-7 is 0.055 mM, that is 2.9 times higher than the value determined by us. Nevertheless, the obtained therein area per molecule 0.45 nm² at the CMC is close to A_{CMC} given in Table 1. The most probable explanation for this difference in the CMCs is that our sample contains a higher amount of the long carbon chain fraction. From the physicochemical viewpoint, all obtained parameters are reasonable and in accordance to the structural formulas of the surfactants (Fig.1).

Table 1. Adsorption parameters of individual surfactants.
The surface tension at the CMC is σ_{CMC} .

	CMC (mM)	σ_{CMC} (mN/m)	Γ_{sat} ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	A_{CMC} (nm ²)
2C ₈ -DAC	5.30	25.2	1.59	1.04
Pareth-7	0.019	29.4	3.45	0.48
Tergitol15-s-7	0.059	28.2	3.00	0.55

Characterization of mixed cationic + nonionic surfactant solutions. In the case of binary mixture of surfactants, the value of the critical micelle concentration is denoted by CMC_{mix} . The CMCs of the individual components are CMC_1 and CMC_2 , their mole fractions relative to the total surfactant concentration are denoted by x_1 and x_2 : $x_1 + x_2 = 1$. Clint et al. [9] derived the following simple relationship between the critical micelle concentrations:

$$\frac{1}{CMC_{mix}} = \frac{x_1}{CMC_1} + \frac{x_2}{CMC_2} \quad (2)$$

Eq. (2) is strictly valid for ideal mixing of surfactant molecules in the micellar phase. In many cases, the surfactant molecules in the micelles obey antagonistic or synergistic mixing behavior. In this case, the use of eq. (2)

to predict the CMC_{mix} leads to considerable deviations from experimental observations.

In the framework of regular solution theory [6], the respective chemical potentials of components 1 and 2 in the bulk phase are equal to those in the micellar phase at the CMC. Thus, the conditions for the chemical equilibrium between both phases lead to:

$$\begin{aligned} \ln(x_1 CMC_{mix}) &= \ln(CMC_1) + \ln(\gamma_1 y_1) \\ \ln(x_2 CMC_{mix}) &= \ln(CMC_2) + \ln(\gamma_2 y_2) \end{aligned} \quad (3)$$

Therefore, one obtains the following relationships:

$$\frac{y_1}{CMC_{mix}} = \frac{x_1}{\gamma_1 CMC_1}, \quad \frac{y_2}{CMC_{mix}} = \frac{x_2}{\gamma_2 CMC_2} \quad (4)$$

Here γ_1 and γ_2 are the activity coefficients and y_1 and y_2 are the mole fractions of molecules 1 and 2 in the micellar phase. Taking into account that $y_1 + y_2 = 1$, the eq. (4) can be rewritten to give the following generalization of the Clint result (2):

$$\frac{1}{CMC_{mix}} = \frac{x_1}{\gamma_1 CMC_1} + \frac{x_2}{\gamma_2 CMC_2} \quad (5)$$

The Rubingh theory of regular solutions gives the formulae for the activity coefficients in terms of mole fractions in micellar phase and the dimensionless energy of interactions, β , between molecules 1 and 2 in the micellar phase:

$$\ln \gamma_1 = \beta y_2^2, \quad \ln \gamma_2 = \beta y_1^2, \quad y_1 + y_2 = 1 \quad (6)$$

If the two surfactants obey the ideal mixing behavior, then $\beta = 0$. For attractive interactions between components in the micellar phase (synergistic mixing), the interaction parameter is negative, and oppositely, for antagonistic mixing, $\beta > 0$. The value of the interaction parameter is of crucial importance for the prediction of the micellar properties of detergent products.

The experimental surface tension isotherm for the mixed solutions of 2C₈-DAC + Pareth-7 at equimolar ratio between surfactants is shown

in Fig. 4A. The determined critical micelle concentration of this mixture is 0.041 mM. One sees that the isotherm does not have a minimum and the CMC is correctly determined. According to the theory of regular solutions [6], see eq. (5), it is convenient to plot $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ as a function of the mole fraction of the cationic surfactant, e.g., x_1 . From eq. (2) it follows that $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ vs x_1 should be a straight line for ideal binary mixing. The experimental data for $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Pareth-7}$ are plotted in Fig. 4B. The black solid line therein corresponds to the ideal mixing behavior. One sees that the experimental value of the CMC for equimolar mixture of $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Pareth-7}$ slightly deviates from the straight line. Having in mind the experimental errors for the CMC determination, we conclude that these two surfactants obey rather an ideal mixing behavior.

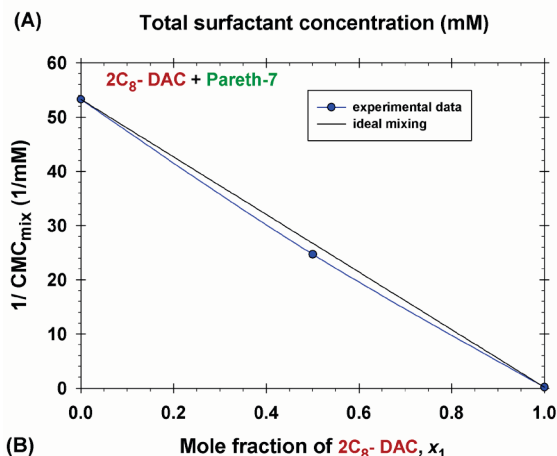
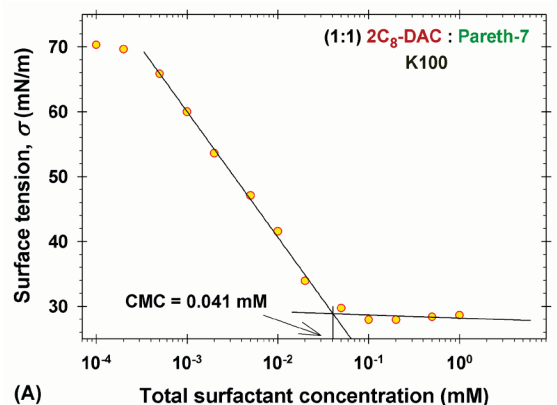


Fig. 4. (A) Surface tension isotherm of equimolar $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Pareth-7}$ solutions. (B) Dependence of $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ on the mole fraction of $2\text{C}_8\text{-DAC}$, x_1 .

The experimental surface tension isotherm for mixed solutions of $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Tergitol 15-s-7}$ at equimolar ratio between surfactants is shown in Fig. 5A. The isotherm does not have a minimum and the correctly determined CMC of the mixture is 0.089 mM. The experimental surface tension isotherms for the other mole ratios, (1:3) and (3:1), of $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Tergitol 15-s-7}$ mixed solutions are analogous to that illustrated in Fig. 5A. The dependence of $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ on the mole fraction of the cationic surfactant, x_1 , is shown in Fig. 5B. One sees that the experimental values for $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ deviate considerably from the straight line corresponding to ideal mixing. The data for the experimental values of $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ lie above the straight line. Such deviations correspond to $\beta < 0$, i.e., the mixing of $2\text{C}_8\text{-DAC}$ and Tergitol 15-s-7 molecules in the micellar phase is synergistic. The CMCs of mixed solutions are considerably lower than those predicted from the ideal solution approximation.

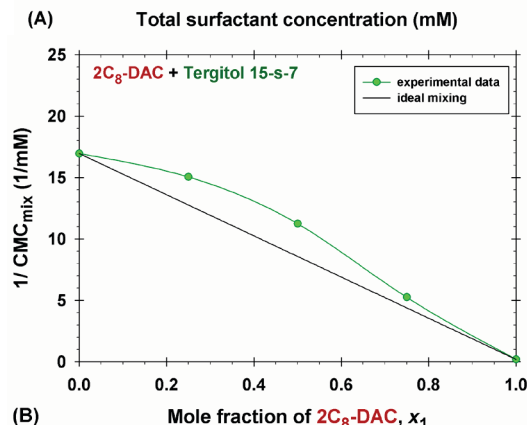
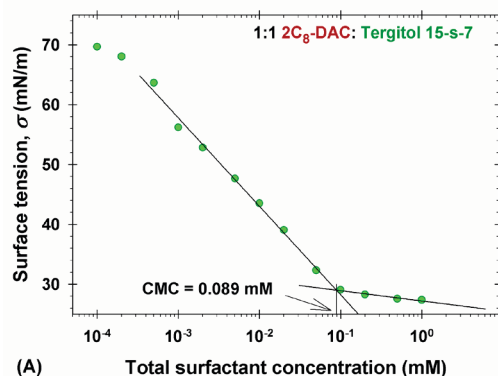


Fig. 5. (A) Surface tension isotherm of equimolar $2\text{C}_8\text{-DAC} + \text{Tergitol 15-s-7}$. (B) $1/\text{CMC}_{\text{mix}}$ vs mole fraction of $2\text{C}_8\text{-DAC}$, x_1 .



The experimental values of the interaction parameter listed in Table 2 are obtained as follows. One defines the experimental values of CMC_1 , CMC_2 , and CMC_{mix} and solves numerically the system of five nonlinear equations (4) and (6) to obtain y_1 , y_2 , γ_1 , γ_2 , and β . The absolute value of β increases with the rise of mole fraction of nonionic component, that is the more Tergitol 15-s-7 in the mixture, the more pronounced is the attraction between molecules 1 and 2 in the micellar phase and the synergism is stronger. Note that the theory of regular solutions [6] is valid for mixtures of nonionic surfactants and the values of β must be independent on the mole fraction. Nevertheless, the reported data for β in Table 2 give information for the degree of the ideality of surfactant mixture. In order to describe more precisely the obtained results, it is necessary to take into account the fact that the mixed micelles are charged, the greater amount of the ionic component leads to a more charged micelles, and as a result, to a stronger repulsion between the ionic species and charged micelles [10]. The extension of the regular solution theory for ionic surfactant solutions is an object for a future work.

Table 2. Calculated values of the interaction parameter from regular solution theory in the case of mixtures 2C₈-DAC and Tergitol 15-s-7.

2C ₈ -DAC + Tergitol 15-s-7	CMC_{mix} (mM)	β
(3:1)	0.19	-2.38
(1:1)	0.089	-4.18
(1:3)	0.066	-4.54

CONCLUSIONS

In the present study, the critical micelle concentrations (CMC) of one cationic (2C₈-DAC) and two nonionic (Pareth-7 and Tergitol 15-c-7) surfactants and their mixtures are determined experimentally. Applying regular solution theory, the cationic surfactant 2C₈-

DAC was shown to be ideal miscible with the nonionic surfactant Pareth-7. In the mixture of 2C₈-DAC and Tergitol 15-s-7, there is a well-pronounced synergism between the two surfactants and the interaction parameter calculated for each molar ratio is negative. The obtained results could be of interest to the industry for the implementation of these surfactants into different formulations and a better control of the behavior of final products.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the support from the Operational Programme “Science and Education for Smart Growth”, Bulgaria, project No.BG05M2OP001- 1.002-0023

REFERENCES

- [1] Zhou C, Wang F, Chen H, Li M, Qiao F, Liu Z, Hou Y, Wu C, Fan Y, Liu L, Wang S, Wang Y. Selective antimicrobial activities and action mechanism of micelles self-assembled by cationic oligomeric surfactants. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2016;8:4242–4249.
- [2] Klibanov AM. Permanently microbicidal materials coatings. *Journal of Materials Chemistry* 2007;17:2479–2482.
- [3] Sayed SRM, Ezzat AO, Yassin MT, Abdelbacki AMM. Synthesis, characterization and application of novel cationic surfactants as antibacterial agents. *Separations* 2023;10:97.
- [4] Padnya PL, Terenteva OS, Akhmedov AA, Iksanova AG, Shtyrlin NV, Nikitina EV, Krylova ES, Shtyrlin YuG, Stoikov II. Thiocalixarene based quaternary ammonium salts as promising antibacterial agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry* 2021;29:115905.
- [5] Zhang H, Liu L, Hou P, Liu J, Fu S. Design, synthesis, antibacterial, and antitumor activity of linear polyisocyanide quaternary ammonium salts with different structures and chain lengths. *Molecules* 2021;26:5686.
- [6] Rubingh DN. Mixed micelle solutions. Mital K (ed.) *Solution Chemistry of Surfactants*, Springer, 1979;1: 337–354.
- [7] Kralchevsky PA and Danov KD. *Chemical physics of colloidal systems and interfaces*.



- Birdi KS (ed.). Handbook of Surface and Colloid Chemistry, CRC Press, 2015, Chapter 4.
- [8] Danov KD, Stanimirova RD, Kralchevsky PA, Slavova TG, Yavrukova VI, Ung YW, Tan E, Xu H, Petkov JT. Solubility of ionic surfactants below their Krafft point in mixed micellar solutions: Phase diagrams for methyl ester sulfonates and nonionic cosurfactants. Journal of Colloid & Interface Science 2021;601:474–485.
- [9] Clint JH. Micellization of mixed nonionic surface active agents. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases 1975;71:1327–1334.
- [10] Danov KD, Kralchevsky PA, Ananthapadmanabhan KP. Micelle-monomer equilibria in solutions of ionic surfactants and in ionic-nonionic mixtures, Advances in Colloid & Interface Science 2014;206:17–45.



ОМОКРЯНЕ И МОРФОЛОГИЯ НА СЛОЕВЕ ОТ КАТИОННИ ПАВ В ПРИСЪСТВИЕ НА НЕЙОНЕН ПАВ ВЪРХУ ТВЪРДИ ПОВЪРХНОСТИ

WETTABILITY AND MORPHOLOGY OF CATIONIC SURFACTANT LAYERS IN THE PRESENCE OF NONIONIC SURFACTANT ON SOLID SURFACES

Veronika Yavrukova, Diana Kovacheva, Krastanka Marinova, Krassimir Danov,
Jordan Petkov

DEPARTMENT OF CHEMICAL & PHARMACEUTICAL ENGINEERING, FACULTY OF CHEMISTRY &
PHARMACY, SOFIA UNIVERSITY, 1164 SOFIA, BULGARIA

Abstract

Cationic surfactants are frequently added to contemporary detergent products mainly to ensure the antibacterial effect of the formulations and might improve the cleansing in some cases. Cationics adsorb on the surfaces and remain adsorbed after rinsing thus ensuring long time antibacterial effect. However, one might find some negative side effects as well – change in the appearance and/or tribology. The latter might have quite a negative effect in industrial applications. The purpose of this study is to compare the adsorption on solid surfaces of the cationic surfactants dioctyl (2C₈-DAC) alone and in a mixture with the nonionic surfactant Tergitol 15-S-7. Adsorption layers formed from solutions of different concentrations (from tenth times below and to hundredth times above the critical micellization concentration, CMC) are characterized as wetting and morphology. Wetting by water droplets is characterized by the contact angles: equilibrium, advancing and receding. Imaging ellipsometry is applied to provide information about the morphology of the deposited layers. The obtained results convincingly demonstrate the role of deposited surfactants for surface wetting, and the influence of the concentration and type of surfactants on the formation of homogeneous layers of desired structure.

Keywords: Cationic surfactants, contact angle, morphology, ellipsometry

INTRODUCTION

Cationic surfactants and polymers are widely used as surface modifiers, as antibacterial agents, as detergents and viscosity modifiers in a plethora of contemporary products for personal, house-hold and industrial applications [1,2]. Cationics adsorb on surfaces and could remain adsorbed after rinsing thus ensuring long time surface modification and/or antibacterial effects, for example. However, some negative side effects could be frequently found as well – buildup on frequent application, change in the appearance and/or tribology.

The adsorption of cationic surfactant and polymers on different surfaces has been intensively studied for many decades [3-8]. Somasundaran and Fuerstenau [4] have proposed a four-region model for surfactant adsorption on solid surfaces in water. This model has been successfully used to describe variety of systems [3-8]. At low surfactant concentration (region I), well below the critical micellization concentration (CMC), surfactant molecules are weakly adsorbed on surfaces through electrostatic interactions, mostly. With the increase of the concentration aggregates/ hemimicelles form on the surface

(region II). In region III, the surfactant concentration is sufficient to allow the hydrophobic interactions between the monomers to structure further the layers.

Above the CMC (region IV), an aggregation saturation and bilayer formation is frequently observed [3,4].

The adsorption layers from nonionic surfactants follow qualitatively similar mechanism, however the structure of the layers depends on the ethoxylation degree [3,5].

The surfactant type and structure might become especially important when mixtures of amphiphiles are used [5]. Contemporary products usually contain different surfactant mixtures. For that reason, studies on the adsorption and deposition from complex mixtures are necessary to understand and optimize the performance of the products.

Our study is devoted to characterize the deposited layers of cationic-nonionic surfactant on solid surfaces. We apply the especially powerful imaging ellipsometry to describe the morphology of dry layers, which remain after product application and water evaporation. Wetting characterization of the layers is applied to quantify the variation of the wettability with the surfactant deposition. Properties of the mixed layers are compared to those of the single surfactants and the effect of each component is analyzed.

MATERIALS

We used the cationic surfactant dioctyl dimethyl ammonium chloride – 2C₈-DAC (Fig. 1a, Mw = 312 g/mol, product by Biosynth), and the nonionic surfactant Tergitol 15-S-7 (Fig 1b, Mw = 508 g/mol, product by Sigma Aldrich). Aqueous solutions of the surfactants alone, and in a mixture of 1:1 molar ratio, are prepared with different concentrations – from hundredth times below up to hundredth times above the CMC. The natural pH of all aqueous solutions was between 5 and 7.

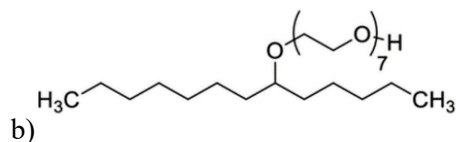
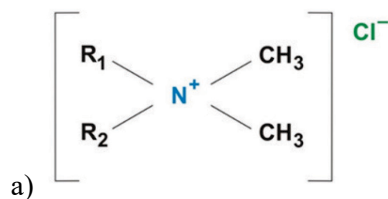


Fig. 1. Structure formulas of the used surfactants:
a) 2C₈-DAC; b) Tergitol 15-S-7

EXPERIMENTAL PROTOCOL AND METHODS

All deposition experiments are performed on a silicon substrate. Before each deposition, the substrate is cleaned by consecutive abundant rinsing with several solvents: isopropanol, ethanol, water, and airdrying at the end.

The experimental protocol for surfactant deposition is as follows. The surfactant solution (50 ml) is poured in a petri dish and it is allowed for one hour equilibration and adsorption layer formation at the air/water interface. Subsequently the upper surface of the silicone substrate is put in contact with the surface of the solution for 10 seconds. Finally, the substrate is left to dry in ambient air at room temperature. The substrate with the dry deposit is characterized further to obtain the structure of the dry surfactant layers and their influence on the wetting by water.

For studying the morphology of the surfactant layers, Imaging ellipsometer EP4 (ACCURION, Germany) is used (Fig 2a). The instrument allows for a precise measurements and visualization of thin mono- and multi-molecular layers on surfaces with a spatial horizontal resolution of 1 μm (close to the optical microscopy [9]). The substrate of the deposits is well defined polished silicon with a top layer of 203 nm silicon dioxide.

Thus, a vertical spatial resolution in the subnanometer range is reached for the deposited layers [9,10].

The surface wetting is characterized by the determination of the equilibrium, advancing and receding contact angle of water droplets on the test surface with and without the deposited surfactant. The instrument Drop Shape Analyzer 100E (KRÜSS, Germany) equipped with a tilting stage (Fig 2b) is used for the contact angle measurements.

The contact angle is measured with 3 μl water droplets put on the substrate. The measurement continues for 90 seconds after the drop deposition on the horizontal substrate and the value at the 90th second is taken as the value of the equilibrium angle. Then the substrate is tilted vertically (to 90° inclination) with speed of 3° per second. During tilting, the advancing and receding contact angles are measured, see Fig. 3, and the values at 90° tilt are further compared for the different composition deposited. All values of the angles shown below are averaged from at least 3 independent measurements.

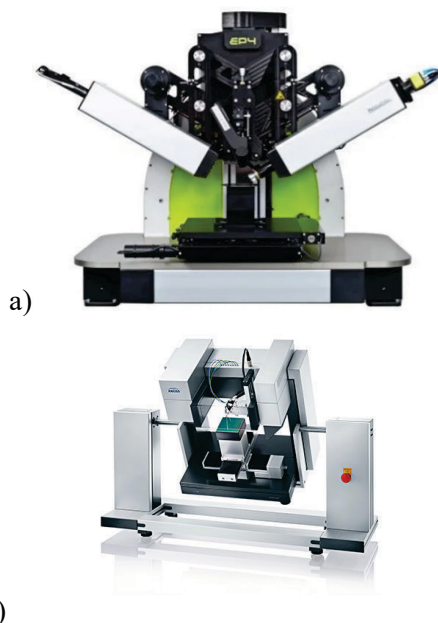


Fig. 2. Instruments used for the measurements: a) Imaging ellipsometer EP4 (Accurion, Germany); b) Drop Shape Analyzer 100E (Krüss, Germany).

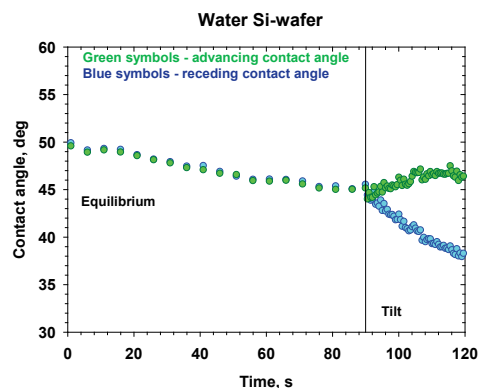


Fig. 3. Contact angle of 3 μl water droplet on a pure silicon substrate as a function of time after deposition: 90 second in horizontal substrate position and 30 seconds tilting to 90°.

RESULTS AND DISCUSSION

The results for the contact angles measured with water droplets on silicon surfaces with deposits from solutions of the cationic 2C₈-DAC are shown on Fig. 4. A slight but steady increase of the contact angles is seen, especially above the CMC (5.3 mM for 2C₈-DAC), which demonstrates the surface hydrophobization with the increase of the cationic surfactant concentration.

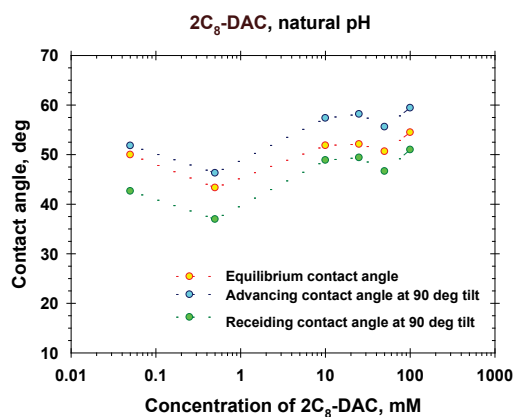


Fig. 4. Equilibrium, advancing, and receding contact angles of water droplets on silicon surface with deposited layers from solutions with different concentrations of 2C₈-DAC.

When layers from the nonionic Tergitol 15-S-7 are deposited, a significant surface

hydrophilization is observed at very low surfactant concentrations, see Fig. 5. When 1:1 surfactant mixture is used, the measured contact angles are almost the same as those for the cationic alone in the entire concentration range. Given the net negative charge of the silicon support at the natural pH (5 to 7), the cationic surfactants adsorb through electrostatic interactions with the surface, which would further control the structure of the adsorbed and deposited layers [1,5-8]. The nonionic surfactant adsorption depends significantly on the particular surfactant structure and the number of the ethoxy groups [3,5]. The observed surface hydrophilization with Tergitol 15-S-7 concentration increase is a clear indication for the important role of the hydrophilic ethylene oxide groups ensuring the good wetting by water. However, in the presence of cationic surfactant, the electrostatic interactions prevail and control the surface wettability when mixed solutions are used, as clearly seen from the data in Fig. 5.

The wettability variations with the concentration increase in the formed deposits (Fig. 5) depends on the structure of the adsorption layers as well [3,5]. We apply imaging ellipsometry to characterize the structure of the deposited layers and to analyze their impact on the wettability.

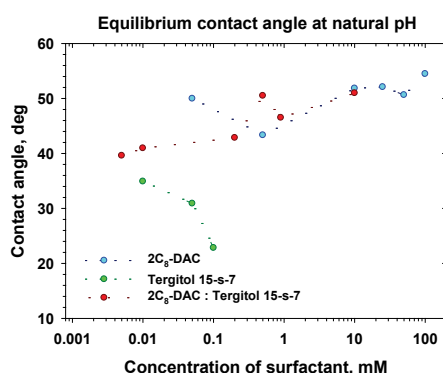
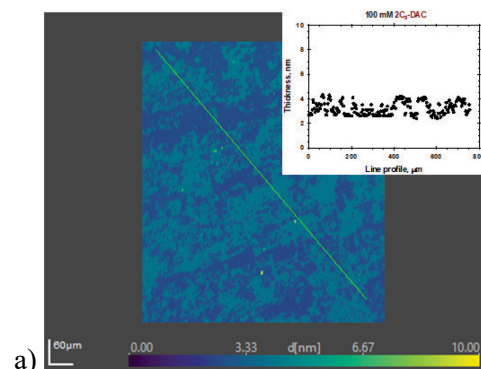


Fig. 5. Dependence of the equilibrium contact angle for individual surfactants and 1:1 mixed solutions of nonionic and cationic surfactants.

Fig. 6 shows representative images of the surfaces after drying surfactant layers from the cationic 2C₈-DAC (Fig. 6a), nonionic Tergitol 15-S-7 (Fig. 6b), and 1:1 molar mixture of the two surfactants (Fig. 6c), deposited from solutions with concentration of hundredths times CMC. Significant differences are seen in the morphology of the layers. The cationic surfactant forms relatively homogeneous layers of thickness 2.5 or 4 nm. One could speculate that these are mono- and bi-layers of the surfactant according to the 4-region model for adsorption of Somasundaran [3-7]. Note that the layers deposited at low surfactant concentrations correspond to regions with hemimicelles-like structures (images not shown). Thus, one can conclude that the structures of the dry layers of cationic surfactants well resemble the ones observed at solid-water surface i.e., before drying.

The dry layers from the nonionic Tergitol 15-S-7 (Fig. 6b) consist of distinct thick areas separated by wide areas without deposits. Having in mind the good hydrophilicity of these surfaces, one might speculate that the oxyethylene groups dominate the surface properties of the thick deposits while the branched surfactant structure (Fig. 1b) prevents the formation of thin ordered layers.

The deposits from the 1:1 cationic:nonionic solutions (Fig. 6c) have “intermediate” structure: grainy, similarly to those from the nonionic surfactant (Fig. 6b) with prevailing thin grains due to the influence of the cationic surfactant. The dominant role of 2C₈-DAC is witnessed from the wettability as well, cf. Fig. 5.



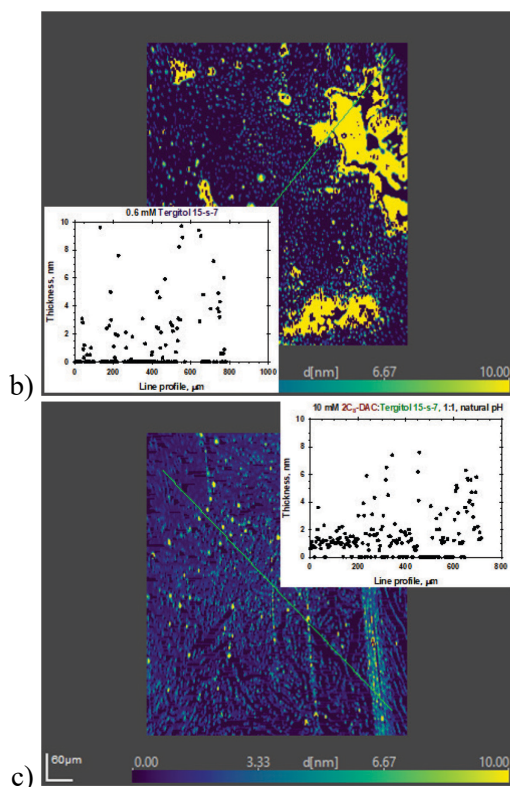


Fig. 6. Images of dry layers deposited from solutions of a) 100 mM 2C₈-DAC; b) 0.6 mM Tergitol 15-S-7; c) 10 mM 1:1 2C₈-DAC:Tergitol 15-S-7. Sectional analyses are shown as insets.

CONCLUSIONS

A systematic characterization of the morphology and wetting of layers of the cationic surfactant 2C₈-DAC, the ethoxylated nonionic Tergitol 15-S-7, and their mixture is performed to analyze the role of the different types of surfactants in complex mixtures.

At natural pH (5-7), the silicone substrate is negatively charged and the morphology of the layers containing the cationic surfactant 2C₈-DAC is dominated by the electrostatic interaction. The morphology changes with increasing the concentration in agreement with the 4-region model of Somasundaran and Fuerstenau [5]. At low concentrations, single aggregates are observed. As the concentration of the surfactant increases, the thickness of the layers increases, with cationic surfactant forming bilayers at very high concentration, while with the nonionic surfactant - formation

of aggregates, is observed. The adsorbed aggregates and layers of cationic surfactant hydrophobize the substrate, and the nonionic ones hydrophilize it. The mixed layers are dominated by the cationic surfactants, which are electrostatically adsorbed onto the substrate.

The nonionic Tergitol 15-S-7 deposits on thick domains which properties are dominated by the ethoxy-groups and overall surface hydrophilization is observed.

The applied imaging ellipsometry reveals important details on the structure of the deposited layers which analysis together with the wetting properties allows for the better understanding of the factors dominating layer properties. This approach will be further used for systematic characterization of deposits from fundamental and practical importance.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the support from the Operational Programme “Science and Education for Smart Growth”, Bulgaria, project No.BG05M2OP0011.002-0023

REFERENCES

- [1] Honciuc A, Surfactants and amphiphiles, Ch. 4 in Chemistry of Functional Materials Surfaces and Interfaces: Fundamentals and Applications. Elsevier, 2021.
- [2] Zhou C, Wang F, Chen H et al. Selective antimicrobial activities and action mechanism of micelles self-assembled by cationic oligomeric surfactants. ACS Appl Mater Inter. 2016, 8(6):4242–4249.
- [3] Somasundaran P, Zhang L. Adsorption of surfactants on minerals for wettability control in improved oil recovery processes. J Petrol Sci Eng 2006; 52(1–4):198–212.
- [4] Somasundaran P, Fuerstenau DW, Mechanism of alkyl sulfonate adsorption at alumina–water interface. J. Phys. Chem. 1966, 70: 90.
- [5] Adamy ST, Adsorption of cationic/ nonionic surfactant mixtures on polyester, J Surfactants Deterg, 2022; 1–11.



[6] Liu Z, Zhao G, Brewer M, Lv Q, Sudhölter EJR, Comprehensive review on surfactant adsorption on mineral surfaces in chemical enhanced oil recovery, Adv Colloid Interface Sci, 2021, 294:102467.

[7] Atkin R, Craig VSJ, Wanless EJ, Biggs S, Mechanism of cationic surfactant adsorption at the solid–aqueous interface, Adv Colloid Interface Sci. 2003;103(3):219-304.

[8] Fan A, Somasundaran P, Turro NJ. Adsorption

of alkyltrimethylammonium bromides on negatively charged alumina. Langmuir 1997; 13(3):506–10.

[9] <https://accurion.parksystems.com/thin-film-characterization/products/nanofilm-ep4>.

[10] Georgiev M, Konstantinov B, Marinova K, Petkov J, Danov K; Investigation of cationic surfactant adsorption behaviour on silicon wafers using Imaginig ellipsometry; J Technical University Gabrovo, 2023, 66:38-42.



ИЗМЕРВАТЕЛНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ФИЗИКОМЕХАНИЧНИ ВЕЛИЧИНИ

MEASUREMENT CONVERTERS OF PHYSICOMECHANICAL QUANTITIES

Tsanko Karadzhov

Technical University of Gabrovo

Abstract

A measurement conversion is a reflection in the value or change in the value of one physical quantity when the value of another physical quantity that is functionally related to the first quantity changes. A measurement conversion is performed by a converter. The measurement converter is a device that provides at its output a quantity that has a definite relationship to the input quantity. The paper is an overview and aims to classify measurement converters according to different criteria.

Keywords: Measurement Converter; Physicomechanical Quantities; Classification.

ВЪВЕДЕНИЕ

Измервателният преобразувател е средство за измерване предназначено да изработва сигнал съдържащ информация от измерването във форма удобна за предаване, по нататъшно преобразуване или обработка, съхраняване, но тази информация не е подлежаща на пряко възприемане от наблюдател. Иначе казано измервателният преобразувател е техническо устройство построено на определен физичен принцип или ефект изпълняващо дадено конкретно измервателно преобразуване. Много-често измервателните преобразуватели преобразуват дадена физикомеханична величина на входа в електрически сигнал на изхода на преобразувателя, като някои от параметрите на електрическия сигнал са функционално свързани с входната величина.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Предимството на измервателния преобразувател е фактът, че то ни позволява да обработваме допълнително получената измервателна информация с помощта на електрониката, което е много евтин и гъб-

кав начин на обработка. В такава форма информацията може лесно да се предава на големи разстояния с минимално въздействие върху околната среда, освен това ние можем да извършваме преобразуване на значително разстояние от обекта. Това е особено важно при измерване в трудно достъпни места или агресивна среда.

В повечето случаи по вида на входната и изходната величина измервателните преобразуватели могат да се разделят на преобразуватели на неелектрическа в неелектрическа величина, неелектрическа в електрическа величина, електрическа в електрическа величина и електрическа в неелектрическа величина.

Според мястото в измервателната верига преобразувателите се разделят на първични, междинни и предаващи преобразуватели. Има и мащабни измервателни преобразуватели.

Първичен измервателен преобразувател – измервателен преобразувател, който се влияе пряко от измерваната физическа величина, т.е. първият преобразувател в измервателната верига на измервателното



устройство.

Сензорът е структурно отделен първичен измервателен преобразувател, от който се приемат сигнали за измервателна информация. Сензорът може да бъде разположен на значително разстояние от измервателния уред, който приема неговите сигнали.

Междинен измервателен преобразувател

Измервателен преобразувател, който заема място в измервателната верига след първичния преобразувател.

Предавателен измервателен преобразувател

Измервателен преобразувател, предназначен за дистанционно предаване на сигнал съдържащ измервателна информация.

Мащабни измервателни преобразуватели

Това са измервателни преобразуватели, които на входа и на изхода има една и съща физична величина, която се различава само по стойността. Примери за такива преобразуватели са делители на напрежение, токови измервателни трансформатори, измервателни усилватели.

Аналогов измервателен преобразувател – измервателен преобразувател, който преобразува една аналогова величина в друга аналогова величина.

Аналогово-цифров измервателен преобразувател

Измервателен преобразувател, предназначен да преобразува аналогов измервателен сигнал в цифров двоичен код.

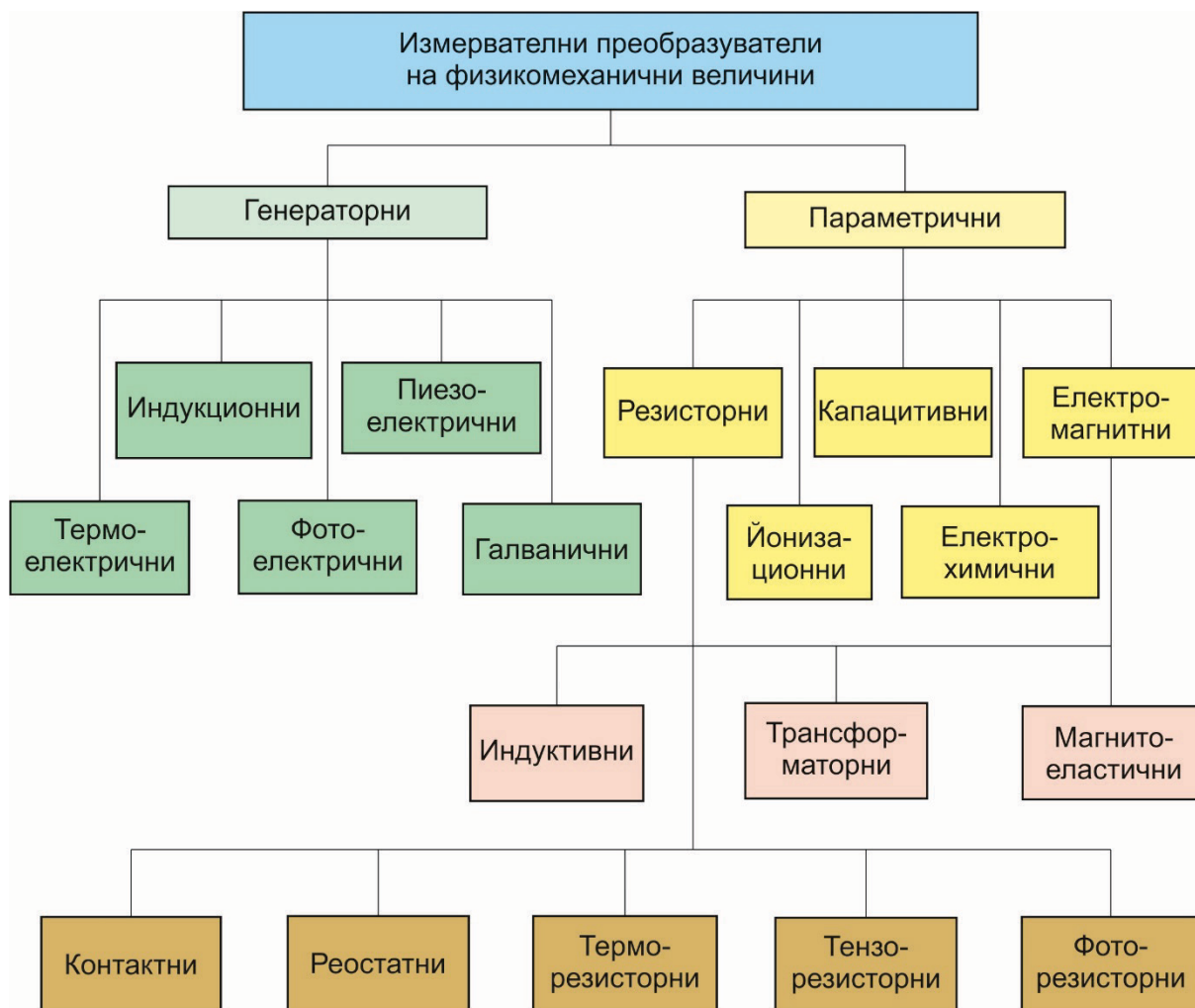
Цифрово-аналогов измервателен преобразувател

Измервателен преобразувател, предназначен за преобразуване на цифров код в аналогова стойност.

Преобразувателите на физикомеханични величини в електрически от гледна точка на вида на сигнала на техния изход могат да бъдат разделение на генераторни, които генерират напрежение или ток с изходна величина $E = F(X)$ или $I = F(X)$ и с вътрешно съпротивление $Z_B = const$, и параметрични с изходно съпротивление, индуктивност или капацитет, изменящи се в съответствие с изменението на входната величина $E = 0$ и изходна величина във вид на изменение на R , L или C във функция на X .

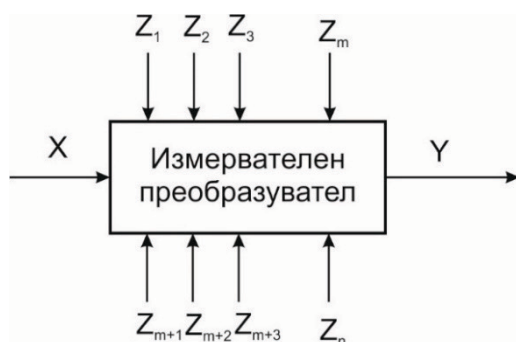
Разликата между генераторните и параметричните преобразуватели се дължи на техните еквивалентни електрически вериги, отразяващи фундаментални разлики в естеството на физичните явления, използвани в преобразувателите. Генераторният преобразувател е източникът на директно изведен електрически сигнал, а измерването на промените в параметрите на параметричния преобразувател се извършва косвено, чрез промяната на тока или напрежението в резултат на задължителното му включване във веригата с външен източник на захранване.

Според физичното явление, което лежи в основата на работата, и вида на входната физична величина, генераторните и параметричните преобразуватели се разделят на множество разновидности фиг. 1. По вида на модулацията измервателните преобразуватели се разделят на две големи групи – измервателни преобразуватели с амплитудна модулация и измервателни преобразуватели с честотна модулация.



Фиг. 1. Класификация на измервателните преобразуватели на физикомеханични величини

Обобщена схема на един преобразувател е показана на фиг. 2



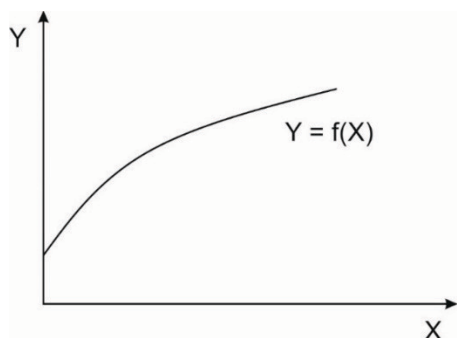
Фиг. 2. Обобщена схема на измервателен преобразувател

На входа на преобразувателя постъпва величината X , а на изхода се получава преобразуваната величина Y . Освен входната величина върху преобразувателя въздействат външни смущаващи фактори $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_m$ като температура, налягане, хранващо напрежение, влажност и др., които предизвикват смущаващ сигнал – шум върху изходния сигнал. Процесът на преобразуване се съпровожда и от вътрешни смущаващи фактори $Z_{m+1}, Z_{m+2}, Z_{m+3}, \dots, Z_n$. Изходната величина на преобразувателя е функция и на двата вида фактори:

$$Y = f \left(X, Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_m, Z_{m+1}, Z_{m+2}, Z_{m+3}, Z_n \right) \quad (1)$$



Тази функция определя вида на изходния сигнал и връзката му както с входната величина, така и със смущаващите фактори. Зависимостта $y = f(x)$ между изходния и входния сигнал е известна като функция на преобразуване или предавателна характеристика [9] фиг. 3. Когато входната величина е постоянна или стойността ѝ на изменение във времето е пренебрежимо малка зависимостта се нарича статична. Когато има изменение във времето на входната величина – динамична $y = f[x(t)]$. В повечето случаи функцията на преобразуване е математичен модел, който описва поведението на системата.



Фиг. 3. Предавателна характеристика

Основни параметри на преобразувателите

Основен параметър на измервателния преобразувател е неговата *чувствителност*, която се определя чрез отношение на изменението на изходната величина към изменението на входната величина:

$$K = \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

Чрез дефиниране на функцията по отношение на влияещите фактори Z_i може да се определи чувствителността към съответния влияещ фактор:

$$K_{Z_i} = \frac{dy}{dz_i} \quad (3)$$

Праг на чувствителност – най-голямото изменение на входната величина, което не предизвиква изменение на изходната величина.

Стабилност – това е свойство на преобразувателя да запази постоянна във времето функцията на преобразуване [1].

Точност на преобразуване – това е свойство преобразувателя на определена стойност на входната величина да съответства еднозначно на определена стойност на изходната величина.

Хистерезис – параметър, който се изразява в различие на функцията на преобразуване при увеличаване и при намаляване на входната величина

Обратно въздействие върху входната величина – такова въздействие се получава в случаите когато енергията необходима за преобразуване се черпи от измерваната величина.

Нелинейност – използва се в случаите когато функцията на преобразуване се апроксимира с линейна зависимост. Нелинейността зависи от стойността на входната величина и от вида на апроксимация.

Генераторни преобразуватели

Принципът на действие на генераторните преобразуватели се основава едно или друго физично явление, осигуряващо преобразуване на измерените величини в електрическа енергия [2]. Най-важните от тези физични явления използвани за построяване на генераторни преобразуватели са дадени в таблица 1.

Таблица 1

Входна величина	Използвани ефекти	Изходна величина
Температура	Термоелектричен ефект	напрежение
Поток оптично лъчение	Пироелектричен ефект	Заряд
	Външен фотоелектричен ефект	Ток
	Вътрешен фотоелектричен ефект	Напрежение
	Фотоелектромагнитен ефект	Напрежение
Сила, налягане, ускорение	Пиезоелектричен ефект	Заряд
Скорост	Електромагнитна индукция	Напрежение
Преместване	Ефект на хол	напрежение



Параметрични преобразуватели

В параметричните преобразуватели някои параметри на изходния импеданс могат да се променят под въздействието на измерваната величина. Комплексното съпротивление на преобразувателя от една страна се определя от геометрията и размерите на неговите елементи, а от друга страна на свойствата на материалите: специфично съпротивление, магнитна проницаемост и диелектрична константа. Измененията в комплексното съпротивление могат да бъдат причинени от въздействието на измерваната величина върху геометрията и размерите на елементите на преобразувателя, върху електрическите и магнитните свойства на неговия материал или по рядко и върху двете едновременно. Геометричните размери на преобразувателя и параметрите на неговото комплексно съпротивление могат да се променят, ако преобразувателят съдържа движен или деформиращ се елемент. Всяко положение на подвижния елемент на преобразувателя съответства на определено комплексно съпротивление и измерването на неговите параметри ви позволява да разберете позицията на елемента. Този принцип се използва от голям брой измервателни параметрични преобразуватели за измерване на положението и преместването на обекти. Те могат да бъдат потенциометрични, индуктивни, капацитивни и др.

При преобразувателите, които съдържат деформиращ се елемент, деформацията е резултат от действието на сила или свързаната с нея измервана величина най-често налягане или ускорение, върху чувствителния елемент на преобразувателя. Промяната в комплексното съпротивление на преобразувателя, причинена от деформацията на сензорния елемент, причинява промяна в съответния електрически сигнал в специална измервателна схема, в която е включен този преобразувател. Електрическите свойства на материала и състоянието на чувствителния елемент на преобразувателя за-

висят от променливи физически величини: температура, налягане, влажност, осветеност и др. Ако само една от величините се промени, а останалите се поддържат постоянни, тогава е възможно да се оцени еднозначно съответствие между стойностите на тази величина и комплексното съпротивление на преобразувателя. Това съответствие се описва с градуировъчна крива. Познавайки градуировъчната крива, според резултатите от измерването на комплексното съпротивление е възможно да се определи съответната стойност на измерената величина. Таблица 2 показва редица физически ефекти, свързани с преобразуването на физикомеханични величини с помощта на параметрични преобразуватели. Сред тях трябва да бъдат специално отбелязани резистивните преобразуватели.

Таблица 2

Измервана величина	Електрическа характеристика, изменяща се под действието на измерваната величина	Вид на използвания материал
Температура	Съпротивление	Метали – платина, никел, мед, полупроводници
Свръхниска температура	Диелектрична проницаемост	Съпротивление
Поток оптично лъчение	Съпротивление	Полупроводници
Деформация	Съпротивление	Никелови сплави, легиран силиций
Преместване	Магнитна проницаемост	Феромагнитни сплави
	Съпротивление	Магниторезистивни материали – бисмут, антимон, индий
Влажност	Съпротивление	Литиев хлорид, алуминиев окис, полимери
	Диелектрична проницаемост	
Ниво на течности	Диелектрична проницаемост	Течни изолационни материали

Методи за намаляване на грешките при измервателните преобразуватели

Повишаването на точността на измерването е една от най-важните и актуални за-



дачи на измервателната техника. Като цяло тя се решава чрез намаляване на грешките във всички звена на системата обект на измерване – измервателно устройство – оператор – външна среда. Въпреки това, най-значимата обикновено е грешката на измервателния преобразувател и следователно увеличаването на точността на измервателния преобразувател е от първостепенно значение [4]. Също така, намаляването на грешката често предопределя подобряването и на други параметри на измервателния уред. Например разширяването на диапазона на измерване към измерване на малки стойности на дадена величина е свързано с необходимостта от намаляване на адитивните грешки, а разширяването на диапазона на измерване към големи стойности – с подобряване на линейността на предавателната характеристика на преобразувателя тоест намаляване на грешката на нелинейност.

Известни са много методи за намаляване на грешката на измервателните преобразуватели, които могат да се разделят в следните групи:

- технологични методи за стабилизиране на параметри и характеристики;
- конструктивни методи за пасивна и активна защита срещу бързо и бавно променящи се смущаващи фактори [5];
- методи за коригиране на систематични грешки;
- методи за статистическа обработка и осредняване на резултатите от измерванията;
- методи за линеаризация на предавателните характеристики.

Повишаването на точността до голяма степен е свързано и с повишаване на цената на средствата за измерване [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е направен сравнителен анализ между различните видове измервателни преобразуватели, на базата на който са разработени класификации на измервателните преобразуватели на физикомеханични величини според различни критерии.

Анализирани са методите за намаляване на грешките при измервателните преобразуватели, на базата на което са предложени модели, схемни решения и методики за отстраняване.

ПРИЗАТЕЛНОСТ

Тази работа е финансирана по Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“ финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шишмарев, В. Ю., Средства измерений, Москва: Академия, 2010.
- [2] Ревин, В. Т., Преобразователи и преобразование измерительной информации Част 1, Минск, 2002.
- [3] www.vishay.com/doc?99912.
- [4] Купер, В. Я., М. Г. Рубцов, „Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей“, *Вестник Самарского государственного технического университета*, pp. 67-72, 2010.
- [5] Сольнищев, Р. И., Н. Н. Майоров, „Повышение точности измерений уровня жидкости в замкнутых движущихся резервуарах“, *Научное приборостроение*, pp. 97-101, 2007.
- [6] Глухов, В. И., Повышение точности измерений в машиностроении на основе введения новых комплексных показателей действительных размеров деталей, Москва, 1998.
- [7] Брюханов, В. А., Методы повышения точности измерений в промышленности, Москва: Стандартов, 1991.
- [8] Троянов, Б., Уреди за измерване на физикомеханични величини, София, 1990.
- [9] Щелканов, А. В., А. И. Чередов, Первичные измерительные преобразователи, Омск: ОмГТУ, 2010.
- [9] Дичев, Д., Метрология. Унив. издателство "Васил Априлов", Габрово, 2016, 264 стр., ISBN 978-954-683-548-2.



КОМПАКТНИ ОБЕКТИВИ ЗА ТЕРМАЛНАТА ИНФРАЧЕРВЕНА ОБЛАСТ ОТ СПЕКТЪРА

COMPACT LENSES FOR THE THERMAL INFRARED RANGE OF THE SPECTRUM

Dimcho Pulov

Technical University – Gabrovo

Dimitar Dichev

Technical University – Gabrovo

Abstract

The possibility of creating compact lenses with spherical surfaces intended for operation in the thermal infrared range of the spectrum has been explored. Spherical aberration of an objective can be reduced if the constituent lenses are replaced by several separate lenses of lower optical power. The study used lenses with a best shape, which was determined by the G-sums method.

Keywords: thermal infrared range region of the spectrum, IR objectives, lens design, thin lens with best shape.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години се наблюдава засилено навлизане на термовизорни камери в различни сфери от промишлеността, диагностиката и неразрушаващия контрол, екологията и отбраната. Причините за това са уникалните възможности, които дава използването на тези уреди. Термовизорите визуализират невидимото инфрачервено излъчване посредством преобразуване на яркостните контрасти в инфрачервената област от спектъра в яркостни контрасти във видимата област.

Двете основни и най-важни функционални звена на термовизора, оказващи най-силно влияние върху неговите характеристики и определящи възможностите му са оптичната система и фотоприемника. Съгласно [1,2,3,4] цената на оптичната система и фотоприемника формират до 90% (45%+45%) от общата цена на целия термовизор. Сnižаването на цената на термовизорния обектив е възможно да се осъществи по два начина:

- Първи. Посредством разработването на нови, висококачествени и значително

по-евтини оптични материали, прозрачни в термалната ИЧ област [2,5,6]. Това е трудна задача от фундаментално научно и научно-приложно естество, чието решаване в обозримо бъдеще е доста проблематично.

- Втори. Чрез конструиране на обективи, съставени от сравнително по-малък брой лещи [7,8,9]. Това от своя страна предполага правилен избор на първоначалната конструкция и нейна последваща оптимизация.

Поради тези причини актуален въпрос е разработването на малокомпонентни ИЧ обективи за LWIR спектъра, съставени от малък брой лещи и предназначени за използване в компактни термокамери и пирометри.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Постановка на проблема.

В [5,6,9] е разгледана възможността за създаване на обективи, работещи в LWIR област от спектъра, съставени от 1, 2 или 3 лещи. Особеност при тях е, че корекцията на аберациите и постигането на по-високо качество на образа се реализира чрез използване



зването или на асферични повърхнини, или на дифракционни повърхнини, или на тяхна комбинация. Асферичните и дифракционни повърхнини са значително по-сложни от технологична гледна точка, изискват използването на специални машини и оборудване и следователно готовия ИЧ обектив ще бъде с висока крайна цена.

Целта на дадения материал е изследване възможността за разработване на малокомпонентни ИЧ обективи за LWIR област от спектъра, съставени само от положителни лещи и изработени от един и същ материал.

Теоретично основание за осъществяване на изследването: при заменянето на една леща със сравнително голяма оптична сила с няколко лещи, притежаващи по отделно малка оптична сила, то на изхода на всяка една от тях се формират сходящи снопове лъчи. Те последователно се пречупват от отделните лещи и постепенно достигат до фокусната равнина, където формират образа. Тъй като ъгълът на пречупване на всяка една от лещите е сравнително малък (вследствие на малката оптична сила), то и сферичната аберация на тези лещи, а следователно и на целия обектив, ще бъдат по-малки.

В даденият материал са използвани следните предварителни условия:

- Всички изследвани обективи са със фокусно разстояние $f' = 100\text{mm}$ и фокусно число $F/2$.
- Обективите са съставени от лещи със сферични повърхнини.
- Ъгловото поле е такова, че да позволи работа с микроболометрични матрици с формат от 120×120 до 160×160 пиксела. Това означава, че формирания образ трябва да има размер около 8mm .
- Обективите трябва да работят в термалната (LWIR) област от спектъра - $(8 - 14)\mu\text{m}$
- Използвани се различни характерни оптични материали, прозрачни в диапазона $(8 - 14)\mu\text{m}$ - Ge, ZnS, ZnSe, AMTIR-1.

- Изобразяваните обекти са разположени в безкрайността ($s = -\infty$).

Тънка леща с оптимална форма

Както е известно, за всяка леща (в зависимост от оптичния материал, от който е изработена) съществува точно определена форма, при която нейните аберации са минимални. Тази форма се нарича оптимална и при нея размерът на петното на разсейване е минимално. Тъй като единичната леща има малък брой корекционни параметри, то на минимизиране подлежи сферичната аберация.

Оптичната сила на тънка леща се определя по израза

$$\varphi = \frac{1}{f'} = (n - 1)(c_1 - c_2) = (n - 1)c \quad (1)$$

където:

- c_1 и c_2 са кривините на отделните повърхности;
- $c = c_1 - c_2$ е общата кривина на лещата.

Израз (1) показва, че оптичната сила зависи от общата кривина на лещата. Това означава, че кривината на едната повърхност може да се използва за оптимизиране на формата на лещата (минимизиране на нейната сферичната аберация), а кривината на другата повърхност – за поддържане на зададеното фокусно разстояние.

Формата на лещата се характеризира чрез коефициента на формата. В различните източници той се обозначава или с K , или с Q , и се изразява съответно:

$$K = \frac{c_1}{c_1 - c_2} \quad \text{и} \quad Q = \frac{c_1 + c_2}{c_1 - c_2}$$

Съответствието между двата коефициента е показано в табл. 1.

Таблица 1: Съответствие между K и Q

K	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Q	-5	-3	-1	1	3	5	7	9

В изследването оптималната форма на лещите се определя с използване на т. нар. G-суми.



Сферичната аберация на леща може да се представи с израза:

$$SA3 = \frac{y^4}{u'_k} (G_1 c^3 - G_2 c^2 c_1 - G_3 c^2 v + G_4 c c_1^2 + G_5 c c_1 v + G_6 c v^2) \quad (2)$$

където:

- $y = D_p/2$ половината от диаметъра на входната зеница;

- u'_k тъл в образното пространство между крайния осов лъч и оптичната ос;

- v е величина обратно пропорционална на разстоянието от обекта до лещата ($v = 1/s$);

- G_i са т. нар. G -суми, които зависят от показателя на пречупване на използвания оптичен материал. Съгласно [6] аналитичният вид на G -сумите е:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{n^2(n-1)}{2}; G_2 = \frac{(2n+1)(n-1)}{2}; \\ G_3 &= \frac{(3n+1)(n-1)}{2}; G_4 = \frac{(n+2)(n-1)}{2n} \\ G_5 &= \frac{2(n+1)(n-1)}{n}; G_6 = \frac{(3n+2)(n-1)}{2n} \\ G_7 &= \frac{(2n+1)(n-1)}{2n}; G_8 = \frac{n(n-1)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Оптималната форма на лещата се определя като решение на уравнението

$$\frac{dSA3}{dc_1} = \frac{y^4}{u'_k} (-G_2 c^2 + 2G_4 c c_1 + G_5 c v) = 0 \quad (4)$$

Решението на (4) е

$$c_1 = \frac{G_2 c - G_5 v}{2G_4} \quad (5)$$

Съвместното решение на (1), (3) и (5) води до намиране на кривината c_1 , за която $SA3$ е минимална

$$c_1 = \left[\frac{n(2n+1)}{2(n+2)(n-1)} \right] \varphi - \left[\frac{2(n+1)}{(n+2)} \right] v \quad (6)$$

Кривината на втората повърхност c_2 се намира при съвместното решение на (1) и (6)

$$c_2 = \left[\frac{n(2n-1)-4}{2(n+2)(n-1)} \right] \varphi - \left[\frac{2(n+1)}{(n+2)} \right] v \quad (7)$$

При съвместно решаване на (1), (2), (3) и (6) се получава минималната стойност на сферичната аберация на конкретната леща

$$SA3_{min} = \frac{y^3 \varphi n}{8(n-1)^2(n+2)(\varphi-v)} [(4n-1)\varphi^2 + 4(n-1)^2(\varphi-v)v] \quad (8)$$

При разполагане на обекта в безкрайността $v = 0$.

Инфракчервени дублет и триплет, съставени само от положителни лещи.

Сферичната аберация на един обектив може да бъде намалена, ако съставлящите го лещи бъдат заменени с няколко отделни лещи, имащи самостоятелно по-малка, но сумарно същата оптична сила [6,9].

За изходен вариант ще се използва получената вече леща с оптимална форма. Тя ще бъде заменена две и три отделни лещи, така че общата оптична сила (респективно фокусното разстояние) на обектива да остане едно и също. При тази трансформация е необходимо всяка една от тези 2-3 отделни лещи да има минимална сферична аберация.

Нека с i се отбележи общия брой на използваните лещи (за дублет $i = 2$; за триплет $i = 3$), а с j – текущия номер на съответната използвана леща. Тогава, след прилагане на метода на G -сумите [6] се получават следните стойности за кривините на първите и вторите повърхности на всички лещи, така че сферичното им аберация да е минимална

$$c_{j1} = \left[\frac{n(2n+1)+4(n^2-1)(j-1)}{2i(n+2)(n-1)} \right] \varphi - \left[\frac{2(n+1)}{(n+2)} \right] v \quad (8)$$

$$c_{j2} = \left[\frac{n(2n-1)-4+(n^2-1)(j-1)}{2(n+2)(n-1)} \right] \varphi - \left[\frac{2(n+1)}{(n+2)} \cdot \left(\frac{m}{(m-1)} \right) \right] v \quad (9)$$

Тогава, минималната стойност на сферичната аберация на всяка една от лещите ще се определи по израза



$$SA3_{min} = \frac{y^3 n \varphi}{8i^2(n-1)^2(n+2)(\varphi-v)} \left\{ (4n - 1)\varphi^2 + 4i^2(n-1)^2 \left[v(\varphi - v) - \frac{\varphi^2}{i^3} \sum_{j=1}^{j=i} j(j-1) \right] \right\} \quad (10)$$

При полагане в изрази (8), (9) и (10) с $j = i = 1$ се получават стойности на кривините и на сферичната аберация на синглет, притежаваща голяма оптична сила.

Резултати

На основата на описаната с статията методика са синтезирани и изследвани обективи, съставени от 1, 2 и 3 тънки положителни лещи с оптимална форма, изработени от еднакъв материал. В табл.2 са показани конструктивните параметри на тези обективи и тяхната сферична аберация при използване на най-разпространените в термалната ИЧ област оптични материали Ge, ZnS, ZnSe и AMTIR-1.

От табл.2 се вижда, че за всички обективи съставени от 1 леща ($i=1$) $SA3 < 0$. Това означава, че сферичната аберация е недокоригирана, или с други думи крайния осов лъч пресича оптичната ос преди параксиалния образ.

За обективи съставени от 2 лещи ($i=2$) сферичната аберация по абсолютна стойност силно намалява. В зависимост от по-

казателя на пречупване (респективно вида на оптичния материал) тя може да остане отрицателна, да бъде близка до 0, или да стане положителна. В последния случай тя отново започва да увеличава своята абсолютна стойност.

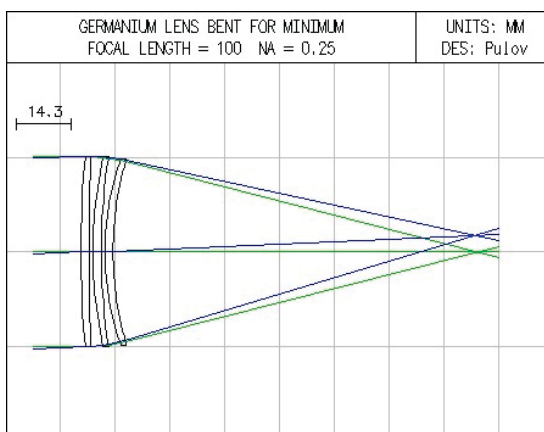
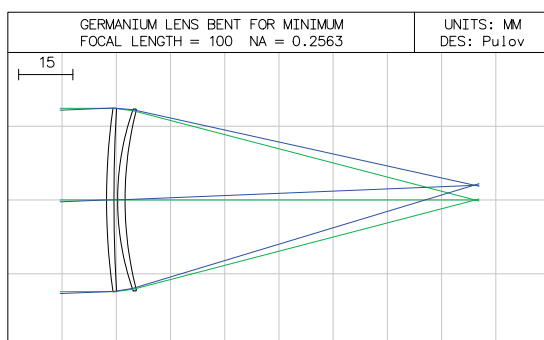
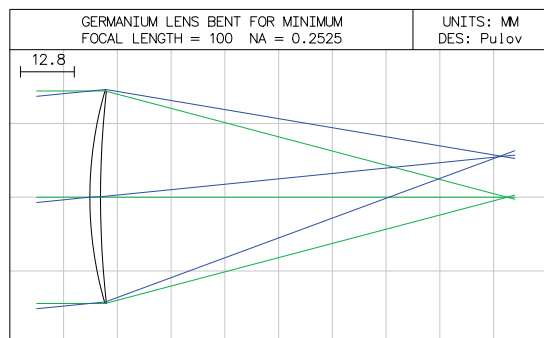
За всички обективи съставени от 3 лещи ($i=3$) $SA3 > 0$. Това означава, че сферичната аберация е прекоригирана, или с други думи крайния осов лъч пресича оптичната ос след параксиалния образ.

От табл.2 става ясно, че заменянето на 1 леща с голяма оптична сила с няколко лещи, притежаващи по-малка оптична сила, може да доведе до намаляване на петното на разсейване. Минимумът по абсолютна стойност на сферичната аберация зависи както от показателя на пречупване на материала, от който е изработена лещата, така и от броя на използваните лещи. Това означава, че прекаленото и произволно увеличаване броя на лещите в обектива е не нужно и може да доведе до наличие на прекоригирана сферична аберация.

На фиг. 1 са показани оптичните схеми на на 1, 2 и 3 лещови обективи изработени от германий, чиито конструктивни параметри съответстват на резултатите от табл. 2 за Ge.

Таблица 2: Конструктивни параметри и сферична аберация на 1, 2 и 3 лещови обективи, изработени от различен материал

		L1		L2		L3		SA3
		R1	R2	R1	R2	R1	R2	
i=1	Ge n=4	100	150					-0,217
i=2		200	300	75	85,714			+0,076
i=3		300	450	112,5	128,571	69,231	75	+0,13
i=1	ZnS n=2,2	84,84	289,65					-0,554
i=2		169,697	579,31	74	107			-0,0362
i=3		254,545	868,965	110,891	160,509	70,986	88,421	+0,0671
i=1	ZnSe n=2,406	628,57	1708,78					-0,46
i=2		177,011	481,25	74,757	101,986			-0,01
i=3		265,517	721,875	112,135	152,98	71,077	85,556	+0,0743
i=1	AMTIR-1 n=2,498	90	225					-0,434
i=2		180	450	75	100			0
i=3		270	675	112,5	150	71,053	84,375	+0,09



Фиг.1. Оптични схеми на 1, 2 и 3 лещови обективи изработени от Германий.

Представлява интерес определяне стойностите на показателя на пречупване, за които сферичната аберация е отстранена напълно, т.е. $SA3 = 0$. Ще се изследват обективи, съставени от 2 и 3 лещи.

- Обектив, съставен от 2 лещи.

Условието за отстраняване на сферичната аберация е $SA3_2 = 0$.

В израз (10) се полага с $i = 2$ и $v = 0$ и се получава

$$4n - 1 = 4(n - 1)^2 \quad (11)$$

Решението на уравнение (11) показва, че сферичната аберация на обектив от 2 лещи ще бъде отстранена, когато показателят на пречупване на материала, от който те са изработени е $n = 2,5$. Обаче оптичните материали имат дискретни стойности на своите показатели на пречупване. Най-близко разположени до $n = 2,5$ са показателите на пречупване на ATMIR ($n = 2,498$ за дължина на вълната $10\mu m$) и ZnSe ($n = 2,406$ за дължина на вълната $10\mu m$).

- Обектив, съставен от 3 лещи.

Условието за отстраняване на сферичната аберация е $SA3_3 = 0$.

В израз (10) се полага с $i = 3$ и $v = 0$ и се получава

$$4n - 1 = \frac{32}{3}(n - 1)^2 \quad (12)$$

Решението на уравнение (12) показва, че сферичната аберация на обектив съставен от 3 лещи ще бъде отстранена, когато показателят на пречупване на материала, от който те са изработени е $n = 1,75$. Най-близко разположен до $n = 2,5$ е показателят на пречупване на CsI ($n = 1,74$ за дължина на вълната $10\mu m$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвана е възможността за разработване на малокомпонентни инфрачервени обективи за термалната област от спектъра, съставени само от положителни лещи и изработени от един и същ материал. Синтезирани и изследвани са обективи, изработени от Ge, ZnS, ZnSe и AMTIR-1 и съставени от 1, 2 и 3 лещи с оптимална форма и малка оптична сила. Установено, е че минимумът по абсолютна стойност на сферичната аберация зависи както от показателя на пречупване на материала, от който е изработена лещата, така и от броя на използваните лещи. Определени са оптичните материали, при които сферичната аберация от трети



ред на дублет и триплет е близка до нула. Оптималният брой леци, от които може да се изгради компактен малокомпонентен инфрачервен обектив отговарящ на зададените в изложението условия е 2 или 3 и се определя от оптичния материал и от сумарния баланс на аберациите.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност към проект BG05M2OP001-1.002-0023, Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Daniels, A., Field guide to infrared systems, SPIE Field guide series, Vol. FG09, Bellingham, Washington, SPIE Press, 2007.

- [2] Справочник по инфракрасной технике / Ред. У. Волф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т.2. Проектирование оптических систем: Пер. с англ. Москва, Мир, 1998.
- [3] M. Riedl, Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition, SPIE Press, Bellingham, WA (2001).
- [4] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение., Пер. с франц., М. Мир, 1988.
- [5] Kingslake R., R. Barry Johnson, Lens Design Fundamentals, 2nd ed., SPIE Press Vol. PM195, 2010.
- [6] Smith, Warren J.: Modern optical engineering. New York, McGraw-Hill, 2008.
- [7] Fischer, R. E., B. Tadic-Galeb, Optical System Design, , New York, McGraw-Hill, 2008.
- [8] Kidger, Michael J. Fundamental Optical Design, SPIE Press, Bellingham, 2002.
- [9] Вычислительная оптика. Справочник под ред. М.И. Русинова, СанктПетербург, ЛКИ, 2008.



АЛГОРИТЪМ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ГРЕШКИ В ПНЕВМАТИЧЕН ИЗМЕРВАТЕЛЕН МОДУЛ

FAULT DETECTION ALGORITHM FOR PNEUMATIC MEASUREMENT MODULE

Albena Taneva

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Desislava Atanasova

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Krum Kutrynski

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Michail Petrov

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Abstract

The aim of this paper is to present basic hardware components of a flexible assembly system (FAS) and investigate possible faults, classify the errors and implement real diagnosis. The mentioned FAS-200 system offers professional training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0. This system consists of an automated flexible assembly cell with five different stages: assembly, handling, quality inspection, transfer and warehouse. The pneumatic system repeats the identical programmed sequence during its operation. The data was collected when the pneumatic system worked perfectly and had some generated faults including empty magazine, zero vacuum, inappropriate material, no pressure, closed manual pressure valve, missing drilling stroke, poorly located material, not vacuuming the material and low air pressure. The faults are simulated according to developed algorithms in this investigation. The analysis of the simulated faults is discussed and the obtained results can be applied in the similar pneumatic systems in industry.

Keywords: Fault detection and diagnosis, Flexible assembly systems, Intelligent manufacturing systems.

INTRODUCTION

Smart Manufacturing is considered as a new paradigm that makes work smarter and more connected, bringing speed and flexibility through the introduction of digital innovation [1]. Digital innovation and sustainability are two inseparable principles which are based on the concept of circular economy. Digital innovation enables like digital platforms, smart devices, artificial intelligence that help to optimize resources.

The main part of Smart Manufacturing are flexible assembly systems [2]. A flexible

assembly system (FAS) is a fully integrated production system consisting of computer numerically controlled assembly stations, connected by an automated material handling system, all under the control of a central computer. FAS is capable of simultaneously assembling a variety of product types in small to medium-sized batches and at high rate comparable to that of conventional transfer lines designed for high volume/low variety manufacture [3].

The aim of this paper is to present one of the basic hardware components of a flexible



assembly system FAS 200 and discuss its fault diagnosis, classify the faults and describe some real applications. The FAS-200 system is the ideal answer to research and training in industrial automation. It is fully modular and flexible equipment and in keeping with industrial reality [7], [8].

FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS IN FLEXIBLE AUTOMATION SYSTEMS

The interest for the development of diagnostic methods for pneumatic and hydraulic systems has increased in the last decade. Researchers concentrated on the detection of the faults of the components. The condition of the pneumatic and hydraulic cylinders [4], and digitally controlled valves [5] were the main focus of the studies. Some of the other considered faults were leakage of the seals [6], friction increase and other malfunctions.

In the Flexible Integrated Assembling System FAS-200, the most modules could simulate 16 errors. These errors are generated by switches. To access to these switches, it is necessary to open the cover of the system TROUB200 using the corresponding key. Each of these switches will cause an error in one of the manipulator components of the corresponding module. There is no limit in the number of errors which can be simultaneously activated

ASSEMBLY SYSTEM DESCRIPTION

It is described a training equipment in mechatronics connected with Industry 4.0 technologies. This is a flexible assembly system FAS – 200, installed at laboratory of *Intelligent Automation Manufacturing Systems* in the new Centre of Competence “*Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies*”.

FAS 200 [7] is comprised of different stations, each performing a part of assembly process. The flexible assembly system has

been specially conceived for persons to acquire professional capabilities in connection with the Occupational Groupings of Electricity/ Electronics and Maintenance, such as: -Installation, Electromechanical Maintenance and Line Transport; - Industrial Equipment Maintenance; - Automatic Control and Regulation Systems.

The flexible system FAS–200, installed at the Laboratory of Intelligent Automation Manufacturing Systems includes six stations Fig.1:

- FAS-203: Module for feeding and transferring of bearings

This cell feeds the bearings and forwards it to the position for measurement. The bearings have two heights. Hence, can be used and putted two types with different heights.

- FAS-204: Measuring module

It measures the bearings assured by the previous cell and forwards them after to the next cell.

- FAS-209: Lid classification station

This station feeds and inspects that, which are to be added to the work-piece. In the current case up to six different of lids with varying height, color and material are possible to classify.

- FAS-210: Lid rejecting and transferring station

This station rejects incorrect lids or inserts them onto the pallet in case they are of the required type.

- FAS-215: Visual inspection and rejection station

Before the last storage steps, the visual inspection station is able to reject the items, if it obtains the unsatisfactory result.

- FAS-216: Storage station

The product is removed from the production line and stored using electric actuators.

In addition to transport processes between all stations there is a linear conveyor with a CCD Camera for final quality inspection.

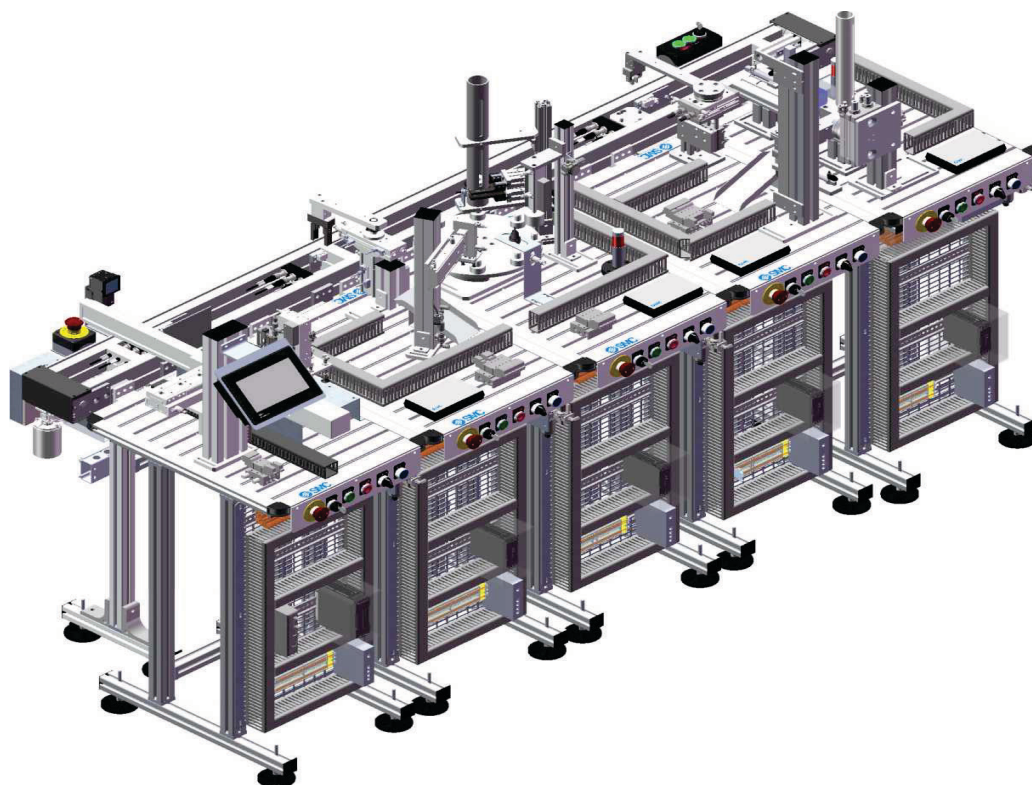


Fig. 1. Overall view of the assembly system FAS-200.

DESCRIPTION OF THE PNEUMATIC MEASUREMENT MODULE FAS 204

It is measured in this module the height to differentiate between the two sizes of bearings, fig. 2. This module rejects the bearing or places it inside the housing of the body on the pallet, depending of the signal “tall bearing” or “short bearing”. The confirmation of the bearing has got the correct height is got by a linear potentiometer like a measurer turning on an internal flag of the PLC, signal “tall bearing” or “short bearing”.

When the pallet is positioned opposite the module this operation begins. The pallet is held in the location by a stopper and a positioner-lifter on the linear transfer system.

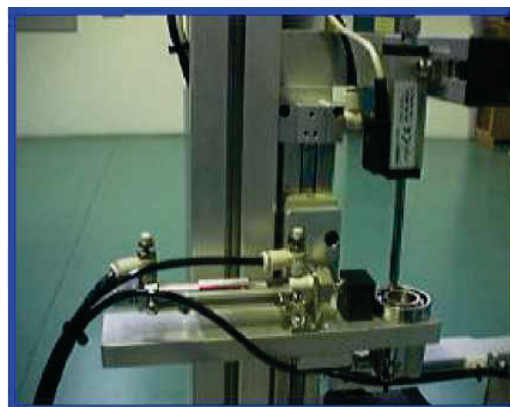


Fig. 2. Measuring manipulator

When the PLC of the previous module sends the signal “end cycle” to the PLC of this measuring module. The task of placing the bearing is performed on the pallet brought by the belt conveyor and carrying the body fed and assembled by the previous modules.

The bearing fitting operation requires the pallet carrying the body to be precisely situated in a predetermined place. To achieve this precision, once the pallet has been retained by a stopper, it is lifted by a pneumatic cylinder and centered at the same time by four pins which fit inside housings formed for this purpose in the bottom of the pallet.

The measuring module, like the others, could be divided into a series of manipulators. Each sub-module has been made by considering it as a set of components which performs a specific operation within the whole process carried out at the main module.

• Measurement of height:

The module allows the possibility of feeding bearings of different heights, because a measuring manipulator is included to measure the height and to select them. The bearing is placed on a platform, with a centering device operated by a pneumatic cylinder which locates it at a very precise position. That is needed to perform the correct measurement of the height. This platform is lifted by a rod less pneumatic cylinder. This way the bearing contacts a touch sensor and gives the height reading. The touch sensor consists of a linear potentiometer with an output, connected with an analogue module, included in the PLC. The lifter returns to its original position after measurement. After that, a cylinder pushes the bearing towards a ramp, in case the height does not correspond to the selected one.

• Bearing insertion:

The final operation is performed by a manipulator (fig. 3) comprising a rotary-linear system with an arm to which a two-finger gripper has been fitted. After picking up the bearing, the arm goes up, turns through 180° and then goes down again to insert the bearing in the housing of the body.

This way the functions in the measuring module are finished.

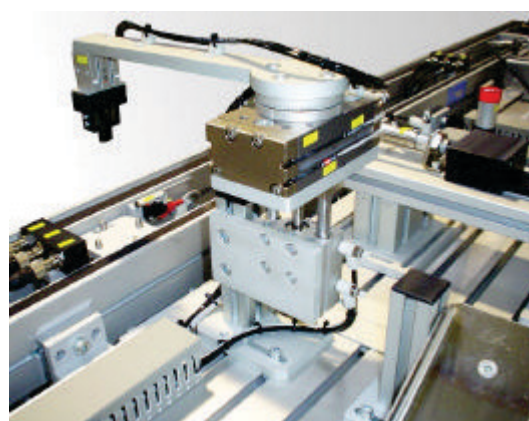


Fig. 3. Insertion manipulator

FAULT CLASSIFICATION

The fault classification aimed at fault localization and/or fault description, both of which can be helpful for targeted and faster maintenance. Using known information from the pneumatic circuit diagram (fig. 4), it can be concluded which of the components involved is out of order.

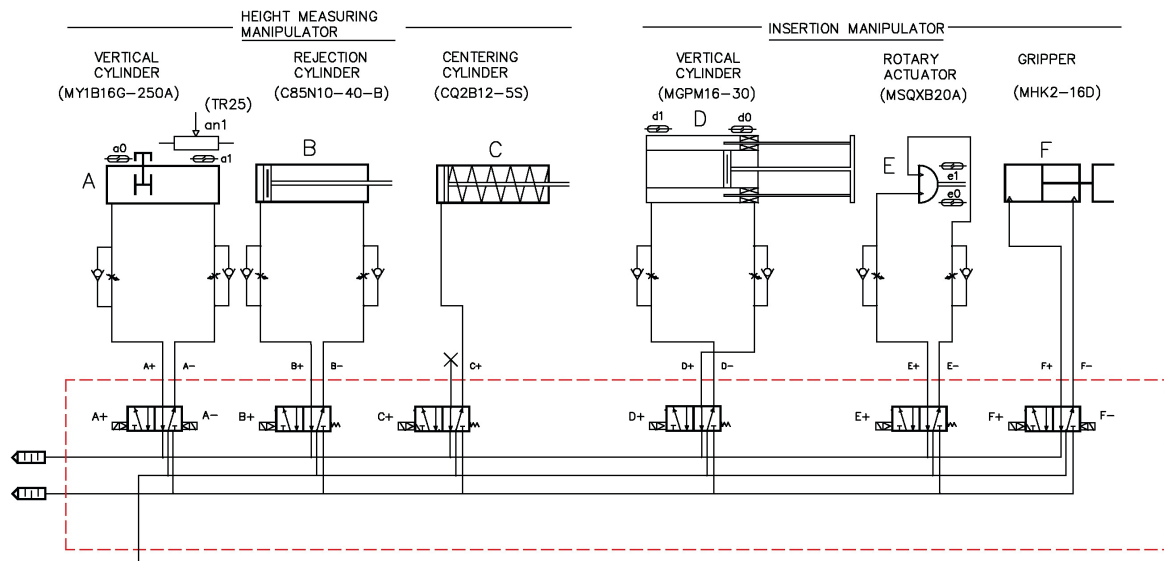


Fig. 4. Pneumatic diagram of the measuring module.

The possible simulated faults could be classified and simulated as follows:

1. The elevator-measurer cylinder (A) does not go up to make the measurement of the bearing. The expected wrong components are:
 - Elevator-measurer cylinder (A).
 - Solenoid valve of the elevator-measurer cylinder (A+).
 - Backward auto switch (a0) of the elevator - measurer cylinder.

The faulty component is wiring of the elevator-measurer cylinder's solenoid valve (A+). The 24v from the PLC's O01 output are not being received.

2. The rejector-measurer cylinder (B) does not reject the bearing, even the size of the bearing is wrong. The expected wrong components are:
 - Rejector-measurer cylinder (B).
 - Solenoid valve (B+) of the rejector-measurer cylinder.

The faulty component is wiring of the rejector-measurer cylinder's solenoid valve (B+). The 24v from the PLC's O03 output are not being received.

3. The centering cylinder (C) of the measuring manipulator does not go down to

hold to the bearing. The expected wrong components are:

- Centering cylinder (C).
- Solenoid valve (C+) of the centering cylinder.

The faulty component is wiring of the centering cylinder's solenoid valve (C+). The 24v from the PLC's O04 output are not being received.

4. The vertical cylinder of insertion (D) doesn't go down to pick up the bearing from the measurement position. The expected wrong components are:
 - Centering cylinder (C).
 - Solenoid valve (C+) of the centering cylinder.

The faulty component is wiring of the centering cylinder's solenoid valve (C+). The 24v from the PLC's O04 output are not being received.

5. The rotary manipulator (E) does not go forward until the pickup position of the bearing. The expected wrong components are:
 - Rotary actuator (E).
 - Solenoid valve (E+) of the rotary actuator.
 - Auto switches (e0, e1) of the rotary actuator.



The faulty component is wiring of the rotary actuator's solenoid valve (E+). The 24v from the PLC's O06 output are not being received.

6. The pneumatic gripper (F) cannot open to pick up the bearing. The expected wrong components are:

- Pneumatic gripper (F).
- Solenoid valve (F+) of the pneumatic gripper.

The faulty component is wiring of the pneumatic gripper's solenoid valve (F+). The 24v from the PLC's O07 output are not being received.

7. The rotary actuator (E) doesn't go down to pick up the bearing from the measurement position. The expected wrong components are:

- Solenoid valve (E) of the rotary actuator.
- Auto switches of the rotary actuator.

The faulty component is wiring of the auto switch of the rotary actuator (e1), 0v are detected in the PLC's I09 input.

8. The rotary actuator (E) doesn't go up to pick up the bearing from the measurement position. The expected wrong components are:

- Solenoid valve of the rotary actuator.
- Auto switches (e0, e1) of the rotary actuator.
- Solenoid valve (E+) of the vertical cylinder.
- Auto switches (d0, d1) of the vertical cylinder.

The faulty component is wiring of the auto switch of the vertical cylinder (d1), 0v are detected in the PLC's I06 input.

9. The measurer cylinder (A) doesn't go up to perform the measurement of the bearing. The expected wrong components are:

- Analog potentiometer (an1).
- Measurer cylinder (A).
- Solenoid valve (A+) of the measurer cylinder.

- Forward auto switch (a1) of measurer cylinder.

The faulty component is wiring of the forward auto switch of the measurer cylinder (a1), continuously provides the PLC's I05 input with 24v.

10. The sequence of the system stops when the insertion manipulator goes down to take a bearing. The module keeps stopping. The expected wrong components are:

- Manual/Automatic selector.

The faulty component is wiring of the upward auto switch of insertion manipulator (d0), continuously provides the PLC's I07 input with 24v.

MEASURING AND FAULT DETECTION ALGORITHM

During operation with the flexible assembling system they are used functional PLCs software programs implemented like structural function codes. The function code diagram for the measuring module is evident from fig. 5.

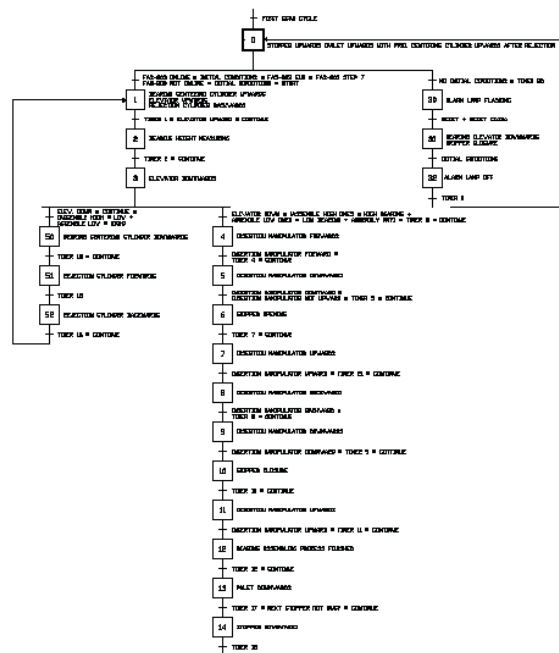


Fig. 5. Program function diagram for the measuring module FAS204.

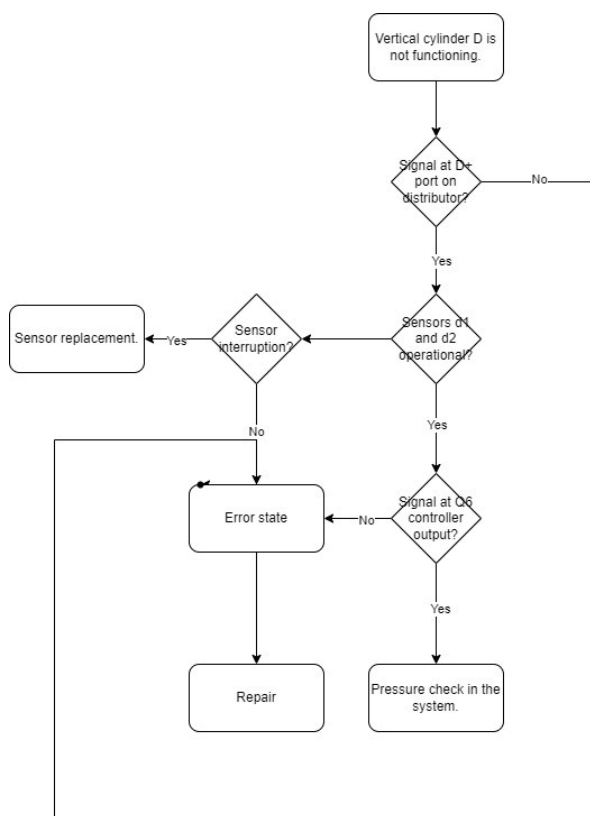


Fig. 6. Algorithm for fault detection in the pneumatic vertical cylinder D.

Two faults were selected from the fault simulation system - fault No. 4 and fault No. 6 described above. Typically, the suspected components and likely causes of these faults include actuators, distributors, wiring, and their connection to the input-output PLC. Two algorithms have been developed that uses visual signaling to notify of a fault in the system and provide a tool for checking the system and its components to identify the causes of the fault.

The first algorithm is implemented when the vertical cylinder D fails to actuate for lifting the bearing (fig.6). When the conditions for implementing step 5 (fig. 5) are met, but step 5 itself is not executed, meaning that cylinder D remains inactive due to the lack of a signal to D+, a visual signal is activated using a lamp to notify the operator of a system error.

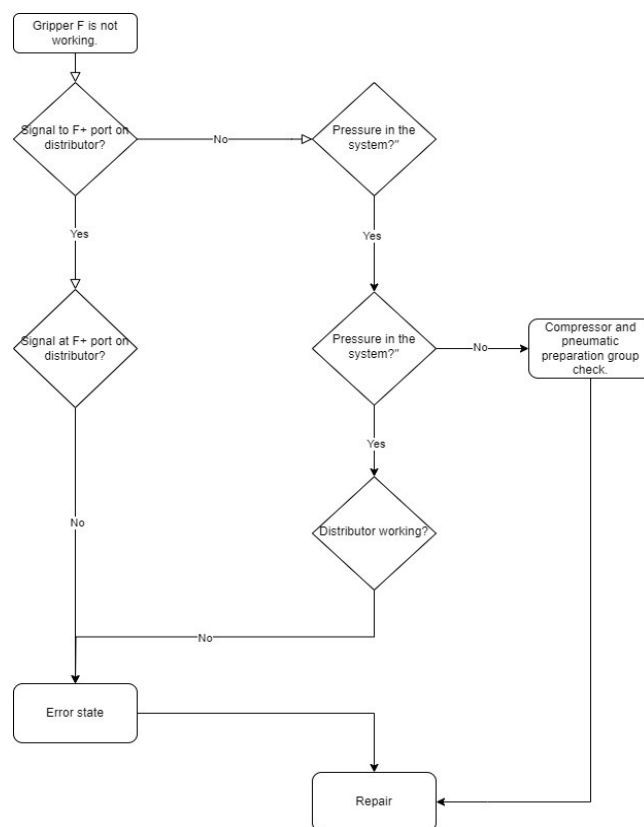


Fig. 7. Block diagram of the algorithm for the case in which gripper F does not actuate.

If cylinder D fails to actuate due to the absence of a signal to D+, this activates a visual signal to alert the operator of a system error. Otherwise, the system continues its cycle.

The second algorithm is implemented when the pneumatic gripper (F) cannot open to pick up the bearing. The developed fault detection algorithm is evident from fig.7. The faulty component is wiring of the pneumatic gripper's solenoid valve (F+). The low level of the air pressure is also a reason for an error state. After fault detection and signalization, the repair process has to be performed.

A program has been created in the Siemens TIA Portal environment, activating light signaling when one error occurs in the selected FAS-204 module. A diagnostic program has been created, hardware stops and



feedback from the PLC when a hardware fault occurs malfunction, such as no power, a broken cable or something else.

The final results satisfied the process of fault detection and diagnostic for preventing of future unwanted effects.

CONCLUSION

The aim of this paper is to present one of the basic hardware components of a flexible assembly system FAS 200 and discuss its fault diagnosis, classify the faults and describe some real applications. The faults are simulated according to developed algorithms in this investigation. The analysis of the simulated faults is discussed and the obtained results can be applied in the similar pneumatic systems in industry. The FAS-200 system is the ideal answer to research and training in industrial automation.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the Centre of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”.

REFERENCES

- [1] S. Liang and M. Rajora, “Intelligent Manufacturing Systems: A Review,” in *International Journal of Mechanical*

Engineering and Robotics Research Vol. 7, No. 3, May 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324598110>.

- [2] H. Elmaraghy, “Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 261-276, 2005.
- [3] N. Asadi, “Flexibility in Assembly Systems using Product Design,” Ph.D. dissertation, Mälardalen University Press Dissertations., Printed by E-Print AB, Stockholm, Sweden, 2017.
- [4] You-Jin Park, Shu-Kai S. Fan and Chia-Yu Hsu. A Review on Fault Detection and Process Diagnostics in Industrial Processes. *Processes* 2020, **8**, 1123.
- [5] Wolfgang Gauchel, Thilo Streichert, Yannick Wilhelm. Predictive Maintenance with a Minimum of Sensors using Pneumatic Clamps as an Example. 12th International Fluid Power Conference | Dresden 2020.
- [6] Rosen Kosturkov, Veselin Nachev, Tanya Titova. Diagnosis of Pneumatic Systems on Basis of Time Series and Generalized Feature for Comparison with Standards for Normal Working Condition. *TEM Journal*. Volume 10, Issue 1, Pages 183-191.
- [7] SMC Networks. FAS-200 User Manual. 2020, p. 97.
- [8] <https://www.smctraining.com/>. SMC International Training.



ВЛИЯНИЕ НА ТОКА НА ТИТАНОВИТЕ ТАРГЕТИ ВЪРХУ АДХЕЗИЯТА НА ТВЪРДИ ПОКРИТИЯ CrTiAlN, ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ РАЗБАЛАНСИРАНО МАГНЕТРОННО РАЗПРАШВАНЕ В ЗАТВОРЕНО ПОЛЕ

THE INFLUENCE OF TITANIUM TARGETS CURRENTS ON THE ADHESION OF CrTiAlN HARD COATINGS OBTAINED BY UNBALANCED MAGNETRON SPUTTERING

Ekaterina Zlatareva^{1*}, Vasilliy Chitanov¹, Stefan Kolchev¹, Tetiana Cholakova¹,
Lilyana Kolaklieva¹, Roumen Kakanakov¹, Chavdar Pashinski^{1,2}

Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences

Technical University Sofia – Branch Plovdiv

*e-mail ekpepe31@gmail.com

Abstract

Hard CrTiAlN coatings were prepared to research the influence of Ti-targets currents on the adhesion to HSS substrate. The samples were processed in UDP 850 (Teer Coatings) by Closed Field Magnetron Sputtering at temperatures below 200°C. The technological regimes differed in values of Ti-targets currents while the other technological parameters were kept the same. The chemical composition of the coating showing optimal properties is: Cr – 48.4 at. %, Ti – 7.8 at. %, Al – 6.9 at. %, N – 36.9 at. %. A progressive scratch test at loading from 0.5 N to 30 N does not reveal features implying any failures in the adhesion and cohesion. The lowest coefficient of friction against the Rockwell indenter – 0.117, was measured for this coating. Significant advantages of this coating compared to the others in the series were found.

Keywords: unbalanced magnetron sputtering, hard coatings CrTiAlN, adhesion.

ВЪВЕДЕНИЕ

Разработването на твърди покрития, нанасяни чрез физично отлагане от газова фаза при температури под 250 °C е обект на изследванията, свързани с тяхното приложение за температурочувствителни материали. Нанасянето на защитни твърди покрития за този клас материали трябва да се осъществява при температури, по-ниски от тези при които те са темперирани. Тази изследователска задача е свързана с избора на подходящо оборудване за нанасяне на покритията, подбора на предварителната механична и химична обработка, режим на плазмата в камерата и на оптимална трибологична система покритие-подложка [1].

Четворните CrTiAlN твърди покрития с преходен слой CrN, нанесени чрез разбалансирано магнетронно разпрашване, се използват за подобряване на времето на експлоатация на различни инструменти. Те се характеризират с температурна и оксидационна устойчивост, което ги прави перспективни за покрития върху режещи инструменти [2]. Изучаването на адхезията на твърдите покрития е предизвикателна задача поради влиянието на широк набор от фактори. Характерните критични натоварвания дават информация за издръжливостта на покритието и за адхезията към подложката [3]. Механизмите на включване на елементи като Ti и Al към CrN за



този клас материали са определящи за тяхната устойчивост към образуване на пукнатини и за адхезионната им сила. Познаването им позволява предсказване на трибологичните свойства на материалите [4]. Структурата, оксидационната устойчивост, механичните и трибологичните свойства при твърдите CrTiAlN покрития с ниско съдържание на Al силно зависят от количеството на елемента Ti. [5]. Целта на настоящата работа е изследване на влиянието на тока на Ti-таргети върху адхезията на твърди покрития CrTiAlN с ниско съдържание на Al, нанесени чрез разбалансирано магнетронно разпрашване при температури по-ниски от 200 °C.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Технологичните процеси са проведени чрез разбалансирано магнетронно разпрашване в затворено магнитно поле във вакуумна установка UDP 850 (Teer Coatings Ltd), оборудвана с четири плоски правоъгълни магнетрона при температура на подложката в интервала 175-195 °C. Детайлно оборудването, както и предварителната пробоподготовка са описани в [6].

В процеса на оптимизация на технологичния режим са отложени CrTiAlN покрития. С цел подобряване на адхезията към подложката и намаляване на вътрешните напрежения са включени адхезионен (Cr) и преходен (CrN) слой при аналогични условия за всички процеси. Градиентният (CrTiAlN) и основният слой са отложени при режими, различаващи се за отделните процеси единствено по приложения на Ti-таргети ток. Параметрите на отлагане на покритията са представени в Таблица 1.

Таблица 1 Параметр на технологичните режими

#	I _{Al} , [A]	I _{Ti} , [A]	I _{Cr} , [A]	I _{Ti} , [A]	N ₂ , [sccm]	p, [Pa]	D, [μm]
#01	6.0	6.0	6.0	6.0	22.0	0.20	3.2
#02	6.0	5.0	6.0	5.0	22.0	0.20	2.8
#03	6.0	4.5	6.0	4.5	22.0	0.20	2.8
#04	6.0	4.0	6.0	4.0	22.0	0.27	1.6

Механичните свойства на покритията и тяхната адхезия са изследвани чрез Compact Platform CPX (CSM Instruments). Адхезията на покритията е изследвана чрез прогресивен тест на надраскване при нормален натиск $F_n = 0.5 \div 30$ N.

Елементният състав на покритията е изследван с помощта на сканиращ електронен микроскоп (Hitachi SU 5000), оборудван със система за енергийно-дисперсионен анализ (EDS, Thermo Scientific).

Наблюдаваните нарушения, механизмът на тяхното възникване и развитие, както и натоварването, при което се проявяват, зависят от характеристиките на системата подложка-покритие (грапаовост на подложката, структура и дебелина на покритието, комплексен модул на еластичност и др.), от параметрите на изпитване (радиус на индентора, скорост на натоварване и придвижване и др.) и от условията на заобикалящата среда (температура, влажност и др.) [7]. От своя страна съставът, структурата и свойствата на получените покрития се определят от условията на нанасяне. Между технологичните параметри съществуват сложни зависимости, често нелинейни и промяната на всеки параметър може да промени равновесието.

За промените в активната повърхност на таргетите се съди от представените в Таблица 2 електрически параметри. Еднаквата мощност, с която работи хромният таргет в отделните процеси показва, че състоянието на неговата работна повърхност не се повлиява от настъпилите промени в условията в камерата. За алуминиевия таргет понижаването на мощността е свързано с понижаване на напрежението. Установената разлика от 40V в напрежението при процеси #03 и #04 най-вероятно се дължи на преход от чиста метална повърхност на алуминиевия таргет към такава, частично или изцяло покрита с нитрид. При титановите таргети повишаването на съпротивлението предполага частично формиране на



титанов нитрид на повърхността му [8]. Разликата в стойностите на напрежението на двата титанови таргета при един и същи ток се дължи на разликата в площта и в профила на активна повърхност, които се определят от експлоатационния им живот.

Изследвания с многофакторен анализ Движението на индентора възникват полу-сферични нарушения, резултат от деформация на покритието пред него. От

Таблица 2 Електрически параметри

#	I_{Al} , [A]	U_{Al} , [V]	P_{Al} , [kW]	I_{Ti} , [A]	U_{Ti} , [V]	P_{Ti} , [kW]	I_{Cr} , [A]	U_{Cr} , [V]	P_{Cr} , [kW]	I_{Ti} , [A]	U_{Ti} , [V]	P_{Ti} , [kW]
#01	6.0	254	1.5	6.0	268	1.6	6.0	300	1.8	6.0	300	1.8
#02	6.0	247	1.5	5.0	270	1.4	6.0	295	1.8	5.0	293	1.5
#03	6.0	237	1.4	4.5	270	1.2	6.0	295	1.8	4.5	292	1.3
#04	6.0	197	1.2	4.0	288	1.2	6.0	295	1.8	4.0	296	1.2

посочват мощността като определящ фактор за дебелината и качеството на получените покрития [9]. При изследването за процес #04 е отчетена най-висока мощност на хромния и най-ниска - на алуминиевия таргет спрямо сумарната мощност на титановите таргети, което съответства на изменението на елементния състав на покритията, представен в Таблица 3. С намаляване на мощността на титановите и на алуминиевия таргет намалява скоростта на отлагане на покритието.

Получените при описаните условия покрития показват известни разлики в механичните свойства и адхезията (Фиг. 1). об-

разец #01 към #03 тези нарушения намаляват значително своята интензивност и гъстота. Аналогична е тенденцията по отношение на дъговидните нарушения, породени от опънови напрежения зад индентора. Тези нарушения са насочени обратно на посоката на движение. Такива са налични в следата на образец #01; в тази на образец #02 и #03 са едва забележими, а при #04 не се наблюдават.

Спектърът на акустичната емисия на образец #01 (Фиг. 2) се отличава с няколко единични пика с различна амплитуда, на които съответстват две големи нарушения с кохезионни пропуквания след $F_n=22$ N. В

Таблица 3 Елементен състав

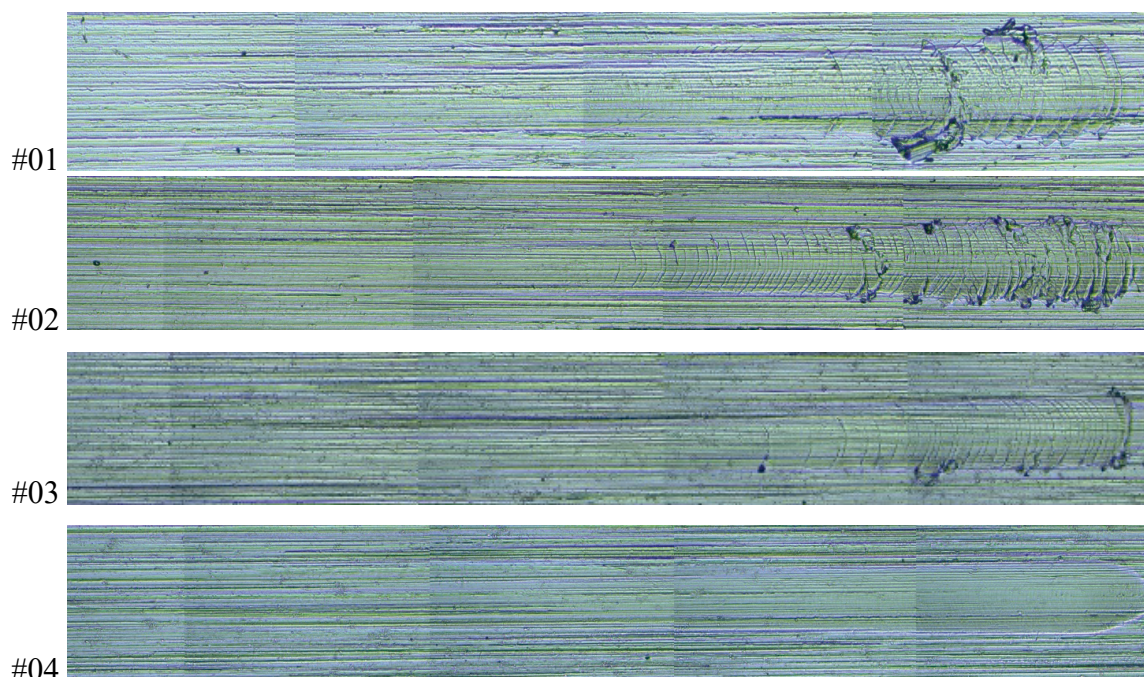
#	Al, [at. %]	Ti, [at. %]	Cr, [at. %]	N, [at. %]	Формула
#01	16.0	18.8	36.6	28.5	$(Cr_{0.51}Ti_{0.27}Al_{0.22})N$
#02	19.4	13.7	38.6	28.3	$(Cr_{0.54}Ti_{0.19}Al_{0.27})N$
#03	19.7	10.6	38.7	31.0	$(Cr_{0.56}Ti_{0.15}Al_{0.29})N$
#04	6.9	7.8	48.4	36.9	$(Cr_{0.77}Ti_{0.12}Al_{0.11})N$

Механизмите на възникване и развитие на нарушенията и връзката им с пиковите в акустичната емисия са разгледани на базата на анализа в [10]. Амплитудата на единичен пик в акустичната емисия е пропорционална на площта на нарушението, което го генерира. Наличието на множество свързани

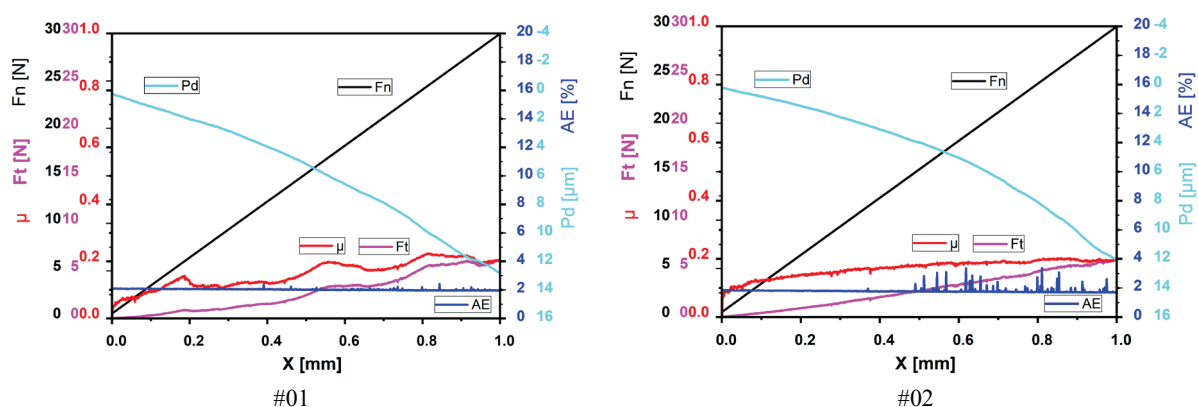
пикове показва откъртване на покритието и в тези случаи се наблюдават големи открити площи от субстрата [10]. Липсата на такива пикове, регистрирани в акустичната емисия за изследваните покрития показва, че нарушенията не достигат подложката за нито едно от покритията.

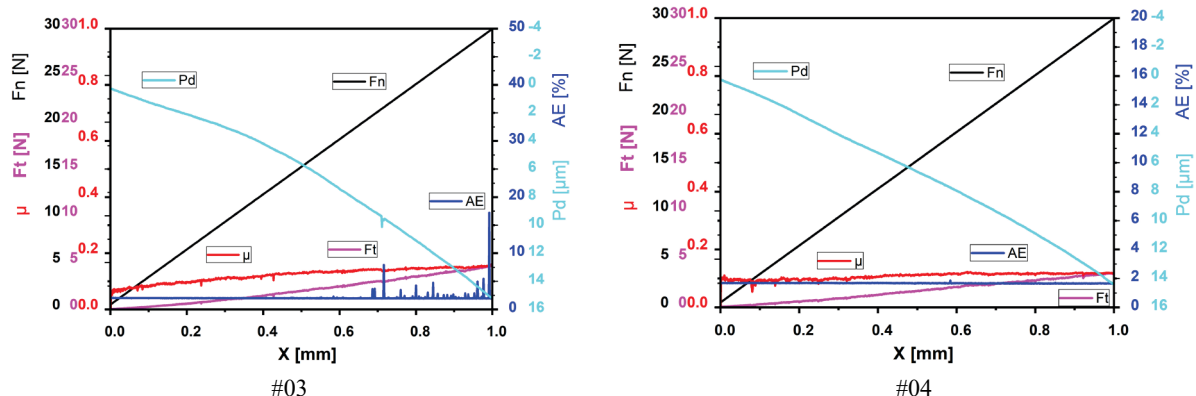
При теста на надраскване по посока на спектъра на образец #02 след $F_n=10\text{ N}$ се наблюдават множество пикове с нарастваща амплитуда. Тези пикове отговарят на серия видими частични полусферични нарушения пред индентора, породени от прекомерно огъване на покритието, водещо до пластична деформация. След 23 N до края на теста се

появяват кохезионни нарушения между преходния и основния слой на покритието, излизащи извън рамките на следата. Снимката на следата (Фиг.1) показва, че тези нарушения не предизвикват отлюспване на покритието. При образец #03 при приложени ниски стойности на натоварване липсват пикове, предизвикани от частични нарушения.



Фиг. 1. Тест на надраскване





Фиг. 2 Графики към тест на надраскване

След 20 N се наблюдават полусферични нарушения, на които съответства серия пикове в спектъра на акустичната емисия. След 23N се наблюдават няколко нарушения, излизащи извън следата, но с много по-слабо изразени пропуквания. В графиката за #04 не се наблюдават пикове, което е свързано с липсата на нарушения, включително, дължащи се на дефекти на подложката

Полученияте резултати от изследването на адхезионно-кохезионните свойства на CrTiAlN покрития, получени при различни технологични режими показват, че увеличаването на съдържанието на хром в състава на покритието намалява крехкостта му. В резултат, първите нарушения в следата от теста на надраскване настъпват при по-голямо натоварване.

Прави впечатление, че дълбочината на проникване Pd е по-малка при образци #01 и #02, които са с по-високо съдържание на титан и с по-малка еластичност.

Силата на триене, съответно, коефициентът на триене, намаляват от образец #01 към #04. За образец #04 $\mu=0.117$, което е почти два пъти по-малко в сравнение с образец #01, за който $\mu=0.206$. Липсата на нарушения и ниският коефициент на триене предполагат подобрена изнosoустойчивост на образец #04.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработени са серия твърди покрития CrTiAlN чрез разбалансирано магнетронно разпрашване и е изследвана зависимостта на адхезията им от тока, подаден към титановите таргети.

- С намаляване на тока на титановите таргети намалява количеството на разпрашвания титан и респективно количеството на титановия нитрид в състава на покритието. Това води до увеличаване на вероятността за формиране на нитриди на хрома и алуминия. Същевременно, част от повърхността на алуминиевия таргет се нитридира в резултат нарастналото съдържание на свободен азот, което рефлектира в намаляване на скоростта на разпрашване и респективно на съдържанието на алуминиев нитрид в състава на покритието. В резултат на това се увеличава съдържанието на хром под формата на Cr_xN_y . Увеличаването на съдържанието на хром за сметка на това на титан и алуминий при запазване на потока на азота в камерата, намалява крехкостта на покритието и първите нарушения настъпват при по-голямо натоварване.

- При покритие $(\text{Cr}_{0.77}\text{Ti}_{0.12}\text{Al}_{0.11})\text{N}$ не се наблюдават нарушения. Измерен е най-нисък коефициент на триене $\mu=0.117$.



Очаква се покритието да демонстрира добра изнosoустойчивост.

ПРИЗАТЕЛНОСТ

Тази работа е финансирана по Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“ финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Navinšek B. Characterization of low temperature CrN and TiN (PVD) hard coatings, Surface and coatings technology, 1995; 74-75: 155-161.
- [2] Yang Q. Wear, erosion and corrosion resistance of CrTiAlN coating deposited by magnetron sputtering, Surface and coatings technology, 2008;202(16):3886-3892.
- [3] Kabir M. Scratch adhesion and tribological behaviour of graded Cr/CrN/CrTiN coating synthesized by closed-field unbalanced magnetron sputtering, Wear, 2017;380-381:163-175.
- [4] Wang Q. Evaluating mechanical properties and crack resistance of CrN, CrTiN, CrAlN and CrTiAlN coatings by nanoindentation and scratch tests, Surface and coatings technology, 2016;285:203-213.
- [5] Lin J. The structure, oxidation resistance, mechanical and tribological properties of CrTiAlN coatings, Surface and coatings technology, 2015;277: 58-66.
- [6] Chitanov V. Elastic-plastic properties of hard Cr-based nitride coatings deposited at temperatures below 200 °C, Tribology in Industry, 2023;45(2): 340-350.
- [7] ASTM Designation: C1624, Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, 2010
- [8] Depla D. Modelling reactive magnetron sputtering: Opportunities and challenges, Thin Solid Films, 2019; 688: 1-6.
- [9] D. Song D. Multi-parameter coupling study of magnetron sputtering nickel-chromium thin film based on Taguchi-gray correlation method, AIP Advances, 2021;11
- [10] Bull S. Failure modes in scratch adhesion testing, Surface Coatings Technology 1991;50(1):25-32

----- www.eufunds.bg -----

Проект BG05M2OP001-1.002-0023, Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.