НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL UNION OF MINING, GEOLOGY AND METALLURGY

СБОРНИК

**Национална научно-техническа конференция
с международно участие**

АВТОМАТИЗАЦИЯ В МИННАТА ИНДУСТРИЯ И МЕТАЛУРГИЯТА

БУЛКАМК '26

**12–13 ноември 2026
Национален дом на науката и техниката
гр. София, ул. „Г. С. Раковски“ №108**

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ
ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ

СЪОРГАНИЗАТОРИ

Федерация на научно-техническите съюзи в България
Съюз по автоматика и информатика “Джон Атанасов”
Български Национален комитет на ICAMC
Българска минно-геоложка камара
Българска асоциация на металургичната индустрия
Минно-геоложки университет ”Св. Иван Рилски”
Химикотехнологичен и металургичен университет
“Метрополитен” ЕАД
Министерство на икономиката, инвестициите и индустрията
Министерство на енергетиката

СБОРНИК С ДОКЛАДИ

Национална научно-техническа конференция с международно участие

“АВТОМАТИЗАЦИЯ В МИННАТА ИНДУСТРИЯ И МЕТАЛУРГИЯТА”

БУЛКАМК ’26

PROCEEDINGS OF
THE NATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION

“AUTOMATION IN MINING INDUSTRY AND METALLURGY”

ИЗДАТЕЛСКИ СЪВЕТ

акад. Васил Сгурев, проф. д-р Коста Бошнаков,
проф. д-р Евтим Кърцелин, доц. д-р Ромео Александров,
доц. д-р Димитър Пенев

Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия

ISSN: 1314-4537


ФНТС
1885
140
години
ФЕДЕРАЦИЯ
НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИТЕ
СЪЮЗИ В БЪЛГАРИЯ

ФИРМИ-ПАРТНЬОРИ

"Асарел-Медет" АД
"Аурубис България" АД
"Гипс" АД
"ДПМ Челопеч" ЕАД
"Елаците-Мед" АД
"Ехнатон България" АД
"Златна Панега Цимент" АД
"Каолин" ЕАД
"КЦМ" АД
"Мини Марица-изток" ЕАД
"Минстрой холдинг" АД
"София Мед" АД
"СПЕСИМА" ООД
"Стомана индъстри" АД
"Фесто" ЕООД
"Холдинг КЦМ 2000" АД

НАЦИОНАЛЕН ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

ПРЕДСЕДАТЕЛ:	
доц. д-р инж. Кремена Деделянова	Председател, НТС по минно дело, геология и металургия
ПОЧЕТЕН ПРЕДСЕДАТЕЛ:	
проф. дтн инж. Цоло Вутов	Почетен председател, НТС по минно дело, геология и металургия
ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛИ:	
доц. инж. Веселин Акиванов	Съюз по автоматика и информатика "Джон Атанасов"
доц. д-р инж. Пламен Василев	Химикотехнологичен и металургичен университет
доц. д-р инж. Ромео Александров	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
СЕКРЕТАР:	
проф. д-р инж. Ясен Горбунов	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
ЧЛЕНОВЕ:	
доц. д-р инж. Ангел Зъбчев	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
инж. Васил Добрев	"ДПМ Челопеч" ЕАД
инж. Васил Харизанов	"София Мед" АД
д-р инж. Владимир Вутов	НТС по минно дело, геология и металургия
инж. Георги Петров	"Елаците-Мед" АД
инж. Даниел Цветков	"Златна Панега - Цимент" АД
проф. д-р Данчо Даналев	Химикотехнологичен и металургичен университет
инж. Димо Кирилов	"Аурубис България" АД
инж. Драгомир Драганов	Българска минно-геоложка камара
проф. д-р инж. Ивайло Копрев	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
инж. Иван Богданов	МДЗ "Балша" АД
инж. Илия Горанов	"Мини Марица-изток" ЕАД
проф. д-р Илия Гърков	ДПМ Металс
инж. Костадин Христов	"МИНПРОЕКТ" ЕАД
инж. Ленко Йорданов	"КЦМ Технолоджи" ЕООД
доц. д-р Никола Добрев	"КЦМ" АД
д-р инж. Никола Рангелов	Българска асоциация на металургичната индустрия
проф. дтн инж. Николай Вълканов	"Минстрой холдинг" АД
д-р инж. Николай Минеков	"Асарел Медет" АД
инж. Николай Пелтеков	"Асарел Медет" АД
д-р инж. Пламен Петров	"ДПМ Челопеч" ЕАД
инж. Румен Цонев	"Холдинг КЦМ 2000" АД
проф. д-р инж. Станислав Топалов	Асоциация "Български въгледобив"
инж. Стоян Пехливанов	"КЦМ" АД

НАЦИОНАЛЕН ПРОГРАМЕН СЪВЕТ

ПРЕДСЕДАТЕЛИ:

акад. Васил Сгурев	Институт по информационни и комуникационни технологии, БАН
проф. д-р Коста Бошнаков	Председател на УС на САИ "Джон Атанасов"

ЗАМ. ПРЕДСЕДАТЕЛИ:

проф. д-р Евтим Кърцелин	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
доц. д-р Димитър Пенев	Технически университет-София
проф. д-р Александра Грънчарова	Химикотехнологичен и металургичен университет

ЧЛЕНОВЕ:

проф. д-р Анатолий Ангелов	Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
проф. д-р Ангел Смрикаров	Русенски университет "Ангел Кънчев"
проф. д-р Елена Колева	Химикотехнологичен и металургичен университет
проф. д-р Емил Михайлов	Химикотехнологичен и металургичен университет
доц. д-р Красимир Иванов	Технически университет - Габрово
доц. д-р Орлин Петров	Русенски университет "Ангел Кънчев"
доц. д-р Алдениз Рашидов	Технически университет - Габрово

ТЕМАТИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ

- **Методи и средства за измерване, диагностика и управление**
- **Автоматизация на електрозадвижването**
- **Автоматизация на добива и преработката на рудни и нерудни суровини**
- **Автоматизация на металургичното производство**
- **Автоматизация на циментовото производство**
- **Управление на енергийните системи и енергийна ефективност**
- **Автоматизация на добива, транспорта, съхранението и разпределението на нефт и газ**
- **Системи и устройства за екологичен мониторинг и управление на пречиствателни процеси**
- **Информационни и управляващи системи**

СЪДЪРЖАНИЕ

МЕТОД ЗА КОСВЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МАСАТА НА ДВИЖЕЩИТЕ СЕ ТОВАРИ НА ЛЕНТОВ КОНВЕЙЕР 1
Валерий Бородай, Стилиян Станков, Велислав Калчев

МЕТОДИ ЗА ОТКРИВАНЕ НА НЕИЗПРАВНОСТИ В ТЪРКАЛЯЩИ ЛАГЕРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ДВИГАТЕЛ ЧРЕЗ АНАЛИЗ НА НЕЕТИКЕТИРАНИ ВИБРАЦИОННИ ДАННИ 7
Атанас Колев

REVIEW OF ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND ITS APPLICATION IN THE ORE PROCESSING INDUSTRY 14
Krasimir Kostadinov

ИЗПОЛЗВАНЕ НА МЕТОДА НА ВЪЗСТАНОВЯВАЩОТО СЕ НАПРЕЖЕНИЕ ЗА ОЦЕНКА НА ИЗОЛАЦИЯТА НА ВЪРТЯЩИТЕ СЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ 20
Красимир Иванов, Георги Велев, Евтим Кърцелин, Николай Илиев

ТОКОВИ ХАРМОНИЦИ В ЖИЛИЩНИ СГРАДИ И ТЯХНОТО ТЕРМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ НИСКОВОЛТОВИ КАБЕЛИ 26
Красимир Иванов, Тодор Тодоров

СГЪСТИТЕЛИТЕ В ОБОГАТИТЕЛНИТЕ ФАБРИКИ: КОНСТРУКЦИЯ, ЕКСПЛОАТАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ 33
Володя Джаров

КООРДИНАТНА МАШИНА ЗА РЯЗАНЕ НА МИННИ МАКЕТИ 39
Вахан Петев, Ромео Александров

АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЕНТИЛАЦИЯТА В ПОДЗЕМНИ РУДНИЦИ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА БЕЗОПАСНОСТ И ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТ – СЛУЧАЙ НА РУДНИК „ЧЕЛОПЕЧ" 46
Георги Станчев

АВТОМАТИЗИРАНА СИСТЕМА ЗА ПОЗИЦИОНИРАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАНЕЛ СПРЯМО СЛЪНЦЕТО – ПРОЕКТИРАНЕ И СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ 51
Анастасия Величкова, Володя Джаров

ОЦЕНКА ЗА ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРОКОНСУМАТОРИТЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В ТОЧКАТА ЗА ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ 58
Евтим Кърцелин, Георги Велев, Красимир Иванов

СЪСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМИ И АКТУАЛНИ ЗАДАЧИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКАТА В БЪЛГАРИЯ 65
Е. Кърцелин, Ст. Топалов, Иван Марков, Щерьо Щерев, Георги Велев, Николай Минеков

EFFECT OF OZONE AS AN ELECTRON ACCEPTOR ON THE PERFORMANCE OF AN AIR-CATHODE MICROBIAL FUEL CELL 76
Sotir Plochev, Kaloyan Nikolov and Anatoliy Angelov

ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА РАЗРАБОТКА НА УМНИ СИСТЕМИ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ 84
Полина Кесова

МЕТОД ЗА КОСВЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МАСАТА НА ДВИЖЕЩИТЕ СЕ ТОВАРИ НА ЛЕНТОВ КОНВЕЙЕР

Валерий Бородай, borodai.v.a@nmu.one, НТУ „Днипровска политехника", катедра „Електрозадвижване", бул. Дмитра Яворницкого, № 19, 49005, Днипро, Украйна
Стилиян Станков, stan@noac.biz, НОАК ЕООД, бул. Цар Борис III, д. 215, 1618, София, Република България
Велислав Калчев, velislav.kalchev@abv.bg, Булекспортконсулт ЕООД, бул. Стефан Станболов, № 10, 1000, София, Република България

РЕЗЮМЕ
Установена е зависимостта на масата на движещите се товари като функция на текущата мощност на задвижващия двигател, като се отчита триенето на конвейерната лента върху механизмите за предаване на въртящия момент при определяне на теглителните сили. Получен е закон за управление на системата за измерване и отчитане, предложени са функционална схема и алгоритъм за управление на устройството.
Предимствата на метода са оперативността при вземането на управленски решения и повишаването на надеждността на системата чрез премахването на датчиците от зоната на агресивни среди.

METHOD OF INDIRECT DETERMINATION OF THE WEIGHT OF MOVING LOADS OF A BELT CONVEYOR

Valerii Borodai, borodai.v.a@nmu.one, Dnipro University of Technology, Department of Electric Drive, Dm. Yavornytskoho Ave., b.19, 49005, Dnipro, Ukraine
Stiliyan Stankov, stan@noac.biz, NOAC Ltd., blvd. Tsar Boris III, b.215, 1618, Sofia, Republic of Bulgaria
Velislav Kalchev, velislav.kalchev@abv.bg, Bulexportconsult Ltd., Stefan Stambolov blvd., b.10, 1000, Sofia, Republic of Bulgaria

ABSTRACT
The dependence of the weight of moving loads in the function of the current power of the drive motor is established, taking into account the friction of the conveyor belt against the mechanisms of torque transmission when determining the traction forces. The control law of the measurement and accounting system is obtained, the functional scheme and the control algorithm of the device are proposed.
Advantages of the method – Efficiency of management decision-making and increased reliability of the system due to the removal of sensors from the zone of aggressive environments.

***Научна новост**. Предложен е метод и оригинален подход за определяне на масата на единица дължина на движещите се товари. Въз основа на анализа на консумираната мощност на задвижващия електродвигател и скоростта на движение на лентата на механизма са получени математически зависимости за определяне на масата на единица дължина на товара.*

***Практическа стойност**. Прилагането на метода ще позволи измерване в реално време на масата на крайния продукт, ще опрости системата за измерване в рамките на*

съществуващата инфраструктура с възможност за дистанционно наблюдение и ще повиши ефективността на управленските решения.

***Ключови думи**: гумено-транспортна лента; асинхронен електродвигател; отчитане на товари; маса на единица дължина; теглително усилие; мощност на задвижващия двигател; непряко измерване на маса; математическо моделиране; алгоритъм за управление; функционална схема.*

Въведение

Ефективността на всяко промишлено предприятие се определя предимно от нивото на производителността на труда, която се характеризира със следните компоненти: производителност на технологичното оборудване и на работния персонал, организация и съгласуваност на логистиката по отношение на компонентите и готовата продукция, както и ефективност на управлението.

Резултатността на управлението може да се оцени по бързината, навременността и безгрешността на взетите решения, което е възможно при достатъчна оперативност на информирането на ръководителя за фактическото състояние на производствените процеси в предприятието.

Ще разгледаме осигуряването на оперативна информация на примера на българското минно предприятие на компанията HB-minerals. Профилът на неговата производствена дейност е добив и подготовка на минерални суровини, включваща трошене и смилане, пресяване и конвейерно транспортиране на крайния продукт до склада. Към актуалната информация спада непрекъснатото наблюдение на наличието и количеството на продукцията, подготвена за продажба. При това тази информация може да се използва както за вземане на управленски решения, така и за планиране и отчитане.

Един от начините за контрол на количеството готова продукция може да бъде нейното непрекъснато претегляне в участъка на лентовия конвейер. Традиционно за тази цел се използват известни методи, чийто дял от общия обем е: механични – 25 %, интелигентни – 15 %, акустични – 10 %, хидравлични – 15 %, електронни – 35 %.

Особеност на минните предприятия с открит и подземен начин на добив е наличието на агресивни среди, което значително ограничава прилагането на класическите методи за претегляне. В тази връзка възниква необходимост от търсене на прости и надеждни методи за контрол на параметрите на транспортирането.

За описаните условия най-перспективното решение е използването на непряк контрол на натоварването въз основа на анализ на консумираната мощност на задвижващия електродвигател и скоростта на движение на лентата на механизма. Такъв подход позволява да се получи информация за масата на материала в режим онлайн без допълнителни механични сензори. Използването на този метод обаче изисква разработването на оригинален математически модел и алгоритъм, които се различават от съществуващите [1], [2].

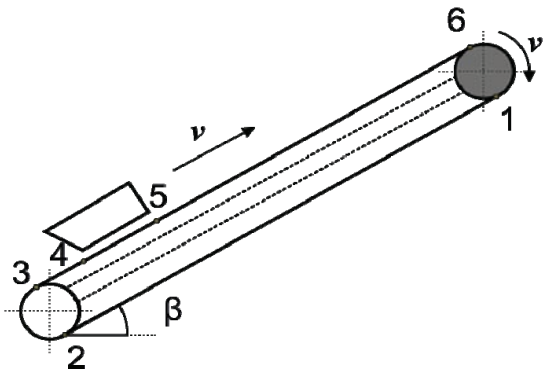
Основна част

В основата на идеята, предложена в настоящата работа, е поставено решаването на пряката и обратната задача за определяне на мощността на механизма въз основа на основните технологични параметри. Предлага се демонстрацията на същността на новия метод да се извърши въз основа на изходните данни за наклонения конвейер на компанията HB-minerals, където необходимите числови параметри са събрани в таблица 1.

Таблица 1. Параметри на изследвания конвейер

№	Наименование на параметъра	Идентификатор	Размер
1.	Насипна плътност на транспортирания материал	ρ	1,3 t/m^3
2.	Производителност на конвейера	Q	100 t/h
3.	Максимален размер на късовете във фракцията	$a_{макс}$	4 mm
4.	Дял на късовете с максимален размер в общия обем на материала	k	20 %
5.	Дължина на наклонения участък на лентата	L	14 m
6.	Височина на повдигане на товара	H	5,2 m
7.	Разстояние от оста на обтягащия барабан до мястото на сипване	L_c	0,8 m
8.	Коефициент на полезно действие	η	0,98
9.	Запас по мощност на задвижването	$k_з$	1,1
10.	Линейна скорост на движение на лентата	v	1,25 m/s

За да се изпълни пряката задача за определяне на мощността на гумено-транспортната лента, допълнително ще се използва изчислителната схема на кинематиката (фиг. 1), където са нанесени точките на контакт на лентата с механизмите и конструктивните елементи, които локализират местата на триене между тях и носещата лента.



1 – изходяща вълна от задвижващия барабан;

2 – притискаща вълна на обтягащия барабан;

3 – изходяща вълна на обтягащия барабан;

4, **5** – точки на триене на захранващата сипка;

6 – падаща вълна към задвижващия барабан;

v – скорост на движение на лентата;

β – ъгъл на наклон спрямо хоризонталата.

Фиг. 1. Разчетна кинематична схема

Класическият метод за изчисляване на мощността на задвижването на лентовия конвейер традиционно се основава на определянето на силите във всяка точка от изчислителната схема, последвано от определяне на сумарната сила на падащата вълна в точка 6 (фиг. 1).

Силата $F_0 = F_6 - F_1$ в зоната на завоя на лентата в точки 6–1 (фиг. 1) е определящият параметър при изчисляването на мощността на конвейерния механизъм. Ще приведем уравнения от общ вид за силите във всяка точка на схемата, започвайки от точка 2 (фиг. 1), изразени чрез силата в точка 1

$$F_2 = F_1 + F_{1_2} = F_1 - 312.25, \text{H}, \tag{1}$$
$$F_{1_2} = \omega \cdot g \cdot \left(q_{хр} \cdot L_{безтовар} + q_л \cdot L_{хн}\right) - q_л \cdot g \cdot H_x$$

където $\omega = 0{,}04$ е коефициент на съпротивление на товара спрямо абразивната среда; $g = 9{,}81$ m/s^2 – ускорение на свободното падане; $q_{хр}$, $q_л$ – маса на ролките и лентата на единица дължина, kg/m; $L_{безтовар} = 13{,}5$, $L_{хн} = 12{,}5$ – дължина на участъка (точки 3–4, фиг. 1) без товар и проекция на наклонения участък, m; $H_x = 5{,}014$ – височина на изкачване, m.

Силата в точка 3 може да се определи по израза

$$F_3 = F_2 + F_{2_3} = 1.05 \cdot F_1 - 327.87, \text{H},$$
$$F_{2_3} = F_2 \cdot \left(k_{2_3} - 1\right), \tag{2}$$

където k_{2_3} = 1,05 – коефициент на завъртане при ъгъл на обхват 180° .

За участъка без товар (точки 3–4, фиг. 1) силата се определя по уравнението

$$F_{3_4} = \omega \cdot g \cdot \left(q_{xp} \cdot L_{безтовар1} + q_л \cdot L_{хн1}\right) - q_л \cdot g \cdot H_{x1}, \text{Н}, \quad (3)$$

където $L_{безтовар1}$ = 0,8, $L_{хн1}$ = 0,743 – дължина на участъка (точки 3–4, фиг. 1) без товар и проекция на наклонения участък, m; H_{x1} = 0,297 – височина на изкачването, m.

Силата в точка 4 (фиг. 1) се определя по формулата

$$F_4 = F_3 + F_{3_4} = 1.05 \cdot F_1 - 303.02, \text{Н}, \quad (4)$$

В зоната на товарния пункт (точки 4–5 на участъка, фиг. 1) силата се определя по следния начин

$$F_5 = F_4 + F_{4_5} = 1.05 \cdot F_1 - 168.96, \text{Н},$$
$$F_{4_5} = F_л + \frac{Q \cdot g \cdot v}{36}, \quad (5)$$

където $F_л$ = l·50 = 100 – сила на съпротивлението на товара, Н; l = 2 – дължина на захранващата сипка, m; Q – производителност, t/h; v – скорост на движение на лентата, m/s.

В участъка между точки 5–6 (фиг. 1)

$$F_6 = F_5 + F_{5_6} = 1.05 \cdot F_1 - 3660.62, \text{Н}, \quad (6)$$
$$F_{5_6} = \omega \cdot g \cdot \left[(q + q_л) \cdot L_{хн2} + q_{рр} \cdot L_{безтовар2}\right] + (q + q_л) \cdot g \cdot H_{x2}$$

където q = A·ρ ·1000 – маса на единица дължина на товара, kg/m; A – площ на напречното сечение на товара, m^2; ρ – насипна плътност, t/m^3; $L_{безтовар2}$ = 11,2, $L_{хн2}$ = 10,4 – дължина на участъка без товар и проекция на празния наклонен участък, m; $q_{рр}$ – маса на ролките на работния участък на лентата, kg/m; H_{x2} = 4,16 – височина на изкачването, m.

За предпоследния етап трябва да се определи силата на падащата вълна на лентата

$$F_{пад} = F_6 + F_6 \cdot \left(k_{6_1} - 1\right) = 1.1025 \cdot F_1 - 3843.65, \text{Н}, \quad (7)$$

където k_{6_1} = 1,05 – коефициент в зоната на завоя (точки 6–1).

Тъй като силата на падащата вълна може да се изчисли чрез изходящата вълна, ще определим силата F_1

$$F_1 = F_{изход} = F_{пад}/e^{f \cdot \alpha} = 2977.774, \text{Н}, \quad (8)$$

където f = 0,25 – коефициент на сцепление при влажен въздух;α – ъгъл на обхващане на задвижващия барабан на лентата, rad.

По условието на Ойлер силата на падащата вълна е

$$F_{изход} = F_{пад} \cdot e^{f \cdot \alpha} = 7126.645, \text{Н}, \quad (9)$$

а мощността на задвижващия двигател

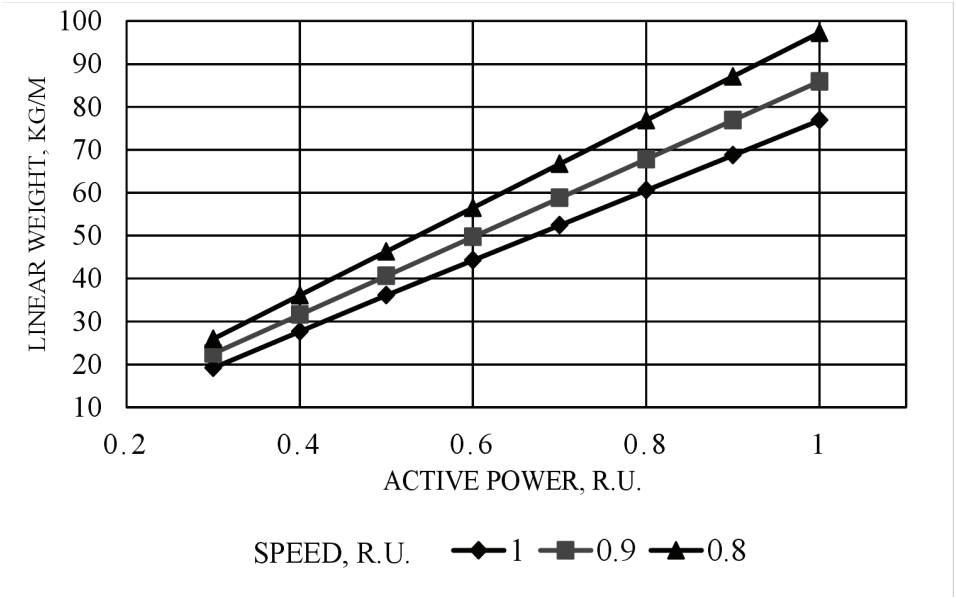
$$P_0 = \frac{k_з \cdot F_0 \cdot v}{1000 \cdot \eta} = 5.821, kW, \quad (10)$$

където F_0 = $F_{пад}$ – $F_{изход}$ = 4148,871, Н – сила за определяне на мощността; k_3 – коефициент на резерв; η – коефициент на полезно действие, относителни единици (о.е.).

Извършената работа позволи да се получат основните параметри при решаването на обратната задача, която се свежда до изчисляване на текущата стойност на линейната маса на транспортирания товар. При това изходните измервани параметри са линейната скорост на движение на лентата и активната консумирана мощност на задвижването. Крайната стойност на масата на транспортирания товар трябва да се измерва на всеки 9 секунди (при номинална скорост на лентата) и да се сумира с предходните стойности

$$t = \frac{L_{безтовар2}}{v} = 8.96, \text{с} \quad (11)$$
$$m_g = L_{безтовар2} \cdot q = 861.224, \text{кг}$$

Трудоемката реализация на косвения подход за измерване на масата на движещия се товар може да бъде заменена с едномерна или двумерна регресионна линия в случай на измерване на активната мощност или едновременно измерване на мощността и скоростта на движение на лентата.



Фиг. 2. Регресионни линии за определяне на масата на единица дължина

Предполага се, че в първия случай се използва стабилизирана скорост, която се поддържа от средствата на автоматизирания задвижващ механизъм, или пък нейното измерване може да се извърши по пряк или непряк начин, което също е допустимо.

Опростена реализация на метода (фиг. 2) е получена върху разработения модел под формата на тренд линии на масата на товара на единица дължина в зависимост от активната мощност на задвижването.

При това скоростта на движение на лентата е фиксирана. При въвеждането на втора променлива функцията ще приеме формата на равнина.

За всички зависимости са получени линии на тенденцията от вида

$$\boldsymbol{y = a \cdot x + b} \tag{12}$$

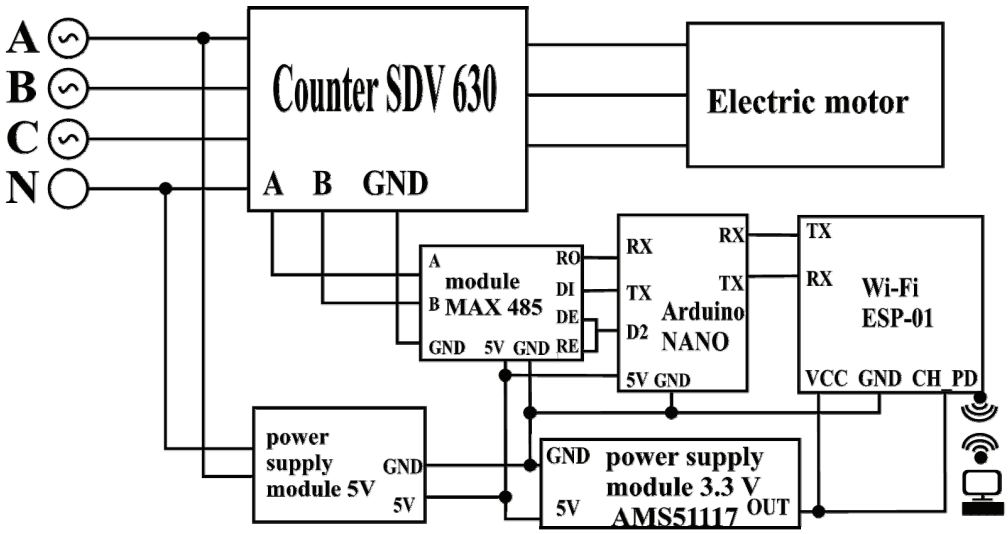
където $\boldsymbol{y}$ – величината на масата на товара на единица дължина, kg/m; $\boldsymbol{x}$ – активната консумирана мощност, kW; $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ – коефициенти на полинома. Параметрите са посочени в табл. 2.

Таблица 2 Параметри на полиномите

Скорост на лентата, v, m/s	Параметри на полиномите		Коефициенти на детерминация R^2
	a	b	
1,0	82,284	-5,2232	0,99
0,9	90,607	-4,651	1
0,8	10,1933	-4,65115	1

Предлага се измервателно-аналитичната система, която използва разработения алгоритъм, да бъде реализирана с помощта на следния хардуер (фиг. 3): трифазен електромер SDM630-Modbus, интерфейсен преобразувател MAX485, микроконтролер Arduino Nano, безжичен модул за предаване на данни ESP-01 и спомагателни захранващи устройства.

Същността на работата на системата се състои в измерване на входните електрически данни с помощта на електромера SDM630, последвано от тяхната обработка и предаване чрез цифровия интерфейс Modbus RTU по линията RS-485.



Фиг. 3. Блок-схема на системата.

Необходимата координация на нивата на сигналите между електромера SDM630 и микроконтролера се осигурява от модула MAX485, където A/B сигналите се преобразуват в адаптирани RO и DI сигнали за приемане и предаване на информация.

Микроконтролерът Arduino Nano реализира протокола Modbus RTU в режим „Master". Възложените му функции включват: иницииране на заявки към електромера, извършване на първична филтрация на получените сигнали, реализация на предложения алгоритъм за определяне на масата на транспортирания товар и проверка на контролната сума на генерираните пакети данни за по-нататъшно предаване по мрежата.

Мрежовата комуникация се осъществява с помощта на Wi-Fi модула ESP-01, който осигурява свързването на системата към локалната Wi-Fi мрежа и предаването на данни към облачен сървър. Стабилността на работата на ESP-01 се гарантира от модула AMS1117, който формира напрежение от 3,3 V от общия захранващ модул с 5 V.

Заключения

По този начин предлаганата система представлява компактен, автономен и икономически обоснован комплекс за оперативна обработка и предаване на информация. Благодарение на използването на достъпни компоненти и отворени цифрови интерфейси се осигуряват висока скорост на събиране на информация, лесна интеграция в съществуващата инфраструктура и възможност за дистанционно наблюдение в реално време. При относително ниски капиталови разходи системата позволява да се повиши ефективността на контрола, да се реагира своевременно на отклонения в режимите на работа и да се създаде основа за по-нататъшна оптимизация на отчета и планирането и накрая, ефективното управление на бизнеса.

Библиография

[1]. Heinzl A., Feyerer T., Kugi A. Indirect Mass Flow Estimation based on Power Measurements of Conveyor Belts in Mineral / 19th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2021. – 1–4 pp. DOI:10.1109/INDIN45523.2021.9557482

[2]. Feyerer T., Heinzl A., et al. Challenges in Mass Flow Estimation on Conveyor Belts in the Mining Industry: A Case Study // ResearchGate.2020. – 90–99 pp. DOI:10.1007/978-3-031-14343-4_9

МЕТОДИ ЗА ОТКРИВАНЕ НА НЕИЗПРАВНОСТИ В ТЪРКАЛЯЩИ ЛАГЕРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ДВИГАТЕЛ ЧРЕЗ АНАЛИЗ НА НЕЕТИКЕТИРАНИ ВИБРАЦИОННИ ДАННИ

Атанас Колев
atanaskolevv01@gmail.com

METHODS FOR FAULT DETECTION IN ROLLING BEARINGS OF AN ELECTRIC MOTOR THROUGH ANALYSIS OF UNLABELED VIBRATION DATA

Atanas Kolev

ABSTRACT
This paper investigates two approaches for fault detection in electric motor rolling bearings using vibration signal without labeled faulty data. The first employs cepstrum-based feature extraction, while the second uses the Hilbert-Huang Transform for adaptive time-frequency feature extraction. In both approaches, Principal Component Analysis reduces the dimensionality, followed by Mahalanobis distance to quantify deviations from nominal operation. The methods are evaluated using the Case Western Reserve University bearing dataset. Results demonstrate clear separation between nominal and faulty observations for both approaches, indicating their applicability to vibration-based fault detection without requiring faulty samples to construct the nominal model.
Keywords: *vibration diagnostics, electric motor, rolling bearing, cepstrum, Hilbert-Huang Transform, Principal Component Analysis, Mahalanobis distance, anomaly detection, fault detection*

1. Въведение

Електрическите двигатели са основна част на множество индустриални системи, поради което ранното откриване на механични неизправности има съществено значение за ограничаване на непланираните прекъсвания и разходите за поддръжка [1, 2]. Търкалящите лагери са сред компонентите, чието състояние може да бъде оценено чрез анализ на вибрационните сигнали. Възникването на локални дефекти променя динамичното поведение на лагерния възел и води до характерни изменения във времевото и честотно представяне на измерените вибрации [3, 4].

Съществен етап при вибрационната диагностика е извличането на информативни признаци, чрез които високочестотните измервания могат да бъдат представени в по-компактна форма. Cepstrum анализът позволява идентифицирането на периодични структури в спектъра и е приложим при анализ на повтарящи се възбуждания и модулационни ефекти [5]. От друга страна, трансформацията на Хилберт-Хуанг (HHT) е предназначена за анализ на нелинейни и нестационарни сигнали, като чрез емпирично модово разлагане (EMD) сигналът се разделя адаптивно на собствени модови функции (IMF), от които могат да бъдат извлечени времево-честотни характеристики [6-9].

Методите, базирани на обучение с учител, могат да постигнат висока точност при диагностика, но предполагат наличието на достатъчно представителни и коректно етикетирани данни за различните видове дефекти. В практически условия подобни данни невинаги са налични, докато измерванията при нормална експлоатация обикновено са значително по-достъпни. Това мотивира разработката на подходи, при които номиналното състояние се моделира без използване на предварително етикетирани дефектни наблюдения

[10-12].

В настоящата работа са изследвани два подхода за откриване на лагерни неизправности в електрически двигател, базирани съответно на Cepstrum и HHT признаци. И при двата подхода размерността на полученото пространство се редуцира чрез метод на главните компоненти (PCA), след което отклонението от номиналното състояние се оценява посредством разстоянието на Махаланобис [13, 14].

Целта е да бъдат сравнени двете представяния на вибрационния сигнал в рамките на обща статистическа схема за диагностика, без необходимост от използване на дефектните наблюдения при изграждането на номиналния модел.

2. Теоретична основа

2.1. Вибрационна диагностика на търкалящи лагери

Търкалящите лагери осигуряват механична опора на въртящия се вал, като локалните дефекти по търкалящите елементи или гривните могат да предизвикат повтарящи се ударни въздействия. Тяхната периодичност зависи от геометрията на лагерите и скоростта на въртене [3]. При дефект на външната гривна характерната честота се определя чрез:

$$BPFO = \frac{N_b f_r}{2}\left(1 - \frac{BD}{PD}cos\varphi\right), \quad (1)$$

където N_b е броят на търкалящите елементи, BD е техният диаметър, PD е диаметърът на делителната окръжност, ϕ е контактният ъгъл, а $f_r = RPM/60$ е честотата на въртене. Тези периодични въздействия се предават през конструкцията и се проявяват в измерения вибрационен сигнал, като могат да възбуждат структурни резонанси и да формират модулирани и нестационарни компоненти [3, 4].

2.2. Cepstrum анализ

Cepstrum представлява преобразуване на логаритмичния амплитуден спектър в областта на цепстралните вре-мена (quefrency), което позволява идентифициране на периодични структури в спектралното представяне на вибрационния сигнал [5]. Основно предимство на метода е възможността за откриване на хармонични последовател-ности и периодични спектрални структури, включително при наличие на шум и модулационни ефекти. По този начин цепстралният анализ обобщава информацията от множество спектрални компоненти, вместо да разчита единствено на отделни спектрални пикове, което повишава диагностичната му информативност при изследване на въртящи се машини [3, 5]. Реалният cepstrum се определя като:

$$c[n] = F^{-1}\{\log|F\{x[n]\}|\}, \quad (2)$$

където F и F^{-1} са съответно правата и обратната трансформация на Фурие. При повтарящи се механични въздействия периодичността на спектралните компоненти може да се прояви като локализирани пикове в Cepstrum представянето. От него се извличат признаци, характеризиращи доминиращата quefrency и съответстващата ѝ честота, изразеността на пиковете, енергията при ниски стойности на quefrency и cepstrum коефициенти.

2.3. Трансформация на Хилберт-Хуанг

Трансформацията на Хилберт-Хуанг (HHT) позволява адаптивен анализ на нелинейни и нестационарни сигна-ли [6-9]. Първият ѝ етап е емпиричното модово разлагане (EMD), при което сигналът се представя като:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{M} IMF_i(t) + r(t), \quad (3)$$

където $IMF_i(t)$ са собствените модови функции, а $r(t)$ е остатъчната компонента. Прилагането на трансформацията на Хилберт върху отделните IMF позволява определяне на техните

моментни амплитуди $A(t)$ и честоти $f(t)$ и формиране на времево-честотно енергийно представяне $H(f, t) = A^2(f, t)$. Граничният спектър на Хилберт (MHS) се получава чрез интегриране на това представяне по времето $MHS(f)=\int_0^T H(f,t)dt$, където T е продължителността на анализирания времеви интервал. MHS характеризира разпределението на енергията на колебателните компоненти по честота. От IMF и MHS се извличат статистически, енергийни и честотни признаци, включително RMS, ексцес, коефициент на пик, характеристики на моментната амплитуда и честота, спектрален център, ентропия и енергия в определени честотни диапазони.

2.4. Метод на главните компоненти и разстояние на Махаланобис

При двата подхода получените многомерни вектори от признаци се редуцират чрез метод на главните компоненти. Той преобразува корелираните първоначални характеристики в ортогонални компоненти, подредени според обяснената от тях вариация [13]. В настоящата работа първите три главни компоненти формират компактно пространство за представяне на номиналното състояние.

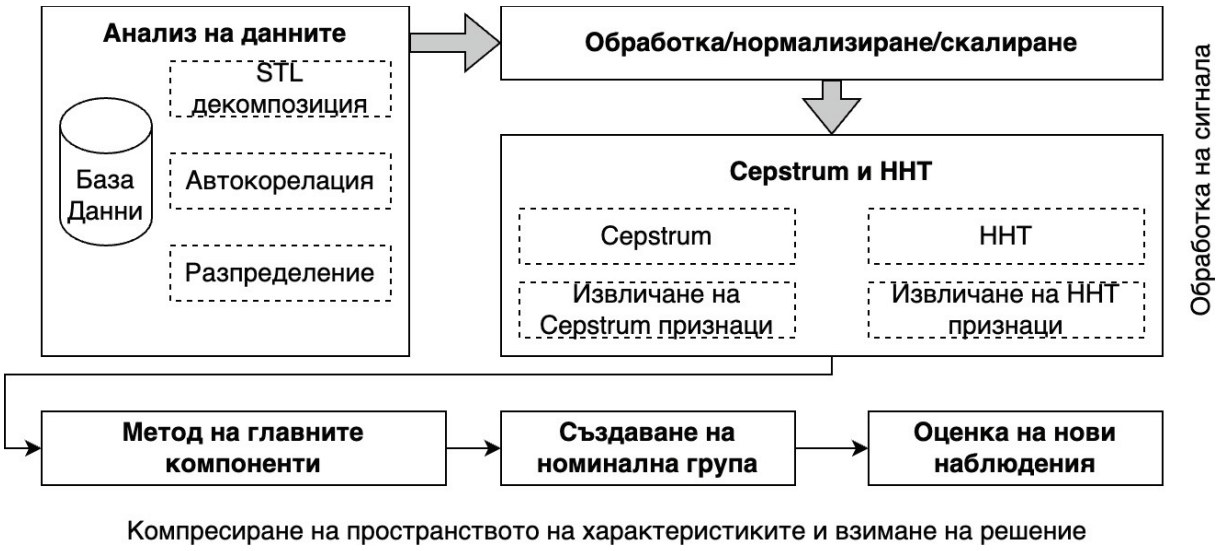
Отклонението на ново наблюдение **z** от номиналното състояние се оценява чрез разстояние на Махаланобис [14]:

$$D_M(z) = \sqrt{(z-\mu)^T \sum^{-1}(z-\mu)}, \quad (4)$$

където μ и Σ са съответно средният вектор и ковариационната матрица на номиналните наблюдения. За разлика от евклидовото разстояние, тази мярка отчита както различната вариация на отделните признаци, така и корелациите между тях, което позволява статистическа оценка на отклонението от номиналното състояние.

3. Методология

Експерименталното изследване е проведено с вибрационни данни от публичния набор на Case Western Reserve University (CWRU) [15]. Използвани са измервания от акселерометър, разположен върху корпуса на електрическия двигател от страната на задвижването. Анализирани са данни за изправен лагер и за лагер с локален дефект на външната гривна с диаметър 0.01778 cm, създаден чрез електроерозийна обработка (EDM). Разглежданият работен режим е при скорост на въртене 1730 RPM. Общата последователност на обработката е представена на Фиг. 1.



Фигура 1: Методология на експеримента

Първият етап включва предварителен анализ на вибрационните данни с цел изследване на тяхната структура преди извличането на диагностични признаци. Анализът включва STL декомпозиция за разглеждане на тренд и сезоналност на сигнала, автокорелационен анализ за установяване на зависимости между последователни наблюдения и анализ на разпределението на измерените стойности. След това сигналите преминават през предварителна обработка, нормализиране и скалиране, така че получените наблюдения да бъдат представени в подходящ вид за последващото извличане на признаци.

След предварителната обработка се прилагат два паралелни подхода за представяне на вибрационния сигнал. При първия се изчислява реалният Cepstrum и от него се извличат признаци, характеризиращи периодичната структура на сигнала, сред които доминиращата стойност на quefrency, съответстващата ѝ доминираща честота, изразеност на пиковете, енергията в ниските стойности на quefrency и лифтерираните коефициенти. При втория подход се прилага HHT, като сигналът първоначално се разлага чрез EMD на собствени модови функции. От получените IMF, техните моментни амплитуди и честоти, граничния спектър на Хилберт и спектъра на обвивката се извличат статистически, енергийни и честотни признаци. По този начин двата клона на методологията формират различни пространства от характеристики върху едни и същи входни вибрационни наблюдения.

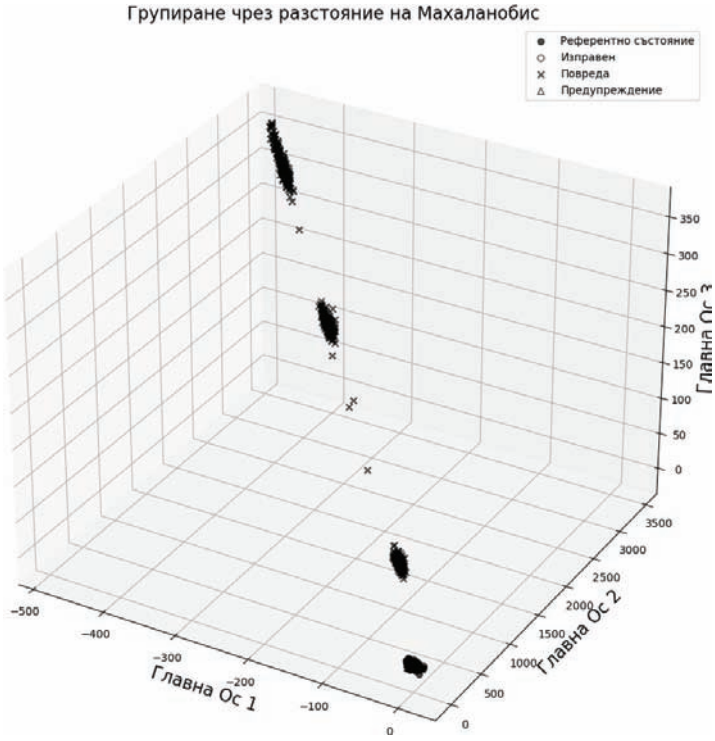
Следващите етапи са еднакви за двата подхода. Размерността на получените пространства от признаци се редуцира до първите три главни компоненти. PCA моделът се определя единствено върху данните от номиналното състояние, след което същата трансформация се използва за проекция на новите наблюдения. В полученото тримерно пространство се изгражда статистически модел на номиналната група, характеризирана чрез нейния център и ковариационна структура. По този начин информация от дефектните наблюдения не участва нито при определянето на PCA пространството, нито при формирането на номиналния модел.

Оценката на ново наблюдение се извършва чрез квадрата на разстоянието на Махаланобис D_M^2 спрямо номиналната група. Етикетите на дефектните данни се използват едва след приключване на диагностичната процедура за количествена оценка - F_1, точност, прецизност и чувствителност, като последната има особено значение за диагностичната задача, тъй като пряко отразява наличието на пропуснати дефектни наблюдения.

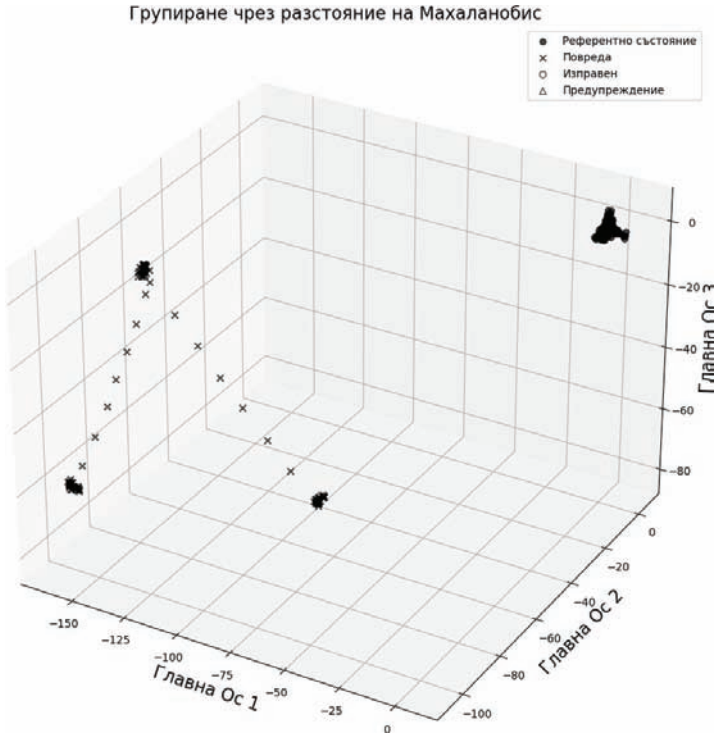
4. Резултати

На Фиг. 2а е представено пространството на първите три главни компоненти при използване на признаци, извлечени чрез HHT. Наблюденията, характеризиращи референтното и изправно състояния, са концентрирани в компактна област, докато тези от лагера с дефект на външната гривна формират няколко ясно отделени групи. Значителното им отдалечаване от областта на номиналното състояние показва, че признаците, извлечени от IMF компонентите и тяхното времево-честотно представяне, отразяват настъпилите изменения във вибрационното поведение. Разделянето се наблюдава в тримерното PCA-пространство, което позволява дефектните наблюдения да бъдат идентифицирани чрез статистическото им отклонение от референтното състояние.

На Фиг. 2б са представени резултатите при използване на Cepstrum признаци. Референтните и изправните наблюдения отново формират компактна област, докато наблюденията от дефектното състояние са разположени в отделни области на PCA пространството. Полученото разделение показва, че периодичните структури в спектъра, характеризирани чрез доминираща quefrency, пикове, енергията при ниски стойности на quefrency и цепстрални коефициенти, също предоставят информативно представяне на изменението във вибрационния сигнал при наличие на лагерния дефект.



(а) HHT характеристики



(б) Cepstrum характеристики

Фигура 2: Пространство на извлечените характеристики след PCA.

Двата подхода формират различна геометрия и мащаб на PCA пространството, което е следствие от различния характер на извличаните признаци и не следва само по себе си да се разглежда като показател за превъзходство на единия метод. Съществено е, че и при двете

представяния номиналните наблюдения формират компактна ре-ферентна област, а дефектните се отдалечават от нея. Това позволява една и съща последваща последователност PCA-Махаланобис да бъде приложена независимо от използвания метод за извличане на признаци.

Класификацията на наблюденията се извършва спрямо квадрата на разстоянието D_M^2. При използваните настройки границите между състоянията се определят чрез квантилите q_w=0.9 и q_e=0.99 на X^2-разпределението със степени на свобода, съответстващи на броя използвани главни компоненти. Наблюденията под първия праг $D_M^2 \leq q_w$ се определят като изправни, тези между двата прага $q_w < D_M^2 \leq q_e$ като предупредително състояние, а наблюденията над втория праг $D_M^2 > q_e$ като дефектни. По този начин праговете се адаптират статистически спрямо модела на номиналното състояние, вместо да бъдат настройвани ръчно.

Количествените резултати са представени в Таблица 1. Алгоритъмът, използващ признаците, извлечени чрез HHT достига F_1=0.9975, точност 0.9962, прецизност 0.9950 и чувствителност 1.0, докато Cepstrum подходът достига съответно F_1=0.9913, точност 0.9851, прецизност 0.9829 и чувствителност 1.0. И при двата метода чувствителността е 1.0, което означава, че в разглеждания експеримент всички дефектни наблюдения са уловени. Разликите в F_1, точността и прецизността показват малко по-различно поведение на двата типа признаци, като и двата подхода достигат високи стойности на използваните оценки.

Таблица 1: Резултати от оценката на методите

Метод	F_1	Точност	Прецизност	Чувствителност
HHT	0.9975	0.9962	0.9950	1.0
Cepstrum	0.9913	0.9851	0.9829	1.0

5.Заключение

В настоящата работа е предложена и експериментално оценена сравнителна методология за откриване на аномалии във вибрационното поведение на електрически двигател чрез два алтернативни подхода за извличане на признаци - Cepstrum анализ и трансформация на Хилберт-Хуанг. Получените пространства от признаци се редуцират посредством PCA, а статистическото отклонение от номиналното състояние се оценява чрез разстояние на Махаланобис. Номиналният модел се изгражда единствено от наблюдения при номинално състояние и се валидира върху експериментални данни за локализиран лагерен дефект.

Основен принос на изследването е прилагането и сравнението на двата различни начина за представяне на вибрационния сигнал в рамките на обща PCA-Mahalanobis последователност. Експерименталните резултати при 1730 RPM и локализиран дефект на външната гривна на търкалящия лагер показват ясно разграничаване на но-миналните и дефектни наблюдения и при двата типа признаци. Получените статистически оценки и при двата метода потвърждават наблюдаваното разделение за разглеждания експеримент.

Резултатите следва да бъдат разглеждани в контекста на конкретния изследван режим и дефект. Следващ етап на работата е разширяване на експерименталната оценка към различни скорости на въртене, натоварвания, типове и степени на развитие на лагерните дефекти. Това би позволило да се оцени устойчивостта на двата подхода при промяна на работните условия и възможността за прилагането им върху по-широк набор от състояния на електрически двигатели.

Източници

[1] M. Achouch, M. Dimitrova, K. Ziane, S. Sattarpanah Karganroudi, R. Dhouib, H. Ibrahim, and M. Adda, "On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, p. 8081, 2022. doi: 10.3390/app12168081.

[2] B. Bilgin et al., "Modeling and Analysis of Electric Motors: State-of-the-Art Review," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 3, pp. 602–617, 2019. doi: 10.1109/TTE.2019.2931123.
[3] A. R. Mohanty, *Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/9781351228626.
[4] W. Caesarendra and T. Tjahjowidodo, "A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing," *Machines*, vol. 5, no. 4, p. 21, 2017. doi: 10.3390/machines5040021.
[5] D. G. Childers, D. P. Skinner, and R. C. Kemerait, "The Cepstrum: A Guide to Processing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 10, pp. 1428–1443, 1977. doi: 10.1109/PROC.1977.10747.
[6] Z. K. Peng, P. W. Tse, and F. L. Chu, "A Comparison Study of Improved Hilbert-Huang Transform and Wavelet Transform: Application to Fault Diagnosis for Rolling Bearing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, no. 5, pp. 974–988, 2005. doi: 10.1016/j.ymssp.2004.01.006.
[7] N. E. Huang, *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. World Scientific, 2014.
[8] U. B. de Souza, J. P. L. Escola, and L. da C. Brito, "A Survey on Hilbert-Huang Transform: Evolution, Challenges and Solutions," *Digital Signal Processing*, vol. 120, 2022. doi: 10.1016/j.dsp.2021.103292.
[9] B. Chen, S. Zhao, and P. Li, "Application of Hilbert-Huang Transform in Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review," *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. doi: 10.1155/2014/317954.
[10] J.-G. Jang, C.-M. Noh, S.-S. Kim, S.-C. Shin, S.-S. Lee, and J.-C. Lee, "Vibration Data Feature Extraction and Deep Learning-Based Preprocessing Method for Highly Accurate Motor Fault Diagnosis," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 204–220, 2023. doi: 10.1093/jcde/qwac128.
[11] Z. Zhu et al., "A Review of the Application of Deep Learning in Intelligent Fault Diagnosis of Rotating Machinery," *Measurement*, vol. 206, p. 112346, 2023. doi: 10.1016/j.measurement.2022.112346.
[12] S. Naeem et al., "An Unsupervised Machine Learning Algorithms: Comprehensive Review," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 911–921, 2023. doi: 10.12785/ijcds/130172.
[13] I. T. Jolliffe, "Principal Component Analysis," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, 2010. doi: 10.1002/wics.101.
[14] R. De Maesschalck, D. Jouan-Rimbaud, and D. L. Massart, "The Mahalanobis Distance, " *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 1–18, 2000. doi: 10.1016/S0169-7439(99)00047-7.
[15] Case Western Reserve University Bearing Dataset https://engineering.case.edu/bearingdatacenter

REVIEW OF ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND ITS APPLICATION IN THE ORE PROCESSING INDUSTRY

Krasimir Kostadinov
PhD student in the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Bulgaria, Sofia, 1700, 1 prof. Boian Kamenov Street, e-mail: k.kostadinov@mgu.bg

ABSTRACT
This review paper presents an overview of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and its application in the mineral processing industry. Decreasing the ore grade over time forces industry to increase efficiency in the mineral flotation or hydrometallurgical leaching processes. EIS can be used as an analytical technique for increasing efficiency by researching new chemical reagents, developing a new bio-assisted flotation and leaching processes, preventing oxidation during flotation grinding, precision reagent dosing and real-time slurry monitoring. Wastewater from ore processing is another field where EIS analysis can improve efficiency of the water recycling and decrease power consumption using microbial fuel cells.
Keywords: *Electrochemical Impedance Spectroscopy; flotation; leaching; real-time monitoring*

ОБЗОР НА ЕЛЕКТРОХИМИЧНАТА ИМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПИЯ И НЕЙНОТО ПРИЛОЖЕНИЕ В МИННООБРАБОТВАЩАТА ИНДУСТРИЯ

Красимир Костадинов
докторант в Минно-Геоложки Университет "Св. Иван Рилски", гр. София 1700, ул "проф. Боян Каменов" 1, България, ел. поща: k.kostadinov@mgu.bg

1. Introduction

A decrease in the content of the valuable components in the ore at mines already in operation, increases the operating costs - such as electricity, chemicals, and water, required for the entrenchment process [1], [2], [3]. This directly influences the profitability of mining companies unless investments are made in new technologies to reduce the cost and time for ore processing and decrease the environmental impact.
Research and development of new technologies requires selection of analytic techniques for evaluation of efficiency of chemical reagents or real-time monitoring of parameters which have influence for effectiveness of the ore processing. For such tasks, electrochemical impedance spectroscopy can be used. It is a non-invasive method for analysing electrochemical processes that has become established over the past few decades in numerous scientific studies across various fields - such as corrosion processes [4], energy storage and conversion technologies [5], [6], detection of contaminants in food and water [7] and development of impedimetric biosensors in biomedicine [8].
The measured impedance with EIS analysers is used for identification and quantification of electrochemical processes [9]. The standard methods for impedance data analysis are equivalent electrical circuits (EEC) and distribution of relaxation times (DRT). DRT is used for identification and EEC is used for quantifying parameters of the electrochemical processes like ion diffusion (Warburg impedance), reduction-oxidation (charge-transfer resistance) and the double layer between the electrode and electrolyte interface (double layer capacitance).
In the last years, the following scientific researches using EIS in the field of ore processing technologies are reported:

- Pre-screening efficiency of chemical reagents for flotation processes [10]. EIS can be used as an alternative of costly and time consuming X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) for evaluation of depressant and collector effectiveness on pyrite. A higher value of charge transfer resistance measured by EIS can be used as quantitative assessment of adsorption behaviour of the depressants and the collector.
- Monitoring of pyrite oxidation during bacterial and chemical dissolution of pyrite using bioleaching process [11]. Pyrite oxidation is one of the leading contributors of environmental problems of acid rock drainage [12].
- Molybdenite flotation recovery analysis based on particle sizes and used electrolyte [13]. Higher values of double layer capacitance and lower values of charge transfer resistance indicates higher flotation recovery.
- Correlation between chalcopyrite electrochemical leaching rate and the charge transfer resistance in the double layer [14].
- Real-time monitoring of pyrite oxidation process and controlling the thiosulfate reagent concentration in the gold leaching system [15]. The higher concentration of thiosulfate increases the oxidation of the pyrite which can be detected by decreasing the charge transfer resistance during EIS measurements.
- Improving leaching rate of chalcopyrite by decreasing the passivation process [15]. The impact of different reagents (ethylene glycol, acetic acid) or reducing agents can be evaluated by the value of the resistance of the passivation layer measured with EIS.
- Analysis of H_2O_2 oxidant for leaching of galena [15]. EIS can be used as an indicator of increasing concentration of H_2O_2 when the charge transfer resistance is increased and the double layer capacitance is increased.
- Investigation of effect of inorganic salts on the absorption of reagents on galena [15], [16]. It is possible to predict the hydrophobicity of galena by the amount of adsorption capacitance from the EIS measurement data.
- Using EIS for analysis mitigation of kaolinite coating on chalcocite surface for improving chalcocite flotation [17].
- Studying the impact of Cu(II) ions on chalcopyrite dissolution during leaching processing [18]. Increased Cu(II) concentration leads to faster leaching rates and it can be detected by decreasing charge transfer resistance and increasing Warburg impedance in the EIS measurement data.

Most of the research articles above show that charge transfer resistance and the double layer capacitance are the parameters which can be used for analysis of the electrochemical processes in the ore processing industry.

2. Electrochemical impedance spectroscopy

A typical electrochemical experiment for measuring electrochemical impedance spectrum is shown in Fig. 1. An EIS analyser is connected with cables to 3 electrodes of the electrochemical cell - working electrode (WE), reference electrode (RE) and counter electrode (CE). The cell is filled with electrolyte and between the WE and CE, an ion exchange membrane can be placed when cations or protons have to be moved unidirectional between the electrodes.

The working electrode of the electrochemical cell is made of material whose properties will be studied. In the case of the ore processing industry, this can be any mineral sulfate like pyrite (FeS□), molybdenite (MoS□), galena (PbS), chalcopyrite (CuFeS□) etc. The content of the mineral should be high enough to get a good electrochemical response. This can be achieved with purification of mineral content using a dry electrostatic separation technique [10].

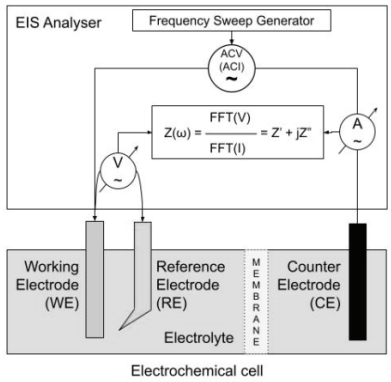


Fig.1 Measuring spectrum impedance of electrochemical cell with EIS analyser

The reference electrode is used for measuring the true potential of electrodes. Because every electrode to electrolyte interface introduces a potential, when two working and the counter electrode are submerged into the electrolyte, the measured potential is the difference between them, instead the true potential of the working electrode relative to the counter electrode or electrolyte. The solution of this problem is to use ideally nonpolarisable electrodes which have independent potential against other electrodes or electrolyte [19]. The most commonly used reference electrodes are made of silver/silver chloride and saturated calomel. The reference electrode should have stable potential over the time and must not change it due to electrochemical processes in the cell [20].
The counter electrode acts as a return path for the electrical current from the working electrode and as a complementary reduction or oxidation reaction to the working electrode depending on the type of the electrochemical cell - electrolysis or electrolytic.
The working principle of the EISA is as follows: a small amplitude of AC voltage or current is applied between the WE and CE. The voltage between the WE and RE and the current through the CE are measured. The impedance is calculated as the ratio of measured voltage and current for each frequency generated by the sweep frequency generator. The frequency range depends on the time constant of the observed electrochemical processes and can vary from micro Hertz to mega Hertz [9]. The measured data can be received in two forms : magnitude of the impedance (|Z|) and the phase angle (θ) or real (Z') and imagine (Z") part of the impedance.
Because the impedance of the cell can change due to electrochemical processes occurring with it, the EISA must be capable of maintaining the AC voltage or current values set by the user. For that reason, the EISA should be able to work in potentiostat or galvanostat mode [21]. In the potentiostat mode, the EISA keeps constant voltage AC amplitude across the WE and RE. In the galvanostatic mode, the EISA keeps constant the current through the CR.
The most important parameters of the EISA are - frequency range, impedance range, output AC voltage and current amplitude and resolution, DC voltage and current bias amplitude and resolution, impedance measurement accuracy. The EISA measurement should be able to work in float and grounded mode.
Once the measured data are taken in the form of real and imaginary part (-Z") of impedance, they can be visualised in Nyquist plot graph, where the data of real part (Z') are plotted on the x-axis and data of the imaginary part (-Z") on the y-axis.
The analysis of the measured data takes several steps. First the data should be validated. The validation is required, because invalid data can lead to wrong equivalent circuit models and misinterpretation of the electrochemical processes. In the practice 2 main algorithms are used for validation of the impedance data - Kremers-Kronig and logarithmic Hilber transform (HIT or Z-HIT) [22]. Those algorithms reconstruct the real part of the impedance from the imaginary part or the magnitude of the impedance from the phase angle. If the reconstructed data match with the

measured data, it can be considered that the observed electrochemical process is linear, stable, stationary and causal.

The second step is preparing the equivalent electrical circuits which model the electrochemical processes in the cell. If the processes are well known, a direct equivalent electrical circuit can be applied. If this is not the case, the model can be predicted based on a plot in the Nyquist graph. In the measured data shown in Fig.2 for electrochemical cell with NaCl electrolyte, the resistance of the electrolyte (Rs) is the real impedance offset value from beginning of the x-axis with imagery part of the impedance equal to 0, the charge transfer resistance (Rct) and the double layer capacitance (Cdl) are semi-circle part of the plot and the Warburg impedance is straight line with 45° angle. The inductance of the cables has a negative value of the imaginary impedance part below the x-axis.

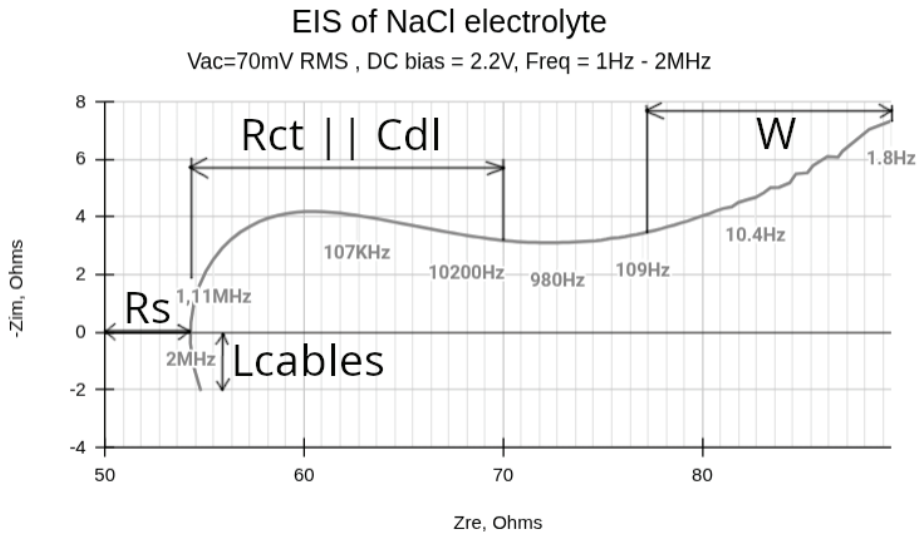


Fig.2 EIS measured data for electrochemical cell with NaCl electrolyte

Based on identified electrochemical processes or known models of them, an equivalent electrical circuit can be built. In the example of electrochemical cell with NaCl electrolyte, the EEC contain resistor for the electrolyte (R0), inductance for the cable (L||Rl), charge-transfer resistance of redox reaction in the anode and cathode (R1 and R2) in parallel with the double layer capacitance which is modeled with constant phase element (CPE1 and CPE2) and the Warburg impedance at the end.

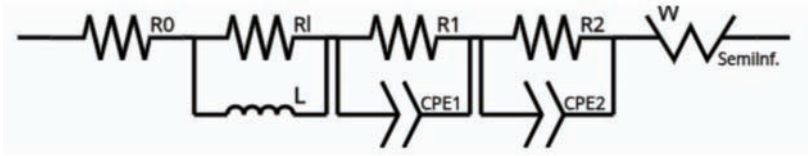


Fig.3 EEC model of electrochemical processes in an electrochemical cell with NaCl electrolyte

The third step involves usage of simulation software which fits the calculated impedance from the EEC model with the measured one. The software calculates the impedance of the components in the EEC with their initial default values set by the user or by the software for a range of predefined frequencies. The process is iterative until the calculated impedance from the simulation matches the real measurement EIS data.

Once the impedance values of each component of the EEC have been calculated, they can be used to analyze how a specific change in the ore processing operation (such as a change in reagent type

or concentration, or water quality) affects mineral recovery efficiency or the time of the flotation and leaching processing.

3. Conclusion

Electrochemical impedance spectroscopy can be used as an analytic technique in the ore processing industry for increasing efficiency of ore enrichment process, real-time monitoring of the flotation and leaching processes, decreasing pollution of the used water resources. This can decrease the cost of operating expenses of companies and allows to prolong mines operation with depleting mineral concentration in ore.

Acknowledgment

This review paper is in performance of BG05SFPR001-3.004-0008-C01. Smart PHD Lab 5.0 "Smart Growth Project Doctorates in Telecommunications, Artificial Intelligence, Automation and Mechatronics", funded by Programme "Education", co-funded by the European Union.

Bibliography

[1] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, and A. Valero, "Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?," *Resources*, vol. 5, no. 4, p. 36, Nov. 2016, doi: 10.3390/resources5040036.

[2] G. Calvo, J.-L. Palacios, and A. Valero, "The influence of ore grade decline on energy consumption and GhG emissions: The case of gold," *Environ. Dev.*, vol. 41, p. 100683, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.envdev.2021.100683.

[3] R. Magdalena, A. Valero, J.-L. Palacios, and A. Valero, "Mining energy consumption as a function of ore grade decline: the case of lead and zinc," *J. Sustain. Min.*, vol. 20, no. 2, pp. 109–121, Jun. 2021, doi: 10.46873/2300-3960.1060.

[4] H. Herrera Hernández *et al.*, "Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels," in *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, M. El-Azazy, M. Min, and P. Annus, Eds., IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.94470.

[5] C. Kim and I. Jang, "Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy for Diagnostics in Fuel Cells, Electrolyzers, and Batteries," *ChemElectroChem*, vol. 12, no. 11, p. e202500005, May 2025, doi: 10.1002/celc.202500005.

[6] S. T. Bakenhaster and H. D. Dewald, "Electrochemical impedance spectroscopy and battery systems: past work, current research, and future opportunities," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 55, no. 7, pp. 1657–1681, Jul. 2025, doi: 10.1007/s10800-025-02273-6.

[7] M. El-Azazy, "Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) in Food, Water, and Drug Analyses: Recent Advances and Applications," in *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, M. El-Azazy, M. Min, and P. Annus, Eds., IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.92333.

[8] J. A. Ribeiro and P. A. S. Jorge, "Applications of electrochemical impedance spectroscopy in disease diagnosis—A review," *Sens. Actuators Rep.*, vol. 8, p. 100205, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.snr.2024.100205.

[9] A. Ch. Lazanas and M. I. Prodromidis, "Electrochemical Impedance Spectroscopy─A Tutorial," *ACS Meas. Sci. Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsmeasuresciau.2c00070.

[10] Z. Ertekin, K. Pekmez, R. Kappes, and Z. Ekmekçi, "Application of EIS technique to investigate the adsorption of different types of depressants on pyrite," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 57, no. 3, pp. 112–126, Apr. 2021, doi: 10.37190/ppmp/136022.

[11] Y. Liu, Z. Dang, G. Lu, P. Wu, C. Feng, and X. Yi, "Utilization of electrochemical impedance spectroscopy for monitoring pyrite oxidation in the presence and absence of Acidithiobacillus

ferrooxidans," *Miner. Eng.*, vol. 24, no. 8, pp. 833–838, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.mineng.2011.03.002.

[12] A. P. Chandra and A. R. Gerson, "The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective," *Surf. Sci. Rep.*, vol. 65, no. 9, pp. 293–315, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.surfrep.2010.08.003.

[13] Y. Chen, N. Zhang, and H. Cui, "The Effect of Electrochemical Surface Properties on Molybdenite Flotation in Seawater," *Minerals*, vol. 15, no. 10, p. 1049, Oct. 2025, doi: 10.3390/min15101049.

[14] Q. Liu, M. Chen, K. Zheng, Y. Yang, X. Feng, and H. Li, "In Situ Electrochemical Investigation of Pyrite Assisted Leaching of Chalcopyrite," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 13, pp. H813–H819, 2018, doi: 10.1149/2.0461813jes.

[15] X. Liu, Z. Du, C. Sun, and N. Zhang, "A review on the electrochemical analysis of sulfide minerals—Pyrite, chalcopyrite, and galena," *Green Smart Min. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 18–31, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.gsme.2024.12.005.

[16] N. Castillo-Magallanes, I. Rodríguez, R. Cruz, and I. Lázaro, "An EIS study of the effects of inorganic salts in the adsorption of flotation reagents on galena," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 27, no. 11, pp. 3029–3040, Nov. 2023, doi: 10.1007/s10008-023-05529-3.

[17] S. Zhao, B. Guo, Y. Peng, and Y. Mai, "An impedance spectroscopy study on the mitigation of clay slime coatings on chalcocite by electrolytes," *Miner. Eng.*, vol. 101, pp. 40–46, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.mineng.2016.09.027.

[18] Y. Ma, Y. Yang, R. Fan, X. Gao, L. Zheng, and M. Chen, "Chalcopyrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: Insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies," *Miner. Eng.*, vol. 170, p. 107063, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107063.

[19] R. Srinivasan and F. Fasmin, *Introduction to electrochemical impedance spectroscopy*, First edition. Boca Raton: CRC Press, 2021.

[20] J. Roscher and R. Holze, "Reference Electrodes," *Encyclopedia*, vol. 3, no. 2, pp. 478–489, Apr. 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3020033.

[21] J. Hoja and G. Lentka, "Electrochemical Impedance Spectroscopy Analyzer with Digital Potentiostat," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 84, Jan. 2008.

[22] W. Ehm, H. Göhr, R. Kaus, B. Röseler, and C. A. Schiller, "The evaluation of electrochemical impedance spectra using a modified logarithmic Hilbert transform," *ACH - Models Chem.*, vol. 137, pp. 145–157, Jan. 2000.

ИЗПОЛЗВАНЕ НА МЕТОДА НА ВЪЗСТАНОВЯВАЩОТО СЕ НАПРЕЖЕНИЕ ЗА ОЦЕНКА НА ИЗОЛАЦИЯТА НА ВЪРТЯЩИТЕ СЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ

Красимир Иванов, Георги Велев, Евтим Кърцелин, Николай Илиев
Технически университет – Габрово, факултет Електротехника и електроника
5300 Габрово, ул. "Х. Димитър" №4, България, krmri@tugab.bg

РЕЗЮМЕ
В работата са дадени основите на метода на възстановяващото се напрежение. Направено е предложение за използването му за оценка на състоянието на изолацията на въртящите се електрически машини. Дадени са резултати от някои изследвания.

IMPLEMENTATION OF THE RECOVERY VOLTAGE METHOD FOR ASSESSING THE INSULATION OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Krasimir Ivanov, Geogi Velev, Evtim Kartselin, Nikolay Iliev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria, Faculty of Electrical Engineering and Electronics
5300 Gabrovo, 4 H. Dimitar str.

ABSTRACT
The paper outlines the fundamentals of the recovery voltage method. A proposal is made to use this method for assessing the insulation condition of rotating electrical machines. Results from several studies are presented.
Keywords : *Recovery Voltage Method (RVM), electrical insulation, diagnostics*

1. Общи сведения за метода на възстановяващото се напрежение

Метод на възстановяващото се напрежение (RVM) е първият в хронологичен план, диагностичен метод, основаващ се на абсорбционните процеси в изолацията. Методът датира от 50-те години. Първоначално е създаден с идеята да се диагностицира състоянието на изолацията и остатъчния ресурс на силови кабели.

В диелектрик, поставен в електрическо поле, се проявяват електропроводимост и различни видове поляризации. В нехомогенна изолация има силно изразена т. нар. миграционна поляризация. Поляризациите в диелектрика се различават по тяхната времеконстанта τ. За миграционната поларизация тя е от 10^{-2} – 10^{2} s. Процесите в един диелектрик се моделират със заместваща схема, дадена на фиг. 1. Описание на явлението поляризация може да се направи чрез използване на еквивалентна електрическа верига с последователно свързани *R-C* елементи, съответстващи на процесите на поляризация и деполяризация. Определяща характеристика на такава верига е времеконстантата τ_p, формирана от произведението на стойностите на *C* и *R*.

$$\tau_p = R_p \cdot C_p, \tag{1}$$

където: индекса *p* ще обозначава поляризационно свързаните величини.

Математическо описание на процесите на поляризация и деполяризация (фиг.1) се формулира със следните изрази, валидни за идеален източник на напрежение с $R_i=0$,

$$i_p(t) = \frac{U_0}{R_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}; \tag{2}$$

$$u_{Cp}(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) \tag{3}$$

поляризиране на $u_{Cp}(t=0)=0$,

$$w_{Cp}(t)=\frac{1}{2}C_p\cdot u_{Cp}^2 \tag{4}$$

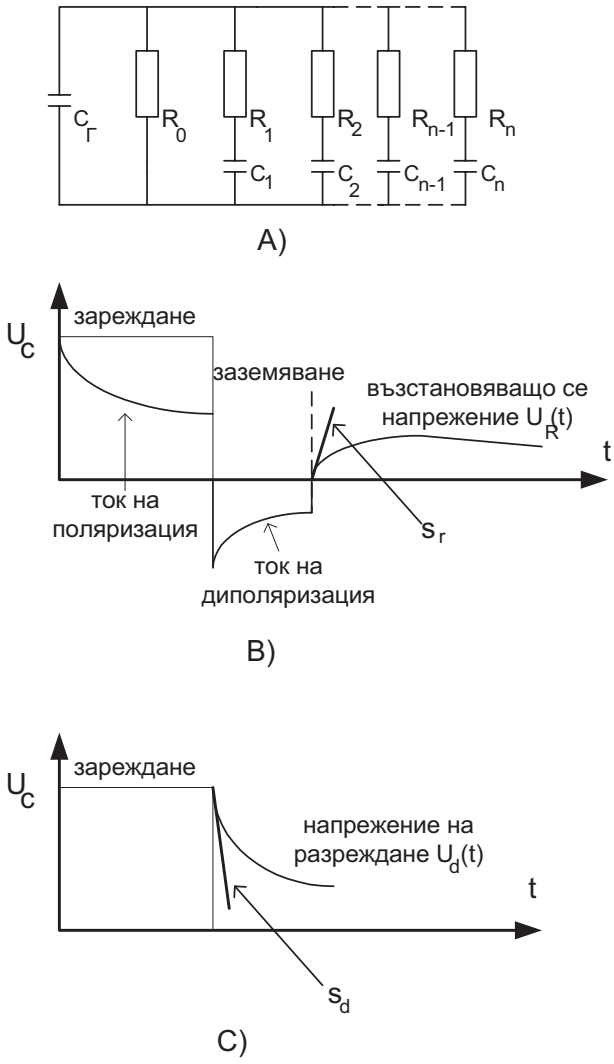
за $w_{Cp}(t=0)=0$,

$$u_{Cp}(t)=U(t=0)\cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \tag{5}$$

деполяризиране.

2. Насоки за използването на метода на възстановяващото се напрежение при диагностика на въртящи се машини.

Методът *RVM* е метод основаващ се на провеждане на определен брой измервани цикли, протичащи в 3 етапа. Това са зареждането за време t_c, разреждането за време t_d и измерването на възстановяващото се напрежение.



Фиг.1. Приложение на метода на възстановяващото се напрежение на изолацията. А)Заместваща схема; В) Определяне на степента на стареене на изолацията S_r; С) Определяне на степента на овлажняване на изолацията S_d;

Възстановяващото се напрежение представлява апериодична функция на времето и се определя от параметрите на заместващата схема на статорната изолация (фиг.1.2. А).

Зависимостите на напрежението на саморазряд $U_d(t)$ и на възстановяващото се напрежение $U_r(t)$ могат да се измерят [1-4]. Тези параметри могат да се използват и за определяне на влажността на изолацията на трансформаторите [5]. Максималните стойности на U_{dMAX} и U_{rMAX}, времената за тяхното достигане и началните наклони на допирателните S_d и S_r на зависимостите $U_d(t)$ и $U_r(t)$ може да се използват като параметри, характеризиращи състоянието на изолацията.

Този метод не зависи от размерите и формите на образците, т.е. параметрите се явяват "специфични" ето защо методът може да се използва и за въртящите се електрически машини. Това се доказва и от изследвания на учени от Университета в Ханновер в последните години. Като обективен критерий за състоянието на изолацията на въртящите се електрически машини може да се използва и явлението абсорбция, тоест поглъщането на заряди от вътрешността на изолацията при нейната поляризация.

Поляризацията представлява изместване на свързаните заряди или по-бавна ориентация на диполните молекули. Зарядите се изместват така, че да намалят интензитета на полето вътре в диелектрика. По този начин се намалява и вероятността за електрически пробив. За процесите на поляризация може да се съди по напрежението на разряд и възстановяващото се напрежение. Изолацията на съоръжението се зарежда в течение на предварително зададено време на заряд T_C с постоянно напрежение U_C за да се акумулира в нея заряда на абсорбция. След това изолацията се изключва от източника на постоянно напрежение, и се дава на късо към земя за малък промеждутък от време наречен време на разряд T_D, като непосредствено след този момент отново се включва чрез делител на напрежение към записващ напреженов измервателен уред.

За времето T_D геометрическия капацитет напълно се разрежда, а зарядите на абсорбция, акумулирани в статорната изолация, остават практически неизменни. За сметка на тези насъбрани навътре в изолацията заряди започва бавно нарастване на напрежението, което се нарича *възстановяващото се напрежение*.

Възстановяващото се напрежение отначало нараства, достигайки максимална стойност, а след това постепенно намалява. По величината, формата и началната скорост на възстановяващото се напрежение може да се съди за състоянието на статорната изолация.

По такъв начин за стареенето на изолацията без да се правят опити, които я разрушават, може да се съди по характера на процесите на поляризация, а именно по големината и формата на възстановяващото се напрежение.

С увеличението на броя на отработените часове на генератора изолацията му се износва и възстановяващото се напрежение намалява, електрическата якост на изолацията и пробивното напрежение също се снижават.

Пробивното напрежение характеризира само кратковременната якост на изолацията и в някой случай тя е достатъчно висока. Понякога се получава така, че при продължително въздействие на напрежението електрическата якост е недостатъчна вследствие на влошени характеристики на изолацията. В процеса на стареене на изолацията се увеличават диелектричните загуби, които могат да доведат до топлинен пробив на изолацията при продължително въздействие на приложеното напрежение. За всеки тип изолация съществува вътрешен ресурс, които характеризира способността й в течение на определено време да издържа на въздействието на приложеното напрежение и да се противопоставя на разрушаващото въздействие на процесите, протичащи при това напрежение. Вътрешният ресурс за всяка нова изолация е постоянна величина, и тя естествено постепенно намалява с броя на работните часове. Намалява също така и възстановяващото се напрежение, така че това е един показател, който много добре характеризира стареенето на изолацията. Количествени характеристики в този случай се явяват първоначалните наклони на

допирателните S_d (право пропорционална на проводимостта) и S_r (право пропорционална на интензивността на поляризациите) и пределните ми стойности, когато ресурса на изолацията е изчерпан и тя излиза от строя.

По стойността на тези параметри може да се определи степента на овлажняване S_d и стареене S_r (фиг.1. B, C) на изолацията. Параметрите S_d и S_r характеризират отработения ресурс на изолацията, а не срока на служба като изминал период от производството. При натрупване на опит от провеждани изпитвания по този метод и правилно тълкуване на получените резултати може също да се предскаже остатъчния ресурс на изолацията.

При диагностика на силови кабели напрежението на саморазряд $U_d(t)$ се измерва след продължително зареждане на изолацията на кабела с постоянно напрежение $U_0=1$ kV, възбуждайки поляризационните процеси за период от $t = 60$ min. Възстанавяващето се напрежение $U_r(t)$ се измерва след „зареждане" с постоянно напрежение $U_0=1$ kV за период от $t=60$ min. След това следва изключване от източника на напрежение, даване на късо за $t_{dc}= 3–5$ s и снемане на възстановяващото се напрежене $U_r(t)$. Заснемането на зависимостите $U_d(t)$ и $U_r(t)$ става през *1, 10, 15* s и *60* min.

Първоначалните участъци на зависимостите $U_d(t)$ и $U_r(t)$ и наклоните на допирателните S_d и S_r може да се използват като параметри, характеризиращи състоянието на изолацията на кабелите, т.к. имаме следните зависимости:

$$S_d = \frac{\gamma E}{\varepsilon_0}, \quad S_r = \frac{\beta E}{\varepsilon_0}, \tag{6}$$

където: γ е специфичната електропроводимост на изолацията на кабела; β – коефициент определящ интензивността на поляризациите:

$$\beta = \sum_{k=1}^{n} \frac{\alpha_k}{T_k}, \tag{7}$$

където: β е право пропорционално на интензивността на α елементарните поляризационни процеси с времеконстанти $T_1...T_n$, които се определят от измерените параметри t_c и времето на разряда.

Метод на RVM е успешно приложим и за диагностика на изолацията на въртящи се машини, като принципът на работа остава същият.

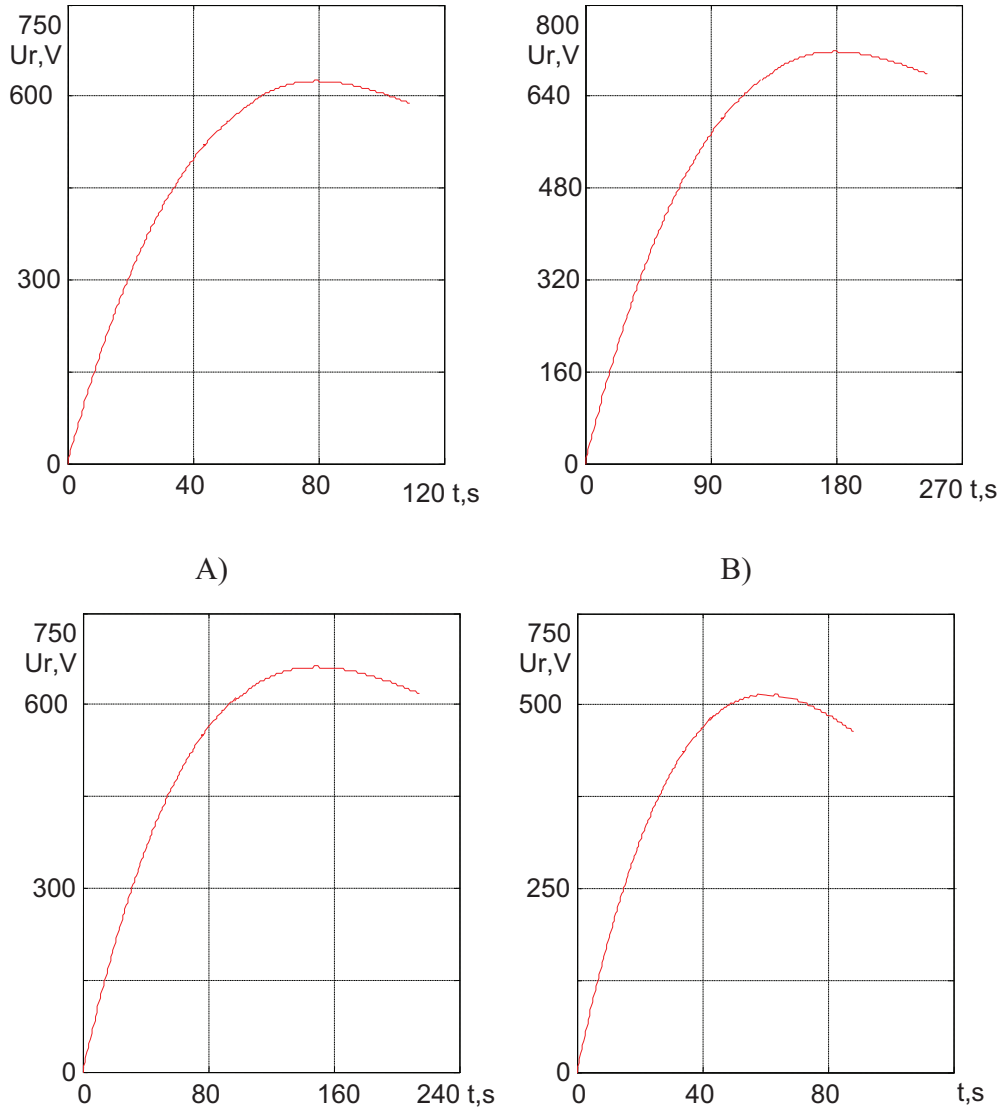
Ако се приложи към една фазите на синхронен генератор изправено напрежение то фазните и междуфазни капаците на генератора се зареждат също. При наличие на дефект в изолацията на статорната намотка в процеса на следене на разреждането на капацитетите на трите фази чрез измерване на фазовото напрежение се появява променлива съставяща в междуфазното напрежение. Този показател може да се използва като диагностичен параметър за състоянието на изолацията.

3. Практически резултати при използване на метода на възстановяващото се напрежение за хидрогенератор.

При оценка на състоянието на изолацията на една електрическа машина и прогнозиране на нейния остатъчен ресурс на живот трябва да се има предвид авариите, които са възниквали в нея, тяхната честота, а също така късите съединения възникващи в близост до шините за високо напрежение. Трябва да се има в предвид, че различните части на изолацията на статорната намотката на въртящата се електрическа машина по време на работа се намират под различно работно напрежение.

Измерено е възстановяващото се напрежение на трите фази на хидрогенератор от страна на началото на намотките, другите две намотки са свързани паралелно и заземени. Резултатите от измерванията на възстановяващото напрежение са дадени на фиг. 2. Максималното възстановяващото се напрежение U_R, времето за неговото достигане T_{peak} и

максималната начална скорост на възстановяващото се напрежение S_R не показват, че в изолацията на статорната намотка има дефекти и проблеми.



Фиг. 2 Изменение на възстановяващото се напрежение на статорната изолация на генератор, където:

A) Възстановяващо се напрежение на статорната изолация на генератора при свързани в паралел трите намотки от страна на неутралата;

B) Възстановяващо се напрежение на статорната изолация на фаза С на генератора. Фази А и В са заземени;

C) Възстановяващо се напрежение на статорната изолация на фаза А на генератора. Фази В и С са заземени;

D) Възстановяващо се напрежение на статорната изолация на фаза В на генератора. Фази А и С са заземени ;

4. Заключение и изводи

Настоящият доклад е посветен на разгледания тук метод на възстановяващото се напрежение и има за цел да опише технически и математически протичащите процеси във

високоволтовата изолация на електрическа въртящата се машина, което е от съществено значение при извършване на експертни оценки.

Получените резултати в този случай не дават основание да твърдим, че високоволтовата изолация на статорната намотка има опасни дефекти.

Литература:

1. Канискин, В. А, Ал. И. Таджибаев, Определение остаточного ресурса силовых кабелей неразрушающая диагностика, "Новости Электротехники", 2(20), 2003;
2. Рубцов, А. В.: Определение остаточного ресурса бумажной изоляции маслонаполненного электрооборудования, ж. Электрик - 2006, № 3, стр. 39 – 40;
3. M. Muhr, R. Strobl, and R. Woschitz, Entladestrommethode – Ein Prüfverfahren für kunststoffisolierte Mittelspannungskabel, (*e & i*) Elektrotechnik und Informations-technik, vol. 115, no. 6, pp. 321–326, June 1998, doi: 10.1007/BF03159875;
4. R. Woschitz, Discharge Current Method for Aged Plastic-insulated Medium-voltage Cables, in Proceedings of the 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, Austria, Aug. 28 – Sep. 1, 1995, pp. 5586:1–4
5. T. Leibfried, Bestimmung des Wassergehaltes im Isolationssystem von Leistungstransformatoren, presented at the MICAFIL Conference 2004, Zurich, Switzerland, Mar. 1, 2004

ТОКОВИ ХАРМОНИЦИ В ЖИЛИЩНИ СГРАДИ И ТЯХНОТО ТЕРМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ НИСКОВОЛТОВИ КАБЕЛИ

Красимир Иванов, Тодор Тодоров
Технически университет – Габрово
факултет Електротехника и електроника
5300 Габрово, ул. "Х. Димитър" №4, България, krmri@tugab.bg

РЕЗЮМЕ
Настоящият доклад представя изследване на токовите хармонични емисии, генерирани от широко използвани битови електрически уреди в жилищни сгради. Хармоничните емисии на измерените уреди се оценяват по отношение на IEC 61000-3-2, а референтните спектри от IEC 61000-3-12 се използват за оценка на хармонично обусловените загуби в кабелите и термичното натоварване. Докладът определя количествено допълнителните резистивни загуби и температурно повишаване в нисковолтови кабели NFA2X (алуминиеви, XLPE) и CBT/NYY (медни, PVC) с напречни сечения от 25 до 70 mm², провеждащи токове с хармоничен състав при референтните граници на емисии по IEC 61000-3-12.

CURRENT HARMONICS IN RESIDENTIAL BUILDINGS AND THEIR THERMAL IMPACT ON LOW-VOLTAGE CABLES

Krasimir Ivanov, Todor Todorov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Faculty of Electrical Engineering and Electronics
5300 Gabrovo, 4 H. Dimitar str.

ABSTRACT
This paper presents a study of current harmonic emissions generated by widely used household electrical appliances in residential buildings. The harmonic emissions of the measured appliances are assessed with respect to IEC 61000-3-2, and the reference spectra from IEC 61000-3-12 are used to assess the harmonic losses in the cables and the thermal load. The report quantifies the additional resistive losses and temperature rise in low voltage cables NFA2X (aluminium, XLPE) and CBT/NYY (copper, PVC) with cross-sections from 25 to 70 mm², carrying currents with harmonic content at the reference emission limits according to IEC 61000-3-12.
Key words: *current harmonics, total harmonic distortion, household loads, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-12, cable losses, surface effect, temperature rise, current-carrying capacity reduction, neutral conductor*

1. Въведение

Разпространението на нелинейни електрически товари в съвременните жилищни и обществени сгради се е превърнало в значителен проблем за качеството на електрическата енергия в нисковолтовите разпределителни мрежи. Влиянието на източниците на хармонично изкривяване върху външната електрическа мрежа се определя преди всичко от токовете, генерирани от електрическите консуматори и инжектирани обратно към захранващия трансформатор. За оценка на въздействието на източниците на изкривяване върху електрическата мрежа е необходимо да се определят стойностите на хармоничните токове, генерирани от главното разпределително табло на жилищната или обществената сграда.

2. Генериране на хармонични от битови електроуреди.

Процесите на генериране на хармоници от отделните електрически уреди, тяхното сумиране и формиране на сумарните токове, протичащи през инсталацията на сградата, са сложни явления, изискващи внимателно експериментално изследване. По време на експерименталните измервания измервателният уред е бил свързан на главното разпределително табло на сградата към захранващия кабел, позволявайки директно характеризиране на общото хармонично съдържание, инжектирано в електроразпределителната мрежа. Формите на тока са записани в точката на общо свързване (ТОС) за всеки уред, работещ самостоятелно при стационарни мрежови условия (230 V ± 5%, 50 Hz). Измерените хармонични данни разкриват ясни разграничения между категориите уреди. Таблица I обобщава коефициентите на хармонично изкривяване и стойностите на THD_I за всичките четиринадесет изследвани уреда.

Таблица I. *Обобщение на хармоничното токово изкривяване за битови уреди*[†]

Уред	Номинална мощност	I_1 (A)	k_I3 (%)	k_I5 (%)	k_I7 (%)	k_I9 (%)	THD_I (%)	Режим
Климатик	Сплит	12,40	4,0	1,0	0,6	0,5	4,25	Прод.
Лампа с наж. жичка	100 W	2,55	2,0	3,5	2,0	2,0	5,28	Прод.
ЕС Лампа	15 W	0,84	20,2	10,7	13,1	9,5	28,37	Прод.
Фризер	300 W	1,78	6,7	6,7	2,8	4,5	10,94	Кратк.
Хладилник	250 W	1,76	6,8	6,8	3,4	3,4	10,97	Кратк.
Вентилатор	75 W	1,02	18,6	18,6	11,8	6,9	29,74	Прод.
Перална машина	2400 W	12,40	4,0	1,0	0,6	0,5	4,25	Прод.
Микровълнова печка	950 W	6,67	41,5	13,8	4,0	1,6	44,01	Прод.
Телевизор	85 W	1,18	39,8	32,2	16,9	5,9	54,33	Прод.
Музикален център	110 W	1,47	42,9	27,2	10,9	4,1	52,19	Прод.
Персонален компютър	75 W	0,86	31,4	29,1	19,8	12,8	49,31	Прод.
Електрическа кана	600 W	12,91	4,4	0,9	0,3	0,4	4,58	Кратк.
Ютия	1000 W	12,38	3,3	1,1	0,3	1,0	3,63	Кратк.
Прахосмукачка	1200 W	7,30	18,2	5,2	2,7	2,6	19,38	Повт.-кр.

Уредите могат да бъдат категоризирани в три групи според нивото на хармонични емисии:

Ниско изкривяване (THD_I < 10%): Резистивните нагревателни елементи доминират тази категория, включвайки електрическата кана (4,58%), ютията (3,63%), климатика при нагревателен режим (4,25%) и пералната машина (4,25%). Тези товари консумират почти синусоидални токове и при едновременна работа с нелинейни товари увеличават компонента на основната честота без съществен допълнителен хармоничен ток, поради което могат да намалят наблюдаваното агрегатно токово изкривяване в точката на общо свързване.

Умерено изкривяване (10% ≤ THD_I < 30%): Уредите с малки асинхронни двигатели — фризер (10,94%) и хладилник (10,97%) — генерират 3-ти и 5-ти хармоничен ток на нива 2–3 пъти по-високи от чисто резистивните товари. Компактната луминесцентна лампа (28,37%) попада в тази категория поради електронния баласт с токоизправител. Вентилаторният двигател (29,74%) и прахосмукачката (19,38%), и двата с универсални (колекторни) двигатели, проявяват повишени 3-ти и 5-ти хармоници с k_I3, достигащ 18,2–18,6%.

Високо изкривяване (THD_I > 30%): Устройствата с импулсни захранвания проявяват най-тежко хармонично замърсяване. Телевизорът (54,33%), музикалният център (52,19%) и

персоналният компютър (49,31%) генерират нечетни хармоници от 3-ти, 5-ти, 7-ми и 9-ти ред със значителни амплитуди. Микровълновата печка (44,01%) генерира доминиращи 3-ти и 5-ти хармоници поради характеристиките на захранването на магнетрона.

Границите за хармонични емисии за оборудване, свързано към нисковолтови разпределителни системи, са определени от серията стандарти IEC 61000-3. Стандарт IEC 61000-3-2 [1] определя граници за оборудване с номинален ток ≤ 16 A на фаза, класифицирайки оборудването в четири класа.

Измерените форми на тока са разложени в представяне чрез ред на Фурие до 13-ти хармоничен ред:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{N} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \qquad (1)$$

където I_n означава амплитудната (синусоидална) стойност на *n*-тия хармоничен компонент, ω = 2π × 50 rad/s е ъгловата честота на основния хармоник, а φ_n е фазовият ъгъл. Съответната ефективна стойност (RMS) на всеки хармоник е I_{n,rms} = I_n / √2. Тъй като показателите за хармонично изкривяване използват отношения на стойности от една и съща конвенция, те са числено идентични, независимо дали са изразени в амплитудни или ефективни стойности. Пълното хармонично изкривяване на тока (THD_I) се изчислява като:

$$\mathrm{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \qquad (2)$$

Уредите са класифицирани в три работни режима: *продължителен* (работа повече от 30 минути), *краткотраен* (по-малко от 30 минути на цикъл) и *повторно-краткотраен* (периодична кратка работа).

Стандарт IEC 61000-3-12 [10] установява граници за хармонични токове за оборудване с номинален ток над 16 A и не повече от 75 A на фаза. Отношението на късо съединение R_sce = S_sc/S_n определя съотношението между мощността на късо съединение и номиналната мощност на оборудването. Случаят с товар от 16 A, включен в настоящото изследване, представлява инженерно гранично условие на долния праг на обхвата на стандарта, позволяващо директно сравнение с оборудване по IEC 61000-3-2. Стандартът въвежда също частичното претеглено хармонично изкривяване (PWHD):

$$\mathrm{PWHD} = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n^2 \cdot \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \times 100\% \qquad (3)$$

Таблица IV представя допустимите хармонични токови компоненти от Таблица 4 на IEC 61000-3-12 (оборудване, различно от балансирано трифазно) при R_sce = 33 за изследваната жилищна инсталация.

Таблица IV. *Хармонични токови граници по Таблица 4 на IEC 61000-3-12 (R_sce = 33)*

n	I_n/I_1 (%)	*n*	I_n/I_1 (%)
3	21,6	21	≤ 0,9
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	≤ 0,6
11	3,1	29	0,7
13	2,0	31	0,7
15	0,7	≥ 33	≤ 0,6
17	1,2		
19	1,1		

3. Допълнителни загуби и температурно повишаване в нисковолтови кабели вследствие на хармонични токове.

Анализирани са два типа кабели, представителни за европейската нисковолтова практика: NFA2X алуминиеви самоносещи кабели с XLPE изолация (T_max = 90°C) и CBT (HH)/NYY медни силови кабели с PVC изолация (T_max = 70°C). Оценени са четири стандартни напречни сечения — 25, 35, 50 и 70 mm² — при три нива на товарен ток: 16 A, 32 A и 70 A (компонент на основната честота), с cos φ = 0,9. Стойностите на DC съпротивлението при 20°C по IEC 60228 са дадени в Таблица V.

Таблица V. *DC съпротивление при 20°C по IEC 60228 (Ω/km)*

Напречно сечение (mm²)	NFA2X (Al)	CBT/NYY (Cu)
25	1,200	0,727
35	0,868	0,524
50	0,641	0,387
70	0,443	0,268

AC съпротивлението на проводник при хармоничен ред *n* се изчислява като:

$$R_{\mathrm{ac}}(n) = R_{\mathrm{dc}}(T) \cdot \left[1 + y_s(n) + y_p(n)\right] \qquad (4)$$

където R_dc(*T*) = R_dc,20 × [1 + α(*T* − 20)] е температурно коригираното DC съпротивление (α_Al = 0,00403 /°C, α_Cu = 0,00393 /°C), а факторът на повърхностния ефект y_s по IEC 60287-1-1 е:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8\,x_s^4}\,, \quad x_s^2 = \frac{8\pi f n}{R'_{\mathrm{dc}} \times 10^7} \qquad (5)$$

Факторът на ефекта на близост е оценен чрез опростено приближение за конфигурация трилистник/усукан пакет: y_p ≈ 0,37 × y_s. Това опростено приближение на ефекта на близост се използва за анализ на чувствителността, а не пълната геометрично зависима формулировка по IEC 60287-1-1, която изисква диаметър на проводника, разстояние между проводниците и специфични за конструкцията коефициенти (k_p), различаващи се между усуканоизолираните въздушни кабели NFA2X и многожилните конструкции SVT/NYY. Общата трифазна мощност на разсейване на километър е:

$$P_{\mathrm{total}} = P_1 + P_h = 3I_1^2 R_{\mathrm{ac},1} + 3\sum_{h>1} I_h^2\, R_{\mathrm{ac},h} \qquad (6)$$

Коефициентът на увеличение на загубите K_P = P_total / P_1 изразява относителното увеличение на загубите в кабела. Еквивалентният термичен ток е дефиниран като:

$$I_{\mathrm{eq}} = \sqrt{\frac{\sum_h I_h^2\; R_{\mathrm{ac},h}}{R_{\mathrm{ac},1}}} \qquad (7)$$

с коефициент на хармонично понижаване η = I_1 / I_eq. Термичният модел използва базова синусоидална температура на проводника T_sin за конкретна работна точка, изчислена итеративно от токовата натоварваемост на кабела при номинална температура, вместо да се приема, че всички кабели работят при максимално допустимата температура. Температурата на проводника при хармонично натоварване е:

$$T_{\mathrm{harm}} = T_{\mathrm{amb}} + (T_{\mathrm{sin}} - T_{\mathrm{amb}}) \cdot K_P \qquad (8)$$

Допълнителното температурно повишаване вследствие на хармоници е ΔT_h = T_harm − T_sin. Приета е температура на околната среда от 30°C.

Границите за хармоничен ток от Таблица 4 на IEC 61000-3-12 определят както индивидуални хармонични максимуми, така и обща граница за пълния хармоничен ток (THC) за всяко отношение на късо съединение R_sce. Тъй като едновременното прилагане на всички индивидуални максимуми поражда комбиниран THC, който може да надвиши общата граница, спектърът трябва да бъде мащабиран с коефициент α:

$$k_{h,\text{test}} = \alpha \cdot k_{h,\max}, \quad \alpha = \min\left(1, \frac{\text{THC}_{\text{lim}}}{\sqrt{\sum_h k_{h,\max}^2}}\right) \qquad (9)$$

Пълният хармоничен вектор обхваща от 3-ти до 39-ти ред (19 нечетни хармоника, включващи седем триплени), съставен от шестте индивидуално специфицирани граници по Таблица 4 плюс стойностите за по-високите редове до 39-ти хармоник, показани в Таблица IV. За най-рестриктивния случай (R_sce = 33), необработеният THC от тези индивидуални максимуми е 25,87%, докато допустимата граница на THC е 23%. Мащабният коефициент α ≈ 0,889 намалява 3-тия хармоник от 21,6% на 19,21%, 5-тия от 10,7% на 9,51% и т.н., давайки съответстващ THC_scaled = 23,00%. Всички производни величини — K_P, I_eq, η, T_harm и I_N,RMS — са изчислени от този единствен каноничен вектор. Анализирани са пет нива на R_sce: 33, 66, 120, 250 и ≥350.

Таблица VI представя изчислените загуби, термични величини и коефициенти на понижаване за алуминиеви кабели NFA2X при R_sce = 33 (най-рестриктивният жилищен сценарий, α = 0,889). Коефициентът на увеличение на загубите K_P варира от 1,0530 до 1,0535, представлявайки приблизително 5,3% допълнителни загуби вследствие на хармонични токове. За разлика от предишния анализ, допълнителното температурно повишаване ΔT_h сега варира значително с работната точка: от 0,02°C за слабо натоварен 70 mm² кабел при 16 A (където T_sin = 30,3°C) до 1,39°C за силно натоварен 25 mm² кабел при 70 A (където T_sin = 56,3°C).

Таблица VI. *Загуби в кабелите и термичен анализ — NFA2X (Al, XLPE, T_max=90°C) при R_sce=33, на km, 3-фазна*

S (mm²)	I_1 (A)	P_1 (W/km)	P_h (W/km)	K_P	I_eq (A)	η	T_sin (°C)	T_harm (°C)	ΔT_h (°C)
25	16	963.5	51.0	1.0530	16.42	0.9745	31.3	31.3	0.07
25	32	3910.8	207.2	1.0530	32.84	0.9745	35.1	35.4	0.27
25	70	20220.8	1071.0	1.0530	71.83	0.9745	56.3	57.7	1.39
35	16	695.7	36.9	1.0531	16.42	0.9745	30.8	30.8	0.04
35	32	2809.1	149.0	1.0530	32.84	0.9745	33.2	33.4	0.17
35	70	14110.5	748.4	1.0530	71.83	0.9745	46.2	47.1	0.86
50	16	513.3	27.3	1.0532	16.42	0.9744	30.5	30.5	0.03
50	32	2065.7	109.8	1.0532	32.84	0.9744	32.1	32.2	0.11
50	70	10197.1	542.1	1.0532	71.84	0.9744	40.3	40.9	0.55
70	16	354.6	19.0	1.0535	16.42	0.9743	30.3	30.3	0.02
70	32	1423.4	76.1	1.0535	32.84	0.9743	31.3	31.3	0.07
70	70	6938.3	370.9	1.0534	71.85	0.9743	36.1	36.4	0.33

Таблица VII представя съответните резултати за медни кабели CBT/NYY при R_sce = 33. Поради по-ниското DC съпротивление на медта абсолютните загуби са по-малки; въпреки това коефициентът на увеличение на загубите K_P е незначително по-висок (1,0531–1,0544), тъй като по-ниското съпротивление поражда по-голям параметър на дълбочината на проникване x_s^2, усилвайки относителния принос на повърхностния ефект. При T_max =

70°C (PVC) базовите температури са по-ниски, отколкото при кабелите NFA2X с XLPE изолация.

Таблица VII. *Загуби в кабелите и термичен анализ — CBT/NYY (Cu, PVC, T_max=70°C) при R_sce=33, на km, 3-фазна*

S (mm²)	I_1 (A)	P_1 (W/km)	P_h (W/km)	K_P	I_eq (A)	η	T_sin (°C)	T_harm (°C)	ΔT_h (°C)
25	16	582.9	31.0	1.0531	16.42	0.9745	31.1	31.2	0.06
25	32	2361.7	125.4	1.0531	32.84	0.9745	34.6	34.8	0.24
25	70	12091.9	641.9	1.0531	71.83	0.9745	53.4	54.6	1.24
35	16	419.6	22.4	1.0533	16.42	0.9744	30.7	30.8	0.04
35	32	1692.5	90.2	1.0533	32.84	0.9744	33.0	33.1	0.16
35	70	8458.4	450.6	1.0533	71.84	0.9744	44.9	45.7	0.79
50	16	309.7	16.6	1.0536	16.42	0.9742	30.5	30.5	0.03
50	32	1245.8	66.8	1.0536	32.85	0.9742	32.0	32.1	0.11
50	70	6136.4	328.9	1.0536	71.85	0.9742	39.8	40.4	0.53
70	16	214.5	11.7	1.0544	16.43	0.9739	30.3	30.3	0.02
70	32	860.9	46.8	1.0544	32.86	0.9739	31.2	31.3	0.07
70	70	4192.4	227.8	1.0543	71.88	0.9739	36.0	36.3	0.32

Факторът на повърхностния ефект y_s нараства приблизително с квадрата на хармоничния ред. За най-големия меден проводник (70 mm²), y_s нараства от 0,0008 при основната честота до 0,357 при 25-тия хармоник — 450-кратно увеличение. За алуминиевите проводници със същото сечение увеличението е по-малко (0,0003 до 0,158) поради тяхното по-високо съпротивление.

Анализът е повторен за пълното семейство спектри по IEC 61000-3-12 (R_sce = 33, 66, 120, 250, ≥350). По-високите стойности на R_sce съответстват на прогресивно по-допустими обвивки на хармонични емисии в референтните таблици на IEC 61000-3-12. Вследствие на това коефициентът на увеличение на загубите K_P нараства с R_sce: от приблизително 1,053 при R_sce = 33 до приблизително 1,22 при R_sce ≥ 350 за спектрите от Случай А. Коефициентът на понижаване η намалява съответно от 0,974 до 0,904.

В трифазни четирижилни (3Ф4Ж) системи, провеждащи токове с хармоничен състав, неутралният проводник е подложен на специфично термично натоварване. Трипленните хармонични токове (редове 3, 9, 15, 21, …) са компоненти с нулева последователност, които се сумират конструктивно в неутралния проводник. При балансиран товар:

$$I_{N,h} = 3I_h\,, \quad h = 3{,}9{,}15{,}21, \ldots$$

и ефективният ток в неутралния проводник е:

$$I_{N,\mathrm{RMS}} = \sqrt{\sum_h (3I_h)^2}\,, \quad h = 3{,}9{,}15{,}21{,}27{,}33{,}39$$

Този анализ се отнася само за Случай А (общ спектър, съдържащ триплени). За Случай Б (балансирано трифазно оборудване) токът в неутралния проводник е нулев по дефиниция.

За неутралния проводник е прието, че има същия материал, напречно сечение, изолационна система и условия на монтаж като съответния фазов проводник. Неговата температура е оценена с използване на същата формулировка за термичен модел за работна точка (8), като хармоничните загуби в неутралния проводник са изчислени от ефективните стойности на трипленните хармонични токове и съответните им честотно зависими АС съпротивления.

3. Заключение и изводи

Основните изводи от коригирания анализ на загубите в кабелите са:

1. С α-мащабирани спектри по IEC 61000-3-12 коефициентът на увеличение на загубите K_P ≈ 1,053 за R_sce = 33 (5,3% допълнителни загуби), което е забележимо по-ниско от 6,7%, получени когато границата на THC не се прилага. K_P остава почти независим от товарния ток, потвърждавайки, че процентното увеличение на загубите е структурно свойство на хармоничния спектър.
2. Коефициентът на хармонично понижаване η ≈ 0,974 за R_sce = 33 означава, че токовата натоварваемост на кабела следва да бъде намалена с приблизително 2,6% при наличие на хармонично натоварване. За по-силни мрежи (R_sce ≥ 350) понижаването нараства до приблизително 9,5% (η ≈ 0,905).
3. Медните кабели проявяват незначително по-високи стойности на K_P от алуминиевите кабели със същото сечение (напр. 1,0544 срещу 1,0535 за 70 mm² при R_sce = 33), тъй като тяхното по-ниско съпротивление поражда по-големи фактори на повърхностния ефект при всяка хармонична честота.
4. В 3Ф4Ж системи с триплени спектри (Случай А) неутралният проводник провежда конструктивно сумирани токове с нулева последователност, които могат да надвишат основния ток на фазата. При R_sce ≥ 350 ефективният ток в неутралния проводник достига 114% от основния фазов ток.

Литература:

1. IEC 61000-3-2:2018, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)," International Electrotechnical Commission, 2018.
2. IEC 61000-3-4:1998, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-4: Limits – Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A," International Electrotechnical Commission, 1998.
3. IEEE Std 519-2022, "IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems," IEEE, 2022.
4. EN 50160:2010, "Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity distribution networks," CENELEC, 2010.
5. A. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.
6. R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012.
7. БДС EN 61000-3-2:2014, „Електромагнитна съвместимост (EMC) – Част 3-2: Граници – Граници за хармонични токови емисии," Български институт за стандартизация, 2014.
8. IEC 60287-1-1:2023, "Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General," International Electrotechnical Commission, 2023.
9. IEC 60228:2004, "Conductors of insulated cables," International Electrotechnical Commission, 2004.
10. IEC 61000-3-12:2021, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤75 A per phase," International Electrotechnical Commission, 2021.

СГЪСТИТЕЛИТЕ В ОБОГАТИТЕЛНИТЕ ФАБРИКИ: КОНСТРУКЦИЯ, ЕКСПЛОАТАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

гл. ас. д-р инж. Володя Джаров
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, Минноелектромехничен факултет, катедра „Електроенергетика и автоматика“

THICKENERS IN MINERAL PROCESSING PLANTS: DESIGN, OPERATION AND AUTOMATION

Ch. Volodya Dzharov, assistant professor, Ph.D., Eng
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Faculty of Mining and Electrical Engineering, Department of "Electric Power Engineering and Automation"
e-mail:volodya.dzharov@mgu.bg

ABSTRACT
Thickeners are essential technological equipment in mineral processing plants, providing solid-liquid separation, clarification of process water and concentration of solid particles in the underflow. Their operation is characterized by significant process inertia and interaction between the main technological parameters, which creates difficulties in maintaining stable operating conditions. This paper presents the construction and operation of thickeners and proposes an automated control structure based on the ***Arduino Opta programmable logic controller****. The system includes measurement of feed flow, slurry density, sludge level, underflow density and overflow turbidity. Automatic control of underflow discharge, flocculant dosing and rake drive is considered. The proposed approach aims to improve process stability, operational reliability and efficiency.*
Keywords: *thickener, mineral processing, automation, Arduino Opta, PLC, flocculant, underflow density, sludge level.*

1. УВОД

Сгъстяването е важен технологичен процес при преработката на рудни и нерудни суровини, при който се извършва разделяне на твърдата и течната фаза и се повишава концентрацията на твърдата фаза в получения подлив. Сгъстителите намират широко приложение в обогатителните фабрики и представляват важен елемент от технологичните схеми за преработка на минерални суровини [1, 2].

Ефективността на процеса на сгъстяване зависи от редица фактори, сред които характеристиките на постъпващата пулпа, концентрацията на твърдата фаза, условията на утаяване и използването на флокулиращи реагенти. Изменението на тези параметри оказва влияние върху нивото на утайката, плътността на подлива и качеството на преливната вода [2, 3].

Експлоатацията на промишлените сгъстители се характеризира със значителна инерционност на процеса и взаимно влияние между отделните технологични параметри. Поради това поддържането на устойчив режим само чрез ръчно управление е затруднено. В литературата са разглеждани различни подходи за автоматично управление на нивото на утайката, концентрацията на подлива и дозировката на флокуланта [3, 4].

Развитието на автоматизацията в минерално-суровинната промишленост създава възможности за непрекъснато измерване на основните технологични параметри и реализиране на автоматични управляващи въздействия. Съвременните системи за управление на сгъстители използват информация от измерванията на нивото на утайката, плътността на подлива, мътността на прелива и натоварването на гребния механизъм за оптимизиране на работния режим [4, 5].

В настоящата работа се разглежда възможността за изграждане на автоматизирана система за управление на сгъстител, при която като управляващо устройство се използва **програмируемият логически контролер Arduino Opta**. Предлага се структура, включваща измерване на основните параметри на процеса, управление на подлива, дозиране на флокулант и контрол на задвижването на гребния механизъм.

Целта на настоящата работа е да се разгледат конструкцията и експлоатацията на сгъстителите в обогатителните фабрики и да се предложи структура на автоматизирана система за управление, реализирана с Arduino Opta, с възможност за контрол на основните технологични параметри.

2. КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА СГЪСТИТЕЛИТЕ

Сгъстителят представлява технологичен апарат, предназначен за разделяне на твърдата и течната фаза на минерална пулпа чрез утаяване на твърдите частици под действие на гравитационните сили. В резултат на процеса в долната част на апарата се формира сгъстена суспензия, която се отвежда като подлив, а избистрената течна фаза се отвежда като прелив. Конструкцията и режимът на работа на сгъстителя са съобразени с характеристиките на преработвания материал и необходимата производителност.

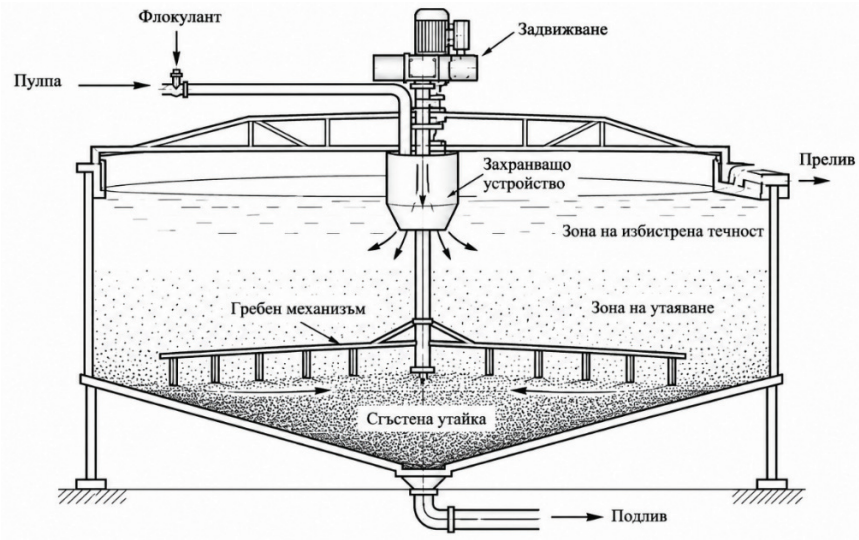
Основните конструктивни елементи на промишления сгъстител са резервоар, захранващо устройство, гребен механизъм, задвижваща система, устройство за отвеждане на подлива и преливна система. В зависимост от конструкцията и предназначението могат да се използват различни изпълнения на захранващото устройство и гребния механизъм.

Пулпата постъпва в сгъстителя чрез захранващо устройство, разположено обикновено в централната част на апарата. Конструкцията му има за цел да осигури равномерно разпределение на входящия поток и да ограничи турбулентността в зоната на утаяване. При необходимост преди или при подаването на пулпата се извършва дозиране на флокулант. Флокулирането води до образуване на по-големи агрегати от твърди частици и създава условия за по-ефективно утаяване.

След постъпването на пулпата твърдите частици се утаяват и постепенно се натрупват в долната част на апарата. Така се формира слой от сгъстена утайка. Гребният механизъм придвижва натрупания материал към централната зона, откъдето той се отвежда чрез подливната система. Едновременно с това течната фаза се издига към горната част на апарата и се отвежда през преливната система.

Гребният механизъм се състои от централен вал и гребла, разположени радиално или по подходяща конструктивна схема. Задвижването му трябва да осигурява необходимия въртящ момент при различни натоварвания. При увеличаване на концентрацията и нивото на утайката съпротивлението срещу движението на греблата нараства, което може да доведе до повишаване на натоварването на задвижването. Поради това измерването на натоварването или въртящия момент на гребния механизъм е подходящо да бъде включено в системата за автоматично управление.

От технологична гледна точка работата на сгъстителя може да се разглежда като непрекъснат процес на подаване на пулпа, утаяване и уплътняване на твърдата фаза, отвеждане на сгъстения продукт и отвеждане на избистрената течност. Основните потоци са представени схематично на фиг. 1.



***Фиг. 1**. Принципна схема на промишлен сгъстител, адаптирана по [6]*

На фиг. 1 е представена принципната схема на промишлен сгъстител и основните потоци в процеса. Постъпващата пулпа се подава в захранващото устройство, където при необходимост се извършва добавяне на флокулант. В резултат на утаяването твърдата фаза се концентрира в долната част на апарата и се отвежда като подлив, докато избистрената течна фаза се отвежда през преливната система. Гребният механизъм подпомага придвижването на сгъстената утайка към зоната на отвеждане.

Конструктивното изпълнение на сгъстителя и параметрите на гребния механизъм се определят в зависимост от производителността на съоръжението, характеристиките на преработваната пулпа и изискваната концентрация на подлива. При промишлените съоръжения особено значение има надеждната работа на задвижващата система, тъй като натрупването на твърда фаза в долната част на апарата може да доведе до увеличаване на съпротивлението срещу движението на греблата и съответно до повишаване на натоварването на задвижването [6].

От експлоатационна гледна точка устойчивата работа на сгъстителя изисква поддържане на подходящо ниво на утайката, концентрация на подлива и режим на подаване на пулпата и флокуланта. При промяна на характеристиките на входящия поток се изменят условията на утаяване и натоварването на гребния механизъм. Повишаването на натоварването на задвижването може да бъде признак за прекомерно натрупване на твърда фаза и необходимост от промяна на режима на работа [4, 6]. Поради това непрекъснатото измерване на основните технологични параметри създава предпоставки за автоматизирано управление на процеса.

3. АВТОМАТИЗАЦИЯ НА СГЪСТИТЕЛЯ

Автоматизирането на процеса на сгъстяване има за цел поддържане на устойчив режим на работа чрез непрекъснато измерване на основните технологични параметри и формиране на управляващи въздействия. Изследванията показват, че при управлението на сгъстители особено значение имат дебитът на входящата пулпа, нивото на утайката и концентрацията на подлива. Тяхното съвместно използване създава възможност за по-стабилно управление на отвеждането на подлива и дозировката на флокуланта [2, 7].

В предлаганата система като основно управляващо устройство се използва Arduino Opta, представляващ micro PLC, предназначен за приложения в индустриалната автоматизация. Чрез Arduino PLC IDE контролерът може да се програмира с езиците,

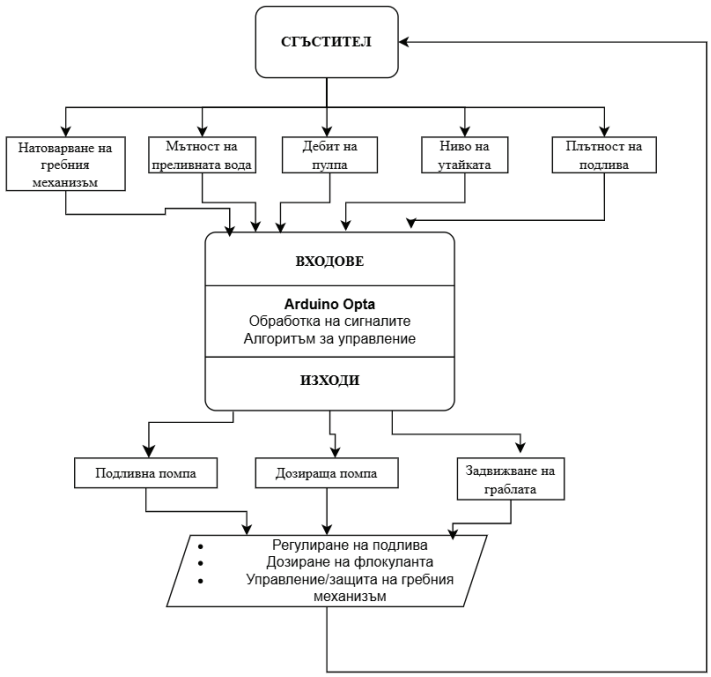
определени в IEC 61131-3, включително Ladder Diagram, Function Block Diagram и Structured Text [8].

Като основни контролирани величини се разглеждат дебитът на входящата пулпа, нивото на утайката, плътността на подлива и мътността на преливната вода. Към тях може да бъде добавен и контролът на натоварването на гребния механизъм. При сгъстители с висока концентрация на подлива увеличаването на въртящия момент на гребния механизъм може да доведе до неблагоприятни експлоатационни режими, поради което този параметър е подходящ за включване в системата за управление [9, 10].

Управляващите въздействия включват регулиране на отвеждането на подлива и управление на дозировката на флокуланта. При промяна на дебита на входящата пулпа и нивото на утайката се изменя режимът на отвеждане на подлива, а дозировката на флокуланта се съобразява с условията на процеса [2, 7]. При повишаване на натоварването на гребния механизъм се предвиждат защитни действия за предотвратяване на претоварване и нарушаване на нормалния режим на работа [9, 10].

В настоящата разработка Arduino Opta приема сигналите от измервателните устройства, обработва получената информация съгласно зададен алгоритъм и формира управляващи сигнали към изпълнителните механизми. По този начин се създава възможност за автоматично регулиране на подлива, дозировката на флокуланта и защита на задвижването на гребния механизъм.

Структурата на предложената система за автоматизация е представена на фиг. 2.



***Фиг. 2**. Структурна схема на автоматизираната система за управление на сгъстител*

От фиг. 2 се вижда, че автоматизираната система функционира като затворена система за управление. От сгъстителя постъпва информация за основните технологични параметри – дебита на пулпата, нивото на утайката, плътността на подлива, мътността на преливната вода и натоварването на гребния механизъм. Получените измервателни сигнали се подават към Arduino Opta, където се обработват съгласно заложения алгоритъм за управление.

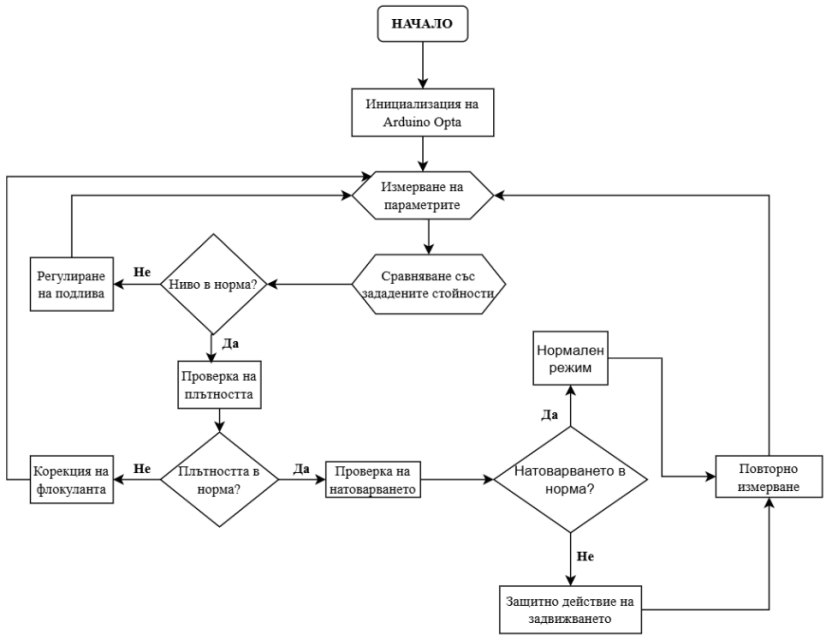
В зависимост от стойностите на измерваните параметри контролерът формира управляващи сигнали към изпълнителните механизми. Чрез подливната помпа се регулира отвеждането на сгъстения продукт, чрез дозиращата помпа се управлява подаването на

флокулант, а задвижването на гребния механизъм се управлява с отчитане на неговото натоварване. По този начин управляващите въздействия променят режима на работа на сгъстителя, а получените резултати отново се измерват и подават към контролера. Реализира се затворен контур на автоматично управление [7–10].

Предлаганата структура позволява едновременно наблюдение на основните технологични параметри и автоматично въздействие върху процеса. При достигане на предварително зададени гранични стойности на натоварването на гребния механизъм може да бъде реализирана защитна функция, насочена към предотвратяване на претоварване на задвижването [9, 10, 11].

4. АЛГОРИТЪМ НА УПРАВЛЕНИЕ

Алгоритъмът за управление е разработен с цел циклично измерване на основните технологични параметри и формиране на управляващи въздействия в зависимост от отклонението им от предварително зададените стойности. След инициализация на Arduino Opta се извършва измерване на дебита на пулпата, нивото на утайката, плътността на подлива, мътността на преливната вода и натоварването на гребния механизъм. Получените стойности се обработват от контролера и се използват за определяне на необходимите управляващи действия.



Фиг. 3. *Алгоритъм на управление на сгъстителя*

Алгоритъмът реализира циклично измерване на основните технологични параметри и сравняването им със зададените стойности. При отклонение на нивото на утайката се извършва регулиране на подлива. При установяване на отклонение на плътността се коригира дозировката на флокуланта. При превишаване на допустимото натоварване на гребния механизъм се активира защитно действие на задвижването. При нормални условия системата продължава работа в нормален режим. След всяко управляващо или защитно действие се извършва повторно измерване на параметрите и алгоритъмът продължава циклично.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледани са конструкцията, принципът на действие и основните експлоатационни особености на сгъстителите, използвани в обогатителните фабрики. Определени са

основните технологични параметри, които оказват влияние върху устойчивостта и ефективността на процеса на сгъстяване.

Предложена е структура на автоматизирана система за управление с използване на Arduino Opta като програмируем логически контролер. Разгледано е измерването на дебита на пулпата, нивото на утайката, плътността на подлива, мътността на преливната вода и натоварването на гребния механизъм. Разработеният алгоритъм предвижда автоматично регулиране на подлива, корекция на дозировката на флокуланта и защитно действие при претоварване на задвижването.

Предложената система създава възможност за повишаване на устойчивостта на технологичния процес, надеждността на експлоатацията и степента на автоматизация на сгъстителя.

Благодарности. Настоящото изследване е финансирано по договор **МЕМФ № 184-30.03.2026 г.**, със средства от държавния бюджет за присъщата научна дейност на държавните висши училища.

Литература:

[1] Segovia, J. P., et al. *On the control of sludge level and underflow concentration in industrial thickeners.* IFAC Proceedings Volumes, Vol. 44, Issue 1, 2011, pp. 8571–8576. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02667.

[2] Xu, N., Wang, X., Zhou, J., Wang, Q., Fang, W., Peng, X. *An intelligent control strategy for thickening process.* International Journal of Mineral Processing, Vol. 142, 2015, pp. 56–62. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.01.007.

[3] Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., Farås, S. *Modeling and controlling clarifier–thickeners fed by suspensions with time-dependent properties.* Minerals Engineering, Vol. 62, 2014, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.12.011.

[4] Sidrak, Y. L. *Control of the thickener operation in alumina production.* Control Engineering Practice, Vol. 5, Issue 10, 1997, pp. 1417–1426. DOI: 10.1016/S0967-0661(97)00138-X.

[5] *Expert Control Tuning of an Industrial Thickener.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 48, Issue 17, 2015, pp. 86–91. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.083.

[6] Metso. *Basics in Minerals Processing. Conventional clarifier/thickener – Design*, Section 6.10, pp. 6:5–6:6. Metso.

[7] Xie, D. D., Tong, X., Xie, X., Hou, K., Li, J. Y. *Efficient Application of Automation Technology in Thickener Process.* Advanced Materials Research, Vol. 1094, 2015, pp. 441–444. DOI: 10.4028/**www.scientific.net/AMR.1094.441.**

[8] Arduino. *Arduino Opta – Hardware and Documentation.* Arduino**.**

[9] Tan, C. K., Bao, J., Bickert, G. *A study on model predictive control in paste thickeners with rake torque constraint.* Minerals Engineering, Vol. 105, 2017, pp. 52–62. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.01.011.

[10] Oulhiq, R., Benjelloun, K., Kali, Y., Saad, M., Griguer, H. *Constrained model predictive control of an industrial high-rate thickener.* Journal of Process Control, Vol. 133, 2024, Article 103147. DOI: 10.1016/j.jprocont.2023.103147**.**

[11] Александров, Р. Претоварваща способност на асинхронен двигател, захранван от честотен преобразувател. Годишник на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски", Том 50, Св. III, 2007, с. 185.

КООРДИНАТНА МАШИНА ЗА РЯЗАНЕ НА МИННИ МАКЕТИ

Вахан Петев, Ромео Александров
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски", София, 1700
E-mail: vahanpetevv@gmail.com, romeo.alexandrov@mgu.bg

РЕЗЮМЕ
Голямата работна площ и прецизното координиране на движенията са от съществено значение при изработването на физически модели на открити рудници въз основа на цифрови данни за релефа. В настоящата статия се описват интегрирането и въвеждането в експлоатация на портална фрезова машина с три оси, предназначена за създаването на такива модели. Системата за управление съчетава софтуера Mach3, контролер за управление на движението CSMIO/IP-M и стъпкови задвижвания с локална обратна връзка от енкодери. Предложен е работен процес, включващ груба и финишна обработка, проверка на траекторията на инструмента (CAM) и контрол на размерите. Създадената платформа служи като основа за изработване на учебни и демонстрационни модели, като точността на позициониране и геометрията на готовите релефни модели подлежат на допълнителни независими измервания.
***Ключови думи**: ЦПУ; портална машина; минен макет; релефен модел; CAM*

COORDINATE MACHINE FOR MILLING MINE MODELS

Vahan Petev, Romeo Alexandrov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, Bulgaria
E-mail: vahanpetevv@gmail.com, romeo.alexandrov@mgu.bg

ABSTRACT
A large working area and coordinated motion are essential when producing physical models of open-pit mines from digital elevation data. This paper describes the integration and commissioning of a three-axis gantry milling machine intended for such models. The control system combines Mach3 software, a CSMIO/IP-M motion controller, and stepper drives with local encoder feedback. A workflow for roughing, finishing, CAM toolpath verification, and dimensional inspection is proposed. The resulting platform provides a basis for manufacturing educational and demonstration models; positioning accuracy and the geometry of finished relief models require further independent measurements.
***Key words**: CNC; gantry machine; mine model; relief model; CAM*

Въведение

Релефният макет представя пространственото устройство на минен обект чрез физическа повърхнина, върху която се различават стъпала, берми, транспортни пътища и насипища. Той е подходящ за обучение и обсъждане на проектни решения, особено когато аудиторията трябва да възприеме височинните зависимости без специализиран софтуер. Геометрията му произлиза от цифровия модел на терена, а възможността за нейното възпроизвеждане зависи от мащаба, материала и използваната машина.

Hasiuk et al. [1] и Harding et al. [2] разглеждат преобразуването на височинни данни в физически теренни модели чрез тримерен печат. Тези разработки показват необходимостта от съгласуване на цифровата разделителна способност с размерите на изделието. Wajs et al. [3] представят лазерно заснемане на открит рудник като източник на пространствени данни за неговото геометрично описание. При големи макети фрезоването на плоча или блок е подходяща технологична алтернатива, защото използва неподвижна заготовка и непосредствено отнемане на материал.

При обработване на полистирен Sandhu et al. [4] изследват влиянието на технологичните параметри върху получената повърхнина със специално изработен термопластичен инструмент. Техните режими не се пренасят непосредствено към метална фреза, но резултатите подкрепят необходимостта от пробно определяне на подаването и дълбочината. Zou [5] разглежда съвместния избор на посока на подаване и височина на остатъчните гребени при генериране на траектории за свободни повърхнини.

Целта на настоящата разработка е да се изгради и настрои трикоординатна машина с цифрово програмно управление (ЦПУ), предназначена за фрезоване на релефни минни макети, и да се свържат нейните характеристики с технологичната подготовка на модела. Приема се работната хипотеза, че портална конфигурация с голяма неподвижна маса и съгласувани координатни движения е подходяща за това приложение при ограничени сили на рязане. Оценката включва кинематичен анализ, проверка на настройките и обработване на налични данни от статично натоварване.

Геометричен модел и мащабиране

Изходният терен се описва чрез геодезически точки, хоризонтали, триъгълна мрежа или цифров модел на височините. За основното приложение повърхнината се приема като еднозначна височина над равнината XY. Така всяка хоризонтална позиция има една кота и може да бъде обработена от вертикално ориентиран инструмент. Подмолни участъци и обратни наклони изискват друга установка или повече управляеми оси. Стръмните стени допълнително ограничават достъпа на инструмента и неговия държач.

При еднакви мерни единици преобразуването от теренни координати X, Y, H към координати на макета се задава с хоризонтален мащаб m и коефициент на вертикално преувеличение k:

$$x_m = m(X - X_0)$$
$$y_m = m(Y - Y_0)$$
$$z_m = km(H - H_0) + z_b \quad (1)$$

Началото X_0, Y_0 задава положението на разглежданата област, H_0 е избрана изходна кота, а добавката в третото уравнение определя дебелината на основата. Ако геодезическите данни са в метри, а машинната програма е в милиметри, преобразуването на единиците предхожда мащабирането. Хоризонталните размери се избират така, че да останат полета за закрепване и контрол в работната зона.

При k = 1 моделът запазва геометричното подобие. Вертикално преувеличение k > 1 прави малките височинни разлики по-видими, но изменя наклоните. За съответстващи сечения тангенсът на наклона се умножава по k. Поради това мащабите трябва да бъдат означени върху готовия макет. Разглежданият модел възпроизвежда геометрията на минния обект; той не осигурява механично подобие за изпитване на устойчивостта на скални откоси.

Интерполацията на височините и сгъстяването на мрежата не създават нова информация за терена. Точността на входните данни, мащабът и минималният възпроизводим елемент трябва да бъдат съгласувани. Широчината на тесни берми и пътища се проверява след мащабиране, тъй като избраният диаметър на фрезата може да ги направи недостъпни за обработване.

Координати и инструментална траектория

Положението на върха на инструмента при идеална декартова кинематика се получава от преместванията по X, Y и Z и от постоянните монтажни отмествания. Машинната координатна система се установява чрез референтна процедура, а работната система свързва програмата с базите на заготовката. След смяна на инструмент се отчита неговата дължина, за да се запази височинната нула.

Траекторията на управляваната точка на инструмента се различава от последователността на точките по проектната повърхнина. Системата за автоматизирана технологична подготовка (CAM) трябва да отчете геометрията на фрезата, припуска и достъпа на държача. При сферичен инструмент центърът на сферата се намира по нормалата към повърхнината на разстояние, равно на радиуса. Пропускането на тази компенсация води до геометрична грешка дори при точно движение на осите.

Подаване и дълбочина на рязане

Скоростта на рязане vc и подаването на един режещ ръб fz се свързват с диаметъра D, оборотите n, броя активни ръбове z и скоростта на подаване vф:

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}, \quad f_z = \frac{v_ф}{zn} \tag{2}$$

В (2) D е в mm, n е в min^{-1}, vc е в m/min, а vф е в mm/min. При n = 18 000 min^{-1}, два ръба и vф = 2880 mm/min изчисленото подаване е 0,08 mm на ръб. Примерът показва връзката между величините и служи като разчетна отправна точка; окончателният режим се избира с пробно обработване на конкретния материал.

Осовата дълбочина определя отнемания слой, а радиалното участие и страничната стъпка определят контакта между инструмента и материала. Допустимото им съотношение зависи от вида на фрезата, коравината, отвеждането на частиците и геометрията на участъка. При навлизане в пълен канал и във вътрешен ъгъл натоварването нараства. За груба обработка се предвиждат послойно отнемане и равномерен припуск, а за довършителна обработка се ограничава страничната стъпка.

За сферична фреза с радиус R върху локално равнинна повърхнина теоретичната височина h на остатъчния гребен между съседни проходи със стъпка s се оценява при s, значително по-малка от R, чрез:

$$h \approx \frac{s^2}{8R} \tag{3}$$

При R = 3 mm и s = 1 mm се получава h ≈ 0,042 mm. Това е геометрична оценка на следите от инструмента, а не измерена грапавост. Върху наклонена или извита повърхнина действителната стъпка и местната кривина променят резултата. Намаляването на s подобрява геометричната точност, но удължава траекторията; тази зависимост е съществена при избора на CAM стратегия [5].

За големи леки макети се предвиждат експандиран и екструдиран полистирен. Разпененото ПВЦ и шперплатът позволяват по-устойчиви изделия, но изискват по-внимателен избор на натоварването. При полимерите прекалено ниското подаване спрямо оборотите увеличава триенето и може да влоши повърхнината. Материалът и режимът се оценяват по отделяните частици, следите от нагряване и запазването на дребните елементи.

Конструкция на координатната машина

Машината е изградена в портална конфигурация с неподвижна заготовка и подвижен мост. Работният обхват е приблизително 2500 × 1250 × 630 mm. Движението по X се изпълнява от напречната количка, по Y се премества мостът, а по Z се движи шпинделният

възел. По координатите с голям ход са използвани рейково-зъбни предавки с редуктори, а вертикалната ос е със сачмено-винтова двойка. Общият изглед е предвиден на фиг. 1.

Механичните възли и специализираните електронни устройства са готови изделия. Изпълнени са тяхното сглобяване, окабеляване, параметризиране и пускане като единна система. Задвижванията са със стъпкови двигатели и енкодери, които затварят локална обратна връзка в съответните управляващи устройства. Така се следи положението на ротора, но геометричните грешки и деформациите след двигателя остават извън тази обратна връзка.

Мостът е задвижван от две страни чрез Y1 и Y2. Вторият клон е конфигуриран като подчинена линейна ос A към Y, с еднакви коефициенти за преместването. Двата двигателя обслужват една технологична координата. Несъгласуването на действителните им премествания завърта моста и натоварва направляващите



Фиг. 1. Портална координатна машина за фрезоване на релефни минни макети

При разстояние B между клоновете и малки отклонения ъгълът на завъртане е:

$$\varphi \approx \frac{y_1 - y_2}{B} \quad (4)$$

Общото референтно установяване запазва предварително настроената геометрия, но само по себе си не доказва автоматично изправяне на моста. Алармата от който и да е клон трябва да предизвиква общо прекратяване на движението. Това изискване свързва синхронността със защитната логика и с геометричния контрол на машината.

Система за управление и настройване

Управлението е реализирано с Mach3 и контролер CSMIO/IP-M, свързан с компютъра чрез Ethernet. Контролерът формира сигналите за стъпка и посока, а задвижващите устройства управляват фазовите токове. Разпределението на функциите съответства на описаната от производителя организация на движението[6]. Mach3 изпълнява управляващия код и осигурява работните координати, референтните процедури и операторския интерфейс [7].

Основното захранване е 230 V. Силовата част на стъпковите задвижвания използва 48 V постоянно напрежение, а управляващата електроника и сигналните вериги използват 24 V. Шпинделът е с мощност 2,2 kW, въздушно охлаждане и честотен преобразувател. Предвидени са крайни ограничения, референтни датчици, алармени входове и два аварийни бутона.

Таблица 1. Настройки на координатните задвижвания

Ос	Импулси за mm	Скорост mm/min	Ускорение mm/s²
X	40,00	4000,2	400
Y1	139,16	4000,2	400
Y2	139,16	4000,2	400
Z	800,00	4000,2	280

Документираните настройки на задвижванията са обобщени в таблица 1. Те определят мащабирането на командите и ограниченията на движението. Динамичните възможности на стъпковия двигател зависят и от честотата на импулсите, натоварването и приведения инерционен момент [8, 9].

За коефициент N импулса на милиметър минималното командно преместване е:

$$\Delta x = \frac{1}{N} \tag{5}$$

Получават се 0,025 mm по X, приблизително 0,007186 mm за всеки клон на Y и 0,00125 mm по Z. Тези стойности описват дискретността на командата. Действителното отклонение включва хлабини, деформации, грешки на направляващите, базирането и инструмента и се определя чрез независимо измерване.

Зададената скорост 4000,2 mm/min е приблизително 66,67 mm/s. При идеален профил с постоянно ускорение изчислените време и път за ускоряване от покой са около 0,167 s и 5,56 mm за X и Y, а за Z са 0,238 s и 7,94 mm. При траектории от къси отсечки достигането на максималната скорост зависи от интерполацията и предварителното разглеждане на програмата. Избраният режим на постоянно контурно движение и 200 предварително разглеждани блока подпомага плавното следване на релефа; запазването на остри стъпала се проверява с пробен детайл.

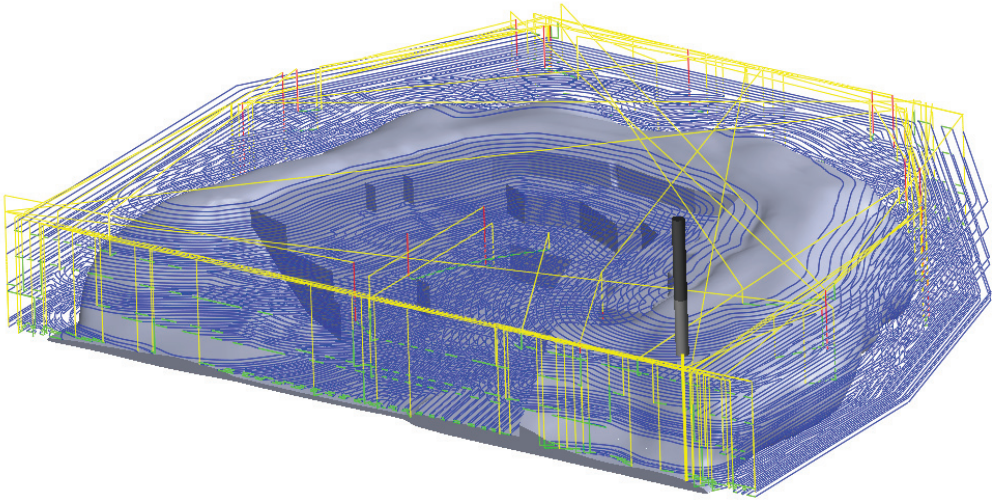
Технологична и CAM подготовка на машината за изработване на релефния модел

Технологичната подготовка започва с проверка на мерните единици, ориентацията и границите на цифровия модел. След мащабиране се избира заготовката и се създават базите. За модел, по-голям от работната зона, се предвиждат отделни модули с общ мащаб и съгласувани граници. Съединяването им изисква контрол на граничните височини и положенията на базовите елементи.

Грубата операция отнема основния обем и оставя припуск за довършване. Плоска фреза е подходяща за послойното отнемане, а сферична фреза следва плавните участъци на релефа. Траекторията може да бъде по успоредни линии, по хоризонтални нива или комбинирана. Изборът се съобразява със стръмните склонове, продължителността на преходите и натоварването на моста. При двупосочни проходи трябва да се оцени влиянието на обръщането на посоката върху следите и хлабините.

CAM симулацията на обработването трябва да показва заготовката, инструменталната траектория и получаваната повърхнина (фиг. 2). Чрез нея се проверяват остатъчният материал, проникването под проектната повърхнина, достъпът на инструмента и безопасните

преходи. Различното означаване на работните и бързите движения улеснява проверката на навлизането, повдигането и връщането между проходите.



Фиг. 2. CAM симулация на траекторията на режещия инструмент при фрезоване на релефен минен модел

Постпроцесорът преобразува траекторията в код, съвместим с Mach3. Преди реалното рязане се проверяват крайните координати, работната нула, корекцията на дължината и безопасната височина. Движението без контакт със заготовката е последваща проверка на реалната установка. CAM симулацията оценява геометрията на процеса, а поведението под товар се установява при пробно фрезоване.

Заключение

Изградена е портална трикоординатна машина с работен обхват приблизително 2500 × 1250 × 630 mm, подходящ за големи релефни минни макети. Практическият принос е интегрирането и настройването на механичните възли, координатните задвижвания и управлението с Mach3 и CSMIO/IP-M. Двустранното задвижване на моста изисква еднакво мащабиране на Y1 и Y2, обща реакция при аларма и контрол на геометрията.

Съпоставянето на мащаба, диаметъра на инструмента и страничната стъпка определя кои елементи от цифровия терен могат да бъдат възпроизведени. Настройките осигуряват задаване на скорост 4000,2 mm/min, но времето за обработване зависи от ускоренията и формата на траекторията. Статичните данни насочват към ограничено изнасяне на шпинделния възел и внимателен избор на дълбочината и подаването.

Машината създава техническа основа за изработване на учебни и демонстрационни макети на кариери и открити рудници. Следващият етап е измерване на двупосочната точност и повторяемостта и проверка на контролни височини върху релефен детайл. Така може да се установи приложимостта на конкретната CAM стратегия и изпълнението на изискването за размерно отклонение до 2 mm.

Литература

[1] Franciszek J. Hasiuk a, Chris Harding b, Alex Raymond Renner c, Eliot Winer (2017). TouchTerrain: A simple web-tool for creating 3D-printable topographic models. Computers & Geosciences, 109, 25–31. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.07.005

[2] Harding, C., Hasiuk, F., & Wood, A. (2021). TouchTerrain—3D printable terrain models. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(3), 108. DOI: 10.3390/ijgi10030108

[3] Jaroslaw Wajs , Paweł Trybała, Justyna Górniak-Zimroz, Joanna Krupa-Kurzynowska and Damian Kasza. (2021). Modern solution for fast and accurate inventorization of open-pit mines by the active remote sensing technique—Case study of Mikoszów granite mine (Lower Silesia, SW Poland). Energies, 14(20), 6853. DOI: 10.3390/en14206853

[4] Kamalpreet Sandhu, Gurminder Singh, Sunpreet Singh, Chander Prakash, Seeram Ramakrishna , Raman Kumar , Grzegorz Królczyk , andCatalinI. Pruncu (2020). Surface characteristics of machined polystyrene with 3D printed thermoplastic tool. Materials, 13(12), 2729. DOI: 10.3390/ma13122729

[5] Zou, Q. (2021). Length-optimal tool path planning for freeform surfaces with preferred feed directions based on Poisson formulation. Computer-Aided Design, 139, 103072. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103072

[6] CS-Lab. (n.d.). CSMIO/IP-M user manual (Version 3). https://en.cs-lab.eu/wp-content/uploads/2016/06/user_manual_csmioipm_en_v3.pdf

[7] ArtSoft. (n.d.). Using Mach3Mill (Rev. 1.84-A2). https://www.machsupport.com/ftp/Docs/Mach3Mill_1.84.pdf

АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЕНТИЛАЦИЯТА В ПОДЗЕМНИ РУДНИЦИ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА БЕЗОПАСНОСТ И ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТ – СЛУЧАЙ НА РУДНИК „ЧЕЛОПЕЧ"

Георги Станчев
ДПМ Металс, e-mail: georgi.stanchev@dpmmetals.com

AN APPROACH TO AUTOMATED VENTILATION CONTROL IN UNDERGROUND MINES FOR ENSURING SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY – A CASE STUDY OF THE CHELOPECH MINE

Georgi Stanchev
DPM Metals, e-mail: georgi.stanchev@dpmmetals.com

ABSTRACT
An automated ventilation control system has been implemented at the Chelopech underground mine to enhance personnel safety and energy efficiency. The system integrates a personnel and equipment localization solution with a SCADA platform and PLC-based control logic to determine when ventilation is required in a given mine zone. Each ventilation fan can operate in three control modes — automatic, based on real-time localization data with configurable activation and post-ventilation delays; manual, through the SCADA application from a remote control center; and local, via a physical button on the fan's starter panel. This layered approach ensures reliable ventilation coverage in active zones while reducing unnecessary fan operation elsewhere, offering a flexible and energy-efficient solution applicable to other underground mining sites with similar characteristics.

Мотивация и цел на изследването

Осигуряването на подходящ въздухообмен в подземните минни изработки е един от основните фактори, определящи безопасността на труда и здравето на персонала. Недостатъчната вентилация води до натрупване на вредни газове, прах и повишена температура, докато прекомерната, постоянно работеща вентилация е свързана със значителен и често неоправдан разход на електроенергия [1], [2]. Тъй като енергийните разходи за вентилация формират съществен дял от общите производствени разходи в подземния добив, оптимизирането на режима на работа на вентилационните агрегати е от значителен практически интерес.
Класическият подход, при който вентилационните вентилатори работят непрекъснато във всички зони независимо от реалната необходимост, все повече отстъпва място на стратегии за динамично, „демандно" управление — т.нар. вентилация по потребност (Ventilation on Demand, VOD) [3], [4], [5]. Такъв подход изисква надеждна информация за присъствието на персонал и техника в реално време, което е станало практически осъществимо благодарение на развитието на системи за локализация в подземни условия, базирани на технологии като RFID, UWB и Wi-Fi [6], [7].
Мотивацията за настоящото изследване произтича от необходимостта да се съчетаят два, на пръв поглед противоположни, приоритета в практиката на Рудник „Челопеч" — осигуряване на надеждна и своевременна вентилация в зоните с активност на персонал и техника, от една

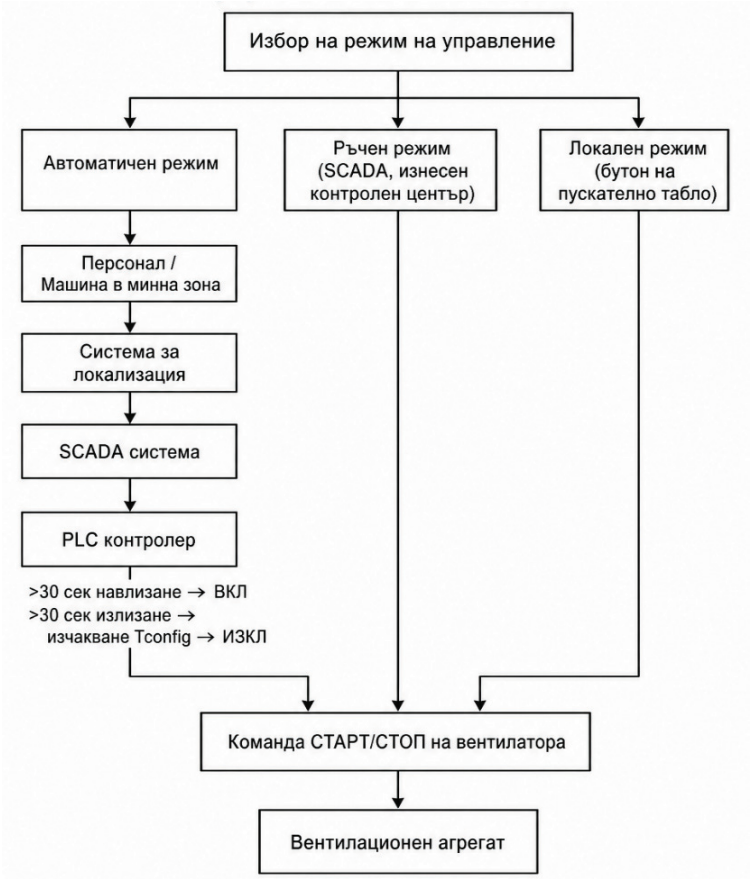
страна, и намаляване на енергийните разходи, свързани с ненужна работа на вентилационните агрегати в зони без такава активност, от друга.
Целта на изследването е да се представи реализиран в Рудник „Челопеч" подход за автоматизирано управление на вентилацията, който съчетава данни от система за локализация на персонал и техника с логика за управление, реализирана чрез SCADA и PLC, допълнена с възможност за ръчно и локално управление на вентилационните агрегати. Изследването си поставя следните конкретни задачи:

- Описание на архитектурата и принципа на действие на реализираната система за управление;
- Анализ на постигнатите резултати по отношение на безопасността на персонала и енергийната ефективност;
- Оценка на приложимостта на подхода за други подземни рудни обекти със сходни характеристики.

Архитектура на системата за управление

Реализираната система за автоматизирано управление на вентилацията в Рудник „Челопеч" представлява многослойно решение, изградено върху интеграцията между три основни функционални нива: ниво на локализация, ниво на супервизорно управление (SCADA) и изпълнително ниво (PLC), допълнени от изпълнителните механизми на самите вентилационни агрегати.
Ниво на локализация. Присъствието на персонал и техника в отделните минни зони се определя чрез система за локализация в реално време, работеща на принципа на позиционни маркери (тагове), носени от персонала и монтирани на минната техника, и стационарни приемни точки, разположени по протежение на минните изработки. Подобни решения за подземна локализация са широко застъпени в съвременната минна индустрия и се основават на технологии като RFID, UWB или Wi-Fi [6], [7]. Системата непрекъснато следи местоположението на всеки обект и генерира данни за влизане и излизане от предварително дефинирани зони.
Ниво на супервизорно управление (SCADA). Данните от системата за локализация се обработват от SCADA системата, която визуализира присъствието по зони в реално време, съхранява конфигурируеми параметри на управление — прагове за активиране и продължителност на периода за доизветряване, предоставя интерфейс на инженера по вентилация за настройка на тези параметри според спецификата на съответната зона, архивира историческите данни за анализ и одит, и позволява ръчно управление на вентилаторите от изнесен контролен център.
Изпълнително ниво (PLC). Контролерите получават от SCADA актуалните статуси на зоните и конфигурираните времеви параметри и на тяхна база формират директни команди за включване/изключване на вентилаторите, с локална логика за безопасност, независима от временна загуба на връзка със SCADA системата.
Режими на работа на вентилатора. Всеки агрегат може да функционира в три режима: автоматичен — по описаната по-долу логика, на база данни от системата за локализация; ръчен — дистанционно чрез SCADA приложението от изнесения контролен център, по преценка на персонала; локален — чрез физически бутон на пускателното табло, използван основно при монтаж, обслужване или тестване.
Алгоритъм в автоматичен режим: при регистрирано навлизане в зона за период над 30 секунди, вентилаторът се активира; при излизане над 30 секунди стартира отброяване на конфигурируем период за доизветряване (по подразбиране 30 минути); ако не последва ново навлизане, вентилаторът се изключва, а при ново навлизане отброяването се прекратява. Тази логика избягва едновременно преждевременно прекъсване и ненужно продължителна работа на агрегатите, като конфигурируемостта позволява адаптиране към спецификата на всяка

зона, в съответствие с добрите практики за оптимизирано управление на вентилационни системи [8], [9].



Фиг. 1. Блок-схема на архитектурата

Ефекти от внедряването на системата

Внедряването на описаната система за автоматизирано управление на вентилацията в Рудник „Челопеч" позволява постигане на значително по-ефективно съответствие между реалната необходимост от проветряване на минните зони и действителната работа на вентилационните агрегати, в сравнение с традиционния подход на непрекъсната вентилация на всички зони независимо от наличието на персонал или техника.

Ефекти върху енергийната ефективност — пример за един вентилатор. За илюстрация на реалния ефект от прилагания алгоритъм е извършен анализ на данните от статус-тага на системата за локализация за един представителен вентилатор за период от 24 часа (17–18.09.2026 г.), в който сигнал „ON" отговаря на регистрирано присъствие на персонал/техника в зоната, обслужвана от съответния вентилатор, а „OFF" — на липса на такова присъствие. Приложена е текущата конфигурация на системата — активиране на вентилатора при непрекъснато присъствие над 30 секунди и деактивиране след период на доизветряване от 30 минути от момента на напускане на зоната, при условие че в рамките на този период не е регистрирано ново навлизане. Разгледаният вентилатор е с номинално напрежение 1000 V и консумиран ток 21 A, което съответства на консумирана мощност от приблизително 21 kW.

Резултатите от анализа на този конкретен вентилатор за наблюдавания 24-часов период са обобщени в Таблица 1 и Таблица 2.

Таблица 1. Обобщени показатели за работата на вентилатора при демандно управление (пример за един вентилатор, 24-часов период)

Показател	Стойност
Наблюдаван период	24 h
Брой цикли ВКЛ/ИЗКЛ на вентилатора	9
Общо време на работа на вентилатора	16.38 h (68.4% от периода)
Консумирана енергия при демандно управление	344.0 kWh
Консумирана енергия при непрекъсната работа (хипотетично)	503.2 kWh
Спестена енергия	159.2 kWh
Процент намаление на енергията	31.60%

Таблица 2. Отделни цикли на работа на вентилатора за наблюдавания период

№	Старт	Стоп	Време в минути	Енергия kWh
1	9/17/2026 11:27	9/17/2026 14:26	178.4	62.44
2	9/17/2026 17:19	9/17/2026 18:32	72.4	25.34
3	9/17/2026 18:36	9/17/2026 19:50	74.8	26.18
4	9/17/2026 20:31	9/17/2026 21:07	36	12.6
5	9/17/2026 21:59	9/17/2026 23:27	87.8	30.73
6	9/18/2026 1:37	9/18/2026 5:42	245.4	85.89
7	9/18/2026 5:49	9/18/2026 7:05	76.7	26.85
8	9/18/2026 7:38	9/18/2026 9:22	104.4	36.54
9	9/18/2026 9:58	9/18/2026 11:45	106.9	37.42

Обобщение и изводи

Представеният в настоящия доклад подход за автоматизирано управление на вентилацията в Рудник „Челопеч" демонстрира практическа реализация на принципите на вентилация по потребност (Ventilation on Demand), базирана на интеграция между система за локализация, SCADA и PLC. Основните изводи могат да бъдат обобщени по следния начин:

- Съчетаване на безопасност и енергийна ефективност. Автоматичното активиране на вентилацията при навлизане в зона и изключването след конфигурируем период за доизветряване гарантират проветряване в заетите зони, като едновременно намаляват ненужната работа на агрегатите в незаетите зони, в съответствие с тенденциите в литературата [3], [4], [5].
- Гъвкавост чрез конфигурируемост. Настройването на периода за доизветряване от SCADA според спецификата на всяка зона осигурява по-прецизно съответствие между реалните нужди и работата на агрегатите, в сравнение с фиксирани универсални прагове [8], [9].
- Надеждност чрез многослойно управление. Наличието на автоматичен, ръчен и локален режим осигурява необходимата резервираност и възможност за пряка намеса на персонала при извънредни ситуации или отказ на автоматичната логика.
- Приложимост в по-широк контекст. Подходът, базиран на общи принципи и технологии за локализация и SCADA/PLC интеграция, е потенциално приложим и в други подземни рудни обекти със сходни характеристики.

Представеният количествен анализ (Таблица 3) обхваща само един от над 30 вентилатора в Рудник „Челопеч", имащи възможност да работят в автоматичен режим, и следва да се

разглежда единствено като илюстративен пример за постигнатия ефект на ниво отделен агрегат. При отчитане на общия брой вентилатори с активен автоматичен режим, дори консервативна екстраполация на наблюдаваната икономия предполага съществен кумулативен потенциал за намаление на енергийната консумация на ниво целия рудник, което представлява насока за бъдещо количествено изследване въз основа на данни от по-голям брой агрегати и за по-дълъг период на наблюдение.

Таблица 3. Съпоставка на консумираната енергия при демандно управление спрямо непрекъсната работа (пример за един вентилатор, 21 kW)

Период	Непрекъсната работа (kWh)	Демандно управление (kWh)	Спестена енергия (kWh)	% спестяване
Денонощие	504	344	160	31.70%
Месец (30 дни)	15 120.0	10 320.0	4 800.0	31.70%
Година (365 дни)	183 960.0	125 560.0	58 400.0	31.70%

Литература

[1] Council Directive 92/104/EEC on the minimum requirements for improving safety and health of workers in surface and underground mineral-extracting industries. Official Journal of the European Communities, 1992.
[2] Изпълнителна агенция „Главна инспекция по труда". Наредба № 8 за микроклимата в подземните рудници.
[3] Sjöström, S., Klintenäs, E., Johansson, P., Nyqvist, J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. International Journal of Mining Science and Technology, 30(4), 533–539, 2020.
[4] A cyber-physical system approach for enabling ventilation on-demand in an underground mining site. Procedia CIRP, 97, 487–490, 2021.
[5] Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. Applied Energy, 146, 65–73, 2015.
[6] Battulwar, R., Zare, M., Seamons, J., Sattarvand, J. Applications of Wireless Indoor Positioning Systems and Technologies in Underground Mining: A Review. Mining, Metallurgy & Exploration, 38, 2307–2322, 2021.
[7] Cavur, M., Demir, E. RSSI-based hybrid algorithm for real-time tracking in underground mining by using RFID technology. Physical Communication, 55, 101863, 2022.
[8] Hyla, M. Integrated control system of main fans station for deep mines ventilation. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 53(4), 16–21, 2015.
[9] Witrant, E. et al. Wireless ventilation control for large-scale systems: The mining industrial case. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010.

АВТОМАТИЗИРАНА СИСТЕМА ЗА ПОЗИЦИОНИРАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАНЕЛ СПРЯМО СЛЪНЦЕТО – ПРОЕКТИРАНЕ И СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ

асистент Анастасия Величкова, гл. ас. д-р Володя Джаров
МГУ „Св. Иван Рилски“, Минно-електромеханичен факултет, катедра „Електроенергетика и автоматика“

AUTOMATED SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PANEL POSITIONING RELATIVE TO THE SUN – DESIGN AND SIMULATION STUDY

Assistant Anastasiya Velichkova, Chief Assistant Dr. Volodya Dzharov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Faculty of Mining Electromechanics, Department of Electrical Power Engineering and Automation
e-mail: a.velichkova@mgu.bg; volodya.dzharov@mgu.bg

ABSTRACT
This paper presents the design and simulation study of an automated single-axis system for positioning a photovoltaic panel relative to the Sun. The system is based on an Arduino Uno microcontroller, two light-dependent resistors (LDR), a 28BYJ-48 stepper motor and a ULN2003 driver. A closed-loop control algorithm based on the difference between the LDR signals is developed. A mathematical model and simulation methodology are presented. The influence of the light-source angle and sensitivity threshold on positioning accuracy is investigated. The results demonstrate the feasibility of the proposed low-cost tracking system.
Keywords: *photovoltaic panel, solar tracker, solar tracking, Arduino Uno, LDR, 28BYJ-48, ULN2003, automated control.*

1.Увод

Фотоволтаичните панели преобразуват слънчевата енергия в електрическа, като получената мощност зависи от интензитета на слънчевото излъчване, температурата, условията на засенчване и ориентацията на панела спрямо падащото лъчение [1, 2]. При изменение на положението на Слънцето през денонощието се променя и ъгълът на падане на лъчите върху активната повърхност на панела.

За поддържане на благоприятна ориентация се използват системи за слънчево проследяване – едноосови и двуосови, реализирани с различни принципи на управление и задвижване [3, 4, 5]. При активното проследяване могат да се използват светлочувствителни сензори, чиито сигнали се сравняват за определяне на посоката на необходимата корекция [5, 8]. Едноосовите системи са подходящи за лабораторни и малогабаритни приложения поради сравнително простата си конструкция [6, 7].

В настоящата разработка е разгледана автоматизирана едноосова система за позициониране на малогабаритен фотоволтаичен панел. Управлението е реализирано концептуално чрез Arduino Uno, два LDR сензора, стъпков двигател 28BYJ-48 и драйвер ULN2003. Положението на панела се коригира в зависимост от разликата между сигналите на двата сензора.

Целта на разработката е проектиране и симулационно изследване на автоматизирана едноосова система за позициониране на фотоволтаичен панел спрямо посоката на

максимална осветеност. За постигане на поставената цел са формулирани следните основни задачи:
анализ на принципите и конфигурациите на системите за слънчево проследяване и избор на подходящ принцип;
избор на електронни и електромеханични компоненти и разработване на структурна схема;
разработване на математически модел и алгоритъм за управление със затворен контур;
провеждане на симулационно изследване на позиционирането и влиянието на прага на чувствителност.

2. Анализ на системите за слънчево проследяване

Системите за слънчево проследяване представляват електромеханични системи, предназначени да изменят ориентацията на фотоволтаичния панел в зависимост от изменението на положението на Слънцето. Основната цел на проследяването е да се поддържа благоприятен ъгъл между слънчевото лъчение и активната повърхност на фотоволтаичния панел. В зависимост от броя на степените на свобода системите за проследяване могат да бъдат разделени на едноосови и двуосови [5, 6, 9].

При едноосовите системи панелът извършва въртеливо движение около една ос. Този тип системи се характеризират с по-опростена механична конструкция и по-малък брой задвижващи елементи в сравнение с двуосовите системи. Съществуват различни конфигурации на едноосови тракери в зависимост от ориентацията на оста на въртене – хоризонтални, вертикални и наклонени системи, както и системи с ос, ориентирана спрямо земната ос [6, 7].

2.1. Едноосови системи за проследяване.

При хоризонталните едноосови системи (HSAT – Horizontal Single-Axis Tracker) оста на въртене е разположена приблизително хоризонтално спрямо земната повърхност. При вертикалните едноосови системи (VSAT – Vertical Single-Axis Tracker) оста е разположена вертикално. Съществуват и наклонени едноосови системи, при които оста на въртене е разположена под определен ъгъл спрямо хоризонталната или вертикалната равнина. Специален случай представляват системите, при които оста на въртене е ориентирана успоредно на земната ос (PSAT) [6, 7].

Изборът на конкретна конфигурация зависи от географското положение на фотоволтаичната система, необходимия диапазон на движение, механичната конструкция и изискванията към точността на проследяване. Изследванията върху едноосовото проследяване показват, че ориентацията на оста оказва влияние върху оптичното представяне и количеството слънчева енергия, което може да бъде усвоено от фотоволтаичния панел [6, 7].

2.2. Методи за определяне положението на Слънцето.

В зависимост от начина на определяне на необходимото положение на фотоволтаичния панел системите за слънчево проследяване могат да използват различни принципи на управление. Един от основните подходи е активното проследяване чрез светлочувствителни сензори. При него се използват два или повече сензора, разположени така, че разликата между техните сигнали да определя посоката на необходимото движение.

При използване на два LDR сензора управляващата система сравнява измерените стойности на осветеността. Когато двата сигнала се различават, се формира грешка, която се използва за определяне на посоката на движение на задвижващия механизъм. При достигане на приблизително равни стойности на сигналите движението се прекратява. Този принцип

позволява реализация на система със затворен контур, при която управляващото въздействие се определя от текущото състояние на системата [5, 8].

Друг подход е астрономическото или хронологично управление, при което положението на Слънцето се определя чрез математически модел на неговото видимо движение. За изчисляването на необходимото положение могат да бъдат използвани информация за датата, часа и географските координати на системата. Предимство на този метод е, че не зависи пряко от измерването на осветеността, но изисква по-сложен алгоритъм и точна информация за времето и местоположението.

За малки лабораторни и прототипни системи използването на LDR сензори представлява сравнително проста реализация на обратната връзка. При подходящо разположение на сензорите може да се получи управляващ сигнал, пропорционален на разликата в осветеността от двете страни на сензорната система [5, 8].

2.3. Избор на принцип за настоящата разработка

За разработваната система е избран едноосов принцип на проследяване със светлочувствителни сензори и управление със затворен контур. Изборът е свързан с необходимостта от реализация на сравнително проста конструкция, подходяща за лабораторен модел и последващо експериментално изследване.

За определяне на посоката на необходимото движение се предвижда използването на два LDR сензора. Сигналите от тях се обработват от микроконтролер Arduino Uno, който определя посоката на въртене на стъпковия двигател. За задвижване е избран стъпков двигател 28BYJ-48, управляван посредством драйвер ULN2003.

Избраната структура позволява да се реализира система, при която движението на фотоволтаичния панел се извършва само при наличие на достатъчно голяма разлика между сигналите на двата сензора. По този начин се ограничава излишното движение на задвижващия механизъм и се създава възможност за въвеждане на праг на чувствителност в алгоритъма за управление.

3. Проектиране и избор на компоненти на системата.

Разработената система включва сензорна, управляваща и изпълнителна част: два LDR сензора, Arduino Uno, драйвер ULN2003 и стъпков двигател 28BYJ-48.

3.1. Микроконтролер Arduino Uno

Arduino Uno, базиран на ATmega328P, приема сигналите от LDR сензорите, сравнява ги и формира управляващите сигнали към драйвера [5, 8].

3.2. Светлочувствителни сензори

Двата LDR се разполагат симетрично спрямо разделител и се свързват към аналоговите входове на Arduino Uno. За всеки сензор е предвиден резистор 10 kΩ, образуващ делител на напрежение [5, 8].

3.3. Стъпков двигател 28BYJ-48 и драйвер ULN2003

За задвижване на механизма е избран стъпков двигател 28BYJ-48 с номинално захранващо напрежение 5 V и вътрешен редуктор. Управлението му се осъществява чрез драйвер ULN2003, свързан към изходите на Arduino Uno. Чрез последователността и броя на управляващите импулси се задават посоката и величината на ъгловото преместване [10].

3.4. Фотоволтаичен панел

За лабораторния модел е избран панел YSL99X69-5 с размери 99×69 mm, номинално напрежение 5 V, ток 160 mA и мощност 0,8 W. Панелът се монтира върху подвижната част на механизма.

На базата на избраните компоненти е формирана структурната схема на системата. Сензорните сигнали се подават към Arduino Uno, който управлява чрез ULN2003 стъпковия двигател, свързан механично с фотоволтаичния панел. Схемата на системата е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Структурна схема на автоматизираната система за позициониране на фотоволтаичния панел

4. Математически модел и алгоритъм за управление

Управлението на положението на фотоволтаичния панел се реализира чрез сравняване на сигналите от двата LDR сензора. Разликата между сигналите определя грешката на позициониране и посоката на необходимото ъглово преместване.

4.1. Математически модел

Сигналите от двата LDR сензора бъдат означени с S_1 и S_2. Сигналът за грешка се определя като:

$$e = S_1 - S_2 \tag{1}$$

При $e > 0$се приема движение в едната посока, а при $e < 0$– в противоположната. За предотвратяване на чести корекции при малка разлика между сигналите се въвежда зона на нечувствителност:

$$|e| \leq e_0 \tag{2}$$

където e_0е зададеният праг на чувствителност. При изпълнение на условие (2) двигателят остава неподвижен, а извън зоната се извършва корекция на положението.

4.2. Ъглово положение на панела.

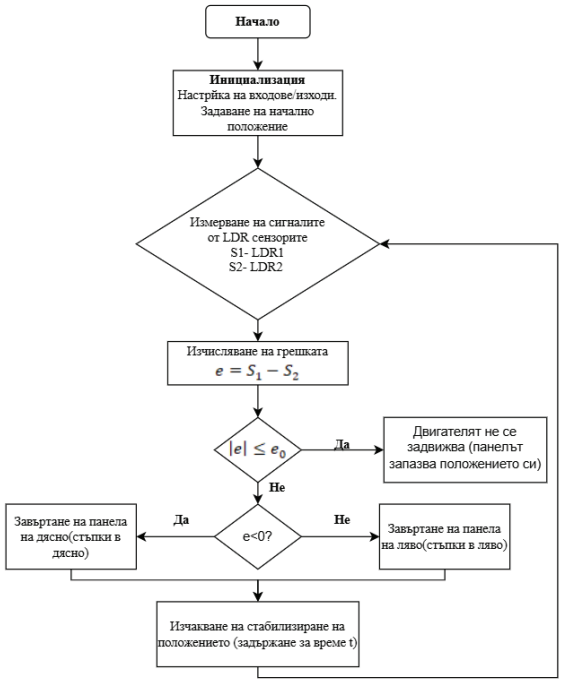
Ъгловото положение се изменя чрез стъпковия двигател 28BYJ-48. Ако $\Delta\theta$е ъгловото преместване при една стъпка, а Nе броят на изпълнените стъпки, положението на панела се определя от:

$$\theta = N\Delta\theta \tag{3}$$

Посоката на въртене се определя от знака на грешката. Чрез последователно измерване на S_1 и S_2 и подаване на необходимия брой стъпки се реализира затворен контур за позициониране.

4.3. Алгоритъм за управление.

Алгоритъмът се основава на циклично измерване на сигналите от двата LDR сензора, изчисляване на грешката и сравняването ѝ с предварително зададения праг на чувствителност (фиг. 2).



Фиг. 2. Блок-схема на алгоритъма за управление на положението на фотоволтаичния панел

При $|\ e\ | \leq e_0$ двигателят остава неподвижен. При $e > e_0$ или $e < -e_0$ панелът се завърта в съответната посока. След изпълнение на корекцията измерването се повтаря, с което се реализира затворен контур на управление.

5. Симулационно изследване и анализ на резултатите.

За оценка на разработения алгоритъм е проведено симулационно изследване на процеса на позициониране на фотоволтаичния панел. Изследвано е следването на изменението на посоката на светлинния източник и влиянието на прага на чувствителност върху позиционирането. В симулационния модел началното положение на панела е $\theta = 0°$, а ъгълът на светлинния източник αсе изменя в диапазона от $-40°$до $+40°$. За описание на сигналите от двата LDR сензора е използван нормализиран модел:

$$S_1 = \frac{1+\sin(\alpha-\theta)}{2} \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{1-\sin(\alpha-\theta)}{2} \quad (5)$$

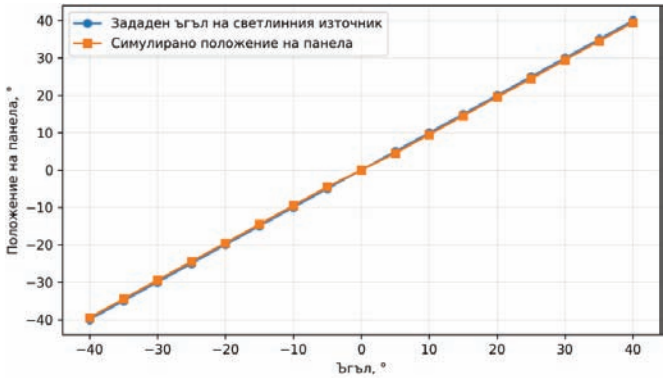
където αе ъгълът на светлинния източник, а θе текущото ъглово положение на панела. Нормализираният сигнал за грешка се определя като:

$$e = \frac{S_1-S_2}{S_1+S_2} \quad (6)$$

При приетия модел се получава:

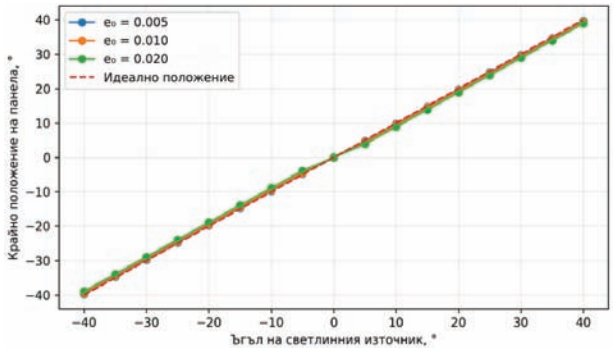
$$e=\sin(\alpha-\theta)$$

В симулацията е използвана ъглова стъпка, съответстваща на 28BYJ-48. При приетите характеристики на двигателя и редуктора тя е приблизително $0,0879°$. За основното изследване е зададен праг на чувствителност $e_0 = 0{,}01$.



Фиг. 3. Сравнение между ъгъла на светлинния източник и симулираното положение на фотоволтаичния панел

Резултатите показват, че панелът следва изменението на посоката на светлинния източник в целия изследван диапазон. При зададените параметри остатъчната ъглова грешка е приблизително $\pm 0,5°$, като се определя основно от дискретната стъпка на двигателя.
За оценка на влиянието на прага на чувствителност е проведено допълнително симулационно изследване при различни стойности на e_0.



Фиг. 4. Влияние на прага на чувствителност върху крайното положение на панела

Намаляването на прага позволява по-малка остатъчна грешка, но води до по-голям брой коригиращи стъпки. При по-голям праг корекцията се прекратява при по-голяма остатъчна грешка. Следователно изборът на e_0 представлява компромис между точността на позициониране и честотата на управляващите корекции.

6. Заключение

В настоящата работа е разработена и симулационно изследвана автоматизирана едноосова система за позициониране на малогабаритен фотоволтаичен панел спрямо посоката на максимална осветеност. Системата включва два LDR сензора, микроконтролер Arduino Uno, драйвер ULN2003 и стъпков двигател 28BYJ-48. Разработеният алгоритъм със затворен контур определя посоката на корекция чрез разликата между сигналите на сензорите и използва праг на чувствителност за ограничаване на излишните корекции. Симулационните резултати показват следване на изменението на светлинната посока с остатъчна ъглова грешка около ±0,5° при зададените параметри. Изследването на прага

показва компромис между точността на позициониране и честотата на корекциите. Разработената система представлява основа за последващо изграждане на лабораторен модел и експериментална проверка.

Литература

[1] Messenger, R. A., Ventre, J. *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press.

[2] Duffie, J. A., Beckman, W. A., Blair, N. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. 5th ed. Wiley, 2020. DOI: 10.1002/9781119540328.

[3] Nwanyanwu, C. J., Dioha, M. O., Sholanke, O. S. Design, Construction and Test of a Solar Tracking System Using Photo Sensor. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2017, Vol. 6, Issue 3. DOI: 10.17577/IJERTV6IS030212.

[4] Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press.

[5] Li, Z., Liu, X., Tang, R. Optical Performance of Vertical Single-Axis Tracked Solar Panels. *Renewable Energy*, 2011, Vol. 36, No. 1, pp. 64–68. DOI: 10.1016/j.renene.2010.05.020.

[6] Li, G., Tang, R., Zhong, H. Optical Performance of Horizontal Single-Axis Tracked Solar Panels. *Energy Procedia*, 2012, Vol. 16, pp. 1744–1752. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.01.270.

[7] Osman, I. S., Almadani, I. K., Hariri, N. G., Maatallah, T. S. Experimental Investigation and Comparison of the Net Energy Yield Using Control-Based Solar Tracking Systems. *International Journal of Photoenergy*, 2022, Article 7715214. DOI: 10.1155/2022/7715214.

[8] Liu, Y., Xiao, Z., Huang, Y., Ma, Y., Yang, Z. Design and Analysis of a Quasi-Biaxial Solar Tracker. *Energies*, 2025, Vol. 18, Article 1554.

[9] Sadeghi, R., Parenti, M., Memme, S., Fossa, M., Morchio, S. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. *Energies*, 2025, Vol. 18, No. 10, Article 2553. DOI: 10.3390/en18102553.

[10] Kostov, G., Alexandrov, R. Structure of an Electric Drive System with a Switched Reluctance Motor. Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Vol. 67, 2024, p. 228.

ОЦЕНКА ЗА ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРОКОНСУМАТОРИТЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В ТОЧКАТА ЗА ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ

Евтим Кърцелин, Георги Велев, Красимир Иванов
Технически университет – Габрово, Факултет Електротехника и електроника
5300 Габрово, ул. "Х. Димитър" №4, България, g_velev@tugab.bg

РЕЗЮМЕ
В статията е направена сравнителна оценка на прилаганите методи за определяне на влиянието на електрическите консуматори върху качеството на електрическата енергия в точката на присъединяване.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ELECTRICAL LOADS ON POWER QUALITY AT THE POINT OF INTERCONNECTION

Evtim Kartselin, Geogi Velev, Krasimir Ivanov,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Faculty of Electrical Engineering and Electronics
5300 Gabrovo, 4 H. Dimitar str.

ABSTRACT
The paper inhere aims to make a comparative evaluation of the applied in practice methods for estimating the influence of electrical consumers on electrical energy quality in points of interconnection.
Keywords: *electromagnetic compatibility, electrical energy quality, non-sinusoidality, asymmetry, voltage diversion*

ВЪВЕДЕНИЕ

Поради някой свои безспорни предимства електрическата енергия намира приложение днес във всички области на човешката дейност: промишленост, информационни технологии, медицина, военна област, административно управление, научни изследвания и др. Мощността на отделни консуматори се изменя от 1 W до няколко десетки MW.

Без да е нов, проблемът за качеството на електрическата енергия и електромагнитната съвместимост става все по-актуален в последно време по следните причини:

- прогресът в областта на силовата електроника, предизвиква бързо развитие на мощни преобразуватели на електрическа енергия, които удовлетворяват и най-сложните изисквания на съвременните технологични процеси, на производствени машини и механизми. Заедно с постигането на високо качество в протичането на технологичните процеси, в управлението на различни производствени машини и механизми, съвременните преобразователни устройства се явяват и основна причина за влошаване качествените показатели на тока и напрежението в електроснабдителните системи;
- много от микропроцесорните системи и уредби работят в мрежи, свързани с информационното осигуряване и управление на изключително сложни и отговорни обекти включително и на системи и обекти, свързани с националната сигурност и безопасност на страната.

Специфична особеност на всички електропотребители се явява обстоятелството, че чрез разпределителната мрежа са свързани помежду си и следователно взаимно си влияят. Това

взаимно влияние между електропотребителите, свързани към една електрическа мрежа, се нарича електромагнитно смущение. Една от актуалните задачи на съвременната електроенергетика е свързана с измерване и ограничаване на електромагнитните смущения до ниво, при което не се нарушава нормалната работа на всички електропотребители [1].

Осигуряването на условия за нормална работа на всички електропотребители чрез контрол на качеството на електрическата енергия се нарича електромагнитна съвместимост. Ето защо терминът „качество на електрическата енергия" става един от ключовите в областта на електроенергетиката след 1980 г. на миналия век.

Показателите за качество на електрическата енергия се определят от стандарти [1-3]:

- ✓ Отменението стандарт БДС 10694-80. Електрическа енергия - Норми за показатели за качеството на електрическата енергия при приемниците.
- ✓ Основният стандарт за качество на електрическата енергия в България и Европейския съюз BDS EN 50160: 2023 - Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените електрически мрежи.
- ✓ БДС EN IEC 61000-2-4:2024 - Електромагнитна съвместимост (EMC). Част 2-4: Околна среда. Нива на съвместимост в електроразпределителни системи в промишлени обекти по отношение на нискочестотни кондуктивни смущения.

1. Причини за нарушаване на електромагнитната съвместимост.

Развитието на съвременните системи за електроснабдяване /СЕС/ е съпроводено със следните тенденции:

- Внедряване на принципно ново електрообзавеждане, което е възможно да се раздели условно на две групи: *чувствително към смущения* и *генериращо смущения*.

Към електрообзавеждане /ЕО/, чувствително към смущения са отнася електронната микропроцесорна техника, която са явява основен елемент на техническите средства за автоматизация, на изчислителните машини и на информационните системи.

Към ЕО, генериращо смущения, се отнасят елементите на силовата полупроводникова техника, мощни нелинейни и несиметрични преобразуватели, бързоизменящи се електрически товари и ударно натоварване; електрически уредби с елегазови и вакумни комутационни контактори [2].

- Нарастване мощността на ЕО от втори клас обуславя съществено увеличаване на нивото на електромагнитните смущения в електроснабдителните мрежи на промишлените предприятия и на енергийната система. Тези смущения в зависимост от техния характер, интензивност и продължителност, оказват неблагоприятно влияние на силовите електрически уредби, системите за автоматика, телемеханиката, каналите за връзка и релейна защита.
- Наличие на електрическа връзка между всички елементи на системата за електрозахранване - смущенията от страна на ниското напрежение проникват в мрежи средно и високо напрежение на ЕРМ, помощните мрежи на други потребители и оказват влияние на цялото ЕО. При тези и други обстоятелства генерираните и разпространяващи се електромагнитни смущения водят до възникването на проблеми с електромагнитната съвместимост.

Нарушаването на ЕМС води до следните неблагоприятни последици:

- ✓ повреждане на техническите средства за осигуряване на безопасност и защита на хората;
- ✓ възможности за поразяване на обслужващия персонал;
- ✓ влошаване на електромагнитната и екологичната обстановка;
- ✓ влошаване качеството на електроенергията;

- ✓ функционални нарушения, свързани с откази и съкращаване на срока за експлоатация на електрообзавеждането, бракуване на произвеждана продукция, аварии, лъжливо сработване на защити, автоматиката и т.н.
- ✓ влошаване на технико-икономическите показатели в работата на цялото промишлено предприятие.

Една от причините за влошаване на ЕМС се явяват електромагнитните смущения.

Електромагнитните смущения по природа са случайни електромагнитни въздействия, които са способни да предизвикат нарушения във функционирането, отказ или разрушаване на електрообзавеждането. Електромагнитните смущения се проявяват като ток, напрежение или в резултат на действие на електромагнитни полета. В зависимост от начина на разпространение електромагнитните смущения са разделят на две големи групи: *кондуктивни* и *полеви* [3, 4].

Към кондуктивните електромагнитни смущения се отнасят тези, смущения, които се разпространяват по електрически свързаните елементи на електрическата мрежа. Полевите електромагнитни смущения се разпространяват чрез околната среда, в която функционира електрическата мрежа.

Нивото на електромагнитните смущения, това е нормативно регламентирано и определено ниво на кондуктивни електромагнити смущения, при които е възможно да се осъществява нормално функциониране на всички технически средства, чувствителни на тези смущения.

2. Оценка за влиянието на електропотребителите върху качеството на електрическата енергия

За качеството на електрическата енергия отговорност носят две страни: елетроснабдителните предприятия и потребителите на електрическа енергия. Ето защо оценката за влиянието на електропотребителите върху качеството на електрическата енергия трябва да започва още на етапа за определяне на техническите условия (ТУ) за присъединяване на електропотребителите към електрическата разпределителна мрежа (ЕРМ) и се включват като задължителна част от договора между двете страни за продажба-покупка на електрическа енергия.

Ако потребителят е оценен като влошаващ качеството на електрическата енергия, е необходимо да му бъдат определени границите за допустимо влияние на неговите потребители върху качеството на електрическата енергия в точката на присъединяване.

Ще се разгледа последователността за анализ влиянието на електроконсуматорите върху качеството на електрическата енергия.

За оценка влиянието на електропотребителите върху качеството на електрическата енергия в точката на присъединяване и определяне на минималната стойност на тяхната мощност на първо място е необходимо да се изчисли отношението:

$$\alpha = \frac{S_{РАЗР}}{S_{КС\min}} 100, \qquad (1)$$

където: α - коефициент за отношение на товара; $S_{РАЗР}$ - разрешена мощност на електро-потребителя (минимално разрешена мощност на този етап); $S_{КС\min}$ - минимална мощност на късо съединение в точката на присъединяване (ТП).

1) Ако $\alpha < C$, където C е зададена числова стойност на критерии, то разглеждания електроконсуматор се отнася към групата на потребителите, които не оказват влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяването (ТП).

2) Ако $\alpha > C$, то електроконсуматорите се отнасят към групата на потребителите, които влошават качеството на електрическата енергия, но не оказват влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване. В този случай,

отчитайки характера на потребителите е необходимо да се определи сумарната инсталирана мощност на нелинейните електропотребители $S_{\Sigma НЕЛ}$ и да се определи отношението:

$$\alpha_1 = \frac{S_{\Sigma НЕЛ}}{S_{KC\min}} 100, \quad (2)$$

2.1) Ако $\alpha_1 < C$, то дадените електропотребители също се отнасят към групата на потребителите с електроконсуматори, влошаващи качеството на електрическата енергия, но не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване.

2.2) Ако $\alpha_1 > C$ дадените електропотребители се отнасят към групата на потребителите с електроконсуматори, влошаващи качеството на електрическата енергия и същевременно създаващи несинусоидалност на напрежението в разглежданата точка за присъединяване.

За потребители, включени към общата точка за присъединяване към шините на цехова или разпределителна подстанция при напрежение 0,4 kV, числовите критерии за C са определени както следва:

- не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване, ако по израз (1) се получава:

$$100 \frac{S_{РАЗР}}{S_{KC\min}} \le 0,2$$

- влошават качеството на електрическата енергия, но не оказват влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката за присъединяване на потребителите, ако по (1) се получава:

$$100 \frac{S_{РАЗР}}{S_{KC\min}} > 0,2 \qquad \text{или по израз (2) се получава}$$

$$100 \frac{S_{\Sigma НЕЛ}}{S_{KC\min}} \le 0,2$$

- влошават качеството на електрическата енергия и създават несинусоидалност на напрежението в точката за присъединяване, ако по изрази (1) и (2) се получава:

$$100 \frac{S_{РАЗР}}{S_{KC\min}} > 0,2 \qquad \text{или} \qquad 100 \frac{S_{\Sigma НЕЛ}}{S_{KC\min}} > 0,2$$

3) След това се оценява влиянието на пределната стойност на мощността на нелинейния товар върху качеството на електрическата енергия в точката на присъединяване по опростен метод. Електроконсуматорите на потребителите се отнасят към групата на не влошаващи качеството на електрическата енергия по несинусоидалност на напрежението, ако е изпълнено условието:

$$\frac{S_{\Sigma НЕЛ}}{S_{KC\min}} \le 0,02 \quad (3)$$

На следващия етап се изпълнява уточнен анализ за влиянието на електроконсуматорите на потребителя върху качеството на електрическата енергия в точката за присъединяване по състава на електроконсуматорите:

✓ Потребителите се отнасят към група, която не влошава качеството на електроенергията в точката на присъединяване, ако мощността на несиметричния, на нелинейния или на рязкопроменливия товар на потребителите не превишава:

а) 10% от номиналната мощност на трансформатора $S_{НТ}$, към който се включват потребителите;

б) 15% от номиналната мощност на трансформатора при условие, че преобладава недвигателен товар, който представлява над 50 % от сумарната инсталирана мощност на електроконсуматорите или при смесен товар е в равни отношения между двигателния и другите видове товар.

в) 20% от номиналната мощност на трансформатора при преобладаване на двигателен товар, който е над 50 % от целия товар на потребителя.

- Ако мощността несиметричния, нелинейния или рязко изменящия се товар на потребителя превишава посочените по-горе стойности, той се отнася към групата на потребителите, влошаващи качеството на електроенергията в общата точка на присъединяване.

3. Оценка за разрешената и сумарната мощност на товара, при която консуматори за ниско напрежение могат да се отнесат към потребителите, които не влошават качеството на електрическата енергия.

Потребител е включен към шини 0,4 kV на трансформаторна подстанция със стандартен ред на мощност 100 - 1000 kVA. Да се направи оценки за разрешената и сумарната мощност на товара, при който електроконсуматорите е възможно да се отнесат към групата на потребителите, които не влошават качеството на електрическата енергията.

Процедира се по вече разгледаният опростен подход в следните стъпки:

1) Определя се мощността на късо съединение в точката за присъединяване съгласно:

$$S_{KC} = \frac{100\,S_{HT}}{u_{k\%}}, \tag{4}$$

където S_{HT} - номинална мощност на трансформатора; $u_{k\%}$ - напрежение на късо съединение на трансформатора в проценти.

В табл. 1 са дадени предварително изчислени диапазони на мощността на електропотребителите и тяхното влияние върху качеството на електрическата енергия в точката на присъединяване в зависимост от мощността на силовия трансформатор в трансформаторната подстанция.

Таблица 1 Предварително изчисляване диапазона на мощност на електропотребителите

Мощност на потребителя	*Стойностни на* $S_{РАЗР}$ *и* $S_{\Sigma НЕЛ}$ *в* kVA *при номинална мощност на трансформатора* $S_{НТ}$, kVA				
	100	*250*	*400*	*630*	*1000*
Потребители с електроконсуматори, не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване					
$S_{РАЗР}$	≤ 4	≤ 10	≤ 16	$\le 25,5$	≤ 40
Потребители с електроконсуматори, влошаващи качеството на електрическата енергия, но не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване					
$S_{РАЗР}$	> 4	> 10	> 16	$> 25,5$	> 40
$S_{\Sigma НЕЛ}$	*4 - 40*	*10 - 100*	*16 - 160*	*25,5 - 252*	*40 - 400*

За силови трансформатори с мощност $S_{HT} = 100 - 1000$ kVA и средна стойност на $u_{k\%} = 5\ \%$, по израз (3) се получава:

$$S_{KC} = 20 \cdot S_{HT}$$

2) Определя се по зависимост (1) минимално разрешената мощност на електро-консуматорите, при която е възможно те да бъдат към групата на потребителите, които не оказват влияния върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване:

$$S_{РАЗР} \le \frac{0,2 \cdot 20 S_{НТ}}{100} \le 0,04 S_{НТ}$$

3) Определя се по зависимост (2) сумарно инсталираната мощност на нелинейните електропотребители, при която те се отнасят към групата на потребители с електроконсуматори, влошаващи качеството на електроенергията, но не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване:

$$S_{\Sigma НЕЛ} \le \frac{0,2 \cdot 20 S_{НТ}}{100} \le 0,04 S_{НТ}$$

Следователно, електроконсуматорите се отнасят към групата на потребителите с такива, влошаващи качеството на електрическата енергия, но не оказващи влияние върху несинусоидалността на напрежението в точката на присъединяване, ако тяхната разрешена мощност е не повече от 4 % от мощността на трансформатора, а сумарната инсталирана мощност на електропотребителите, влошаващи качеството на електрическата енергия, е по-малка или равна на 4% от номиналната мощност на трансформатора.

Определя се по формула (3) максималната мощност на нелинейния товар, при който електропотребителите се отнасят към групата на консуматорите, които не влошават качеството на електрическата енергия по несинусоидалност на напрежението:

$$S_{\Sigma НЕЛ} = 0,02 \cdot 20 S_{НТ} \le 0,4 S_{НТ}$$

Следователно, ако сумарната мощност на нелинейния товар не превишава 40 % от номиналната мощност на трансформатора, електроконсуматорите е възможно да бъдат отнесени към групата на потребителите, които не влошават качеството на електроенергията. Обобщеното пресмятане на мощностите на нелинейните консуматорите отнесени към мощността на трансформатора е направено в табл. 2.

Таблица 2 Уточнен разчет за допустимата мощност на нелинейните консуматори на електропотребителите

Характер на електрическия товар на потребителя	*Стойност на $S_{\Sigma НЕЛ}$ при номинална мощност на трансформатора $S_{НТ}$, kVA*				
	100	*250*	*400*	*630*	*1000*
Не е двигателна	*< 10*	*< 25*	*< 40*	*< 63*	*< 100*
Смесена	*< 15*	*< 37,5*	*< 60*	*< 04,5*	*< 150*
Двигателна	*< 20*	*< 50*	*< 80*	*< 126*	*< 200*

4. Заключение и изводи

В настоящия доклад е предложен метод за предварителна оценка за влияние на електроконсуматорите върху качеството на електрическата енергия преди пприсъединяването на потребителя към електрическата мрежа въз основа на данни за мощността на трансформатора в трансформаторната подстанция, номинална сумарна мощност на електроконсуматорите на потребителя, неговия характер и делът на нелинейни консуматори, участващи в него.

Литература:

1. БДС 10694-80. Електрическа енергия - Норми за показатели за качеството на електрическата енергия при приемниците.
2. BDS EN 50160: 2023 - Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените електрически мрежи

3. БДС EN IEC 61000-2-4:2024 - Електромагнитна съвместимост (EMC). Част 2 - 4: Околна среда. Нива на съвместимост в електроразпределителни системи в промишлени обекти по отношение на нискочестотни кондуктивни смущения.
4. Сазыкин, В. Г., Электромагнитная совместимост в системах электроснабжения, Иркутск, 2005
5. Adolf J. Schwab, Wolfgang Kuerner, Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011

СЪСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМИ И АКТУАЛНИ ЗАДАЧИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКАТА В БЪЛГАРИЯ

Решаването на един проблем в енергетиката поражда два нови
проф. дтн Менто Ментешев,
МГУ „Св. Иван Рилски"

проф. д-р Е. Кърцелин[1], проф. д-р Ст. Топалов[1], stopalov@gmail.com, проф. д-р Иван Марков[2], инж. Щерьо Щерев[2], доц. д-р Георги Велев[3], д-р инж. Николай Минеков[4]
[1]МГУ „Св. Иван Рилски" – гр. София, [2]Асоциация "Български въгледобив", 1000 София, „Г. С. Раковски" 108, [3]Технически университет – гр. Габрово, [4]„Асарел-Медет"АД – гр. Панагюрище

РЕЗЮМЕ
Качеството на електроснабдяването и количеството на консумираната електроенергия се явяват основен и обективен критерий за определяне състоянието и възможностите за развитие на съвременното индустриално общество през XXI век.
На тази основа е представена информация за постиженията и състоянието на българската електроенергетика като генериращи мощности, преносни и електроразпределителни мрежи в страната и междусистемните връзки на електроенергийната система (ЕЕС) на съседните страни. Посочени са някои от най-острите проблеми на българската електроенергетика, свързани преди всичко с лошото и безконтролно управление на програмата за строителство и въвеждане в експлоатация на нови генериращи мощности, работещи с различни енергосуровини. Определени са някои актуални задачи, въпроси и проблеми, от решаването на които зависи качеството и възможностите на ЕЕС на страната в следващите 25-30 години.
Ключови думи: *електроенергийна система, състояние, проблеми, актуални задачи.*

STATUS, PROBLEMS AND CURRENT TASKS OF THE ELECTRIC POWER INDUSTRY IN BULGARIA

Prof. Dr. E. Kartselin[1], Prof. Dr. St. Topalov[1], stopalov@gmail.com , Prof. Dr. Ivan Markov[2], Eng. Shteryo Shterev[2], Assoc. Prof. Dr. Georgi Velev[3], Dr. Eng. Nikolay Minekov[4]
[1]MGU "St. Ivan Rilski" - Sofia, [2]Association "Bulgarian Coal Mining", 1000 Sofia, "G. S. Rakovski" 108, [3]Technical University - Gabrovo, [4]"Asarel-Medet" AD - Panagyurishte

ABSTRACT
The quality of electricity supply and the quantity of electricity consumed are the main and objective criteria for determining the state and development opportunities of modern industrial society in the 21st century.
On this basis, information is presented on the achievements and state of the Bulgarian electric power industry in terms of generating capacities, transmission and distribution networks in the country and the interconnections of the electric power system (EPS) of neighboring countries. Some of the most acute problems of the Bulgarian electric power industry are indicated, primarily related to the poor and uncontrolled management of the program for construction and commissioning of new generating capacities operating with different energy sources. Some current tasks, issues and problems are identified, which solution will determine the quality and capabilities of the country's EPS in the next 25-30 years.
Keywords: *power system, state, problems, current tasks.*

Въведение

В началото на XXI век човечеството на планетата Земя е изправено пред реалната угроза на две сериозни заплахи и изпитания, а именно: реална заплаха от възникването на енергийна криза и реална заплаха от възникването на екологична катастрофа.

Тези реални заплахи и изпитания на човечеството в началото на XXI са свързани и предопределени преди всичко от развитието на енергетиката през XX век.

Енергетиката се явява основна двигателна сила за социално- икономическото развитие на всяка отделно взета страна. Не случайно един от показателите за качеството на живот се определя по средногодишния разход на енергия за човек от населението на дадена страна.

Заедно със своето полезно въздействие за развитие на живота на планетата Земя, в началото на XXI век, а именно енергетиката, се явява една от основните причини за възникналите опасности от енергийна криза и екологична катастрофа.

В основата на тези потенциални заплахи се оказват следните фактори:

• Енергетиката през XX век се развива преди всичко на основата на въглеводородните енергийни суровини (нефт, газ, въглища), които се определят като невъзобновяеми източници на енергия (НВИЕ).

• Използваните принципи и технологии за производство на енергия (електрическа и топлинна) с използване на НВИЕ се характеризират с нисък к.п.д. и се явяват сериозен източник на вредни емисии ($C0_2$, CO, MO_x, прахови частици, пепел и др.), които необратимо влошават и нарушават екологичното и топлинно равновесие в природата.

• НВИЕ са неравномерно разпределени (разпространени) по Земята, което предопределя енергийната зависимост на едни страни от други, което пък оказва съществено влияние и върху националната сигурност на енергийно зависимите страни.

Традиционната енергетика, изградена на основата на въглеводородните енергийни суровини осигури устойчиво развитие на човешката цивилизация през XX век, но заедно с това предопределя и приближава в обозримо бъдеще възникването на:

• енергийна криза, породена от изчерпване запасите на въглеводородните източници на енергия;

• екологична катастрофа, в резултат на вредните емисии, които изхвърлят ТЕЦ на въглища и оказват необратимо въздействие на околната среда.

Един от реалните и възможни пътища за преодоляване на тази кризисна ситуация е свързана с ускореното реализиране на концепцията за развитие на енергетиката през XXI век на основата на децентрализираните източници на енергия с използване на възобновяеми източници на енергия (ВИЕ).

1. Постижения на енергетиката в Република България в края на XX век

За оценка на състоянието и възможностите на българската енергетика в края на 2025 година ще се използва следната официално представена информация

- генериращи мощности на електроцентрали в експлоатация
- произведена електроенергия
- електропреносната мрежа за напрежение 110 kV, 220 kV и 400 kV
- електроразпределителна мрежа за средно напрежение (СРН) 20 kV и ниско напрежение (НН) – 380 V
- междусистемни връзки на електроенергийната система на Република България с електроенергийните системи на съседните страни

1.1. Генериращи мощности на електроцентрали в експлоатация

В таблица 1. са представени инсталираните и разполагаемите генераторни мощности в електрическите централи, присъединени към преносната и разпределителните мрежи (MW) към 2010 г. у нас.

Разпределението на инстали-раните мощности в зависимост от първичния енергоносител, в %, е както следва: ТЕЦ – 53.6%, АЕЦ – 33.0%, ВЕЦ – 11.9% и други – 1.5%.

Електропроизводството в РБ, базирано на три основни стълба – ТЕЦ, АЕЦ и ВЕЦ, за 2010 г. е показано в табл. 2.

В първата колона на таблица 3. са посочени инсталираните мощности по видове електроцентрали към 31.12.2025 г. по данни на ЕСО [1,8].

Табл. 1.

Видове електроцентрали	Инсталирани	Разполагаеми
АЕЦ	2000	2000
ТЕЦ на лигнитни въглища[1]	3979	3899
ТЕЦ на черни и кафяви въглища	1678	1568
ТЕЦ на газ	794	734
ВЕЦ, в т.ч.	3108	3108
Подязовирни[2]	2204	2204
На дневен изравнител	761	761
На течащи води	143	143
Вятърни ЕЦ	488	488
Фотоволтаични ЕЦ	25	25
Общо	**12 072**	**11 822**
Забележка:	[1] – Отчетено е увеличението на мощностите в ТЕЦ „Марица изток 2" и „ЕНЕЛ Марица изток 3" след модернизацията [2] – Отчетени са два нови генератора във ВУЕЦ „Студен кладенец", 5-ти мощност 16 MW и 6-ти с мощност 1.2 MW	

Табл. 2.

Видове електроцентрали	GWh
АЕЦ	15249
ТЕЦ на лигнитни въглища[1]	18084
ТЕЦ на черни и кафяви въглища	4884
ТЕЦ на газ	1848
ВЕЦ, в т.ч.	5523
ПАВЕЦ	636
Вятърни ЕЦ	658
Фотоволтаични ЕЦ	14
Общо	46260

Изискването към тях е да са в състояние да покриват върховото потребление в страната, което през зимата достига до 7000 MW, а за да се обезпечи надеждната и сигурна работа е необходим резерв от 20 %, т.е. за нашите условия задължителните мощности са 8400 MW.

Предложени са няколко хипотетични сценария, за използваемостта на централите, за илюстриране на абсурдността на ситуацията:

Сценарий 1 – редовно реализиращ се по време на сутрешния и вечерния връх на натоварване на ЕЕС;

Сценарий 2 – при безветрие по време на сутрешния връх на ЕЕС;

Сценарий 3 – при спиране на електроцентралите на комплекса „Марица изток"

Сценарий 4 – при спиране на електроцентралите изгарящи лигнитни въглища;

Сценарий 5 – при спиране на всички въглищни електроцентрали.

В таблица 3. са представени и анализирани няколко (5-те) сценария за възможното развитие на енергийния комплекс „Марица изток"

Табл. 3. ***Вероятни промени на генериращите мощности в Република България***

Тип мощност	**Мощност, MW**	**Мощност, MW**	**Мощност, MW**	**Мощност, MW**	**Мощност, MW**	**Мощност, MW**
	31.12.2025	сценарий 1	сценарий 2	сценарий 3	сценарий 4	сценарий 5
АЕЦ	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
ТЕЦ – л. въгл. в т.ч. „МИ"	4 119 3 450	4 119 3 450	4 119 3 450	670		
ТЕЦ – ч. въгл.	336	336	336	336	336	
ТЕЦ – газ	733	733	733	733	733	733
ВЕЦ	3 218	3 218	3 218	3 218	3 218	3 218
ВяЕЦ	715	715				
ФтЕЦ	6 104					
ЕЦ на биомаса	60	60	60	60	60	60
ОСЕЕ*	1 382*	1 382*	1 382*	1 382*	1 382*	1 382*
Общо	**18 667**	**12 563**	**11 848**	**8 398**	**7 728**	**7 392**

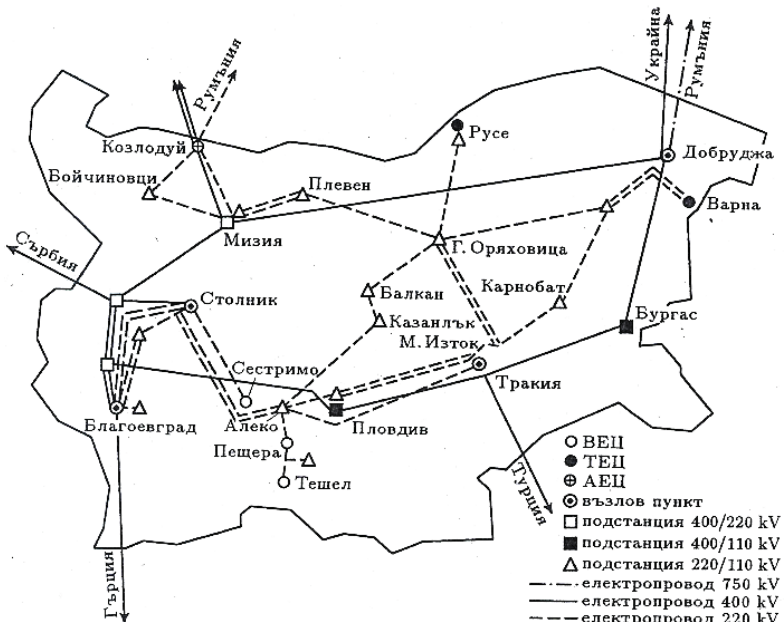
* Обектите за съхранение на електроенергия не генерират енергия, т.е. показват мощности, които може да отдават за 1 час.

Коефициентът на едновременна работа на всички ВЕЦ само чисто теоретично може да бъде 1.

1.2. Електропреносна мрежа на Република България за напрежение 110, 220 и 400 kV.

Електропроводите за високо напрежение имат обща дължина, както следва: 400 kV – 2451km, 220 kV – 2805 km и 110 kV – 995 km, или общо – 15 210 km. Системните подстанции са 32 бр. с обща инсталирана мощност 15 888 MWA, а понижаващите – 256 бр. имат обща трансформаторна мощност 15 143 MWA [3].

Схемата на електропреносната система за 220 и 400 kV на РБългария е посочена на фиг. 1.



Фиг. 1 Схема на електропреносната система за 220 и 400 kV на РБългария

1.3. Електроразпределителна мрежа на Република България за средно и ниско напрежение.

Пълна информация за електроразпределителната мрежа у нас за средно и ниско напреже-ние се получава от официално публикуваните Правила и процедури за приватизация на електроразпределителните дружества в България през 2004 година.

2. За някои проблеми в енергетиката на България в края на 2026 г.

2.1. АЕЦ „Козлодуй" – българско дело, български успех, но и български погром.

Хронологично разгледано, някои дати в историята на АЕЦ „Козлодуй" показват:

- 14.10.1969 г. – направена е първата копка за строителство на АЕЦ „Козлодуй", на обекта се работи на 3 смени;
- 1970 г. – назначени са първите експлоатационни кадри за електроцентралата;
- 1972 г. – провежда се първата едномесечна студентска бригада на АЕЦ „Козлодуй", вкл. студенти от спец. „Автоматизация на производството при ВМГИ – София;
- 4.09.1974 г. – официално откриване на I-ви блок на АЕЦ „Козлодуй";
- 22.08.1975 г. – осъществен е физически пуск на реактора на II-ри блок на АЕЦ „Козлодуй";
- 4.03.1977 г. – възниква силно земетресение в района на Вранча, Румъния (с магнитуд 7,4 по скалата на Рихтер с епицентър в окръг Вранча, в Източните Карпати, на

дълбочина 94 километра. То засяга сериозно и България, продължава 55 секунди, а ударната вълна е усетена в почти целия балкански регион). По изпълненото строителство на АЕЦ „Козлодуй" – фундаменти, сгради и съоръжения не са констатирани поражения и последици от него. Сградите и фундаментите на АЕЦ „Козлодуй" са проектирани по условието за устойчивост на земетресение 7 бала по дванадесет степенната скала на Медведев - Шпонхоер - Карник при вероятност за възникване на такова събитие – веднъж на 10 000 години.

В табл. 4. са дадени сроковете за строителство, инсталираните мощности и произведената електроенергия.

Табл. 4.

№ на блока	Тип на реактора и мощност	Година на включване	Година на спиране	Текущ горивен цикъл	Произведена ел. енергия MWh
1	ВВЕР-440	1974	31.12.2002	25	66675397.0
2	ВВЕР-440	1975	31.12.2002	24	68905334.0
3	ВВЕР-440	1981	31.12.2006	22	
4	ВВЕР-440	1982	31.12.2006	21	68711968.0
5	ВВЕР-953	23.12.1988	-	-	-
6	ВВЕР-953	30.12.1993	-	-	-

По информация на инж. Йордан Йорданов, бивш директор на АЕЦ „Козлодуй", общата стойност на строително-монтажните работи на обекта, в лева, е разпределена, както следва: блок I – 200 млн., блок II – 300 млн., блок III – 650 млн., блок IV – 800 млн., блок V – 600 млн., и блок VI – 600 млн, или общо – 3150 млн. лева.

За АЕЦ „Белене" може да се отбележи, че - проучванията за изграждане на втора АЕЦ започват в началото на 70-те години на XX-ти век като в края на десетилетието е избрана площадка край гр. Белене, утвърдена с Постановление от март 1981 г. на Министерския съвет. Първоначално е предвидено изграждането на 4 енергийни блока, с възможност за разширение с още нови мощности. Началният проект на АЕЦ „Белене" е разработен в периода 1986-1987 г. от проектантските институти АЭП - Киев и Енергопроект – София и предвижда изграждане на 4 блока с реактори тип ВВЕР-1000/ В-320, аналогични на проектите на блокове 5 и 6 на АЕЦ "Козлодуй". Основно строителство започва през 1987 г. на база разработения Технически проект при паралелно изготвяне на работни проекти за предстоящите дейности, а строителство на централата се осъществява от края на 1987 г. до средата на 1991 г. С решение на Правителството на Република България от август 1991 г. строителството на АЕЦ Белене е спряно. Възложено е на Комитета по енергетика да организира изготвяне на технико-икономическа обосновка за изграждане в следващите години на паро-газова централа на площадката на АЕЦ — Белене, или на друга алтернативна площадка. Освен това, от съответните държавни органи се изисква да подготвят предложения за рационално използване на изградената инфраструктура, материалната и производствена база на площадката.

2.2. АЕЦ „Белене" – парите за финансиране на атомна електроцентрала „Белене" са изразходвани, но вместо централа има само един гьол.

Най-пълна информация за избора на площадка, екологична оценка на обекта, дадено разрешително за строеж, изпълнено строителство, доставени машини, строителство на инфраструктура, строителство на жилищни комплекси в гр. Козлодуй, гр. Свищов и гр. Плевен, строителство на болници и техникуми, и всичко друго свързано с осигуряването на нормални условия за живот и работа, е представена в [4].

Решение на МС и Парламента за спиране на строителството, за възобновяване на строителството на АЕЦ „Белене" е „образцов" пример за това, как се „прахосват" държавни пари, народни пари, а отговорни и виновни няма.

2.3. Приватизацията на електроразпределителните дружества в България.

На 9.06.2004 г., съгласно правилата за провеждане на заключителния етап от конкурсните процедури за приватизация на седемте енергоразпределителни дружества, в Агенцията за приватизация са подадени общо 13 окончателни финансови оферти, депозирани от петима сертифицирани за участие в Заключителния етап кандидати, а именно: CEZ – Чехия; ENEL – Италия; EVN – Австрия; PPC – Гърция и EON – Германия [3].

В табл. 5. са показани окончателните финансови предложения, в лева, на посочените кандидати.

Съгласно правилата за провеждане на Заключителния етап от конкурсните процедури, класацията на кандидатите се извършва единствено на база предложена цена съответния пакет, при спазване на правилото, че един кандидат има право да закупи само един от трите пакета ЕРД. В резултат на прегледа и оценките на подадените окончателни оферти, конкурсните комисии за трите пакета определят следната класация:

- CEZ – Чехия - Западен пакет: ЕРД Столично, ЕРД София област и ЕРД Плевен;
- EVN – Австрия - Югоизточен пакет: ЕРД Пловдив и ЕРД Стара Загора;
- EON – Германия - Североизточен пакет: ЕРД Варна и ЕРД Горна Оряховица.

Табл. 5.

Окончателни финансови оферти, депозирани от петима сертифицирани за участие в Заключителния етап от конкурсните процедури за приватизация на седемте енергоразпределителни дружества в Р България			
Пакет **Кандидат**	**Предложена цена в окончателната оферта за Западен пакет:** **ЕРД Столично** **ЕРД София област** **ЕРД Плевен**	**Предложена цена в окончателната оферта за Югоизточен пакет:** **ЕРД Пловдив** **ЕРД Стара Загора**	**Предложена цена в окончателната оферта за Североизточен пакет:** **ЕРД Варна** **ЕРД Горна Оряховица**
CEZ – Чехия	281 500 000	171 500 000	121 500 000
ENEL – Италия	241 200 000	201 000 000	120 600 000
EVN – Австрия	302 000 000	271 000 000	-
PPC – Гърция	270 000 000	-	140 700 000
EON – Германия	165 000 000	180 000 000	80 000 000

Информация към периода на приватизация за седемте енергоразпределителни дружества се съдържа в табл. 6.

Табл. 6.

	Брой потребители			**Бр. трансфор-матори срН/НН**	**Мрежи срН/km**		**Мрежи НН/km**		**Обем продажби**	**Приходи от продажби на ЕЕ и услуги, след преоценка, хил. лв.**	**Финансов резултат Нетна печалба (по МСС 2003г) след преоценка, млн. лв.**
	общо	**битови**	**стопански**		**Въздушни електропроводи**	**Подземни кабели**	**Въздушни електропроводи**	**Подземни кабели**			
ЕРП Столично	675424	599155	76369	6248	860.5	3175	2796	3744	3562.3	305.604	8.231
ЕРП София област	599290	536178	63112	5119	6766.6	1377.8	10347.3	2366.1	2775.8	176.332	3.150
ЕРП Плевен	616449	561852	54597	6678	9223.0	1292	10856	2059	2257.0	193.257	7.926
ЕРП Варна	595964	521112	74852	5454	6412.5	1441.4	6675.7	3809.4	2563.0	217.833	9.386
ЕРП Горна Оряховица	541685	503950	37735	6891	8593.5	1682.7	10054.4	2673	2372.0	201.874	3.897
ЕРП Пловдив	866679			6835	10863	2652	14992	4749	3652.4	316.723	5.174
ЕРП Стара Загора	628927			7031	8866	2326	7692	4535	2925.0	252.953	5.260

Приватизираните електропроводи и трансформаторни подстанции са разпределни, както следва:

- Брой потребители – общо 4524418, от които битови – 2724247 и стопански – 306692;
- Брой трансформатори СрН/НН – 44266;
- Мрежи СрН, km- въздушни ел. проводи – 51583 и подземни кабели – 13945;
- Мрежи НН, km- въздушни ел. проводи – 63412 и подземни кабели – 23935.

2.4. Междусистемни връзки на електроенергийната система на Република България с електроенергийните системи на съседните страни

Значителен дял в ефективността на функциониране на електроенергетиката имат и изградените междусистемни връзки на електроенергийната система (ЕЕС) на РБ и ЕЕС на съседните страни. Връзките, осигуряващи трансгранична преносна способност са посочени в табл. 7.

Табл. 7.

Напрежение, kV	**Електропровод**	**Страна**	**Подстанция в България**	**Подстанция в със. страна**	**Дължина, km**	**Паралелна работа в UCTE**
400	Дружба	Румъния	Добруджа	Исакча	230.6	Да
400	Цинцарене 1	Румъния	Козлодуй	Цинцарене	115.7	Да
400	Цинцарене 2	Румъния	Козлодуй	Цинцарене	115.7	Да
400	Нишава	Сърбия	София Запад	Ниш	122.6	Да
400	Одрин	Турция	Марица изток 3	Бабаески	136.6	Не
400	Сакар	Турция	Марица изток 3	Хамитабат	150.0	Не
400	Пирин	Гърция	Благоевград	Солун	174.7	Да
220	Дунав	Румъния	Козлодуй	Ишалница	98.1	Не
110	Връшка чука	Сърбия	Кула	Зайчар	21.0	Не
110	Ерма	Сърбия	Брезник	Върла	64.1	Не
110	Страцин	Македония	Скакавица	Крива паланка	12.7	Да, врем.
110	Беласица	Македония	Петрич	Сушица	49.3	Да, врем
400	Руен	Македония	Червена могила	Щип	161.6	Да
400		Гърция	Марица изток 1	Филипи		в проект

2.5. ПАВЕЦ „Чаира" – най-новата и модерна електроцентрала в България, въведена в експлоатация през 1995 г., но след умишлено предизвикана авария от март 2022 година централата не работи.

В тази централа няма взривен склад, няма антени „Старлинк", няма информация за външна намеса на терористи и участие в нейното разрушаване и погром, но е факт че все още не е в експлоатация.

2.6. Енергиен комплекс „Марица изток" – един от стълбовете на българската енергетика в продължение на 100 години – проблеми днес, 2026 г., и възможности за надеждна работа до 2050 година

През последните няколко години върху енергийния комплекс „Марица изток" се упражнява невъобразим натиск, което застрашава по-нататъшното му съществуване. Очевидно не се разбира и респективно не се отчита неговото място, роля и значение. Фактът, че редица отговорни персони в страната употребяват безличното „Мариците" говори точно за това.

Редно е да си зададем въпроса при условие, че престанат да функционират мините и електроцентралите в „Марица изток", какво отражение би дало това върху нашия живот и дали България може да си позволи такава загуба?

1. Източномаришките електроцентрали са с най-големи технически възможности и са едни от най-сигурните производители на електроенергия в страната. Тяхното спиране ни

изправя пред угрозата да се лишим от необходими генериращи мощности. Да анализираме как това би се отразило на нашата електроенергийна система (ЕЕС)!

Първите два сценария (т. 1.1.) и понастоящем се реализират, но те не се отразяват върху сигурността на работа на ЕЕС, тъй като има достатъчно мощности, за да се покрият потребностите. Недопустими са следващите сценарии, които са свързани с извеждане от експлоатация на въглищни централи, особено тези от „Марица изток", защото се нарушава мощностния баланс и води до ограничителен режим при потребление на електроенергия.

2. На следващо място е технологичната роля на електроцентралите в „Марица изток" за регулиране на ЕЕС. Това са 14 блока (без тези на „Брикел"), които са сравнително маневрени, могат и осигуряват цялостното ефективно управление на товарите и честотата, способстват за равномерно натоварване на мрежата и други от това естество. Ограниченията в работата на балансиращите електроцентрали водят до предвидими негативи. [1,2]

3. Сравнителна оценка на предимствата и недостатъците на различните енергийни суровини

3.1. Предимства и недостатъци на невъзобновяемите енергийни суровини (НЕИ)

Предимства на НЕИ

- висока енергийна плътност на енергоносителите:
  - ✓ Въглища – 5000÷7000 kcal /kg;
  - ✓ Нефт - 9000÷10000 kcal /kg;
  - ✓ Газ - 7000÷8000 kcal /kg;
  - ✓ Уран – $(17\div20).10^9$ kcal /kg
- висока степен на усвояване на технологиите от проучване на запасите до потреблението на суровините;
- ориентация на световното стопанство за тяхното използване като гориво и суровина;
- развите инфраструктура за всички стадии на технологичния процес – добив, транспорт, преработка и използване;
- развита структура за подготовка на научни и експлоатационни кадри;
- развита инфраструктура и производствена база за производство и ремонт на необходимити прибори и обзавеждане;
- широк диапазон на мощностите на енергийните уредби (1 ÷ 1 500 000 kW);
- развита структура на научни учреждения (университети, научно-изследователски и проектантски институти, експериментални звена и бази, научно-изследователски лаборатории и др.).

Недостатъци на НЕИ

- изтощимост (изчерпаемост) на ресурсите (ограничени количества в природата);
- глобално влияние върху изменението на климата в резултат на емисиите въглероден двуокис (CO_2) и топлинно замърсяване;
- замърсяване на жизнената среда обитавана от човека в резултат на различните производствени отпадъци в течно, твърдо и газообразно състояние;
- неравномерност на разпределението им по Земното кълбо – източник на нестабилност и зависимости;
- потенциална опасност от замърсяване на околната среда и възникване на извънредни ситуации при транспорт и съхранение;
- потенциална опасност от възникване на аварии в атомните електроцентрали със значително изхвърляне на радиоактивни вещества;
- възможност за шзползване на атомно-енергийните технологии за създаване на атомно оръжие;

- изменение на структурата на земната кора в резултат на добива на нефт, газ и въглища с непердскацуеми последици;
- голям разход на вода.

3.2. Предимства и недостатъци на възобновяемите енергийни суровини (ВЕИ) – слънце, вятър, хидроенергия, биомаса

Предимства на ВЕИ

- неизтощимост;
- отсъствие на допълнителни емисии на въглероден двуокис (CO_2);
- отсъствие на вредни емисии;
- съхраняване и запазване на топлинния баланс на планенана Земя;
- достъпност за използване (на слънцето, вятъра и др.);
- възможност за използване на територии, които не са подходящи за селскостопанска дейност (слънчеви и вятърни електроцентрали);
- незначителен разпод на вода (за слънчеви и вятърни електроцентрали).

Недостатъци на ВЕИ

- ниска плътност на енергията (1 W слънчева радиация на 1 m^2 от земната повърхност);
- необходимост от използване на концентратори, т.е. устройства, които позволяват и осигуряват възможност да се увеличи плътността на слънчевата енергия;
- непостоянен, вероятностен характер на постъпващата енергия към електроцентралите (слънце, вятър и в по-малка степен за ВЕЦ);
- необходимост от разработване и внедряване на системи за акумулиране и резервиране на произведена енергия в големи количества (от слънцето и вятъра). Акумулаторните системи осигуряват възможност частично или напълно да изпълняват ролята на резервни източници на енергия;
- локално изменение на климата (при големи ВЕЦ);
- наводняване на плодородни площи земеделска земя при строителството на голеви ВЕЦ;
- необходимост от изграждане на специализирана промишлена инфраструктура;
- обучение на научни кадри и специалисти.

4. Резултати от управлението на електроенергийната система на отделно взета страна по законите на пазарната икономика.

Световният опит, включително и на индустриално развитите страни и на развиващи страни показва, че управлението и експлоатацията на ЕЕС по законите на пазарната икономика е недопустимо. Причините, поради които са възникнали големи аварии с катастрофални последици в ЕЕС на различни страни по света могат да се обединят в две големи групи:

- несъвършенство на техническите решения в различните звена на ЕЕС;
- различни противоречиви интереси на различните субекти, които участват в производството, пренасянето, разпределението и потреблението на електрическа енергия.

Високо качество и надеждност на електроснабдяване на различните категории електропотребители може да се постигне само при комплексно изследване, решаване и управление на всички въпроси и проблеми на една ЕЕС, съответстваща на високите изисквания на XXI век.

От качеството на електроснабдяването вече зависи не само качеството на живота и ефективността на икономиката, но и най - важните въпроси през XXI век за всяка отделно взета страна, а именно: националната сигурност и екологичната безопасност.

Тези особено високи изисквания към ЕЕС за отделно взета страна е невъзможно да бъдат постигнати само с усилията на енергетиците. За целта е необходимо разработването на национална програма за повишаване жизнената устойчивост на ЕЕС, като в тази програма се включват участници от различни организации и държавни органи: енергетици, проектанти, производители на електрообзавеждане за енергетиката, изпитвателни и сертификационни центрове, комитет по стандартизация и др.

В тази програма трябва да се включат въпроси:

- в областта на енергетиката;
- в областта на стандартизацията;
- в областта на производството;
- в областта на сертифицирането и изпитването.

Успешното изпълнение и реализация на тази национална програма е възможно само при управляващата и координиращата роля на Министерството на енергетиката.

5. Развитие на електроенергетиката през XXI век

Електрическата енергия в началото на XXI век се явява основна двигателна сила в съвременното индустриално общество. Ето защо търсенето на нови източници на енергия е една от основните задачи на съвременната наука и промишлени технологии, която трябва да бъде изследвана и решавана.

Съществуват много съвременни решения, които биха удовлетворили решаването на подобни задачи, но основните параметри следва да бъдат определени и включени в Енергийната стратегия на България, която да бъде с хоризонт 2075 или поне 2050 година.

Изводи:

1. Съвременната енергетика на всички индустриално развити страни е изградена на пет основни принципа. В продължение на повече от 130 г. се доказва тяхната актуалност, приложимост и работоспособност. Всеки опит за нарушаване или подмяна на който и да е от тях води до:

- катастрофални събития в „експерименталната" енергийна система на съответната страна;
- замяна на част от енергообзавеждането, свързано с огромни финансови, материални и трудови ресурси;
- неустойчива работа на електроенергийната система

2. Системният анализ показва, че решаването на един от основните проблеми на съвременната цивилизация през XXI век – производство на необходимото количество енергия е възможно само по пътя на многократното увеличаване производството на електроенергия както от централизирани, така и от децентрализирани (автономни) източници на енергия.

3. Нито една от съвременните технологии („огнева", „ядрена" и „зелена") не дава радикално решение, а само в една или друга степен способства за отлагане (отсрочване) на глобалния проблем на човечеството през XXI век – енергийно осигуряване или енергийна криза.

4. Необходимо е не усъвършенстване на скъпоструващи и металоемки устройства, машини и технологични комплекси за удължаване срока на използване на традиционния зелен букет (слънце, въздух и вода), а намиране на нови революционни решения.

5. Големите катастрофални събития и аварии, които възникват в енергийните системи на индустриално развити страни, с доказани възможности, успехи и традиции в науката и промишлените технологии са показател, че в областта на съвременната енергетика има редица неизследвани въпроси, проблеми и нерешени задачи.

6. Резултатите от експлоатацията на енергийните системи на индустриално развити страни, и особено след възникване на катастрофални събития, показват и доказват, че

футкционирането на енергийната система, на която и да е страна, не се подчинява на законите на пазарната икономика.

7. Енергетиката на Република България се определя като стратегически отрасъл на национална икономика и държавата, с която трябва да се осигурява и гарантира:

- високо качество на живот;
- високо и устойчиво индустриално развитие на страната;
- национална сигурност на страната във всички аспекти.

8. В определението за бедност („гладен“) в началото на XXI век следва да се разбира и като недостиг или липса на достъп до храна, вода и енергия. От 8 млрд. жители на планетата Земя, около 2.5 млрд. нямат достъп до електричество, а още 2 млрд. са принудени да използват ограничени количества изкопаеми и дървесина.

9. Населението на Земята през 2050 г. по различни прогнози се очаква да нарастне до 10 млрд. жители. В началото на XXI век в света се разходват над 10 TWh енергия. За задоволяване на потребностите на населението на Земята през 2050 г. по прогноза се определя необходимостта от производството на още 10 TWh енергия. Във връзка с това възникват основателните въпроси: С какво гориво и с какви технологии е възможно да се реализира тази огромна задача само за 25-30 години? Производството и разходването на 20 TWh и повече енергия е преминаване на „топлинната бариера“ и нарушаване на топлинния баланс в природата на нашата планета с всички произтичащи последици.

10. Необходимо е да се определи какъв да бъде относителния дял на ВЕИ, които могат да се интегрират в енергиъната система, така че да се осигури и съхрани нейната функционалност, надеждност и устойчива експлоатация.

Всичко това налага да се търсят удовлетворителни решения на поставените проблеми.

Литература

1. Набатов Н. и колектив., Електроенергетиката на България., Тангра, ТанНакРа ИК, София, 2015.
2. Кърцелин Е. Р., Постижения, проблеми и задачи на съвременната наука за осигуряване на безопасно и устойчиво развитие на съвременното индустриално общество през XXI век., „БУЛКАМК 22“, София 27-28 октомври 2022.
3. Кърцелин Е., С. Топалов, И. Марков., Минното дело и енергетиката – определящи и осигуряващи устойчивото развитие на Република България през XXI век., Сборник доклади от IX Национална научно-техническа конференция с международно участие "Технологии и практики при подземен добив и минно строителство", 07 – 10 октомври 2024, Девин, България, (с. 124 – 137) (ISSN: 1314-7056)
4. Благоев Г., Сагата с АЕЦ „Белене“ и странната авария в ПАВЕЦ „Чаира“. в. Трета възраст, бр. 12, 25-31 март 2026.
5. Безруких П.П., Стребков Д.С., Возобновляемая енергетика: стратегия, ресурси, технологии., М. ГНУ ВИЭСХ, 2005.
6. Уилямс Л., У. Адамс. Нанотехнологии. М., ЭКСМО, 2004.
7. Стефанов Я. С., Анализ на електрически и термични системи за акумулиране на енергия в децентрализирани енергийни източници. Дис. за присъждане на ОНС „Доктор“, ТУ – Габрово, 2019.
8. https://www.eso.bg/doc/?pbook

EFFECT OF OZONE AS AN ELECTRON ACCEPTOR ON THE PERFORMANCE OF AN AIR-CATHODE MICROBIAL FUEL CELL

Sotir Plochev, Kaloyan Nikolov and Anatoliy Angelov
Department of Engineering Geoecology, University of mining and geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700, Bulgaria
E-mail: s.plochev@mgu.bg, nikolovkaloyan0@gmail.com, tonyagev@mgu.bg

ABSTRACT
This study evaluates the effectiveness of a single-chamber aircathode microbial fuel cell (MFC) with ozone (O_3) as a cathodic electron acceptor in comparison with the same with forced aeration and/or passive air diffusion. The ozone-supplied MFC achieves a maximum power density of 170-175 mW/m^2, significantly outperforming forced aeration (80-85 mW/m^2) and passive air diffusion (60 mW/m^2). By contrast, the linear sweep voltammetry (LSV) shows the highest current response under passive air conditions. This difference is attributed to water management within the porous cathode. Continuous gas flow causes evaporative drying and increases internal resistance, but the high oxidation potential of ozone compensates these drying losses to enhance overall power output.
***Key words**: microbial fuel cells, ozone, cathode electron acceptors, air cathode, power density.*

Introduction

Microbial fuel cells (MFCs) are promising bioelectrochemical technologies that enable the simultaneous wastewater treatment, energy recovery from organic matter and electricity generation. In MFCs, organic substrates are oxidized by electroactive microorganisms in the anodic compartment, releasing electrons and protons. Electrons are transferred to the anode and subsequently transported through an external electrical circuit to the cathode, while protons or other ions migrate through the separator. At the cathode, the electrons are consumed by a terminal electron acceptor [1-3]. Consequently, the overall performance of an MFC is determined not only by microbial activity and anodic electrochemical processes, but also by the thermodynamics and kinetics of the cathodic reaction.

The performance of MFCs is affected by numerous factors, including substrate type and composition, microbial community, electrode materials, membrane characteristics, electrolyte conductivity, internal resistance and cathode configuration [1, 2, 4]. Among these factors, the cathodic process frequently poses a major limitation to achieve high power output. Therefore the optimization of the cathodic reaction is considered as one of the key strategies for improving MFC performance.

The terminal electron acceptor in the cathode compartment plays a particularly important role because it determines the cathodic potential and affects activation, mass-transfer, and concentration losses within the cell [5]. A wide range of electron acceptors has been investigated in MFCs, including oxygen, ferricyanide, permanganate, persulfate, nitrate, nitrite, metal ions, hydrogen peroxide, and other oxidizing agents [5, 6]. The selection of an appropriate electron acceptor, however, requires a balance between electrochemical performance, cost, stability, safety, and applicability in real wastewater systems.

Oxygen from air is the most widely used cathodic electron acceptor because of its high availability, low operating cost, and the formation of water as the principal reduction product under appropriate conditions [1, 5]. Air-cathode configurations are therefore particularly attractive for practical applications because they do not require continuous addition of a soluble chemical oxidant. Nevertheless, oxygen reduction on conventional carbon electrodes is relatively slow and is associated with substantial cathodic overpotential [5, 7]. Furthermore, the performance of an air cathode depends strongly on oxygen mass transfer, electrode surface area, wettability, catalyst properties, and operating conditions.

These limitations stimulate investigations of alternative electron acceptors. Ferricyanide, for example, exhibits favorable cathodic kinetics and can provide higher power output than oxygen under comparable laboratory conditions. It has been used often as a reference electron acceptor in fundamental MFC studies [5]. However, its practical application is restricted by the need for regeneration and by chemical and environmental considerations. For this reason, ferricyanide is more appropriate for laboratory-scaled comparative studies than for long-term sustainable operation.

Another important approach is the use of compounds that can act simultaneously as electron acceptors and contaminants requiring electrochemical or biological removal. Nitrate, for example, can be reduced at the cathode to nitrogen gas, allowing electricity generation to be combined with nitrogen removal [5]. A similar concept can be applied to several metal ions, including Cr(VI), Cu(II), and Hg(II), which can undergo cathodic reduction and subsequent removal or recovery [5, 8]. Thus, the selection of the cathodic electron acceptor can influence not only electrical performance but also the environmental function of the bioelectrochemical system.

Among highly oxidizing compounds, permanganate and persulfate have also demonstrated considerable electrochemical activity. Under appropriate conditions, permanganate can produce significantly higher power densities than oxygen. However, its application is associated with progressive depletion of the oxidant and changes in catholyte composition [5]. Persulfate also has a high redox potential and has been investigated as an alternative cathodic electron acceptor, although its use requires chemical addition and is associated with specific reduction products.

In this context, ozone (O_3) represents a particularly interesting electron acceptor for bioelectrochemical systems. Ozone has a significantly higher standard reduction potential than molecular oxygen and is a highly reactive oxidant. During cathodic reduction, O_3 can accept electrons and participate in reactions involving reactive oxygen species, potentially facilitating the cathodic electron-transfer process. The use of O_3 may overcome some of the limitations associated with the relatively slow oxygen reduction reaction and may increase cell voltage and power generation.

Initial studies on ozone as a cathodic electron acceptor have demonstrated considerable potential. Waheeb and Al-Alawy [2] have investigated the influence of cathode configuration and have compared O_2 and O_3 as electron acceptors. Using 50 mM NaCl as catholyte, a maximum power density of 31.8 mW/m² has been obtained with O_3, barely 2.17 mW/m² with O_2. The authors have linked enhanced electricity generation to the higher ozone reactivity.

The ozone potential has been further demonstrated in microbial desalination cells (MDCs). Gholizadeh et al. [7] have compared MDC systems employing O_2 and O_3 as cathodic electron acceptors. At an initial NaCl concentration of 20 g/L, the O_3-MDC has achieved a maximum open-circuit voltage of 1331 mV, compared with 628 mV for the O_2-MDC. The maximum power density has reached 4.06 W/m², approximately 11 times higher than that of the oxygen-based system. The O_3-MDC has also achieved a higher desalination efficiency.

The advantages of ozone are not limited to electricity generation. In a subsequent study, Gholizadeh et al. [8] have demonstrated that the application of O_3 in an MDC improves the removal of Cr(VI) and Pb(II) while simultaneously increasing power generation in comparison with the corresponding oxygen-based system. These findings indicate that ozone may provide a dual function as a highly reactive electron acceptor and as part of an oxidative treatment process.

Additional interest has been directed toward systems combining ozone with electrochemically generated hydrogen peroxide. Chen et al. [9] have developed a Bio-E-Peroxone process in which H_2O_2 generated at the MFC cathode reacts with O_3 to produce highly reactive hydroxyl radicals. The system enables simultaneous electricity generation and enhances degradation of refractory organic pollutants. Compared with ozonation alone or electrochemical treatment without ozone, the combined process demonstrates enhanced degradation performance, while the addition of ozone to the cathodic air also increases the electricity production.

Overall, the available literature demonstrates that the selection of the cathodic electron acceptor is a crucial factor that influences MFC performance. Oxygen remains the most practical

electron acceptor because of its availability and low cost, but its relatively slow cathodic kinetics could limit the electrical output of the system. Alternative electron acceptors may provide enhanced electrochemical performance, but they are frequently associated with additional reagent consumption, regeneration requirements, chemical instability, or environmental limitations. Ozone is an attractive alternative because it combines a high redox potential, high chemical reactivity, and the potential for simultaneous electrochemical and oxidative treatment.

Nevertheless, comparative investigations of O_3 and O_2 in air-cathode MFCs, particularly under controlled experimental conditions and with emphasis on polarization behavior, internal resistance, and power generation, remain relatively limited. A systematic investigation of ozone as a highly reactive cathodic electron acceptor represents a relevant approach for improving MFC performance. Therefore the aim of this study was to evaluate ozone as a cathodic electron acceptor in an air-cathode MFC and to compare its electrochemical and electrical performance with forced-air aeration and passive air diffusion. Particular attention is payed to polarization and power-density behavior and to the relationship between LSV response and whole-cell performance.

Materials and methods

The membrane-separated air-cathode microbial fuel cell (MFC) is constructed with two rectangular chambers with different volumes - an anodic chamber of 0.10 dm^3 and a cathodic chamber of 0.08 dm^3, separated by a proton exchange membrane (CMI-7000S, Membrane International Inc.) with an active surface area of 0.0016 m^2. A 40 x 40 mm graphite plate with a thickness of 6 mm (total area of 0.0032 m^2) served as the anode electrode. The air-cathode chamber is packed with activated carbon (particle size fraction of 2-4 mm) forming a 36 mm thick bed layer, within which a graphite rod (8 mm in diameter, 40 mm in length; area of 0.001 m^2) is embedded as a current collector.

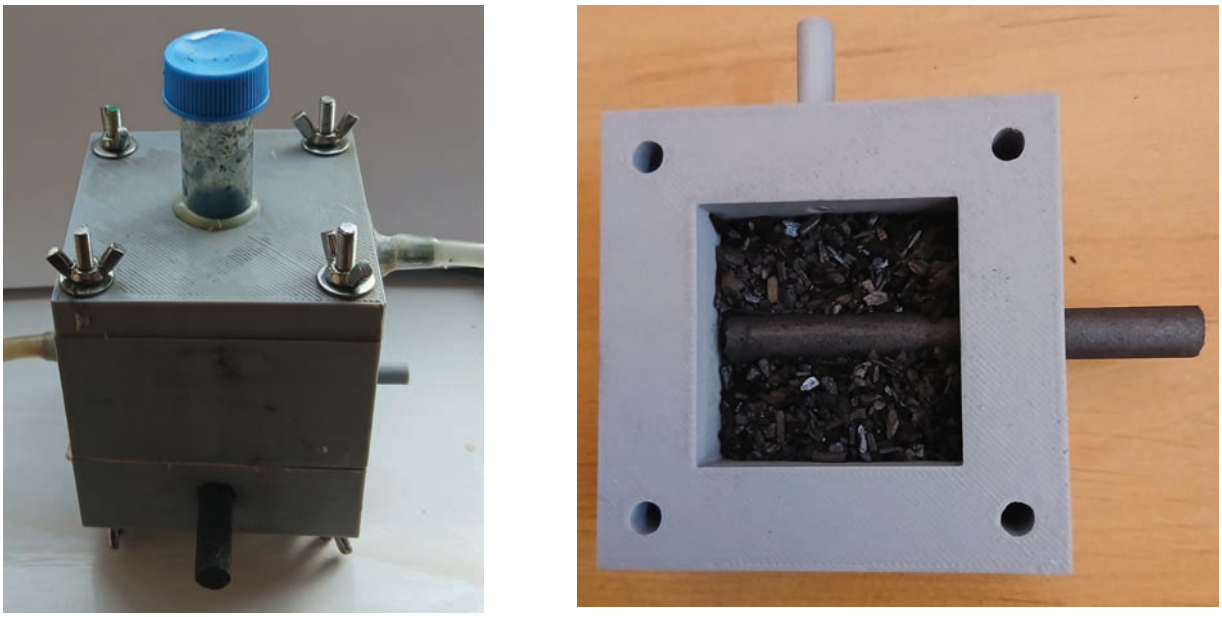
The packed-bed anaerobic bioreactor has a geometric volume of 0.33 dm^3. The carrier material is prepared by saturating natural zeolite (clinoptilolite; fraction size of 2.5–5.0 mm) with a solution containing NH_4Cl (10 g/L), K_2HPO_4 (5 g/L), and $MgSO_4.7H_2O$ (4 g/L). For saturation, 200 g of zeolite is treated with 1 L of this solution. The zeolite's chemical composition is described in a previous study [13]. Fluidisation and mixing within the laboratory setup are achieved using an upflow recirculation pump (5).

The MFC anodic chamber is filled with a modified Postgate growth medium containing 0.25 g/L K_2HPO_4, 0.5 g/L NH_4CI, 2.0 g/L Na_2SO_4, 0.1 g/L CaCl, 4.0 g/L $MgSO_4.7H_2O$, 6.0 g/L sodium lactate and 0.25 g/L yeast extract, adjusted to pH 6.5. The sulphate concentration in the medium is 3 g/L. A mixed culture of sulphate-reducing bacteria (SRB) is used as the inoculum according to previous studies [13]. The cultivation of the sulphate-reducing bacteria is carried out in batch mode, and the MFC performance parameters are measured 20 days after the complete replacement of the anolyte, once a concentration of H_2S up to 200 mg/L is reached.

The experiments are conducted using an air-cathode MFC configuration (Fig. 1). All experiments are performed in batch mode, with a fresh anolyte replacement prior to each test run. In the laboratory setup (Fig. 2), upon reaching dynamic equilibrium, the anolyte is continuously recirculated in a closed circuit at a flow rate of 5 L/h using a peristaltic pump (4), passing through the fixed-film sulfidogenic bioreactor (1) and the buffer tank (2). When necessary, the pH is adjusted to 7.5 using 1 N NaOH solution.

The cathodic chamber (Fig. 1b) accommodates three distinct operational modes: ozone supply via an ozonator (model GL-3189A, nominal production capacity 600 mg O_3/h) (7), forced aeration via an air pump (flow rate of 6 L/h) (6) and passive air diffusion. Passive air diffusion is achieved through 1 mm openings in the lower section of the cathodic chamber to allow ambient-air access, while the ozone generator capacity is reported according to the manufacturer's specification, with the actual O_3 concentration in the gas stream not independently quantified (Fig. 2). Thus, the

laboratory setup allowes comparative testing of three cathodic operating regimes: ozonated, forced aeration and natural passive air diffusion.



a) Air-cathode MFC *b) Cathode chamber with activated carbon*

Figure 1. *Air-cathode MFC (a) and cathode chamber with activated carbon (b).*

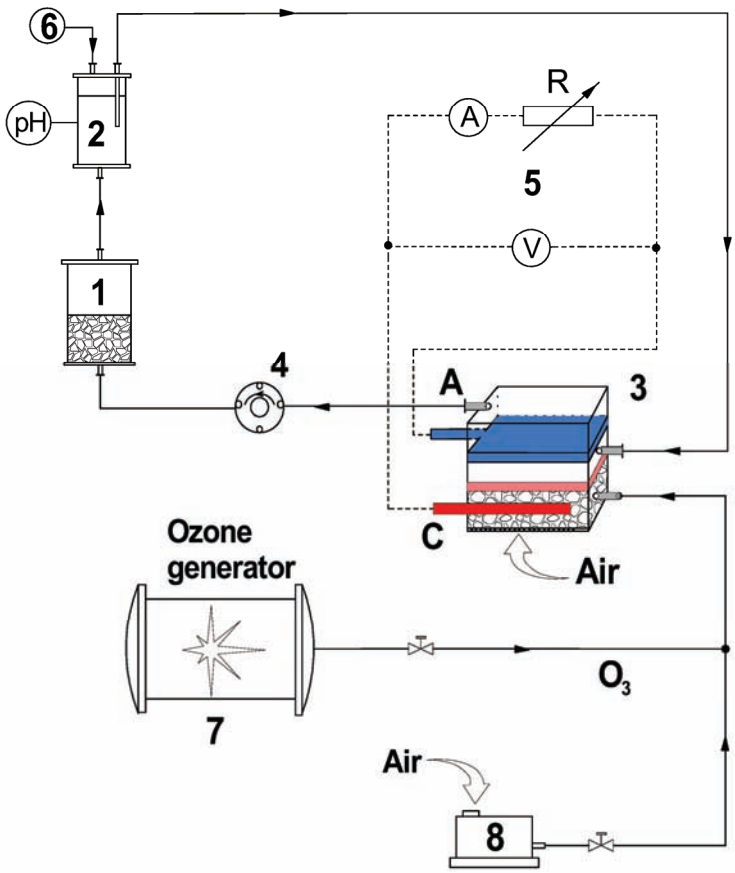


Figure 2. *Experimental set-up. 1 - Sulfidogenic bioreactor with fixed biomass, 2 - pH bufferring tank, 3 - Microbial fuel cell with air cathode, 4 - Recirculation pump, 5 - External load circuit, 6 - 1N NaOH solution for pH adjustment, 7 - Ozone generator, 8 - Air pump.*

The electrical parameters of the MFC are recorded using a digital multimeter (Wireless MS8238H). A precision decade resistor box (potentiometer) with an adjustable external resistance range of 10 Ω to 11 kΩ is employed as the external load. Polarization curves and power density profiles are derived across this resistance range. During the SRB cultivation phase and prior reaching system dynamic equilibrium, the external load between the anode and cathode is disconnected, allowing the MFC to operate under open-circuit conditions (OCV). The power density (P) is normalized to the geometric surface area of the anode and calculated according the formula: $P=U^2/(R.A)$, where A (m^2) is the anodic geometric surface area, R (Ω) is the external resistance and U (V) is the cell output voltage.

The electrochemical performance of the microbial fuel cell (MFC) iss evaluated by Linear Sweep Voltammetry (LSV) using a Squidstat potentiostat (Admiral Instruments). Prior to the scan, a quiet time of 30 s is applied at open-circuit potential (OCP) with a sampling interval of 1 s. The potential iss linearly swept from 0 mV to - 800 mV relative to OCP at a scan rate of 1 mV/s and a potential step (sampling interval) of 1 mV. The maximum absolute current limit is set to 200 mA.

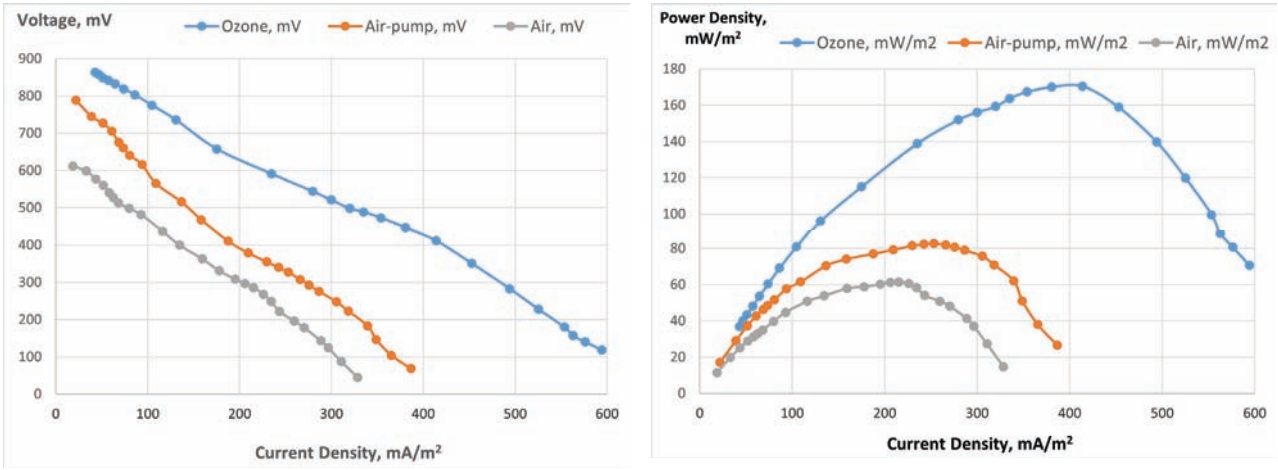
Results and discussions

Effect of ozone as a cathodic electron acceptor on MFC performance.

Polarization and power-density measurements show clear differences among the three cathodic operating modes: passive air diffusion, forced-air aeration and ozone supply (Fig. 3). The ozone-operated MFC has highest voltage retention with increasing current density and the highest power density.

The maximum power density under ozone operation is approximately 170-175 mW m^{-2}, compared to 80-85 mW m^{-2} for forced-air aeration and approximately 60 mW m^{-2} for passive air diffusion. Thus, the ozone configuration produces approximately twice the maximum power density of forced aeration and nearly three times over of passive air operation under the investigated conditions.

The maximum current density is also higher with ozone, reaching approximately 600 mA m^{-2}, compared to approximately 390 mA m^{-2} for forced air and 330–340 mA m^{-2} for passive air. The higher voltage retention and current density indicate improved whole-cell electrical performance during ozone operation. The result is consistent with the strong electron-accepting and oxidizing properties of ozone, although the measured power output reflects the combined behavior of the anode, cathode, membrane, electrolyte, gas transport, and external circuit.



a) *Polarisation curves* b) *Power curves*

Figure 3. *Polarisation and power curves on MFC with different electron acceptor in cathode.*

Cathodic response determined by LSV

The cathodic behavior of the three configurations is additionally investigated using linear sweep voltammetry (LSV). In contrast to the polarization and power-density measurements, the LSV curves show the highest cathodic current response for the passive-air configuration, followed by forced-air aeration and ozone supply. The passive-air configuration therefore exhibits the largest current response during the LSV experiment, while the ozone configuration shows the lowest current response among the three system (Fig.4).

At first sight, this trend appears to be inconsistent with the power-density results, where the exact opposite order is observed, with ozone yielding the highest output, followed by forced aeration and passive air diffusion. However, these two measurements characterize different aspects of the electrochemical system. LSV evaluates the current response of the electrode under a controlled potential sweep, whereas the polarization and power-density curves describe the behavior of the complete operating MFC, including the anode, cathode, membrane, electrolyte, mass transfer and internal resistance. That is why a higher LSV current does not necessarily correspond to a higher maximum power density of the complete MFC. The observed difference suggests that the overall performance was controlled not only by the cathodic reaction kinetics but also by mass-transfer and resistive effects occurring under actual MFC operating conditions.

Possible effect of cathode hydration and gas flow

An important factor that may contribute to the observed difference between the LSV and polarization results is the water-management state of the porous activated-carbon cathode.

The passive-air configuration does not involve continuous forced gas flow and therefore is expected to produce lower evaporative water losses from the porous cathode. In contrast, both forced-air and ozone operation involve continuous gas transport through or across the cathodic structure. Such gas flow can enhance oxygen or ozone supply but can also increase evaporation and reduce the water content of the porous electrode.

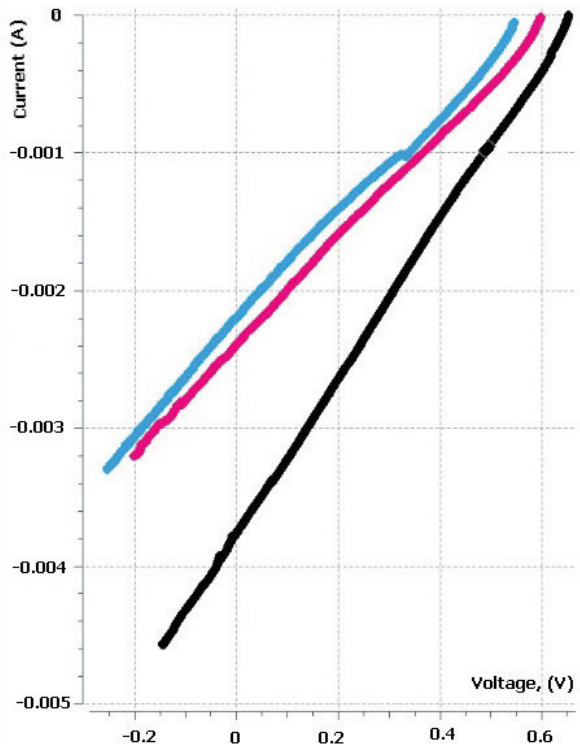


Figure 4. *Linear sweep voltammetry (LSV) of different variants experimental setup. Black - passive air; red - forced-air aeration; blue - ozone.*

Cathode hydration is particularly important for porous activated-carbon electrodes because their electrochemical performance depends on the balance between gas transport and electrolyte/water availability. Excessive hydration can limit oxygen transport, whereas excessive drying can increase resistive losses and reduce the effective electrochemically active region. Thus, the impact of gas supply depends on the balance between two competing mechanisms - on one hand, improved electron-acceptor transport enhances the cathodic reaction, on the other hand, higher gas flow promotes cathode drying, resulting in increased resistive losses. This phenomenon aligns with findings on activated carbon air-cathodes, where structural porosity and moisture retention play a decisive role in managing mass transport and internal ohmic resistance [14]. Zhang et al. [14] have demonstrated that variations in cathodic diffusion layer properties significantly alter oxygen availability and resistive behavior over extended operation. Furthermore, relative humidity and moisture levels in the cathodic chamber directly influence proton conduction and triple-phase boundary stability [15]. As highlighted by Lee et al. [15], reduced relative humidity or excessive cathode drying leads to a marked increase in internal resistance and a decline in electrochemical activity due to restricted proton transport.

For the ozone configuration, the beneficial electrochemical effect of using ozone as a strong electron acceptor appears to compensate for the adverse contribution of cathode drying under the investigated conditions. Despite exhibiting the lowest LSV current, the ozone-operated MFC produced the highest power density.

Conclusion

Ozone substantially increases the electrical output of the investigated air-cathode MFC. The maximum power density reaches approximately 170-175 mW m^{-2} with ozone, compared to 80-85 mW m^{-2} in forced-air aeration and approximately 60 mW m^{-2} in passive air diffusion. The maximum current density follows the same order.

In contrast, LSV produces the highest cathodic current response for passive air and the lowest for ozone. The different trends demonstrate that electrode-level LSV response alone cannot be used to predict the power output of the complete MFC. Whole-cell performance is influenced by the combined effects of cathodic reaction, mass transfer, membrane and electrolyte resistance, and cathode water management.

The results indicate that ozone has potential as a cathodic electron acceptor for increasing the power output of air-cathode MFCs. Further experiments measuring ozone concentration, cathode humidity or water content and internal resistance would help distinguish the relative contributions of reaction kinetics, gas transport, and cathode hydration to the observed performance.

Acknowledgements

This research is in performance of Project BG05SFPR001-3.004-0002-C02 "Development and improvement of professional and interdisciplinary education in technical and economic sciences and enhancement of the research capacity of the extractive industry through project-based doctoral studies", funded by Programme "Education", co-funded by the European Union.

References

1. Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R. A., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 40(17), 5181–5192. https://doi.org/10.1021/es0605016.
2. Waheeb, H. A., & Al-Alawy, A. F. (2020). Innovative microbial fuel cell design for investigation of cathode chamber effect and electricity generation enhancement. AIP Conference Proceedings, 2213, 020212. https://doi.org/10.1063/5.0000172.

3. Ucar, D., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2017). An overview of electron acceptors in microbial fuel cells. Frontiers in Microbiology, 8, 643. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00643. (Frontiers)
4. Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. Bioresource Technology, 101(6), 1533–1543. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017.
5. Logan, B. E. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. Nature Reviews Microbiology, 7, 375–381. https://doi.org/10.1038/nrmicro2113.
6. Oh, S. E.; Kim, J. R.; Joo, J.-H.; Logan, B. E. . (2009). Effects of applied voltages and dissolved oxygen on sustained power generation by microbial fuel cells. Water Science & Technology, 60(5), 1311–. doi:10.2166/wst.2009.444
7. Gholizadeh, A., Ebrahimi, A. A., Salmani, M. H., & Ehrampoush, M. H. (2017). Ozone-cathode microbial desalination cell; An innovative option to bioelectricity generation and water desalination. Chemosphere, 188, 470–477. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.009.
8. Gholizadeh, A., Salmani, M. H., Ebrahimi, A. A., Hosseini, S. S., Ehrampoush, M. H., Miri, M., Nikoonahad, A., & Pasalari, H. (2018). Improved power density and Cr/Pb removal using ozone in a microbial desalination cell. Environmental Chemistry Letters, 16, 1477–1485. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0760-5.
9. Chen, S., Wei, K., Wang, Y., Wang, J., et al. (2021). Enhanced recalcitrant pollutant degradation using hydroxyl radicals generated using ozone and bioelectricity-driven cathodic hydrogen peroxide production: Bio-E-Peroxone process. Science of the Total Environment, 776, 144819. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144819.
10. You, S. J., Zhao, Q. L., Zhang, J. N., Jiang, J. Q., & Zhao, S. Q. (2006). A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor. Journal of Power Sources, 162, 1409–1415.
11. Rhoads, A., Beyenal, H., & Lewandowski, Z. (2005). Microbial fuel cell using anaerobic respiration as an anodic reaction and biomineralized manganese as a cathodic reactant. Environmental Science & Technology, 39(12), 4666–4671. https://doi.org/10.1021/es048386r.
12. Pant, D., Singh, A., Van Bogaert, G., Irving Olsen, S., Singh Nigam, P., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2012). Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. RSC Advances, 2, 1248–1263.
13. Angelov, A., Bratkova, S., Loukanov Microbial fuel cell based on electroactive sulfate-reducing biofilm, A., Energy Conversion and Management, 2013, 67, pp. 283–286, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.024
14. Zhang, Fang, Deepak Pant, and Bruce E. Logan. "Long-Term Performance of Activated Carbon Air Cathodes with Different Diffusion Layer Porosities in Microbial Fuel Cells." Biosensors and Bioelectronics, vol. 30, no. 1, 2011, pp. 49–55. ScienceDirect, https://doi.org/10.1016/j.bios.2011.08.025
15. Lee, Mungyu et al. "Performance of an air-cathode microbial fuel cell under varied relative humidity conditions in the cathode chamber." Bioprocess and biosystems engineering vol. 42,8 (2019): 1247-1254. doi:10.1007/s00449-019-02122-9

ИНТЕЛИГЕНТЕН ПОДХОД ЗА РАЗРАБОТКА НА УМНИ СИСТЕМИ ЗА ЕНЕРГИЕН МЕНИДЖМЪНТ

д-р инж. Полина Кесова, E-mail: p.kesova@ellatzite-med.com
Инженер-Енергетик, Отдел Енергиен Мениджмънт, Елаците-Мед АД

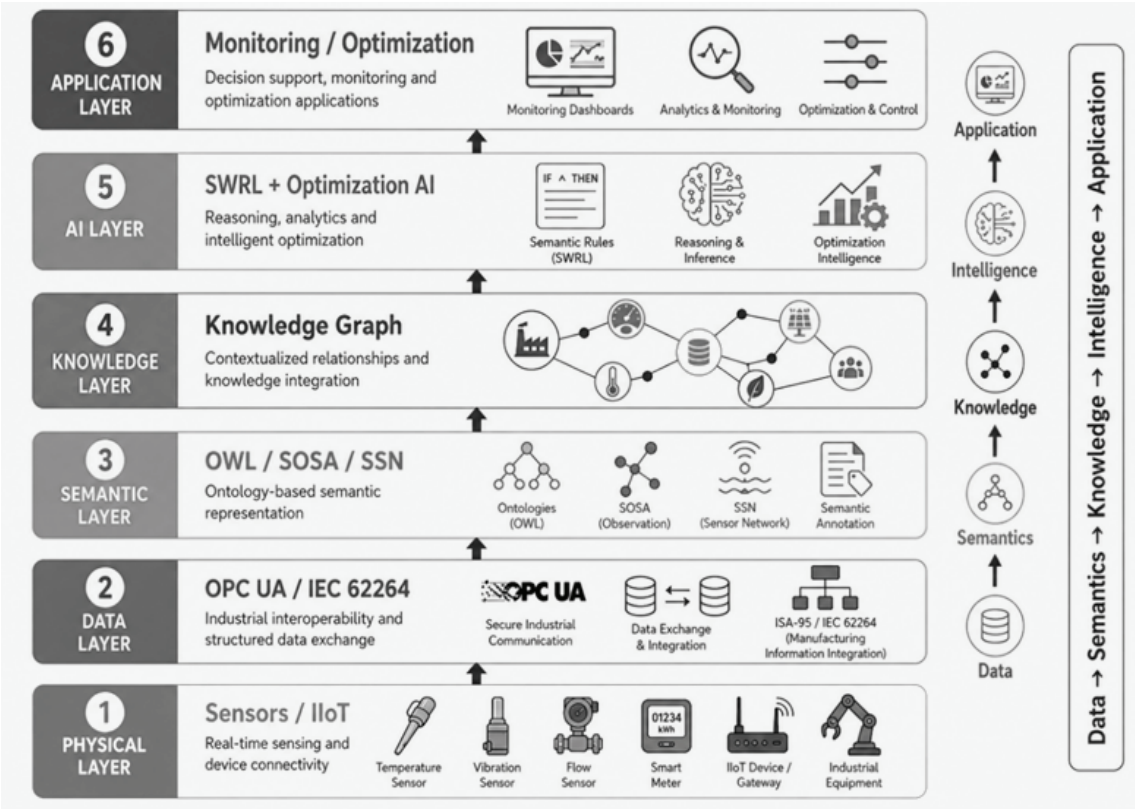
ABSTRACT
This paper presents an intelligent approach to the development of industrial energy management systems by integrating semantic technologies, ontological modelling, knowledge graphs, and artificial intelligence. The proposed hybrid semantic–optimisation framework combines symbolic and computational intelligence for contextual analysis, diagnostics, anomaly detection, and optimisation of energy processes. The methodological model comprises six interconnected stages—planning, modelling, semantic integration, system integration, intelligent analysis, and validation—and supports compatibility with industrial standards and platforms. The approach provides a foundation for a next-generation adaptive, explainable, and interoperable EnMS that supports decision-making and the continuous improvement of energy performance.

Същност на съвременните индустриални системи за енергиен мениджмънт

Съвременните индустриални системи за енергиен мениджмънт функционират в среда на хетерогенни данни, разнообразни комуникационни протоколи и необходимост от интеграция между измервателна инфраструктура, SCADA, MES, ERP и IIoT платформи. Това поставя изисквания към оперативната съвместимост, интелигентния анализ и автоматизираното управление на енергийните процеси.
Съществуващите EnMS обикновено са насочени към мониторинг, визуализация и отчетност, но често не осигуряват достатъчно развити механизми за семантична интеграция, онтологично моделиране и повторно използване на знания. Липсата на унифициран семантичен модел затруднява диагностиката, оптимизацията и подпомагането на управленските решения.
В този контекст онтологиите, графите от знания и символният изкуствен интелект позволяват формализирано представяне на енергийните и производствените процеси, контекстно описание на данните, автоматизиран логически извод и семантична оперативна съвместимост между индустриалните системи.
Към това се добавят методите на изчислителния интелект и интелигентността на роящите, които осигуряват адаптивна оптимизация. Комбинирането им със семантични технологии формира хибридна AI рамка, обединяваща знания, логически извод и оптимизационна интелигентност.

Хибридна семантично - оптимизационна рамка с изкуствен интелект на предложения подход

Предложеният подход за интелигентен енергиен мениджмънт се основава на хибридна AI концепция, илюстрирана на фиг.1. Тя интегрира символен изкуствен интелект, семантични технологии, онтологично моделиране, графи от знания и методи на изчислителния интелект в единна архитектура за анализ, диагностика и оптимизация на енергийните процеси в индустриална среда.



Фиг.1 Хибридна семантично-оптимизационна рамка с изкуствен интелект (авторска разработка; визуализация, създадена с помощта на ChatGPT Images, OpenAI)

Необходимостта от хибриден AI подход произтича от факта, че индустриалните енергийни данни се генерират от различни източници и описват едновременно производствени процеси, измервателна инфраструктура, енергийни показатели, оборудване и организационни цели. Самостоятелното използване само на правила или само на модели, базирани на данни, не е достатъчно за надеждна семантична интерпретация и адаптивна оптимизация.

Хибридната концепция комбинира няколко взаимно допълващи се парадигми. Символният AI осигурява формално представяне чрез онтологии, ограничения и правила. Семантичните технологии създават оперативна съвместимост, графите от знания свързват енергийните, производствените и измервателните обекти, а изчислителният интелект подпомага оптимизацията и избора на решения.

В предложения подход взаимодействат три основни слоя: семантичен слой, слой на графа от знания и интелигентен AI слой. Те осигуряват онтологично описание на понятията, съхранение на контекстна информация и използване на SWRL правила, логически извод и AI оптимизация за диагностика, откриване на аномалии и анализ на енергийните показатели.

Основно предимство е свързването на семантичния логически извод с AI оптимизацията. Онтологичният модел предоставя контекст, ограничения и цели, които насочват оптимизационните алгоритми и правят резултатите по-обясними и приложими в реална индустриална среда.

Така концепцията позволява изграждане на адаптивна и обяснима система за енергиен мениджмънт, която обединява анализ, базиран на знания, семантична оперативна съвместимост и оптимизационна интелигентност.

Основните компоненти на хибридната AI концепция и тяхната роля са обобщени в Табл.1

- Ориентирана към знание основа (Symbolic AI). Онтологии, семантични модели и SWRL правила формализират знанията за енергийни, производствени и измервателни процеси и подпомагат логическия извод.
- Семантична интелигентност (Semantic AI). Съгласуването на ISO 50001, IEC 62264 и SOSA/SSN осигурява контекстно разбиране и унифицирано представяне на данните.
- Граф от знания. Свързва оборудване, процеси, ресурси, измервателни устройства, EnPI и наблюдения, което позволява контекстни заявки и анализ на зависимости.
- Изчислителен интелект. Алгоритми като Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) се използват за оптимизация на реактивната мощност, минимизиране на загуби и повишаване на енергийната ефективност.
- Интеграция между AI компонентите. Семантичният слой предоставя контекст и ограничения на оптимизационните алгоритми, а резултатите се връщат към графа от знания.
- Интелигентна обратна връзка. Данните в реално време и историческите данни се използват за актуализиране на знанията, правилата и оптимизационните модели.

Табл.1. Роля на основните AI компоненти в предложената архитектура

Компонент	Роля в системата	Очакван резултат
Семантични технологии	Осигуряват унифицирано описание, свързване и обмен на данни	Семантична оперативна съвместимост
Онтологично моделиране	Формализира понятия, връзки, ограничения и правила	Структурирано представяне на знания
Граф от знания	Свързва енергийни, производствени и измервателни обекти	Контекстен анализ и семантични заявки
Символен AI	Реализира логически извод чрез OWL логически извод и SWRL правила	Обясним анализ и диагностика
Изчислителен интелект	Използва оптимизационни алгоритми и интелигентност на роящите	Оптимални решения и адаптивно управление
IIoT технологии	Осигуряват поток от измервателни и производствени данни	Данни в реално време
Интелигентен анализ и оптимизация	Комбинира логически извод, диагностика и AI базирана оптимизация	Подпомагане на вземането на решения

В резултат предложеният подход реализира синергия между символен и изчислителен интелект и създава основа за EnMS от следващо поколение, способна да интегрира данни, знания, логически извод и оптимизационни решения.

Общ модел на предложение подход

Предложеният интелигентен подход за разработка на EnMS е структуриран като последователност от шест взаимосвързани етапа: планиране, моделиране, семантична интеграция, системна интеграция, анализ и AI, и валидация (фиг.2). Всеки етап има входни данни, методи за обработка и резултати, което позволява систематично изграждане на система, съвместима с принципите на непрекъснато подобрение и управление, базирано на знания.

Цялостната рамка интегрира стандартизирани модели, семантични технологии и AI, като осигурява преход от данни към знания и от знания към интелигентно управление в контекста на Индустрия 4.0. Тя съчетава стандартизирано моделиране, логически извод и AI конвейери в затворен цикъл за управление на енергийните системи. Табл.2 формализира метода чрез входни данни, обработка, изход и очакван резултат за всеки от шестте етапа.



Фиг.2 Методологична рамка за разработка на интелигентна система за енергиен мениджмънт (авторска разработка; визуализация, създадена с помощта на ChatGPT Images, OpenAI)

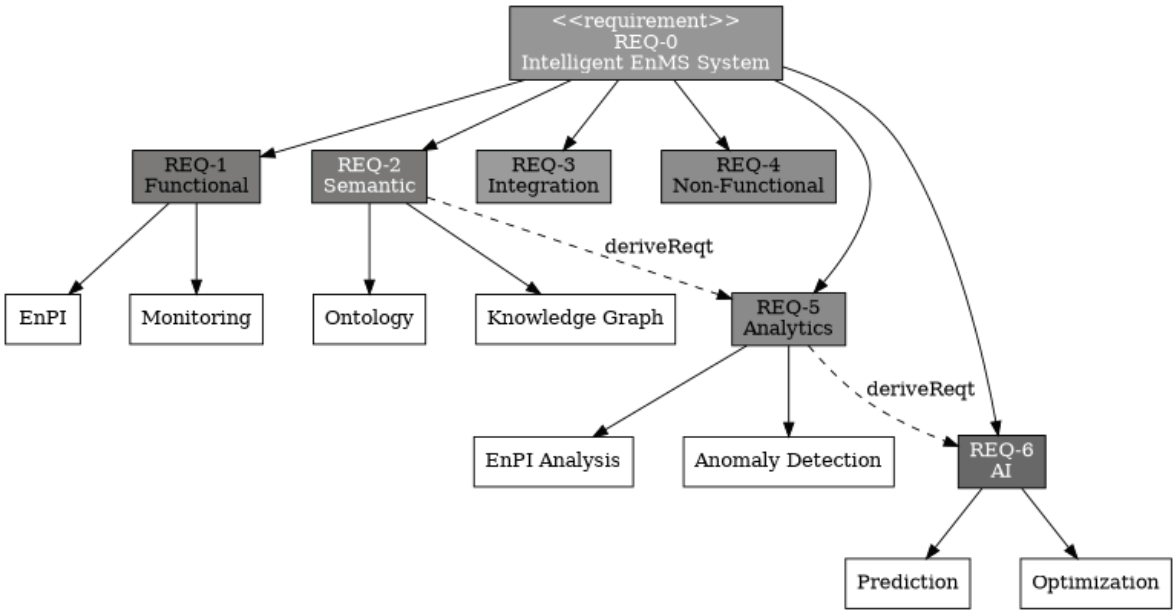
Табл.2 Етапи на предложения подход – входни данни, обработка и резултати

№	*Етап на метода*	*Вход (Input)*	*Обработка / метод*	*Изход (Output)*	*Очакван резултат*
1	**Планиране и анализ**	**Данни за енергопотребление, структура на предприятието, производствени процеси**	**Анализ на изискванията, идентификация на енергийни потребители**	**Формализирани изисквания към системата**	**Ясно дефинирана основа за разработка на EnMS**
2	**Моделиране на системата**	**Данни за съоръжения, процеси и енергийни ресурси**	**Моделиране на ресурси и процеси на база IEC 62264**	**Структуриран модел на енергийната система**	**Създаване на формализирано представяне на системата**
3	**Семантична интеграция**	**Модел на системата, данни от сензори**	**Разработка на онтология (OWL), дефиниране на класове и отношения**	**Унифициран семантичен модел**	**Осигуряване на интероперативност между системите**
4	**Интеграция със системите**	**Семантичен модел, данни от EnMS и MES**	**Интеграция чрез IEC 62264 и комуникационни протоколи**	**Свързана информационна система (EnMS + MES + ERP)**	**Координирано управление на енергийни и производствени процеси**
5	**Анализ и интелигентна обработка**	**Исторически и текущи енергийни данни**	**Анализ на данни, алгоритми за оптимизация и прогнозиране**	**Аналитични резултати и препоръки**	**Подобрено вземане на решения**
6	**Валидация и оценка**	**Резултати от системата, реални данни**	**Оценка на ефективността, сравнение преди/след**	**Потвърдени резултати**	**Демонстрирана приложимост и ефективност**

Таблицата демонстрира системния характер на подхода и връзката между изисквания, модели, интеграция и реализация на интелигентна EnMS.

Дефиниране на изискванията към системата за енергиен мениджмънт

Ефективността на EnMS зависи от коректното дефиниране на функционални, архитектурни, интеграционни и аналитични изисквания. В съответствие със SysML диаграмата на фиг.3 изискванията към разработваната семантична EnMS са групирани в шест основни категории.



Фиг.3 SysML диаграма на изискванията към интелигентна система за енергиен мениджмънт

- Функционални изисквания (REQ-1) – Те определят основните възможности, които интелигентната система за енергиен мениджмънт трябва да осигурява при мониторинг, анализ и управление на енергийните процеси в индустриална среда. Те са свързани със събиране, обработка, визуализация и използване на енергийни данни за оценка на енергийната ефективност и подпомагане на управленските решения.

Системата трябва да осигурява непрекъснат мониторинг на енергопотреблението чрез събиране на данни от измервателни устройства, сензори, SCADA, MES и IIoT източници. Събраните данни следва да бъдат достъпни в реално време и да позволяват анализ на текущи и исторически стойности, визуализация чрез графики, табла за управление и справки.

- Семантични изисквания (REQ-2)- Семантичните изисквания са ключов компонент при разработването на интелигентна система за енергиен мениджмънт, тъй като осигуряват формализирано представяне на знанията за енергийните, производствените и измервателните процеси. Те са насочени към преодоляване на хетерогенността на индустриалните данни и към осигуряване на семантична оперативна съвместимост между различни информационни системи, измервателни устройства и аналитични модули. Системата трябва да поддържа онтологично моделиране на основните понятия и зависимости, свързани с енергийния мениджмънт. Това включва представяне на енергийна политика, енергийни цели, показатели за енергийна ефективност (EnPI), базови енергийни линии (EnB), значими енергийни потребители (SEU), производствени процеси, оборудване и сензорни данни. За целта се използват формални модели, базирани на OWL/RDF, които позволяват еднозначно описание на класове, свойства, ограничения и логически зависимости.

Изисквания за интеграция и стандартизация (REQ-3)- Изискванията за интеграция и стандартизация определят способността на системата за енергиен мениджмънт да взаимодейства с хетерогенни индустриални системи, комуникационни протоколи, измервателни устройства и информационни модели. Те са от съществено значение за изграждането на интелигентна EnMS, съвместима с принципите на Industry 4.0 и Industry 5.0, както и с изискванията за оперативна съвместимост в съвременните индустриални предприятия.Системата трябва да осигурява интеграция с оперативните технологии и индустриалната измервателна инфраструктура чрез използване на стандартизирани комуникационни механизми.

- Нефункционални изисквания (REQ-4)- Те определят качествените характеристики на системата и са свързани с нейната надеждност, мащабируемост, производителност, сигурност и възможност за интеграция в реална индустриална среда. Те имат ключово значение за практическата приложимост на интелигентната система за енергиен мениджмънт. Системата трябва да осигурява оперативна съвместимост с различни индустриални платформи, включително SCADA, MES, ERP, IIoT устройства и OPC UA сървъри.

Аналитични (REQ-5) и AI изисквания (REQ-6)- Те определят способността на системата да трансформира събраните данни и семантично представените знания в полезна информация, заключения, прогнози и оптимизационни решения. Те осигуряват преход от мониторинг към интелигентен анализ, диагностика, прогнозиране и подпомагане на вземането на решения.

Аналитичният слой трябва да осигурява изчисляване, анализ и проследяване на показатели за енергийна ефективност (EnPI), сравнение с базови енергийни линии (EnB), оценка на отклонения и анализ на изпълнението спрямо зададени цели. Това включва агрегиране на данни по времеви интервали, оборудване, процеси, производствени зони и значими енергийни потребители.Системата трябва да поддържа механизми за откриване на аномалии чрез комбинация от прагови стойности, статистически методи, семантични правила и AI модели.

Заключение

Предложеният интелигентен подход показва, че ефективната EnMS от следващо поколение следва да обединява данни, формализирани знания, логически извод и оптимизационни алгоритми в единна, адаптивна и обяснима архитектура. Комбинирането на семантични технологии, онтологично моделиране, графи от знания и изчислителен интелект осигурява основа за:

- непрекъснат мониторинг, контекстен анализ и ранно откриване на отклонения в енергийните процеси;
- семантична и системна интеграция на EnMS със SCADA, MES, ERP и IIoT инфраструктурата на предприятието;
- оперативна съвместимост и повторно използване на знания чрез стандартизирани информационни и онтологични модели;
- обяснимо подпомагане на решенията и адаптивна оптимизация, насочени към устойчиво подобряване на енергийната ефективност.

Научно-приложният принос на подхода се изразява в съчетаването на символен и изчислителен интелект в затворен управленски цикъл, при който контекстът и ограниченията от онтологичния модел насочват аналитичните и оптимизационните алгоритми, а получените резултати актуализират графа от знания. По този начин се създават предпоставки за преминаване от традиционен мониторинг към проактивно, адаптивно и обяснимо управление на енергийните процеси.

Литература

1. ISO 50001-2011, Energy management systems - Requirements with guidance for use (IDT).
2. Antunes P., Carreira P., Silva da M.M., Towards an energy management maturity model, Energy Policy, Elsevier, vol. 73(C), pages 803-81, 2014
3. Blanes L.M., Costa A., Rehault N., Keane M.M., Integration of Fault Detection and Diagnosis with Energy Management Standard ISO 50001 and Operations and Maitenance of HVAC Systems, 11th. REHVA World Congress and 8th. International Conference on IAQVEC. CLIMA 2013. At: Prague. Czech Republic, 2013.
4. Bradicich T., The 7 Principles of the Internet of Things (IoT), 2015,