

**ГІРНИЧА  
ЕЛЕКТРО-  
МЕХАНІКА  
та АВТОМАТИКА**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЗБІРНИК**

**Заснований у 1965 р.**

**96**

**Дніпро  
2016**

---

# Засновник – Національний гірничий університет

---

**Рекомендовано до видання вченою радою  
Державного вищого навчального закладу  
"Національний гірничий університет"**

*(Протокол № 8 від 23 червня 2016 р.)*

---

## **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Півняк Г.Г.**                    **Головний редактор,**  
академік НАН України, ректор ДВНЗ "НГУ"

**Шкрабець Ф.П.**            **Заступник головного редактора,**  
професор, ДВНЗ "НГУ"

**Ципленков Д.В.**           **Відповідальний секретар,**  
к.т.н., доцент, ДВНЗ "НГУ"

## **EDITORIAL BOARD**

**Pivniak G.G.**                    **Chief Editor,**  
Academician of NAS of Ukraine, Rector of  
NMU

**Shkrabets F.P.**                **Deputy Editor,**  
Professor, NMU

**Tsyplenkov D.V.**            **Executive Managing Editor,**  
PhD, Associate Professor, NMU

## **Члени редакційної колегії**

**Бешта О.С.**                    член-кор. НАН України, ДВНЗ "НГУ"

**Блюсс Б.О.**                    професор,  
ІГТМ НАН України ім. Н.С. Полякова

**Випанасенко С.І.**            професор, ДВНЗ "НГУ"

**Заболотний К.С.**            професор, ДВНЗ "НГУ"

**Іванов О.Б.**                    професор, ДВНЗ "НГУ"

**Колосов Д.Л.**                професор, ДВНЗ "НГУ"

**Маліновський А.А.**        професор, НТУ "Львівська політехніка"

**Мілих В.І.**                    професор, НТУ "ХПІ"

**Муха А.М.**                    професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна

**Плешков П.Г.**                професор, Кіровоградський НТУ

**Розен В.П.**                    професор, НТУ "КПІ"

**Самуся В.І.**                    професор, ДВНЗ "НГУ"

**Сивокобиленко В.Ф.**      професор, ДонНТУ

**Сиченко В.Г.**                професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна

**Сінчук О.М.**                професор, КНУ

**Слесарєв В.В.**              професор, ДВНЗ "НГУ"

**Ткачов В.В.**                професор, ДВНЗ "НГУ"

**Нойбергер Н.**                професор, Есслінгенський університет  
прикладних наук, Німеччина

**Резизант В.**                професор, Вроцлавський технічний  
університет, Польща

## **The members of Editorial Board**

**Beshta O.S.**                    Corresponding Member of NAS of  
Ukraine, NMU

**Bliuss B.O.**                    Professor,  
M.S. Polyakov IGTM of NAS of Ukraine

**Vypanasenko S.I.**            Professor, NMU

**Zabolotniy K.S.**            Professor, NMU

**Ivanov O.B.**                    Professor, NMU

**Kolosov D.L.**                Professor, NMU

**Malinovskiy A.A.**            Professor, NTU "Lviv Polytechnic"

**Milykh V.I.**                    Professor, NTU "KhPI"

**Mukha A.M.**                    Professor, Academician V. Lazarjan DNURT

**Pleshkov P.G.**                Professor, Kirovograd NTU

**Rozen V.P.**                    Professor, NTU "KPI"

**Samusia V.I.**                    Professor, NMU

**Sivokobylenko V.F.**        Professor, DonNTU

**Sychenko V.G.**                Professor, Academician V. Lazarjan DNURT

**Sinchuk O.M.**                Professor, KNU

**Slesarev V.V.**                Professor, NMU

**Tkachev V.V.**                Professor, NMU

**Noiberger N.**                Professor, Esslingen University of Applied  
Sciences, Germany

**Rebizant V.**                    Professor, Wroclaw University of  
Technology, Poland

---

**Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (Наказ Міністерства освіти і науки України від 16.05.2016 № 515), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук**

## **Адреса редакції**

Кафедра "відновлювані джерела енергії", ДВНЗ "НГУ",  
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна  
Тел: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Факс: (056) 370-13-92  
E-mail: [ShkrabetsF@nmu.org.ua](mailto:ShkrabetsF@nmu.org.ua). [gea@nmu.org.ua](mailto:gea@nmu.org.ua)  
Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>

## **Editorial office adress**

Department of Renewable Energy Sources, NMU,  
19 D. Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine  
Tel: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Fax: (056) 370-13-92  
E-mail: [ShkrabetsF@nmu.org.ua](mailto:ShkrabetsF@nmu.org.ua). [gea@nmu.org.ua](mailto:gea@nmu.org.ua)  
Website: <http://gea.nmu.org.ua>

Збірник зареєстрований у Міністерстві інформації України.  
Реєстраційний номер КВ № 7498 від 03.07.2003.

© НГУ, 2016

# ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.317.38

*Л.В. Лещенко, О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук*

*(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)*

## ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ НА ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ ОБЛІКУ

*Сформована структура комплексу визначення складових потужності в елементах електропостачання електрорухомого складу та тягової підстанції, зважаючи на вимоги, які пред'являються до автоматизованих системи комерційного обліку електроенергії. Запропоновано алгоритми визначення складових потужності для обліку електричної енергії та її показників з урахуванням спотворення струму, напруги та несиметрії зазначених параметрів, який ґрунтується на положеннях стандарту IEEE STD/1459-2010.*

**Ключові слова:** *тягова підстанція; вимірювальна система; складові потужності.*

*Сформирована структура комплекса определения составляющих мощности в элементах электро-снабжения электродвижного состава и тяговой подстанции, учитывая требования, предъявляемые к автоматизированным системам коммерческого учета электроэнергии. Предложены алгоритмы определения составляющих мощности для учета электрической энергии и показателей с учетом искажения тока, напряжения и несимметрии указанных параметров, основанные на положениях стандарта IEEE STD / 1459-2010.*

**Ключевые слова:** *тяговая подстанция; измерительная система; составляющие мощности.*

*Formed structure of complex power components determination in the elements of electromotive power and traction substation, given the requirements that apply to the automated system of commercial electric power accounting. Algorithms determine the components of power for electricity metering and its performance taking into account the distortion of current and voltage unbalance these parameters, based on the provisions of the standard IEEE STD/1459-2010.*

**Keywords:** *traction substation; measuring system; components of power.*

Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, який забезпечує 82% вантажних і майже 50% пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту. Експлуатаційна мережа залізниць України складає майже 22 тис. км, з яких 65% електрифіковано [1]. Застосування електрообладнання на основі силових напівпровідникових елементів, а саме, використання тиристорів у випрямно-інверторних перетворювачах електровозів змінного струму дозволяє плавно регулювати напругу на тягових двигунах, забезпечуючи високі тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу [2, 3]. З іншого боку нелінійність вольт-амперної характеристики напівпровідникових елементів приводить до значних спотворенням форми кривої тягового струму та синусоїдальної форми кривої робочої напруги контактної мережі на струмоприймачі електровозу, що погіршує показники якості електричної енергії. В таких умовах експлуатації ефективне функціонування електрорухомого складу та системи електропостачання ускладнене [4]. Тому все частіше постають питання контролю показників електричної енергії з урахуванням її якості електричної як на електрорухомому складі так і на тягових підстанціях [5].

Ефективність розроблювальних технічних рішень покращення якості електричної енергії та економії при впровадженні енергозберігаючих технологій на електрорухомому складі необхідно оцінювати із застосуванням сучасних засобів вимірювання. Вони дозволяють здійснювати реєстрацію миттєвих значень електричних параметрів, та подальшу їх обробку [4, 5]. Для забезпечення господарської діяльності з передачі та постачання електроенергії, починаючи з 2001 р., на залізницях України активно впроваджуються автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) [5].

**Метою роботи** є аналіз структури та алгоритмів обробки параметрів режиму первинних вимірювальних пристроїв у системі автоматизованого контролю та обліку електричної енергії при визначенні складових потужності.

Основна мета впровадження АСКОЕ – отримання достовірної інформації щодо обсягів споживання, генерації, передачі та розподілу електроенергії і потужностей всіма об'єктами системи електропостачання [6]. Така система передбачає наявність двох підрівнів: автоматизованої системи обліку електроенергії на фідерах контактної мережі (АСОЕ ФКМ) та автоматизованої системи обліку електроенергії на електрорухомому складі (АСОЕ ЕРС), синхронізованих між собою; причому до обох підсистем повинні виступати жорсткі вимоги за функціональністю, точністю вимірювань і надійністю.

Після програмної обробки інформації з двох систем (АСОЕ ФКМ і АСОЕ ЕРС) на єдиному сервері АСКОЕ базово можуть отримувати звіти [7], які містять дані про:

- витрати і повернення електроенергії за лічильниками ЕРС за результатами поїздки;
- витрати і повернення електроенергії на тягу поїздів за лічильниками на ФКМ тягових підстанцій і ЕРС в межах залізниці, тарифної зони, дистанції електропостачання або міжпідстанційної зони за необхідний період;
- значення питомої витрати і небалансу електроенергії на тягу поїздів в межах залізниці, тарифної зони, дистанції електропостачання, міжпідстанційної зони за період;
- значення небалансу прийому і розподілу електричної енергії по шинам тягової підстанції за необхідний період;
- витрати і повернення електроенергії на тягу поїздів по тяговій підстанції і окремим ФКМ за необхідний період.

Отримана інформація дозволяє:

- виявляти міжпідстанційні зони з нерівномірно завантаженими тяговими підстанціями;
- визначати на підставі даних про рух потужності по ФКС середні значення зрівняльних струмів в контактній мережі міжпідстанційних зон ділянок;
- забезпечувати підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування без аналізу поїзної обстановки і визначення конкретного місця розташування в фідерній зоні ЕРС за рахунок оперативного контролю поточного навантаження на ФКМ;
- виконувати синхронне осцилографування процесів, що виникають в контактній мережі, що дозволяє оцінити потекорозподіл енергії рекуперативної і якості електроенергії на ФКМ і ЕРС;
- забезпечувати достовірний контроль питомої витрати і небалансу електричної енергії на тягу поїздів, що дозволить підвищити ефективність планування витрат електроенергії на тягу поїздів на всіх рівнях, а також обґрунтувати мережеву складову тарифу на електроенергію на основі фактично виміряних величин споживання електроенергії при експлуатації приватного ЕРС;
- оптимізувати закупівлі електроенергії на оптовому ринку електроенергії за рахунок оперативного прогнозу споживання електроенергії на найближчі години і коригування добових прогнозів про витрату на тягу поїздів;
- оцінювати зниження енергетичної ефективності тяги поїздів з урахуванням системи тягового електропостачання, обумовленого обмеженням швидкості руху поїздів з подальшим адресним визначенням претензій до винуватців збільшення вартості залізничних перевезень.

Розглянемо структуру організації системи контролю споживання електричної енергії на ЕРС (рис. 1) [8]. Для проведення вимірювань на вводах тягового трансформатора і фідерах контактної мережі (ФКМ) тягової підстанції встановлені два комплекти інформаційно-обчислювальних комплексів (ІОК).

Як показують результат досліджень [8] показників якості електричної енергії з міжпідстанційної зони двостороннього живлення, можуть бути сформовані результати вимірювань профілю активної потужності на вводах (27,5; 220 кВ) трансформатора (рис. 2, а) та фідера контактної мережі (рис. 2, б). Ділянка тягової мережі, яка досліджувалась складається з трьох тягових підстанцій і двох міжпідстанційних зон (L1, L2). При проведенні експерименту ця ділянка розглядалася як єдина частина ЕЕС з тяговими навантаженнями. Графіки на рис. 2 дозволяють визначити потоки потужності, споживані з системи зовнішнього електропостачання і віддавані в тягову мережу.

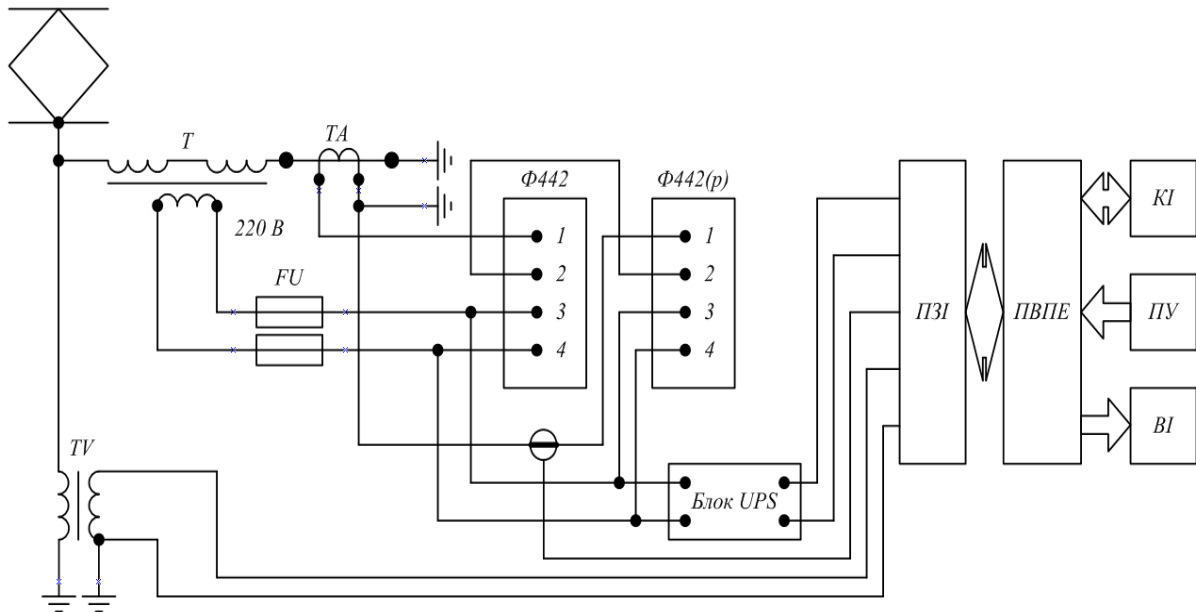


Рис. 1. Схема під'єднання ІОК на електровозі:

**T** – трансформатор; **TA** – трансформатор струму; **TV** – трансформатор напруги; **FU** – запобіжник плавкий;  
**Ф442** – лічильник активної електричної енергії; **Ф442(р)** – лічильник реактивної електричної енергії;  
**ПЗІ** – пристрій збору інформації; **ПВПЕ** – пристрій визначення показників енергоспоживання;  
**КІ** – комутаційний інтерфейс; **ПУ** – пульт управління; **ВІ** – візуальний інтерфейс

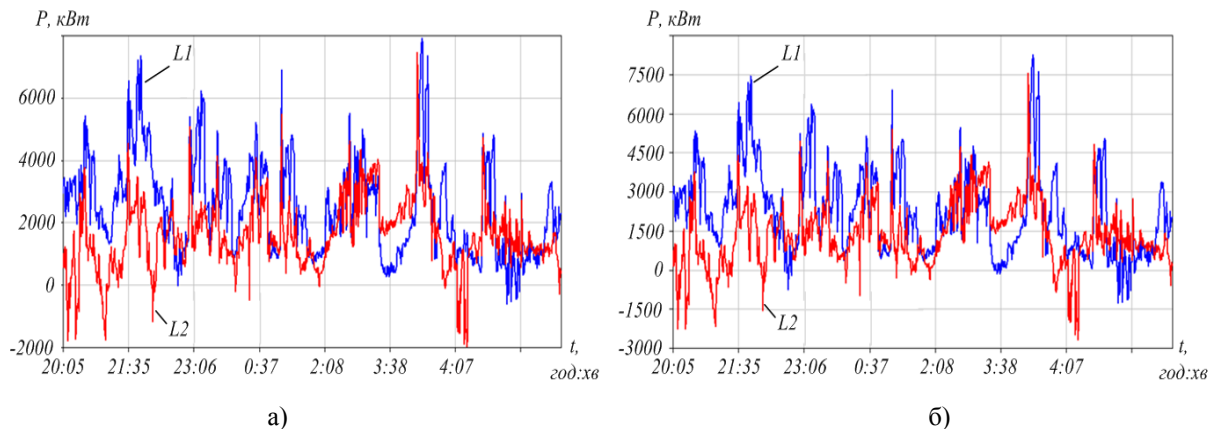


Рис. 2. Активна потужність по введенню 220 кВ тягового трансформатора в випадку двостороннього живлення ділянки (а), активна потужність на фідері 27,5 кВ тягового трансформатора у випадку двостороннього живлення ділянки (б)

Представлені дані показують співвідношення цих потужностей, ця інформація може використовуватися для визначення поточного стану електроенергетичної системи вироблення керуючий впливів для систем регулювання режимів роботи ЕЕС. Для визначення структури втрат електроенергії для одного зрізу за результатами експерименту визначають розподіл потужності від вхідних ввідів тягового трансформатора до електровоза при консольному живленні від одного трансформатора. Це раціонально виконувати використанням комбінованого контролю показників споживання на ЕРС та ФКМ.

Традиційно для визначення втрат потужності використовують значення активної, реактивної і повної потужності [9]. Останнім часом, зважаючи на збільшення ЕРС з напівпровідниковими перетворювальними агрегатами, враховують наявність вищих гармонік у струмі та напрузі, відповідно виникає потреба корекції процедури визначення показників енергоспоживання. Досвід розрахунку та експлуатації [8] показує наступні показники розподілу потужності в системі електропостачання ЕРС – рис. 3.

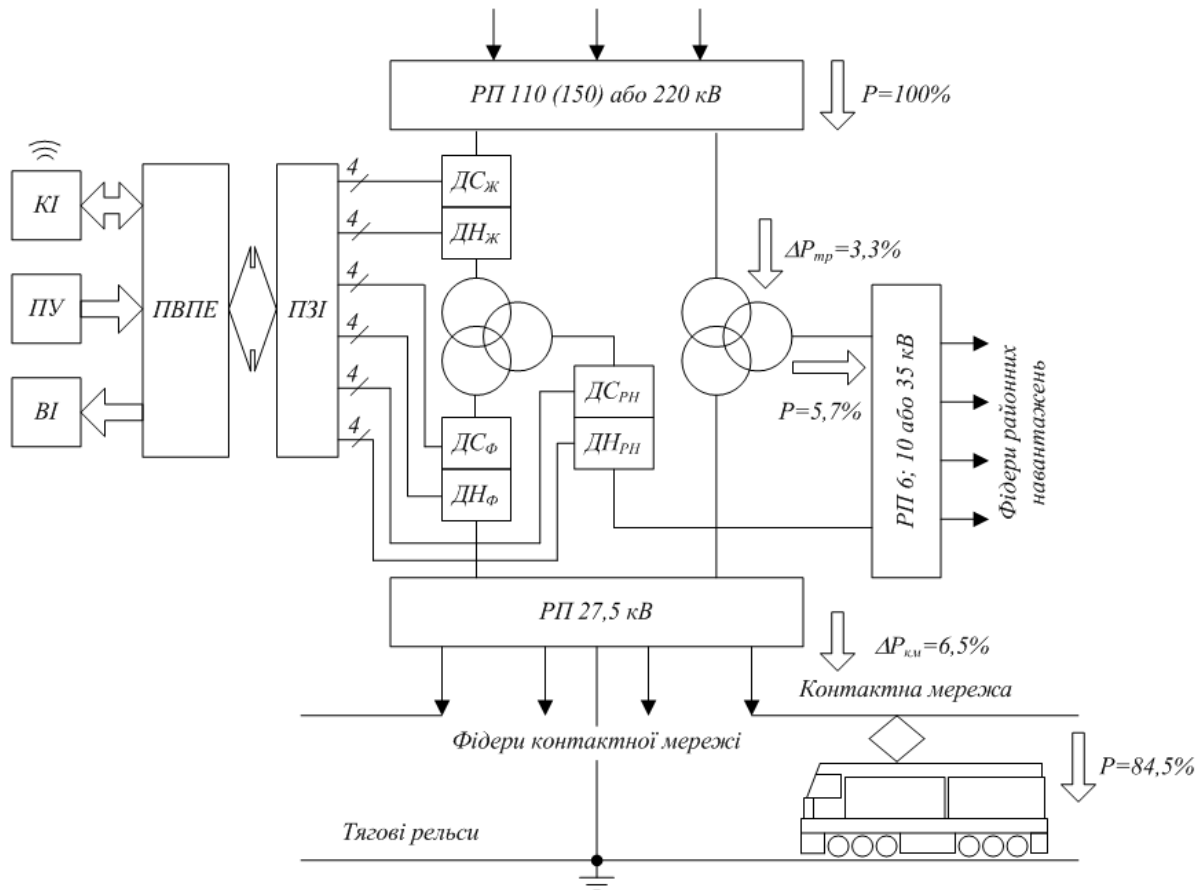


Рис. 3. Структура вимірювальної системи тягової підстанції

Величину неактивної потужності визначають як таку, що складається з реактивної потужності основної гармоніки і складової неактивної потужності, яка визначається наявністю вищих гармонік [9]. При цьому відзначають що вищі гармоніки в складі активної потужності складають 22-25%. Зважаючи на експлуатацію ЕРС з напівпровідниковими перетворювачами, та викривлення струмів та напруг контактної мережі, ФКМ та силових трансформаторів підстанції слід враховувати вплив цих викривлень на потужність та споживання електричної енергії [10]. Таким чином, за наявності якісної апаратної частини, постає питання визначення відповідного алгоритму обчислення показників енергоспоживання. При цьому лінії зовнішнього електропостачання, елементи тягової мережі, розподільчі лінії поздовжнього електропостачання і автоблокування, маючи певні частотні характеристики впливають на розподіл гармонійного складу напругу та струму. Все це негативно впливає на роботу приладів обліку електричної енергії та піднімає проблему електромагнітної сумісності засобів обліку з факторами, що впливають на точність обліку.

Наразі єдина методика визначення реактивної потужності відсутня. Існує досить широкий спектр думок з приводу поняття реактивної потужності. Незважаючи на відмінності, для кожного виразу є своя фізична інтерпретація [8]:

- фундаментальна реактивна потужність – визначаються тільки основні гармоніки і, отже, дає інформацію про ефективності перенесення енергії;
- реактивна потужність за Будаєну – об'єднує потужність яка визначає процеси обміну енергією між реактивними елементами мережі та споживача, з урахуванням викривлення струму та напруги;
- реактивна потужність за Фрізе – визначається шляхом поділу струму в часовому інтервалі на дві частини, одна з яких переносить активну енергію (не залежить від частоти) і додатковий струм;
- реактивна ємнісна / індуктивна потужність за Кастерсом-Муром – визначається шляхом поділу струму на частини, які текли б через один еквівалентний конденсатор або котушку індуктивності;
- реактивна потужність за Шароном – максимальна реактивна потужність, яка може бути компенсована за допомогою пасивних елементів;

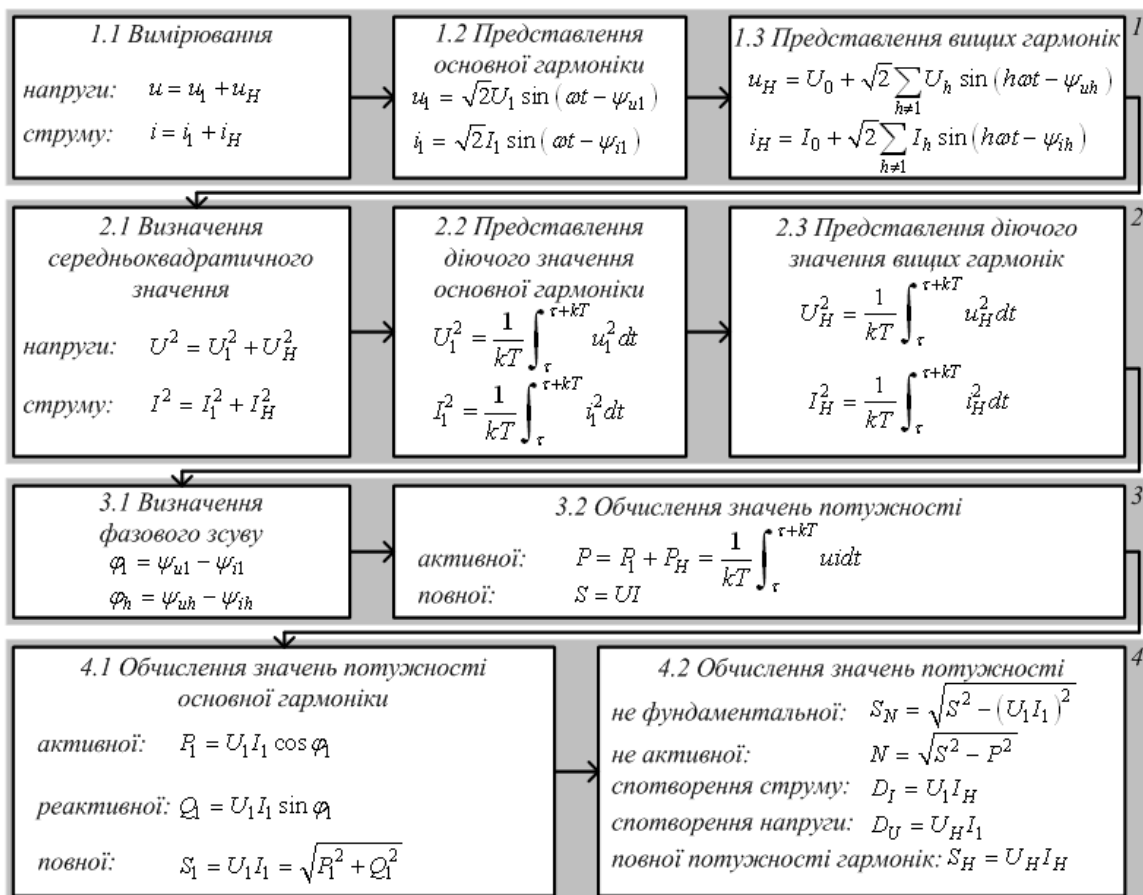
– реактивна потужність за Чарнецьким – передбачає декомпозицію миттєвого струму на дві ортогональних складових: активний і реактивний струм. Неактивна потужність визначається як продукт середньоквадратичних значень напруг і струмів, в якому вектори напруг і струмів обчислюються як комплекси квадратичних значень для кожної гармонійної частоти;

– реактивна потужність за Маєвським – геометричне трактування цього підходу полягає в тому, що площа вольт-амперної характеристики двополюсника, описаної за період, пропорційна реактивній потужності;

– теорія миттєвої потужності розділяє складові потужності на два типи: потужність, що передається від джерела в навантаження, що здійснює корисну роботу і всі інші, які визначають перетоки потужності в системі електропостачання і втрати. За допомогою активних компенсаторів, наприклад типу СТАТ-КОМ, можна компенсувати частину зазначених втрат потужності;

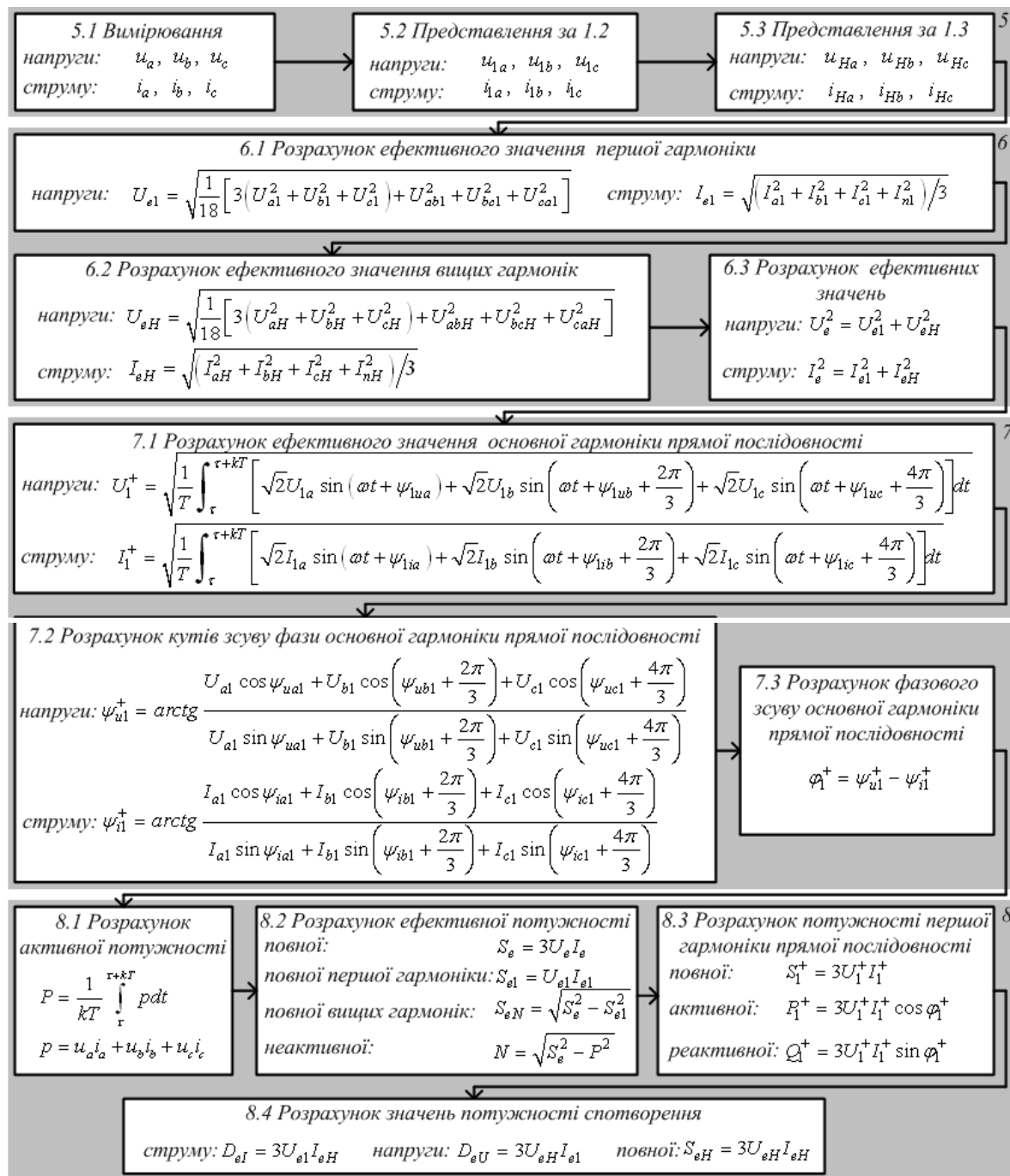
Аналіз різних теорій потужності показує, що у кожній методикі є свої недоліки та переваги. Для визначення показників споживання електричної енергії ЕРС та ФКМ, які б раціонально характеризували процес, розглянемо декілька існуючих алгоритмів, які використовуються в ІВК. На рис. 4 наведений алгоритм розрахунку показників енергоспоживання, який застосовують для ЕРС та ФКМ [11], а на рис. 5 подібний для аналізу електроспоживання тягової підстанції по стороні високої напруги зважаючи на споживання за трьома фазами.

На рис. 5 показаний алгоритм визначення показників потужності трифазних несиметричний кіл при контролі струмів та напруг трифазної мережі. Використані індекси означають: «1» – основна гармоніка, «+» – пряма послідовність, «е» – ефективне значення. Таким чином, в результаті реалізації алгоритмів наведених на рисунках 4 та 5 в системі автоматизованого контролю електроспоживання стають доступними показники, які характеризують основні показники електроспоживання – активну та реактивну потужності за першою гармонікою; додаткові показники електроспоживання – потужності зумовлені спотворенням струму, спотворенням напруги та взаємодією вищих гармонік струму та напруги. На відміну



**Рис. 4. Алгоритм визначення потужності в однофазному колі з несинусоїдальними сигналами**

від показників ФКМ та ЕРС, в ЕЕС додатково визначаються показники електроспоживання, які відбивають вплив несиметрії – напруга та струм прямої послідовності та відповідні потужності прямої послідовності: повна, активна та реактивна.



**Рис. 5. Алгоритм визначення показників потужності трифазних несиметричних кіл**

**Висновки.**

На підставі аналізу вимог до автоматизованих системи комерційного обліку електроенергії, зважаючи на характер потужності, яка циркулює в елементах електропостачання електрорухомого складу та структуру тягової підстанції сформована структура комплексу визначення складових потужності для обох об'єктів контролю.

Запропоновано алгоритми визначення складових потужності для обліку електричної енергії та її показників з урахуванням спотворення струму, напруги та несиметрії зазначених параметрів, який ґрунтується на положеннях стандарту IEEE STD/1459-2010.



Список літератури

1. Феоктистов В.П. Электрические железные дороги: учебник / В. П. Феоктистов, Ю. Е. Просви́ров. – М.: Моск. ун-т путей сообщения, 2006. – 312 с.
2. Зиновьев Г. С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров – 5-е изд., испр. и доп. / Г. С. Зиновьев. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 667 с.
3. Грищенко А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник / А. В. Грищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 320 с.
4. Кабалык Ю. С. Системы управления электроподвижным составом: учеб пособие / Ю. С. Кабалык. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2013. – 119 с.
5. Малоземов Б.В. Энергосберегающие технологии технического обслуживания электрического транспорта / Б. В. Малоземов // Электроэнергия и будущее цивилизации: Материалы Международной научно-технической конференции. – Томск, 2004. – С. 391-393.
6. Пантелеев В. И. Модернизация систем тягового электроснабжения переменного тока / В. И. Пантелеев, А. Г. Машкин, П. Ю. Лукьянов // Энергетик. – 2011. – №7. – С. 13-15.
7. Черемисин В. Т. Снижение небаланса электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и электроподвижного состава / В. Т. Черемисин, Е. Л. Емельяненко, С. Ю. Ушаков // Железнодорожный транспорт: науч.-теоретич. технико-экономич. журн. – 2011. – № 2. – С. 43–48.
8. Совалов С. А. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / С.А. Совалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.
9. Крогерис А. Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 149 с.
10. Слепцов М. А. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
11. IEEE STD/1459-2010. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2000. – 52 с.
12. Курись Л. В. Energy processes in the system of controlled storage condenser – DC motor / Л.В. Курись, О.В. Бялобржеський // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 93. – С. 83-88.
13. Бялобржеський О. В. Розробка автоматизованої виміральної системи по дослідженню несинусоїдності та несиметрії напруги трьохфазної системи мережі / О.В. Бялобржеський, О.Ю. Давидов // Вісник КДУ: Наукові праці КДУ. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип.3/2010 (62), Ч2 с. 170- 174
14. Давыдов А. В. Сигналы и линейные системы: Тематические лекции / А. В. Давыдов. – Екатеринбург: УГТУ, 2006. – 125 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Сінчуком О.М.*

УДК 621. 311

**В.В. Радченко, канд. техн. наук**

*(Україна, Запорізька державна інженерна академія)*

## ОСНОВА ПОЛІПРЕДМЕТНОГО ПІДХОДУ В ЕНЕРГЕТИЦІ

**Анотація.** Показана основа формування поліпредметного системного підходу до об'єктів енергетики. Розглянуті основні групи різномірних діючих складових та їх взаємодія. Відображені можливості формування впливів різномірних чинників на енергетичні об'єкти. Наведені основні вимоги й умови формування просторів завдань і впливів. Запропонована поліпредметна система матеріальних, енергетичних і інформаційних складових функціонального опису енергетичних об'єктів.

**Ключові слова:** Енергетика, Опис енергетичних об'єктів.

**Аннотация.** Показана основа формирования полипредметного системного подхода к объектам энергетики. Рассмотрены основные группы действующих разнородных составляющих и их взаимодействие. Отражены возможности формирования влияний разнородных факторов на энергетические объекты. Приведены основные требования и условия формирования пространств задач и влияний. Предложена полипредметная система материальных, энергетических и информационных составляющих функционального описания энергетических объектов.

**Ключевые слова:** Энергетика, Описание энергетических объектов.

**Abstract.** Basis of forming of polysubjecting of approach of the systems is shown to the objects of energy. The basic groups of operating heterogeneous constituents and their co-operation are considered. Possibilities of forming of influencing of heterogeneous factors are reflected on power objects. The basic requirements and terms of forming of spaces of tasks and influencing are resulted. The polysubjection system of financial, power and informative constituents of behavioral description of power objects is offered.

**Keywords:** Power, Description energy facilities.

Енергетика досить різноманітна за змістом, засобами та технологічними схемами енергетичних перетворень, в сучасному розумінні відноситься до техніки великих систем, /1/. При цьому існують відповідні загальні ознаки технологічного процесу енергетичних перетворень, що можуть бути виділені й практично використані для визначення його характеристик. Такими ознаками є потоки: енергетичного носію (Н), перетворення (П) та енергії (Е). Тоді енергетичний процес спрямованої системи можливо представити у загальному вигляді

$$H \rightarrow P \rightarrow E$$

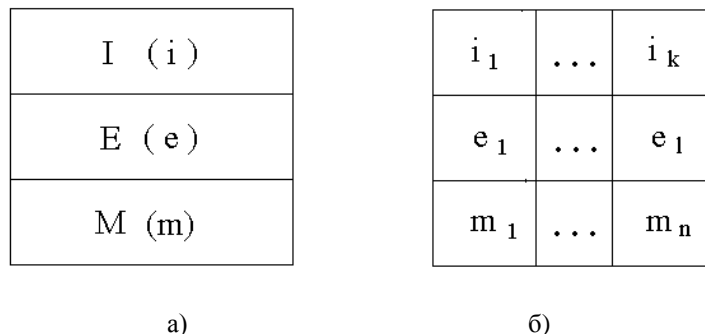
Така схема досить коректно відображає основні складові технологічного процесу, однак не завжди дозволяє розглядати їх особливості та впливи окремих складових. Особливо наочно це проявляється в оцінці ефективності таких процесів та їх складових. Не відображає вона й впливи, можливості контролю процесу та потенціал керування, що є важливим для ефективної реалізації процесу. Не допомагає в такому разі навіть системний та метасистемний розгляд за визначеними окремими складовими, навіть масивами однорідних складових параметрів та характеристик процесів.

Тому системний підхід до розгляду та формуванню властивостей енергетичних об'єктів має враховувати різнобічні, навіть різнорідні характеристики й масиви, важливі для забезпечення потрібного рівня їх ефективності. Будь-який тип задач, як відомо, визначається в термінах впорядкованих зв'язків між двома типами систем, початковим й кінцевим та набором типів вимог сумісних з типами цих систем. Для конкретних задач такі вимоги може бути відображено адекватними цілями або обмеженнями, / 2/.

Одним з перспективних напрямів реалізації зазначеного є поліпредметний системний підхід, що дозволяє поєднати різнобічні погляди на технічний енергетичний об'єкт.

Поліпредметність полягає у формуванні множин різнорідних груп важливих чинників компонентів або реакцій і їх структуризація у вигляді наборів відповідних даних, відображенням яких є множина потрібних властивостей об'єкту.

Досить зручними для системних досліджень з погляду поліпредметності відносно технічних об'єктів енергетики в багатьох випадках можуть стати їх матеріальні, енергетичні й інформаційні складові. З них складаються відповідні множини. Вони в поєднанні й окремо складають змістовну основу поліпредметного структурованого матеріально-енергетико-інформаційного (МЕІ) підходу, рис. 1.



**Рис. 1. Основа поліпредметного структурованого МЕІ підходу: а – поліпредметність, б – структуризація.**

Матерія (М), енергія (Е), інформація (І) складають структурну, функціональну діючу основу технічних об'єктів, /3, 4/. МЕІ структури, різноманітні за змістом та складом, можуть мати рівні, бути як зосередженими, так і розподіленими, рис. 2.



**Рис. 2. Вигляд МЕІ структур: а – зосереджена; б – шарова.**

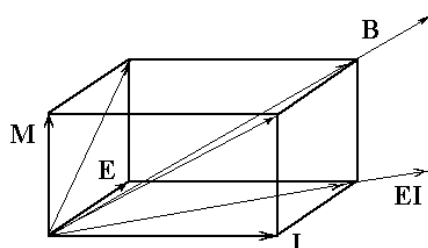
Вид системи визначається переважаючим внеском активних складових. Таким чином можливо виділити: М – системи; Е – системи і І – системи. Проте на практиці однієї складової виявляється явно недостатньо для успішної реалізації процесу. Практично будь-яка з матеріальних систем містить також компоненти Е й І в тих або інших співвідношеннях.

За такого підходу необхідні властивості досліджуваного об'єкта можливо представити у вигляді масива {Ss}, що відображає потрібні чинники у вигляді характеристик, параметрів тощо. Зазначений масив є відображенням виділених поліпредметних складових

$$\varphi: (\{M s\} \{E s\} \{I s\}) \rightarrow \{S s\}.$$

Основними умовами формування масиву {Ss} є забезпечення рівня якості процесу, що реалізується, і його ефективності через впливи. За необхідністю зазначені множини можуть бути розподілені на вхідні та кінцеві, що надає можливість визначити потрібні стани об'єктів.

З'являється також можливість розгляду властивостей об'єкту в поліпредметних МЕІ координатах, рис 3., що теж сприяє формуванню потрібного простору задачі й деталізації його особливостей за необхідністю. Використання таких координат дозволяє наочно відобразити та дослідити механізми формування впливів, рис. 3.



**Рис. 3. Координати МЕІ простору й формування впливу**

У загальному випадку можливо представити узагальнений МЕІ простір будь-якої енергетичної системи наступним чином

$$\prod_{n=1}^N (MEI) = \sum_{i=1}^K \prod_{m=1}^N f_n(M_k)(E_l)(I_m) \cdot dM_k \cdot dE_l \cdot dI_m, (n = 1, N; i = 1, K)$$

де відповідно  $M_k$  –  $k$ -матеріальна,  $E_l$  –  $l$ -енергетична,  $I_m$  –  $m$ -інформаційна складові.

Наведений математичний опис абстрактного  $n$ -мірного простору можливо сприймати в якості узагальненого. Такий  $n$ -мірний підхід до формування простору дозволяє не тільки формувати потрібні впливи, а й деталізувати їх складові за окремими проекціями.

Вплив здатний не тільки ініціювати процеси, але й змінювати їх хід, течію та формувати умови реалізації. У загальному випадку схема реалізації інформаційного впливу наступна

$$\text{ВПЛИВ} \rightarrow \text{ДІЯ} \rightarrow \text{ІМПУЛЬС СИЛИ},$$

або в математичному вигляді

$$\vec{W}(I) \quad t \rightarrow W \quad t \rightarrow \Delta \sum_{i=1}^N m_i v_i.$$

Важливо й те, що природа походження таких сил може бути різною: гідравлічною, механічною, електричною, магнітною, електромагнітною або іншою. Це надає поліпредметному підходу ознак універсальності. Вказані компоненти забезпечують спрямовану взаємодію інформаційних, енергетичних і матеріальних компонент системи.

$$\vec{B} = \sum_{n=1}^N f(M_n, E_n, I_n).$$

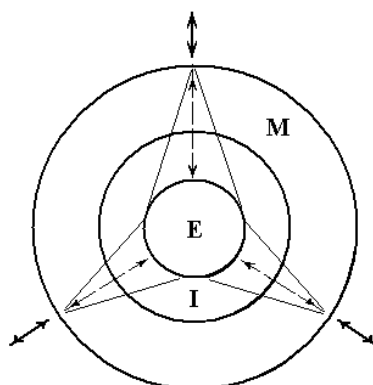
Слід також розглянути властивості основних поліпредметних чинників.

Матеріальні чинники технічних систем фактично створюють їх умовний базис – жорстку алгоритмічну і функціональну основу реалізації технологічних процесів. У енергетиці матеріальна складова часто носить допоміжний характер, складає основу, створює умови реалізації технології або процесу отримання або перетворення енергії.

Енергетичний аспект реалізації процесу переважно визначається величиною необхідної для реалізації процесу енергії.

Інформаційний аспект реалізації процесу полягає у визначенні спрямування зусилля або енергетичного впливу і необхідної його величини.

Взаємодія поліпредметних складових, як внутрішніх, так і зовнішніх, реалізується на основі наведених основних їх функціональних властивостей. В загальному вигляді їх можливо показати як на рис. 4.



**Рис. 4. Взаємодія складових процесу**

Для об'єктів енергетики також важливий зріз взаємодій з навколишнім середовищем. При цьому слід враховувати зовнішні і внутрішні чинники процесів, що реалізуються

$$\sum M_B \cdot W_B \cdot I_B = \sum M_3 \cdot W_3 \cdot I_3,$$

де індекси  $B$  – відповідно позначають характеристики внутрішніх, а  $3$  – зовнішніх процесів.

Для енергетичних об'єктів функціонально важлива динамічна робоча складова. Чинник часу входить до складу  $MEI$  множин і може виділятися, наприклад, для віддзеркалення динамічних властивостей або характеристик.

$$\frac{dW_S}{dt} = \frac{dW_M}{dt} + \frac{dW_E}{dt} + \frac{dW_I}{dt},$$

Динамічна складова енергетики теж адекватно відображається зазначеним підходом. При цьому динамічні чинники реакцій можуть також враховуватися як

$$\sum M_D \cdot W_D \cdot I_D = f(M_P \cdot W_P \cdot I_P),$$

де індекси  $D$  – відповідно відображають впливи динамічних складових, а  $P$  – перехідних складових процесів.

Таким чином, на пропонуваній основі, шляхом організації раціональної взаємодії поліпредметних складових технологічних процесів можливо досягти потрібного рівня функціональної ефективності об'єктів енергетики.

**Основні висновки**

1. Поліпредметний підхід надає нові можливості системного розгляду властивостей технічних об'єктів та їх впливів функціональну ефективність.
2. Результируючий баланс технічної системи дозволяє комплексно підходити до виділення дієвих чинників.
3. Взаємодія поліпредметних складових здатна забезпечити потрібний рівень ефективності енергетичних об'єктів.

Список літератури

1. Честнат Г. Техника больших систем. – М.: Энергия, 1969. – 656 с.
2. Клар Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
3. Пожужев В. И., Радченко В. В. Информационно-энергетическое обеспечение диагностики, контроля и управления в энергетических объектах. Монография. – Запорожье, ЗГИА, 2011. – 182 с.
4. Радченко В. В. Матеріальні, енергетичні та інформаційні складові технічних систем. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 87, 2011 р. С. 76 – 79.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 622.271.23

**В.С. Хилов, д-р техн. наук**

(Украина, Днепропетровск, Государственный ВУЗ "Национальный горный университет")

**К.П. Фофанов**

(Украина, Днепропетровск, Государственное предприятие «Конструкторское Бюро "Южное"»)

### ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЕМКОСТИ ЖИЛ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТОКОПРОВОДА

**Анотація.** Проаналізовані питання розрахунку ємності  $n$ -провідної кабельної лінії з броньованою оболонкою. Приведені проблемні питання визначення ємності для кабелів з жилами розташованими в центрі провідника. Виконані додаткові дослідження проблемних питань за допомогою різних методів. Сформульовані особливості характеру отриманих результатів розрахунку.

**Ключові слова:** Метод дзеркальних відображень, ємність, провідник, кабель, поверхня рівного потенціалу, вісь симетрії, потенційні коефіцієнти, ємкісні коефіцієнти

**Аннотация.** Проанализированы вопросы расчета емкости  $n$ -проводной кабельной линии с бронированной оболочкой. Приведены проблемные вопросы определения емкости для кабелей с жилами расположенными в центре проводника. Выполнены дополнительные исследования проблемных вопросов при помощи различных методов. Сформулированы особенности характера получаемых результатов расчетов.

**Ключевые слова:** Метод зеркальных изображений, емкость, проводник, кабель, поверхность равного потенциала, ось симметрии, потенциальные коэффициенты, емкостные коэффициенты

**Abstract.** Questions of calculation with an armored tank shell  $n$ -wired cable line analyzed. Problematic issues of definition of the capacity for cables with conductors located in the center of the conductor are shown. Additional studies of problematic issues through a variety of methods are fulfilled. Features of the nature of the results of calculations are formulated.

**Keywords:** method of mirror images, capacitance, conductor, cable, equipotential surface, the axis of symmetry, the potential factors capacitive coefficients

#### Постановка вопроса и ее связь с прикладными задачами.

В процессе эксплуатации электроустановок возникает задача контроля сопротивления изоляции питающей сети и как следствие использование систем контроля данного параметра, а также необходимость аналитического расчета целесообразности использования данных систем [1, 2].

Были сделаны выводы о трудностях учета в расчетах, по методу зеркальных изображений, проводника расположенного по центру кабеля с бронированной оболочкой. Что влечет за собой трудности в вычислении емкостного сопротивления кабеля. Возможно нужно не учитывать данный проводник в расчетах из-за особенностей построений эквипотенциалей. Так в поперечном сечении они представляют собой окружности определенного радиуса с равным потенциалом. Если центр окружности проводника четко совпадает с центром окружности бронированной оболочки то данный проводник будет заряжать каждую точку брони одинаково, что влечет за собой одинаковое влияние на другие проводники кабеля и в целом не повлияет на соотношение зарядов проводников и как следствие на емкостное сопротивление кабельной линии.

Также в [5] полученные результаты показали что при наличии центрального проводника возникают расчетные трудности в применении метода зеркальных изображений.

Подобные предположения требуют дополнительных исследований.

**Анализ исследований и публикаций.**

В [2] для оценки возможности использования информационно-измерительных систем использовано метод зеркальных изображений приведенный в [3, 4]. В работе [5] были дополнительно проанализированы результаты полученные в работе [2].

В [4] описана методика определения емкости между двумя параллельными проводниками. Согласно которой расчетную схему двух параллельных проводов можно заменить на схему проводника размещенного в цилиндре радиусом равным большему проводнику. Данный в [4] метод не запрещает нам разместить проводник четко по центру и рассчитать емкость. Следовательно он может быть использован для решения поставленной задачи. Также известна формула из курса физики по определению емкости цилиндрического конденсатора, что возможно применить для анализа полученных результатов.

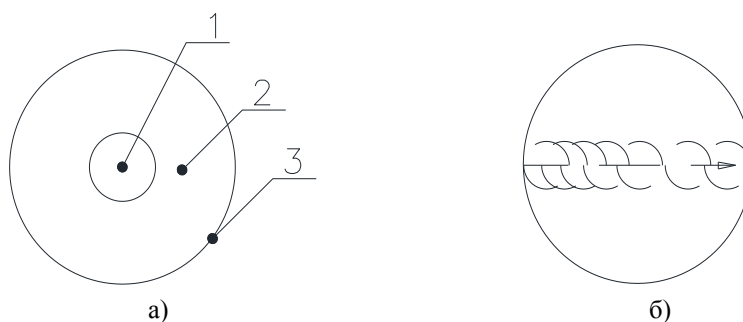
В [3, 4] приведен алгоритм применения метода зеркальных изображений для оценки емкости системы проводников относительно плоскости.

**Постановка задачи исследования.**

Рассчитаем емкость с помощью выше описанных методов для кабеля с бронированной оболочкой, предварительно упростив расчетную схему. Проанализируем полученные результаты сравнив данные двух методов. Опишем характер полученных результатов. Подведем итоги в выводах.

**Основной материал и результаты исследования.**

Для упрощения схемы удалим все проводники кроме расположенного по центру (рис. 1, а)



**Рис.1 Упрощенная схема расчета для кабеля с бронированной оболочкой, где 1 – проводник расположенный по центру кабеля, 2 – слой диэлектрика, 3 – бронированная оболочка - а), Расчетная схема для отображения зависимости значения емкости от взаимного расположения – б) Согласно [4] емкость между проводником и оболочкой определится по формуле (1)**

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{Ln \frac{k_1}{k_2}}; \tag{1}$$

где  $C_0$  – емкость,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $k_1, k_2$  – значения определяющие потенциалы цилиндров.

Для достоверности проверим полученные результаты с помощью следующей формулы (2)

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L}{Ln \frac{R_1}{R_2}}; \tag{2}$$

где  $C_0$  – емкость,  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $R_1, R_2$  – радиус проводящего цилиндра и проводника соответственно,  $L$  – длина проводника.

Рассчитав по выражению (1) мы получаем сложную не определенность в вычислении  $k_1, k_2$  которая не позволяет нам определить емкость. С другой стороны по формуле (2) вычисления имеют результат.

Для того что бы решить это противоречие проследим зависимость изменения взаимной емкости проводника и цилиндра при изменении положения проводника внутри цилиндра. Используем для описания данной зависимости формулу (1), для упрощения вычислений примем значение  $\epsilon_0\epsilon_r=1$  для пересчета к реальным значениям полученные результаты нужно умножить на реальное значение  $\epsilon_0\epsilon_r$ ,

для используемого диэлектрика. Разместим проводник вплотную к стенке цилиндра и передвигая его с шагом в 1 мм проведем вычисления емкости рис.1 б).

Для большей наглядности построим графики зависимости конечного результата взаимной емкости и промежуточных коэффициентов от расстояния между центрами проводников Рис.2.

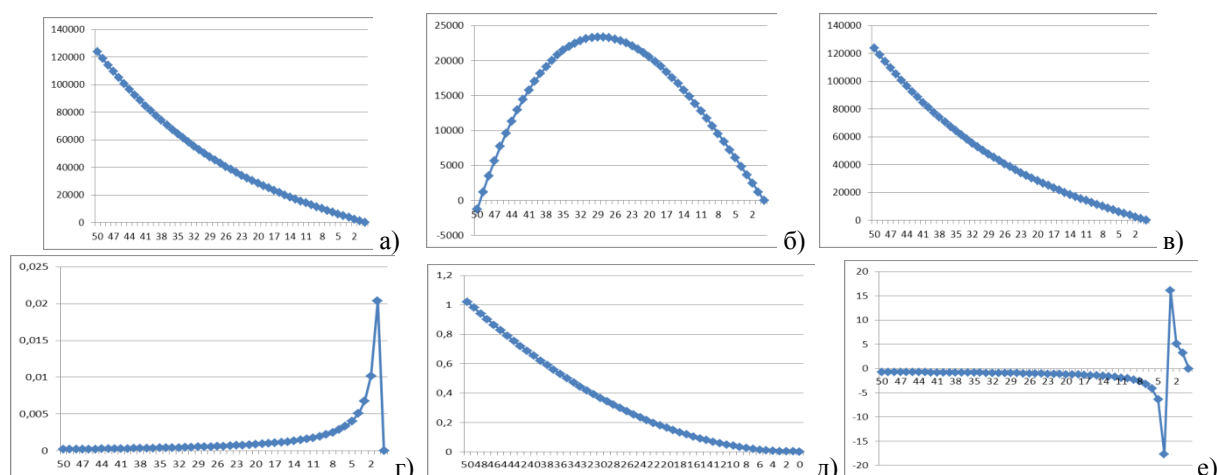


Рис. 2  $X_{01}=F(S)$  а),  $X_{02}=F(S)$  б),  $a=F(S)$  в),  $K_1=F(S)$  г),  $K_2=F(S)$  д),  $C=F(S)$  е)

Согласно рис. 2 видим что с уменьшением расстояния  $S$  между геометрическими осями токопроводящей жилы и проводящего цилиндра значение:

- рис. 2, а, расстояния между центром проводящей жилы и нулевой точки отсчета системы эквипотенциалей  $X_{01}$  уменьшается по криволинейной зависимости;
- рис. 2, б, расстояния между центром проводящего цилиндра и нулевой точки отсчета системы эквипотенциалей  $X_{02}$  увеличивается по криволинейной зависимости до значения в области  $S=29$  после прохождения данной области уменьшается по криволинейной зависимости;
- рис. 2, в, расстояния между электрической осью и нулевой точки отсчета системы эквипотенциалей  $a$  уменьшается по криволинейной зависимости;
- рис. 2, г,  $K_1$  увеличивается по криволинейной зависимости. В области значений близких к  $S=0$  значение  $K_1$  не возможно рассчитать;
- рис. 2, д,  $K_2$  уменьшается по криволинейной зависимости;
- рис. 2 е, взаимной емкости уменьшается до значения в области  $S=4$  по криволинейной зависимости после данного значения также наблюдается уменьшение значения по криволинейной зависимости.

В районе нуля емкость  $C$  рассчитать не возможно данным методом.

Как мы видим из графика рис. 2, е взаимна емкость поменяла свое значение с отрицательного на положительное на промежутке  $S=4-3$ .

Построим для наглядности график зависимости емкости  $C$  от расстояния  $S$  на рис. 3.

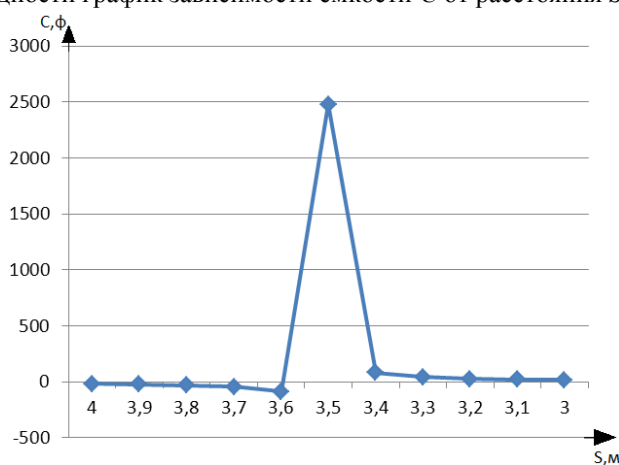
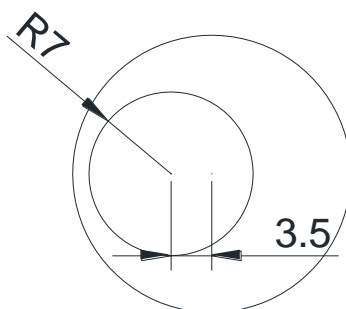


Рис. 3  $C=F(S)$

Как видно из рис. 1, б, изменение знака емкости произошло в районе значение  $S=3,5$ . При этом наблюдается резкий скачок в сторону положительного значение с последующим спадом в сторону нуля.

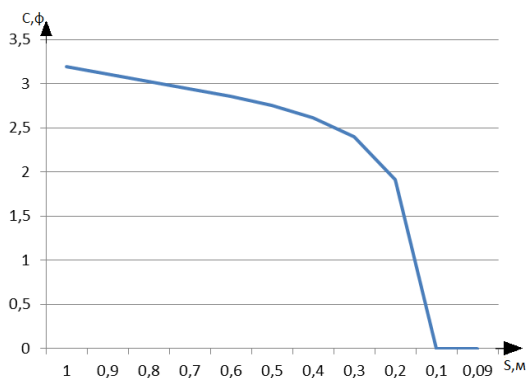
В расчетной схеме рис. 1, б, был рассмотрен проводящий цилиндр с радиусом  $R_1=50$  мм и расположенным в нем проводником  $R_2=7$  мм. Если полученные результаты перевести на физическую расчетную схему рис. 4 получим:



**Рис. 4.** Расчетная схема с расстоянием между центрами симметрии  $S=3,5$  мм

Следовательно исходя из рис. 3, 4 можно сделать вывод, что изменение знака происходит когда проводник своим телом пересекает центр симметрии проводящего цилиндра.

Рассмотрим более подробно промежуток между  $S=1-0$ . Построим для наглядности график зависимости емкости  $C$  от расстояния  $S$  на рис. 5.



**Рис. 5.**  $C = F(S)$

Как видно из рис.4 на промежутке  $S=1-0$  наблюдается уменьшение емкости и начиная с значения  $S=0,1$  отсутствуют значения. Если углубиться в расчетную формулу данного метода и пересчитать его для данного значения то под знаком натурального логарифма получим отрицательное значение, а как известно с высшей математики логарифма отрицательного значения не существует.

Проверим полученные результаты методом приведенным в работе [6]. За основу возьмем расчетную схему описанную на рис.1 е). Согласно работе [6] емкость для нашей расчетной схемы будет рассчитываться по формуле

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r L}{Ln \frac{(s_1 + a)(s_2 - a)}{R_1 R_2}}, \quad (3)$$

где  $s_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{R_2^2 - R_1^2}{d} - d \right)$ ,  $s_2 = s_2 + d$ ,  $a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2}$ ,  $C_0$  - емкость,  $\epsilon_0$  - абсолютная

диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $R_1$ ,  $R_2$  - радиус проводящего цилиндра и проводника соответственно,  $L$  - длина проводника,  $d$  - расстояние между геометрическими осями.

Для наглядности полученных результатов построим графики  $s_1 = F(S)$ ,  $s_2 = F(S)$ ,  $a = F(S)$ ,  $C = F(S)$  рис. 6, а - в, рис. 7 соответственно



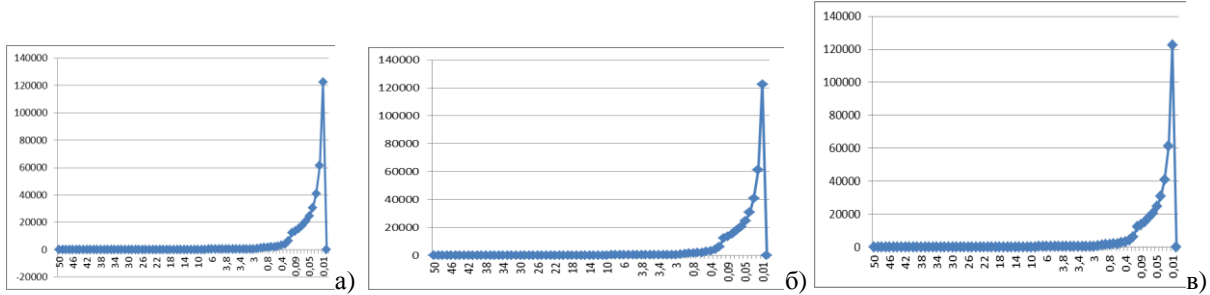


Рис. 6  $s_1 = F(S)$  а),  $s_2 = F(S)$  б),  $a = F(S)$  в)

Согласно рис. 6, табл. 4 наблюдаем что с уменьшением расстояния  $S$  между геометрическими осями токопроводящей жилы и проводящего цилиндра значение:

а)  $s_1$  увеличивается по криволинейной зависимости и в области значений  $S=0$  имеет значение равное бесконечности;

б)  $s_2$  увеличивается по криволинейной зависимости и в области значений  $S=0$  имеет значение равное бесконечности;

в)  $a$  увеличивается по криволинейной зависимости и в области значений  $S=0$  имеет значение равное бесконечности. Также в области значений  $S=50$  (где имеет место пересечение тела проводника с телом проводящего цилиндра) значение  $a$  не существует.

На первый взгляд кажется что графики на рис. 6 а - в имеют не только одинаковый характер зависимостей но и что коэффициенты равны. Действительно в области значений  $S=0$  разница между значениями коэффициентов может составлять меньший процент нежели процент допустимой погрешности вычислений. Однако в области значений близкой к  $S=43$  величина коэффициентов может отличаться на порядки. Построим для наглядности данные зависимости на промежутке значений  $S=43-35$  рис. 7 а)-в)

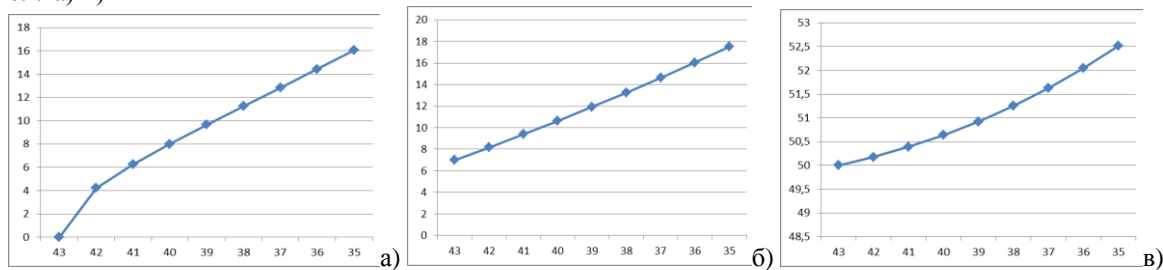


Рис. 7: а)  $a = F(S)$  а)  $s_1 = F(S)$  б)  $s_2 = F(S)$  в)

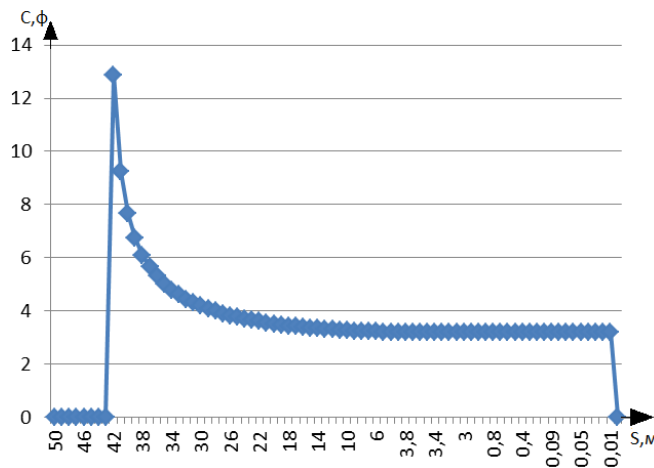
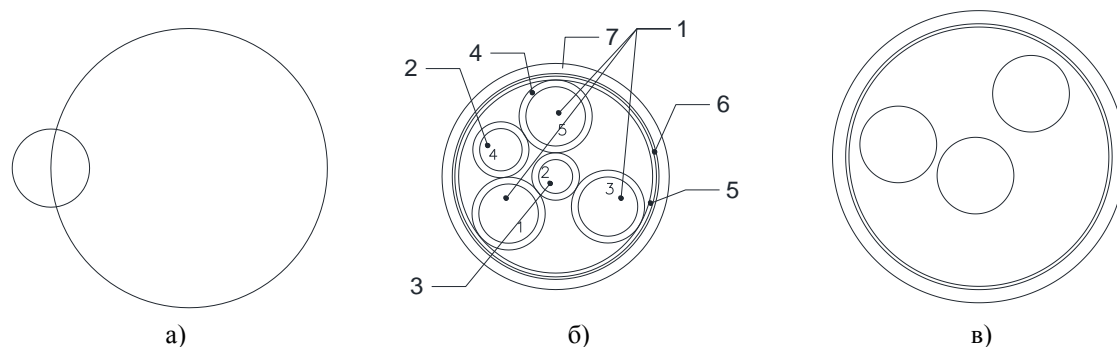


Рис. 8  $C = F(S)$

Согласно рис. 8 наблюдаем что с уменьшением расстояния  $S$  между геометрическими осями токопроводящей жилы и проводящего цилиндра значение  $C$  уменьшается по криволинейной зависимости и в области значений  $S=0$  имеет значение равное бесконечности. Также в области значений  $S=50$  (где имеет место пересечение тела проводника с телом проводящего цилиндра) значение емкости не существует.

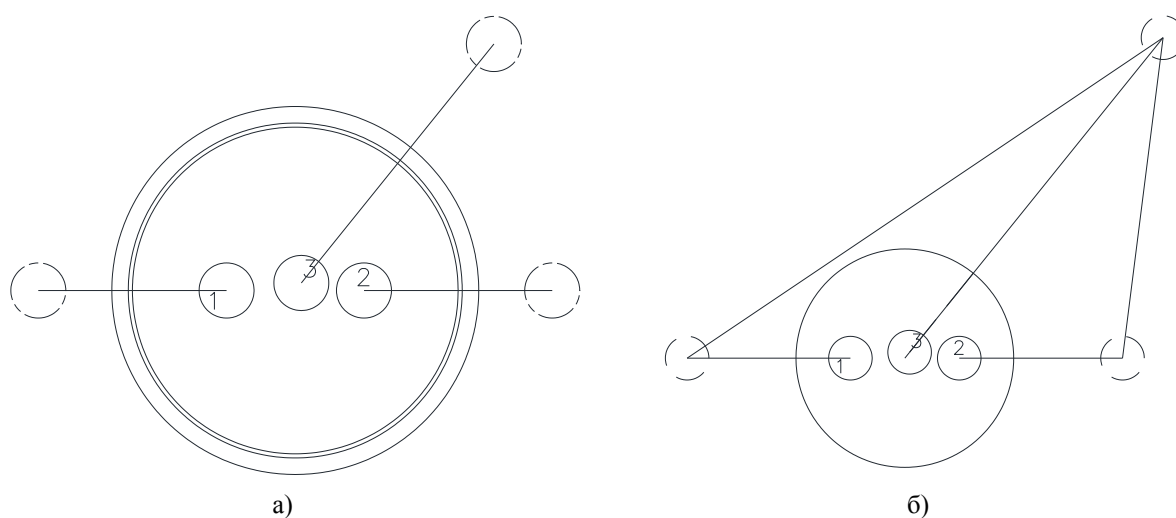
Как видно из сравнения данных рис. 1-8 наблюдается отличие конечного результата, а именно емкости  $C_0$  рассчитанной двумя методами для одной и той же расчетной схемы. При этом общий характер зависимости  $C=F(S)$  одинаков. С приближением геометрических осей проводника и проводящего цилиндра друг к другу емкость уменьшается. Однако в первом случае имеет место скачек в положительную сторону с последующим уменьшением. Так к же в двух методах при достижении совпадения геометрических осей наблюдается отсутствие результата. При этом в первом методе отсутствие результата наблюдается раньше чем во втором. Во втором методе наблюдаем отсутствие результата когда тело проводника заходит на тело проводящего цилиндра рис. 8 а, в первом результат есть.



**Рис. 8. Расчетная схема с расстоянием между центрами симметрии  $S=50$  мм – а), Сечение кабеля где – 1-3 проводники кабеля, 4 – изоляция жил, 5 – поясная изоляция, 6 – броня, 7 – изоляционный шланг – б), Сечение кабеля где один из проводников телом накладывается на ось симметрии токопроводящего цилиндра (оболочки) - в)**

Данные полученные при расчете с помощью метода описанного в работе [4] наводят на мысль что результаты полученные в работе [5] в части положительного значения взаимной емкости, в то время как согласно работе [3] они все должны быть отрицательны, будут иметь тот же характер не только при размещении одного из проводников кабеля четко по центру токопроводящего цилиндра рис. 8 б) но и в случае если он будет смещен от центра на некоторое расстояние однако при этом часть тела проводника будет пересекать ось симметрии токопроводящего цилиндра рис. 8 в).

Проверим данное предположение с помощью методов описанных в работах [4, 6]. Расчетные схемы будем составлять для кабеля с тремя токопроводящими жилами как показано на рис. 8, в. Для метода описанного в работах [3, 4] схема замещения будет иметь вид рис. 9, а. Для метода описанного в работе [6] схема замещения будет иметь вид рис. 9, б.



**Рис. 9 Схема замещения для расчета:  
а - согласно работам [3, 4]; б - согласно работам [6].  
1-3 токопроводящие жилы кабеля, пунктирными кругами показаны фиктивные заряды**

Результаты вычислений занесем в таблицы 1-2.

**Результаты расчета емкостных и потенциальных коэффициентов для кабеля с бронированной оболочкой и одной из жил телом совпадающей с осью симметрии брони**

Потенциальные коэффициенты $\times 10^9$ м/Ф	Емкостные коэффициенты Ф/м	$d_{12}'(d_{11})$ $\times 10^{-3}$ м	$d_{12}(r)$ $\times 10^{-3}$ м
$\alpha_{11}=10.81$	$\beta_{11}= 1.604 \times 10^{-10}$	27,40	4
$\alpha_{12}=4.85$	$\beta_{12}= -1.373 \times 10^{-11}$	47,40	20
$\alpha_{13}=8.853$	$\beta_{13}= -7.551 \times 10^{-11}$	52,86	10,94
$\alpha_{21}=4.85$	$\beta_{21}=5.879 \times 10^{-12}$	47,40	20
$\alpha_{22}=10.81$	$\beta_{22}=1.651 \times 10^{-10}$	27,40	4
$\alpha_{23}=8.338$	$\beta_{23}= -9.762 \times 10^{-11}$	40,47	9,18
$\alpha_{31}=7.042$	$\beta_{31}= -1.084 \times 10^{-10}$	38,30	10,94
$\alpha_{32}=7.762$	$\beta_{32}= -9.261 \times 10^{-11}$	36,53	9,18
$\alpha_{33}=13.55$	$\beta_{33}= 1.832 \times 10^{-10}$	44,59	4

Таблиця 2

**Результаты расчета емкостных и потенциальных коэффициентов для кабеля с бронированной оболочкой и одной из жил телом совпадающей с осью симметрии брони**

Потенциальные коэффициенты $\times 10^{10}$ м/Ф	Емкостные коэффициенты Ф/м	$d_{12}'(d_{11})$ $\times 10^{-3}$ м	$d_{12}(r)$ $\times 10^{-3}$ , м
$\alpha_{11}=1.132$	$\beta_{11}= 1.753 \times 10^{-10}$	30	4
$\alpha_{12}=0.515$	$\beta_{12}= -1.392 \times 10^{-11}$	50	20
$\alpha_{13}=1.846$	$\beta_{13}= -4.949 \times 10^{-11}$	292,13	10,94
$\alpha_{21}=0.515$	$\beta_{21}=3.187 \times 10^{-11}$	50	20
$\alpha_{22}=1.132$	$\beta_{22}=1.587 \times 10^{-10}$	30	4
$\alpha_{23}=1.506$	$\beta_{23}= -6.381 \times 10^{-11}$	297,57	19,18
$\alpha_{31}=1.846$	$\beta_{31}= -1.551 \times 10^{-10}$	40,9	10,94
$\alpha_{32}=0.8148$	$\beta_{32}= -8.898 \times 10^{-11}$	39,13	9,18
$\alpha_{33}=2.396$	$\beta_{33}= 1.2 \times 10^{-10}$	284,34	4

Как видно из таблиц 1-2 обе методики, описанные в работах [4,6], показали одинаковый результат в случае определения емкостного коэффициента  $\beta_{21}$ , а именно его положительный характер что не совпадает с ожидаемым результатом работы [3].

**Выводы и направление дальнейших исследований.**

Полученные данные подтверждают результаты и выводы работы [5], а именно положительный характер емкостных разноименных коэффициентов в случае, когда ось симметрии одного из проводников совпадает с осью симметрии токопроводящей цилиндрической оболочки.

Дальнейшие результаты вычислений показывают что подобный эффект можно распространить и на случаи кабеля с бронированной оболочкой, когда тело любой из жил совпадает с осью симметрии бронированной оболочки (поверхности равного потенциала) при не совпадении оси симметрии того же проводника с поверхностью равного потенциала.

В дальнейшем исследования будут направлены на математическое описание получения положительных емкостных разноименных коэффициентов в области указанной в выводе.

**Список литературы**

1. В.С. Хілов, К.П. Фофанов Основні вимоги до безперервного контролю опору ізоляції в мережі з ізованою нейтраллю напругою до 1000 В та тенденції розвитку даних систем. Форум гірників -2014: матеріали між нар. конф., 1-4 жовт. 2014 р., м. Дніпропетровськ. – Д.: ТОВ «Лізунов Прес», 2014. – Т.3. 232с.
2. Дослідження можливості використання інформаційно-виміральної системи для визначення складових частин опору ізоляції кабельної мережі / Хілов В.С. В.С., Фофанов К.П.//Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. 2015.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов – М. : Высшая школа, 1996. – с. 575.
4. К.М. Поливанов Теоретические основы электротехники. М.: «Энергия», 1969, т. 3, с. 352.
5. В.С. Хілов, К.П. Фофанов Дослідження можливості використання методу дзеркальних відображень для визначення емнісного опору ізоляції кабельної мережі. Форум гірників – 2015: матеріали міжнарод. конф., 30 вересня – 3 жовтня 2015 р., м. Дніпропетровськ. - Д.: Національний гірничий університет, 2015., - Т.3. – 252 с.
6. А.И. Даревский, Е.С. Кухаркин. Теоретические основы электротехники. М.: «Высшая школа», 1965, ч. 2, с. 283.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Разумним Ю.Т.*

*О.В. Остапчук, канд. техн. наук.*

*(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")*

## ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ЗАХИСНОГО ШУНТУВАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГЛИБОКИХ ШАХТ

**Анотація.** Виконана оцінка існуючих методів підвищення рівня електробезпеки при обслуговуванні підземних ліній напругою 35 кВ, проаналізовано існуючі методи вибору пошкодженої фази та технічно обґрунтована його реалізація за рахунок накладення оперативних сигналів непромислової частоти. Наведено функціональну схему підключення пристрою у мережу та реалізація системи керування на базі сучасних мікроконтролерів. Розроблено алгоритм функціонування арифметично-логічного блоку мікроконтролера.

**Ключові слова:** електробезпека, контроль ізоляції, оперативні сигнали, мікроконтролер, пристрій захисту.

**Аннотация.** Выполнена оценка существующих методов повышения уровня электробезопасности при обслуживании подземных линий напряжением 35 кВ, проанализированы существующие методы выбора поврежденной фазы и технически обоснована его реализация за счет наложения оперативных сигналов непромышленной частоты. Приведены функциональная схема подключения устройства в сеть и реализация системы управления на базе современных микроконтроллеров. Разработан алгоритм функционирования арифметическо-логического блока микроконтроллера.

**Ключевые слова:** электробезопасность, контроль изоляции, оперативные сигналы, микроконтроллер, устройство защиты.

**Abstract.** The evaluation of the existing methods of increasing the level of electrical safety during maintenance of underground lines with a 35 kV voltage has been performed, the existing methods of the faulty phase selection have been analyzed and its implementation by imposing operational non-industrial frequency signals has been technically justified. The device connection to the grid functional scheme and the control system implementation on the modern microcontrollers basis are shown. The algorithm of the microcontroller arithmetic and logical unit functioning is designed.

**Keywords:** electrical safety, control isolation, operational signals, microcontroller, device of protection.

**Вступ.** У зв'язку зі останніми дослідженнями, одним з раціональних способів підвищення ефективності глибоких та потужних гірничорудних та вугільних підприємств є підвищення рівня напруги живлячих мереж, з використанням класу напруги 35 кВ в системі підземного електропостачання. Ефективність використання класу напруги визначається успішністю вирішення додаткових технічних завдань, що полягають у успішному вирішенні додаткових технічних задач, що пов'язані зі забезпеченням умов електро- та пожежобезпеки у підземних виробках, а саме: мінімізація впливу параметрів та режимів роботи електричних мереж напругою 35 кВ поверхні на експлуатаційні характеристики внутрішньошахтних мереж та обладнання; безперервний контроль ізоляції відносно землі електричної мережі напругою 35 кВ; зменшення значень аварійних струмів при замиканнях на землю в кабельних лініях напругою 35 кВ, підвищення рівня безпеки обслуговуючого персоналу тощо. Для вирішення відмічених проблем необхідно використовувати комплекс заходів, одним з яких є (враховуючи параметри ізоляції підземної мережі електропостачання напругою 35 кВ), метод захисного заземлення (закорочування) пошкодженої фази.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Використання методу захисного шунтування для підвищення рівня безпеки підземних мереж відомо досить давно [1]. Основною ідеєю цього методу є заземлення пошкодженої фази в результаті пошкодження (послаблення) ізоляції відносно землі однієї із фаз мережі живлення, пошкоджена фаза автоматично з'єднується з землею, таким чином шунтується місце аварії, за рахунок чого різко зменшується значення струму через місце пошкодження (або людину) та практично за півперіоду промислової частоти затухає перехідний процес. Ефективність процесу автоматичного замикання (шунтування) пошкодженої фази визначається високою швидкістю системи, а також відповідною чутливістю та надійністю. Відомі принципи та пристрої, що використовуються в [2-3], мають застарілу елементну базу та низьку надійність і швидкодію, що не дозволяє рекомендувати їх у якості виконавчих механізмів. Крім того, на сьогоднішній день у гірничорудній та вугільній галузі відбувається широке впровадження мікропроцесорних пристроїв захисту та автоматики, що потребує розробки пристроїв захисного шунтування з використанням мікроконтролерів для підвищення загальної швидкодії та надійності пристрою. Заслуговує уваги також розроблений на базі мікроконтролеру метод захисного шунтування для низьковольтних розподільних мереж [4]. Проте для високовольтних підземних мереж

напругою 35 кВ [5], найбільш ефективним застосуванням пристрою є його інтеграція з пристроєм безперервного контролю ізоляції, тому необхідно розробити пристрій, що може ефективно функціонувати у діючій системі.

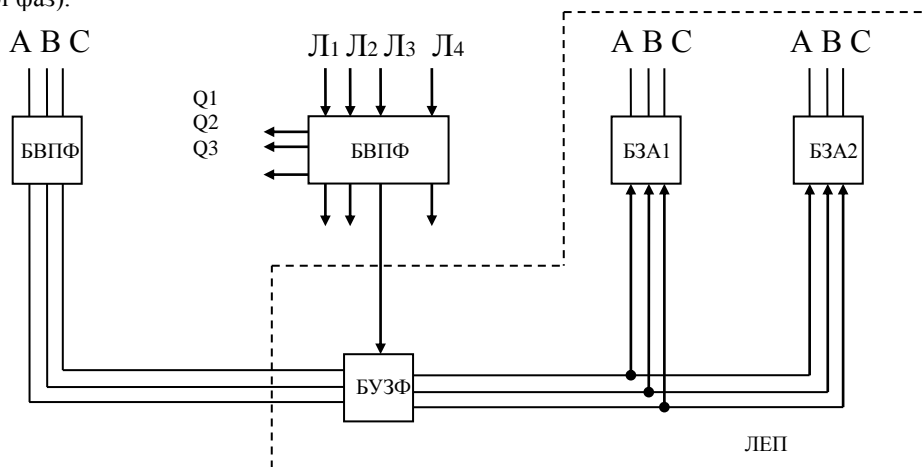
**Метою роботи** є дослідження та розробка методу та пристрою захисного шунтування для підземних мереж живлення напругою 35 кВ.

**Матеріали досліджень.** Жорсткі вимоги функціональної надійності повинні надаватися блоку вибору пошкодженої фази (БВПФ) в частині чутливості (забезпечення працездатності при замиканнях на землю через перехідний опір, у тому числі і через тіло людини) і в частині правильності визначення пошкодженої фази. Помилка при виборі пошкодженої фази призводить до створення штучного двофазного замикання через заземлювальну мережу, тобто, перехід однофазного замикання на землю в небезпечніший для ураження людей і стійкості електрообладнання аварійний режим.

Для довгих ліній розподільчої мережі і потужними синхронними або асинхронними електродвигунами як навантаження слід розглядати можливість застосування двох блоків заземлюючих апаратів з пофазним керуванням - на початку лінії БЗА1, і в кінці лінії БЗА2 для забезпечення захисту від дії напруги вибігу від відключених від мережі електродвигунів (рис. 1).

Пристрої вибору пошкодженої фази за принципом дії можна класифікувати за параметрами спрацьовування, а саме:

- пристрої, що реагують на зниження абсолютних значень напруг пошкодженої фази (або на підвищення абсолютних значень двох непошкоджених фаз);
- пристрої, що реагують на суму (або різницю векторів) опорних фазних напруг і напруги нульової послідовності;
- пристрої, що реагують на різницю абсолютних значень фазних напруг і напруги нульової послідовності;
- пристрої, що реагують на зниження випрямленої оперативного напруги пошкодженої фази, одержуваного з мережі, що захищається;
- пристрої, що реагують на кут зсуву між фазними напругами і напруги нульової послідовності;
- пристрої, що реагують на різницю абсолютних значень фазних напруг мережі (пошкодженої і випереджаючої фаз).



**Рис 1. Функціональна схема системи автоматичного захисного заземлення пошкодженої фази для розподільчої мережі**

Всі наведені пристрої мають суттєвий недолік – добре працюють тільки в сем метричних системах, проте несиметрія в реальних мережах змінюється від 2,5 до 5 %, це призводить до великої кількості помилкових спрацювань та потребує розробки пристроїв, які не мають відповідних недоліків.

Особливістю функціонування цифрових систем визначення пошкодженої фази є висока надійність, яка забезпечується постійною перевіркою достовірності інформації. Така особливість роботи дозволяє уникнути помилкового спрацювання пристрою без втрати його швидкодії. Реалізація запропонованого пристрою виглядає наступним чином: у системі безперервного контролю ізоляції з додатковим джерелом оперативних сигналів (ДОС), що увімкнене у нейтраль трансформатора, є можливість визначити пошкоджену фазу за рівнем сигналу. Принцип дії методу визначення пошкодженої фази забезпечується генерацією сигналу ДОС з частотою до 300 Гц, який при протіканні у фазах створює оперативні струми, що мають однакову амплітуду та фазу. У разі виникнення аварії (зниження рівня ізоляції) у фазі, буде змінено значення струму і пристрій подасть керуючий імпульс на відповідний виконавчий орган. Необхідна швидкодія пристрою забезпечується використанням короткозамикачів (час спрацювання – 0,0015 с проти 0,1 с – у найбільш швидкодіючих вакуумних вимикачів), що дозволяє знизити негативний вплив елект-

ромагнітного поля на організм людини. Схема підземної мережі електропостачання та підключення пристрою визначення пошкодженої фази показано на рис. 2.

У якості первинних датчиків, доцільно використовувати штатні трансформатори струму, які встановлені у комірці. Отриманий сигнал виділяється за допомогою фільтра низької частоти (ФНЧ), елемент гальванічної розв'язки (ЕГР), дозволяє підвищити рівень безпеки пристроєм та знизити вплив різних завад, наступні операції включають в себе потрапляння сигналів на мультиплексор (МПЛ) та за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюються в цифрові імпульси, обробку відповідних значень виконує обчислювальний блок (ОБ) де реалізується заданий алгоритм, після виконання обчислювальних операцій, відбувається зворотне перетворення сигналу в аналоговий вигляд за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) та подачу на виконавчий орган (ВО). Як відмічено на рисунку 1, блоки МПЛ, АЦП, ОБ та ЦАП можуть бути реалізовані на базі мікроконтролера МК.

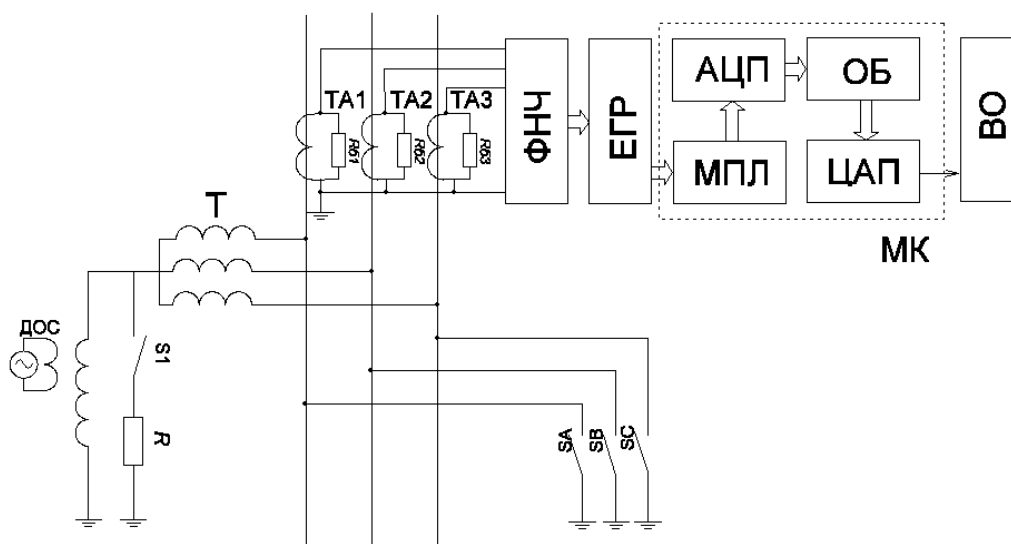


Рис. 2. Схема підземної мережі електропостачання та підключення пристрою визначення пошкодженої фази: ДОС – джерело оперативних сигналів, ТА1..ТА3 – трансформатори струму, SA, SB, SC – полюси короткозамикача у фазах, ФНЧ – фільтр низької частоти, ЕГР – елемент гальванічної розв'язки, МПЛ – мультиплексор, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ОБ – обчислювальний блок, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ВО – виконавчий орган, МК – мікроконтролер.

Вибір відповідної моделі мікроконтролера забезпечується наступними обставинами:

- складність завдань, що вирішуються (розрядність мікроконтролера, його архітектура, частота тактового генератора, та швидкість виконання поставлених команд);
- кількістю вхідних та вихідних сигналів (як аналогових, так і цифрових) – від цього залежить кількість виводів мікроконтролера та розміри його корпусу;
- кількістю вхідних аналогових сигналів, точністю їх виміру – визначається розрядність, швидкість та максимальна припустима похибка вбудованого АЦП, їх загальна кількість у мікроконтролері, кількість каналів, що підключені через мультиплексор до АЦП;
- особливостями побудови програмного забезпечення, що потребує наявності різного роду апаратних модулів (таймери, джерела переривань тощо);
- вимогами до рівня енергоспоживання мікроконтролера.

Так для вирішення простих завдань доцільно застосовувати найбільш прості, малогабаритні та дешеві мікроконтролери, причому бажано частину функцій перекласти на апаратне вирішення, щоб уникнути перевантаження мікроконтролера. Інколи такі мікроконтролери не можуть повноцінно виконати обробку вхідних сигналів програмними методами, наприклад згладжуванням вхідного сигналу або виключенням з масиву даних найменш характерних величин. Також необхідно звернути увагу на математичні можливості контролерів низького рівня, оскільки в них апаратно підтримуються найбільш прості арифметичні операції (додавання, зсув тощо). Будь-які обчислення можна представити у вигляді арифметичних операцій та виконати їх розрахунок програмними методами а не апаратними можливостями мікроконтролера. У більшості випадків така ситуація знижує швидкодію ядра мікроконтролера, за рахунок чого виконання другорядних завдань, які пов'язані з індикацією, зберіганням та передаванням даних є просто неможливим.

Більш складні мікроконтролери знайшли розповсюдження у системах керування та захисту і відрізняються за рахунок більшої кількості вхідних сигналів, їх різноманітності, складності та множиною форми вхідного сигналу, жорсткими вимогами до високої інформативності апарата, що включають у себе індикацію, зберігання та передавання даних у мережу SCADA. Для таких систем характерними є пристрої з більшою розрядністю ядра, підвищеною швидкодії, високої продуктивності математичного апарата, розвинутими допоміжними функціями, великою кількістю виходів, наявністю одного або кількох модулів АЦП. Важливим фактором при виборі типу мікроконтролера є їх захищеність від завад та температурний режим.

Приклад архітектури відповідного мікроконтролера наведений на рисунку 2.

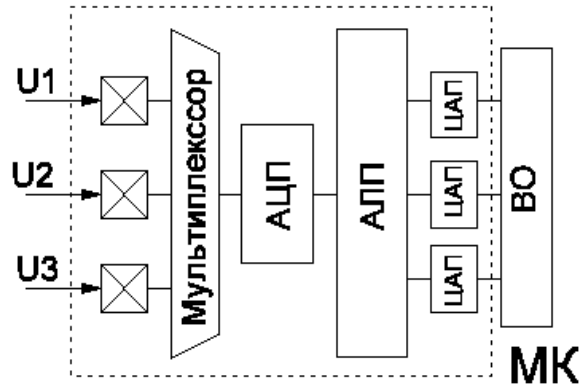


Рис. 2. Архітектура мікроконтролера:

$U_1...U_3$  – відповідні значення оперативної напруги у контрольованих фазах, АЛП – арифметично-логічний пристрій

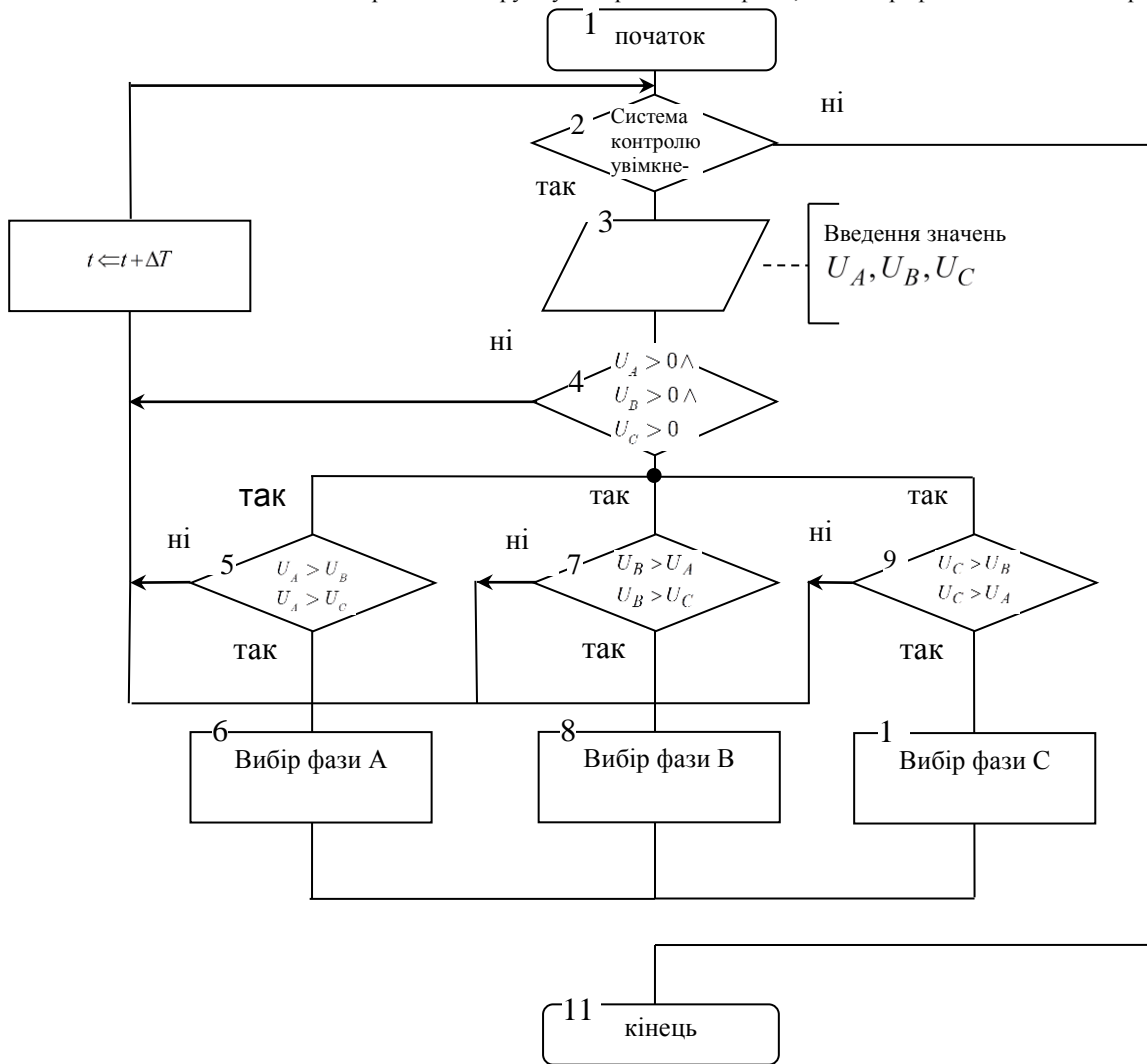


Рис. 3. Алгоритм визначення пошкодженої фази

На вхід мікроконтролера подаються значення оперативної напруги, в яких попередньо було виділено сигнал відповідної частоти, який потім перетворюється за допомогою мультиплексора та блоку АЦП в цифрові сигнали з частотою дискретизації не менше 1 кГц. Отже, кількість точок опитування на одному періоді змінного вхідного сигналу становить не менше 50. Далі перетворені сигнали надходять в арифметично-логічний пристрій (АЛП), де йде їх зіставлення за заданим алгоритмом. Алгоритм роботи АЛП зображений на рисунку 3.

Таким чином спочатку система виконує контроль оперативного сигналу за напругою. При позитивному результаті виконується почергове порівняння кожної з фаз з іншими та у випадку перевищення отриманого значення, подача команди на відповідний виконавчий блок.

Для написання програм для контролера доцільно використовувати мову високого рівня, серед яких найбільшого розповсюдження отримала мова С. Для уніфікації різноманітних захистів та полегшення їх сумісності при одночасній роботі є доцільним використання вказаної мови програмування при створенні програмного забезпечення будь-якого роду. Сучасні компілятори дозволяють оптимально перетворювати в мову машин програмний код, що дозволяє сучасним програмістам не використовувати мови низького рівня (асемблер).

**Висновки.** Наведена методика вибору ємності установки ПСК може використовуватись в умовах гірничих підприємств для забезпечення необхідних показників якості електричної енергії споживачів глибоких горизонтів. Застосування сучасних установок поздовжньої компенсації дозволить максимально підвищити ефективність передавання електричної енергії по стовбурним кабельним лініям з невеликим рівнем капіталовкладень.

#### Список літератури

1. Серов, В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных сетях горных предприятий/ В.И. Серов, Щуцкий В.И., Ягудаев Б.М. – М.: Наука, 1985. 136 с
2. Колосюк, В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок/ В.П. Колосюк. – М.: Недра, 1987. 407 с.
3. Ягудаев, Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Шишкин Н.Ф., В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
4. Савицкий, А.В. Микроконтроллерные аппараты защиты от токов утечек на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В/ А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий, А.И. Белошистов// Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Д.: ООО «АИР», 2013. – С. 83-97.
5. [Шкрабец Ф. П.](#) Обеспечение перевода подземного электроснабжения энергоемких шахт на напряжение 35 кВ / Ф. П. Шкрабец, А. В. Остапчук, Е. П. Месяц, А. В. Акулов // [Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.](#) - 2012. - Вип. 25(2). - С. 58-64. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu\\_2012\\_25\(2\)\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2012_25(2)_12).

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 621.314.1

**Р. В. Серов, О. В. Бялобржеський, канд. техн. наук**

*(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)*

### **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНДЕНСАТОРНОГО ПРИСТРОЮ НА ФОРМУВАННЯ СТРУМУ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ**

*Використання пристроїв з накопичувачами енергії в електротехнічних системах та комплексах широко розповсюджене, зокрема подібні пристрої розробляються та використовуються в системах керування збудженням синхронних машин. Предметом дослідження в роботі обрано процеси розподілу параметрів режиму конденсаторного пристрою для формування струму збудження. При цьому покладаючи вентильні елементи ідеальними виконаний аналіз перехідних процесів у елементах еквівалентного контуру. На підставі аналізу аналітично визначені максимальне значення струму та час досягнення цього значення від параметрів накопичувальних елементів схеми та початкових умов. Аналіз графічних залежностей дозволив сформулювати підхід з визначення раціональних параметрів за кривою, яка є перетином двох поверхонь: максимуму струму та часу цього максимуму, залежно від індуктивності буферного реактора та ємності накопичувального конденсатора.*

**Ключові слова:** *пристрій формування струму збудження; максимальне значення струму; накопичувальні елементи.*



*Использование устройств с накопителями энергии в электротехнических системах и комплексах широко распространено, в частности подобные устройства разрабатываются и используются в системах управления возбуждением синхронных машин. Предметом исследования в работе выбраны процессы распределения параметров режима конденсаторного устройства для формирования тока возбуждения. При этом полагая вентильные элементы идеальными выполнен анализ переходных процессов в элементах эквивалентного контура. На основании анализа аналитически определены максимальное значение тока и время достижения этого значения от параметров накопительных элементов схемы и начальных условий. Анализ графических зависимостей позволил сформулировать подход по определению рациональных параметров по кривой, которая является пересечением двух поверхностей: максимума тока и времени этого максимума, в зависимости от индуктивности буферного реактора и емкости накопительного конденсатора.*

**Ключевые слова:** устройство формирования тока возбуждения; максимальное значение тока; накопительные элементы.

*Using devices with stored energy in electrical systems and complexes widespread, particularly such devices are developed and used in synchronous machines excitation control systems. The subject of research in the chosen process parameters of the distribution mode of the capacitor-forming apparatus of the excitation current. At the same time putting the valve elements perfect the analysis of transients in the equivalent circuit elements. Based on the analysis of analytically determined the maximum value of the current and the time to reach this value from the storage elements of circuit parameters and initial conditions. Analysis of plots allowed to formulate rational approach to define parameters for the curve, which is the intersection of two surfaces: the maximum current and the maximum of this time, depending on the inductance of the reactor and the buffer capacity of the storage capacitor.*

**Keywords:** excitation current generation unit; the maximum current value; storage elements.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Для підвищення стійкості роботи синхронних двигунів і збільшення віддачі в мережу реактивної потужності при короткочасних зниженнях напруги використовують параметричне або релейне форсування збудження [1,2]. Однак при роботі потужних тиристорних електроприводів прокатних станів та інших електроприймачів з різкозмінним навантаженням, перетоки реактивної потужності, що викликають втрати електроенергії і коливання напруги в мережах, як правило, не можуть бути ефективно скомпенсовані синхронними двигунами оснащеними серійними тиристорними збудниками з регламентованою кратністю форсування напруги. Обмежені можливості існуючих тиристорних збудників і пристроїв форсування збудження можна істотно розширити за допомогою використання конденсаторних накопичувачів [3,4].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Відносна простота організації процесу накопичення енергії та невеликі питомі витрати, порівняно з іншими накопичувачами дозволяють застосовувати схемні рішення, як для підвищення ефективності електромеханічних пристроїв [4], так і для компенсації неактивних складових потужності [5] в системах електропостачання. Як показано в роботі [5] використання накопичувального пристрою в контурі обмотки збудження дозволяє підтримувати заданий струм збудження синхронного двигуна період часу, за рахунок енергії конденсатора, введеного в контур збудження транзисторним перетворювачем. При цьому, очевидно, що ефективність формування струму залежить як від режиму керування транзисторами так і від параметрів накопичувальних елементів.

**Постановка задачі.** Визначення зв'язку параметрів режиму конденсаторного пристрою формування струму збудження синхронного двигуна з параметрами реактивних елементів.

**Викладення матеріалу та результати.** На рис. 1 а зображено спрощену принципову схему обмотки збудження з пристроєм форсування [5] та спрощену схему підключення під час комутації транзисторних ключів (рис. 1 б). Робота схеми організована на енергообмінних процесах між буферною індуктивністю та накопичувальним конденсатором. При цьому під час періодичного перезаряду зазначених елементів (рис. 1 а, б) з'являється можливість передачі низько потенціальної енергії до накопичувача з більш високим потенціалом.

Незалежно від пари увімкнених транзисторів чи діодів баланс напруги [6]:

$$r_f i_{fc} + u_{Cfc} + L_{\Sigma} \frac{di_{fc}}{dt} = 0, \quad (1)$$

де,  $r_f$  – активний опір обмотки збудження;  $L_{\Sigma} = L_f + L_b$  – сумарна індуктивність контуру;  $C$  – ємність конденсаторного накопичувача;  $i_{fc}$  – вільна складова струму;  $u_{Cfc}$  – напруга на конденсаторі.

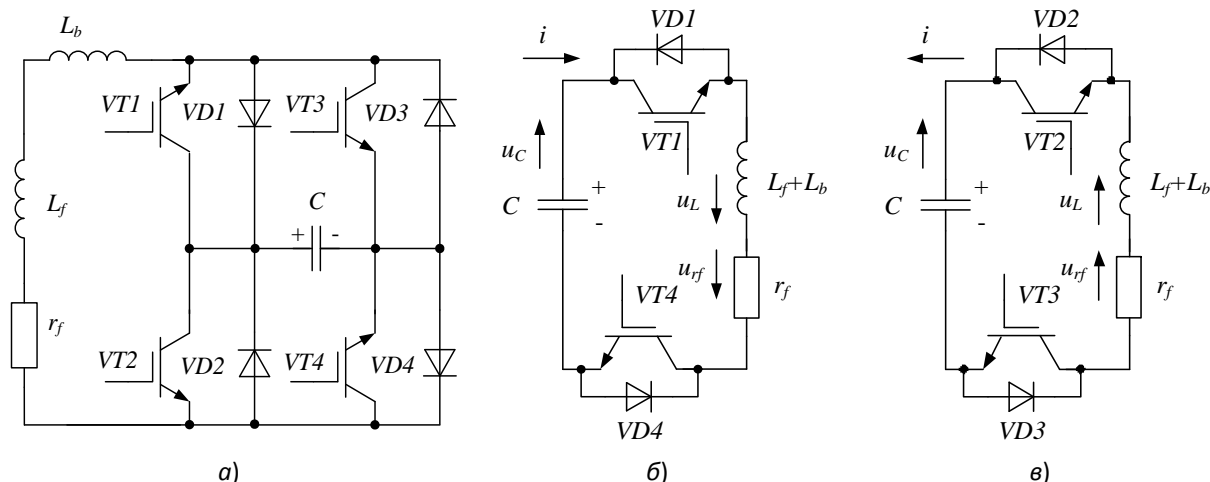


Рис.1. Силова схема підключення конденсатора до обмотки збудження (а), контур протікання струму під час розряду конденсатора (б), контур протікання струму під час заряду конденсатора (в)

Беручи до уваги, що струм конденсатора:

$$i_{fc} = C \frac{du_{Cfc}}{dt}, \quad (2)$$

та підставивши (2) в (1), отримаємо диференційне рівняння другого порядку.

$$\frac{d^2 u_{Cfc}}{dt^2} + \frac{r_f}{L_\Sigma} \frac{du_{Cfc}}{dt} + \frac{1}{L_\Sigma C} u_{Cfc} = 0. \quad (3)$$

Введемо параметри що характеризують частоту коливань та ступінь затухання:

$$\beta = \frac{r_f}{2L_\Sigma}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_\Sigma C}}, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (4)$$

Тоді корені характеристичного рівняння за (3):

$$p_{1,2} = -\frac{r_f}{2L_\Sigma} \pm \sqrt{\frac{r_f^2}{4L_\Sigma^2} - \frac{1}{L_\Sigma C}} = -\beta \pm j\omega. \quad (5)$$

Таким чином зміна напруги конденсатора у випадку, що розглядається:

$$u_{Cfc} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (7)$$

де \$A\_1\$ та \$A\_2\$ – постійні інтегрування, які знаходять із початкових умов. Підставивши (7) у (2), визначають струм в контурі:

$$i_{fc} = C \frac{du_{Cfc}}{dt} = C(A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}). \quad (8)$$

Для коректної роботи схеми напруга на конденсаторі повинна мати початкове значення [5], яке повинне перевищувати напругу обмотки збудження. Покладаючи, першим етапом роботи схеми – розряд конденсатора з початковим значенням напруги \$u\_c = U\_0\$ та вважаючи що в індуктивних елементах до комутації \$t=0\$ протікав струм \$i=I\_0\$ визначають постійні інтегрування \$A\_1\$ та \$A\_2\$.

$$U_0 = A_1 1 + A_2 1, \quad (9)$$

$$I_0 = C(A_1 p_1 \cdot 1 + A_2 p_2 1), \quad (10)$$

звідки

$$A_1 = \frac{p_2 U_0 - \frac{I_0}{C}}{p_2 - p_1} = \frac{(-\beta - j\omega)U_0 - \frac{I_0}{C}}{-2j\omega}, \quad A_2 = \frac{\frac{I_0}{C} - p_1 U_0}{p_2 - p_1} = \frac{\frac{I_0}{C} - (-\beta + j\omega)U_0}{-2j\omega}. \quad (12)$$

Таким чином струм в контурі з урахуванням початкових умов:

$$i = i_{fc} = C(A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}) = -\frac{1}{\omega} e^{-\beta t} (I_0 \beta \sin(\omega t) - I_0 \omega \cos(\omega t) + C U_0 \beta^2 \sin(\omega t) + C U_0 \omega^2 \sin(\omega t)) \quad (13)$$

Напруга на конденсаторі:

$$u_C = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) = \frac{U_0 e^{-\beta t} (\omega \cos(\omega t) + \beta \sin(\omega t))}{\omega}. \quad (14)$$

Напруга на резисторі:

$$u_{r_f} = i r_f. \quad (15)$$

Напруга на буферній індуктивності:

$$u_L = L_b (C A_1 p_1^2 e^{p_1 t} + C A_2 p_2^2 e^{p_2 t}) = \frac{L_b}{\omega} e^{-\beta t} [I_0 \beta^2 \sin(\omega t) - I_0 \omega^2 \sin(\omega t) - 2 I_0 \beta \cos(\omega t) - C U_0 \omega^3 \cos(\omega t) + C U_0 \beta^3 \sin(\omega t) - C U_0 \beta^2 \omega \cos(\omega t) + C U_0 \beta \omega^2 \sin(\omega t)] \quad (16)$$

На рисунку 2 наведена графічна ілюстрація параметрів режиму силової частини схеми (рис. 1 б), при наступних параметрах схеми [5]:  $C=3,44$ ,  $L=0,5$ ,  $U_0=144$ ,  $r_f=0,133$ ,  $I_0=10$ .

Струм контуру носить коливальний характер із затуханням, це відповідає некерованому режиму схеми рис. 1, при якому транзистори діагоналі відкриті. Шляхом релейного керування транзисторами [5] можливо реалізувати керовану зміну струму, при наближенні зон струмової трубки у межевому випадку до нуля – лінійну (рис. 3.)  $i_x(t)$ .

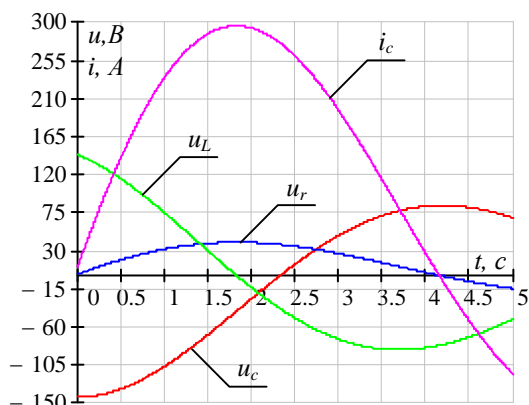


Рис.2. Напруги на елементах та струм в контурі збудження

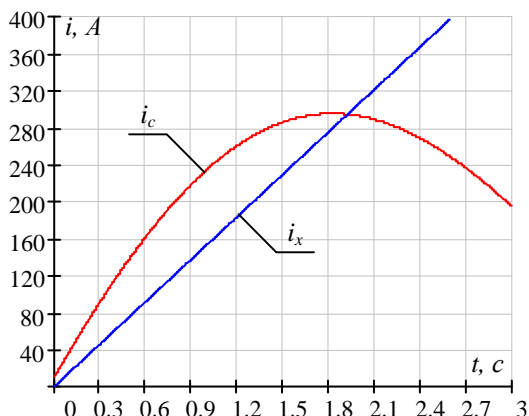


Рис.3. Криві струмів при вільному протіканні перехідного процесу ( $i_c$ ) та керованому лінійному струмі ( $i_x$ )

Розглянемо розподіл потужностей та енергії за інтервал, коли струм досягає максимального значення (рис. 3).

При цьому енергія конденсаторного накопичувача:

$$W_C = \int p_C dt = \int u_C i dt = \frac{u_C^2 C}{2}, \quad (17)$$

енергія індуктивних елементів:

$$W_L = \int p_L dt = \int u_L i dt = \frac{i_L^2 L_\Sigma}{2}, \quad (18)$$

енергія витрачена під час процесу на активних елементах:

$$W_r = \int p_r dt = \int i^2 r dt \quad (19)$$

Результати розрахунку наведені на рисунках 4 та 5. Не враховуючі комутаційні втрати в транзисторах під час формування лінійної траєкторії струму, енергія, що використовується при наростанні струму за синусоїдальним законом дорівнює  $W_{i(t)} = 9,4 \times 10^3$ , за пропорційним  $W_{ix(t)} = 6,2 \times 10^3$ , що приблизно на 34 відсотки менше. Таким чином, раціональним є керування процесом зміни струму за лінійною траєкторією.

Зважаючи на невизначеність початкового струму на попередньому такті роботи схеми та відміну напруги на конденсаторі від заданого значення раціонально визначити час за який струм досягає максимального значення при некерованому процесі розряду конденсатора. Перша похідна струму за рівнянням (13)

$$CA_1 p_1^2 e^{p_1 t} + CA_2 p_2^2 e^{p_2 t} = 0. \quad (20)$$

Виконуючи заміну:

$$k_1 = CA_1 p_1^2 = \frac{((\beta - j\omega)^2 (-CU_0\omega + CU_0\beta j + I_0 j))}{2\omega}, k_2 = CA_2 p_2^2 = \frac{((\beta + j\omega)^2 (-CU_0\beta - CU_0\omega j - I_0 j))}{2\omega}. \quad (21)$$

Визначають час за який струм досягне максимального значення:

$$t_{max} = \frac{\ln(k_1) - \ln(-k_2)}{(p_2 - p_1)}. \quad (22)$$

Зробивши підстановку та виконуючи зворотні перетворення:

$$t_{max} = \frac{1}{-(2j\omega)} \left[ \ln \left( \frac{((\beta - j\omega)^2 (-CU_0\omega + CU_0\beta j + I_0 j))}{2\omega} \right) - \ln \left( \frac{((\beta + j\omega)^2 (-CU_0\beta - CU_0\omega j - I_0 j))}{2\omega} \right) \right]. \quad (23)$$

Максимальний струм в контурі визначається при підстановці значення  $t_{max}$  в рівняння (13):

$$i_{max} = C(A_1 p_1 e^{p_1 t_{max}} + A_2 p_2 e^{p_2 t_{max}}), \quad (24)$$

або:

$$i_{max} = -\frac{1}{\omega} e^{-\beta t_{max}} [I_0 \beta \sin(\omega t_{max}) - I_0 \omega \cos(\omega t_{max}) + CU_0 \beta^2 \sin(\omega t_{max}) + CU_0 \omega^2 \sin(\omega t_{max})] \quad (25)$$

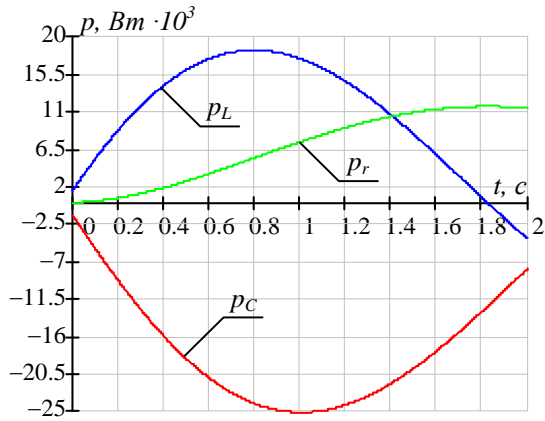


Рис. 4. Потужність елементів в контурі

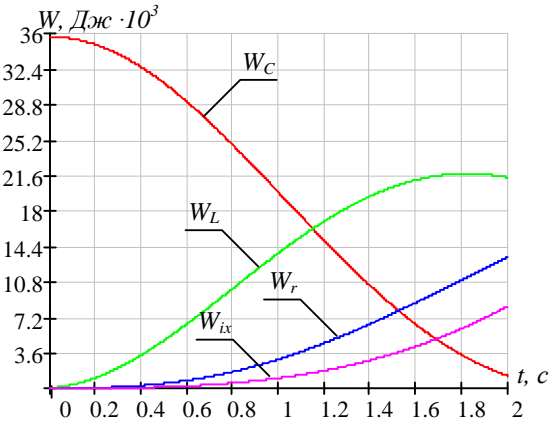
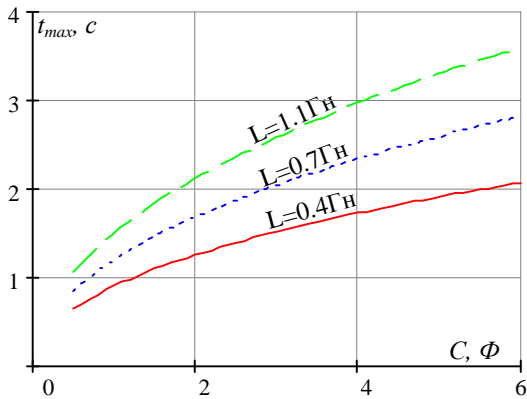
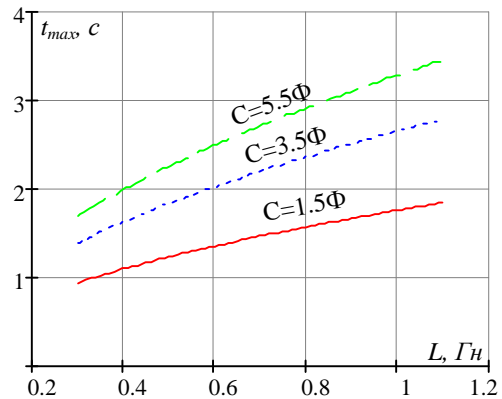


Рис. 5. Енергія елементів в контурі

Варіюючи параметри реактивних елементів силового контуру, за виразами (24) та (25) побудовані графічні залежності  $i_{max}$  та  $t_{max}$ . На рисунку 6, а представлено залежність часу досягнення струмом максимального значення від ємності конденсатора при декількох значеннях індуктивності, на рисунку 6, б - від значення індуктивності при декількох значеннях ємності конденсатора. В обох випадках зі зростанням параметру реактивного елементу час перехідного процесу збільшується.



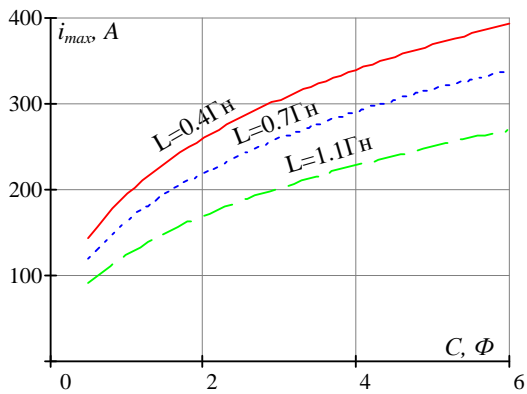
а)



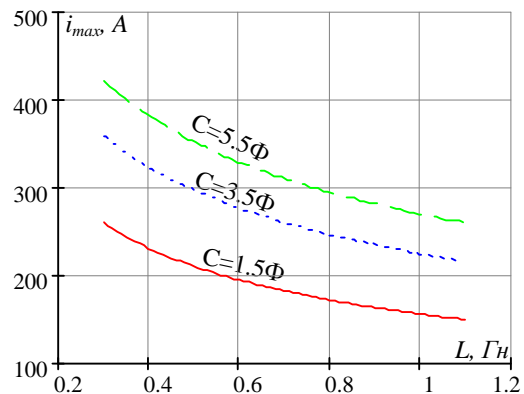
б)

Рис. 6. Значення часу досягнення максимального струму в контурі від ємності конденсатора при різних значеннях індуктивності а), від індуктивності при різних значеннях ємності конденсатора б)

За наведених вище умов розраховані залежності максимального струму контуру за умов зміни параметрів накопичувальних елементів. Максимальне значення струму (рисунок 7) збільшується за умов збільшення ємності накопичувача та зменшується при збільшенні індуктивності, тобто властивості накопичення електромагнітної енергії індуктивними елементами призводять до обмеження амплітуди струму.



а)



б)

Рис.7. Значення максимального струму в контурі залежно від ємності конденсатора при різних значеннях індуктивності а), від значення індуктивності при різних значеннях ємності конденсатора б)

Для оцінки взаємозв'язку часу досягнення максимального струму із значенням максимального струму зазначені вище результати зведено на рисунку 8. Таким чином, пошук максимального значення струму та мінімального часу досягнення цього значення є задачею визначення для певних умов, лінії перетини площин зумовлених зміною індуктивності буферного елемента та ємності накопичувального конденсатора.

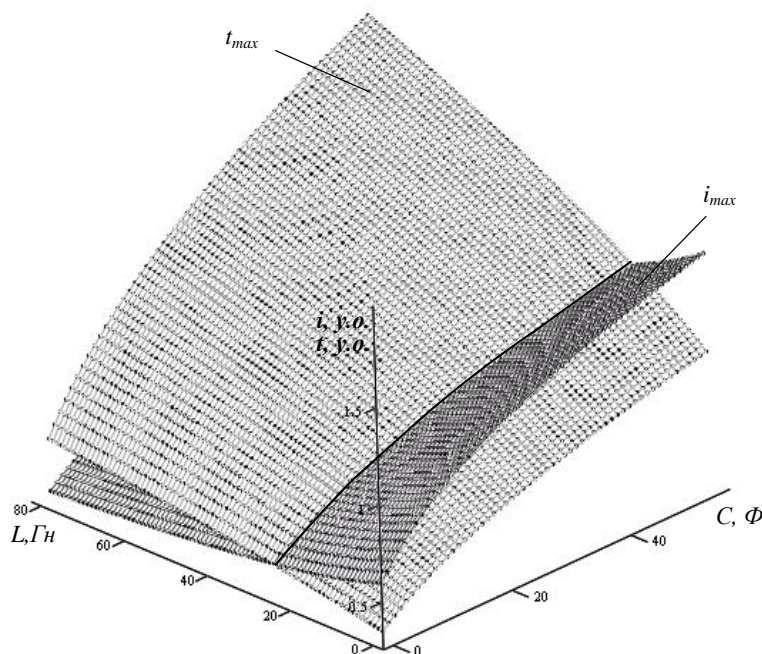


Рис. 8. Значення максимального струму та часу максимального струму від значень ємності конденсатора та значень індуктивності

**Висновки:** В результаті виконаної роботи встановлено аналітичні залежності які пов'язують параметри режиму пристрою формування збудження з параметрами його накопичувальних елементів. При цьому виявлено характер залежності часу досягнення максимуму струму в еквівалентному контурі та відзначено енергетичні показники які можна отримати при керуванні струмом відносно некерowanego режиму, що може бути використаним під час визначення параметрів елементів схеми.

#### Список літератури

1. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989. – 287 с.
2. Калентиюк Е.В., Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
3. Низимов В. Б. Динамика облегченного пуска синхронного двигателя с нелинейным емкостным накопителем энергии / В. Б. Низимов, С. В. Колычев, А. А. Снижко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 5. - С. 72-77.
4. Власенко Р. В. Алгоритм прогнозуемого управления трифазного силового активного фильтра / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 4. – С. 17-21.
5. Слободенюк Д.В., Бялобржеський О.В. Застосування ємнісного накопичувального пристрою контури збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля / Слободенюк Д.В., Бялобржеський О.В. // Науково-практичний журнал Електротехніка і Електромеханіка. – Харків 2015 №2 – С. 16-20.
6. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., и др. Основы теории цепей. – Москва. Энергия, 1975. – 344 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Сінчуком О.М.*

УДК 541.136.

*В.А. Дзензерский, д-р техн. наук, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, д-р ф.-м. наук, В.В. Лисунова, О.И. Ширман*  
(Украина, г. Днепрпетровск, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

## ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

**Анотація.** Обґрунтовано та реалізовано імпульсний метод автоматизованого контролю поточно-го стану електрохімічних накопичувачів енергії у складі електротехнічних комплексів. Метод базується на визначенні параметрів хімічного джерела струму шляхом їх ідентифікації з параметрами електрохімічного процесу, значення яких визначаються із сигналу відгуку джерела струму на тестовий імпульс. Запропонований метод дозволяє здійснювати контроль одночасно декількох параметрів електрохімічних накопичувачів енергії без порушення штатного режиму роботи комплексу.

**Ключові слова:** хімічне джерело струму, сигнал відгуку, параметри електрохімічного процесу, автоматизований контроль, імпульсний метод.

**Аннотация.** Обоснован и реализован импульсный метод автоматизированного контроля текущего состояния электрохимических накопителей энергии в составе электротехнических комплексов. Метод основан на определении параметров химического источника тока путем их идентификации с параметрами протекающего в нем электрохимического процесса, значения которых определяются из сигнала отклика источника тока на тестовый импульс. Предложенный метод позволяет осуществлять многопараметрический контроль электрохимических накопителей энергии без нарушения штатного режима работы комплекса.

**Ключевые слова:** химический источник тока, сигнал отклика, параметры электрохимического процесса, автоматизированный контроль, импульсный метод.

**Annotation.** The impulse method of electrochemical energy storage devices automated control is designed and implemented. The method is based on determination the parameters of chemical current source by identification them with the parameters of the electrochemical process, the values of which are determined by the response current signal on the test impulse. The proposed method allows the simultaneous determination of the values of several accumulator parameters without interrupting the operation mode of autonomous power sources.

**Keywords:** chemical source of power, response signal, electrochemical process parameter, automatic control, impulse method.

### Введение

Функционирующие в составе электротехнических комплексов электрохимические накопители энергии на основе химических источников тока (ХИТ) работают в дежурном режиме с подзарядкой. При таких условиях эксплуатации в ХИТ протекают деградационные процессы различной природы, в результате которых происходит постепенное изменение энергетических показателей ХИТ и в конечном итоге – их отказ. Эти изменения неизбежны и чаще всего трудно предсказуемы, поэтому их своевременное выявление является важной задачей. Контроль состояния электрохимических накопителей энергии на основе ХИТ в составе электротехнических комплексов, таких как автономные системы электроснабжения, сводится к контролю параметров ХИТ. Однако контроль традиционными методами даже ограниченного количества электрических и энергетических параметров ХИТ (ток, напряжение и температура) требует применения сложных многоуровневых иерархических систем обработки информации [1], а для определения остаточной емкости источников тока требуется отключение их на длительное время от сети потребителей, в результате чего нарушается штатный режим работы системы в целом.

Поэтому разработка относительно простого метод контроля состояния накопителей энергии без нарушения штатного режима работы энергосистемы является актуальной задачей и нуждается в новых подходах и методах решения.

Цель работы – разработка метода автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии с выполнением требований бесперебойной работы автономной системы электроснабжения.

**Обоснование метода автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии и его реализация**

Отличием предлагаемого метода контроля параметров химического источника тока от традиционных методов, широко применяемых на практике, является использование для этих целей информации о параметрах протекающего в нем электрохимического процесса, всецело определяющего электрические и

энергетические параметры ХИТ. В электрохимии параметры электрохимических процессов исследуются различными релаксационными методами, в том числе хронопотенциометрическим, разновидностью которого является импульсный гальваностатический метод, в котором на электрохимическую ячейку, находящуюся в равновесном состоянии, подается импульс тока с заданными или с программно управляемыми параметрами. В результате воздействия импульса тока происходит смещение потенциала ячейки относительно его равновесного значения, обусловленное: 1) омическим падением потенциала; 2) зарядением емкости двойного электрического слоя (ДЭС); 3) перенапряжением стадии разряда-ионизации (электрохимической поляризацией); 4) концентрационной поляризацией; 5) деполяризацией. Отмеченная последовательность протеканий стадий электрохимического процесса - закономерное явление в электрохимической кинетике [2], которое находит практическое применение в измерительной технике.

Возможность использования импульсного тока для диагностики химических источников тока показана в [3]. Авторы указанной работы используют для диагностики зарядно-разрядные импульсы длительностью примерно 0,0045 секунд. Используя математическую модель зарядного и разрядного импульсов, разработанную на основе упрощенной эквивалентной схемы химического источника тока, вычисляют емкость двойного электрического слоя, внутреннее активное сопротивление и емкость ХИТ. Следует отметить, что при указанной длительности воздействующего импульса электрохимический процесс не проходит всех отмеченных выше стадий, что влечет за собой потерю части информации.

Дальнейшее развитие импульсный метод контроля состояния свинцово-кислотного аккумулятора с учетом особенностей протекающего в нем электрохимического процесса получил в [4] и был положен в основу предлагаемого метода автоматизированного контроля текущего состояния электрохимических накопителей энергии на основе ХИТ. Преимуществами метода являются возможность непосредственного определения значений нескольких параметров ХИТ по значениям параметров его сигнала отклика (СО) на импульсное воздействие без привлечения при выполнении этих операций эквивалентных схем химического источника тока, что повышает достоверность полученной информации о состоянии накопителя энергии в штатном режиме работы автономной энергосистемы, а также относительная простота реализации метода и отсутствие электроизмерительных приборов для определения контролируемых параметров ХИТ.

#### **Реализация метода**

Суть метода заключается в подаче на ХИТ тестового зарядного импульса тока с заданными параметрами и регистрации сигнала отклика химического источника тока на импульс в виде временной зависимости напряжения на его клеммах. Последующий анализ формы сигнала отклика позволяет получить информацию о параметрах процесса. Предлагаемый метод автоматизированного контроля состояния электрохимических накопителей энергии реализуется путем последовательного выполнения следующих операций:

- формирование тестового импульса тока и подача его на контролируемый ХИТ;
- регистрация сигнала отклика ХИТ на тестовый импульс тока;
- анализ формы сигнала отклика для определения его параметров,
- установление связи между параметрами сигнала отклика и параметрами протекающего в ХИТ электрохимического процесса;
- установление связи между параметрами электрохимического процесса и параметрами ХИТ путем подстановки значений параметров сигнала отклика в соответствующие выражения.

В кратком изложении выполнение перечисленных операций сводится к следующему.

Сформированный тестовый зарядный импульс тока, параметры которого соответствуют изложенным в [4] требованиям, подают на контролируемый ХИТ и регистрируют сигнал отклика в виде функциональной зависимости напряжения на клеммах ХИТ от времени. Поскольку форма сигнала отклика содержит информацию о протекающем в ХИТ электрохимическом процессе, то для получения значений параметров процесса проводится анализ формы СО с использованием разработанных нами методов математической обработки сигналов с указанной функциональной зависимостью [5, 6] При этом выделяют характерные участки СО с определением координат ограничивающих их информационных точек и устанавливается соответствие выделенных участков стадиям протекающего в ХИТ электрохимического процесса. Типичная форма сигнала отклика с обозначениями информационных точек, выделенных участков и соответствующих им стадий процесса приведена на рис. 1а.

Участок сигнала отклика, соответствующий моменту подачи тестового импульса тока, отражает величину падения напряжения на активном сопротивлении ХИТ и величину напряжения зарядения двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела активная масса – электролит, при этом процессе зарядения ДЭС соответствует резкое повышение величины тока в момент подачи тестового импульса (рис. 1б), которая определяется из выражения:

$$I_{\text{зДЭС}} = \frac{U_{\text{дЭС}}}{t_3} C_{\text{дЭС}} , \quad (1)$$



где  $U_{дэс}$  – напряжение ДЭС;  $t_3$  – время заряжения ДЭС, и на сигнале отклика регистрируется как резкое повышение напряжения относительно  $U_a$ , (рис. 1б, увеличенный фрагмент) определяемое из (1) в виде:

$$U_{дэс} = \frac{I_3}{C_{дэс}} t_3, \quad (2)$$

где величина  $U_{дэс}$  обратно пропорционально величине емкости двойного электрического слоя  $C_{дэс}$ .

В свою очередь емкость ДЭС можно описать выражением для емкости плоского электрического конденсатора [7] с допущением, что расстояние между его обкладками эквивалентно толщине диффузного слоя, который вносит основной вклад в величину емкости ДЭС:

$$C_{дэс} = \frac{\varepsilon}{4\pi\delta U_{дэс}}, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{1}{Z} F \sqrt{\varepsilon RT / 8\pi C^0}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – приведенная толщина диффузного слоя, а площадь обкладок эквивалентна площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс электродов.

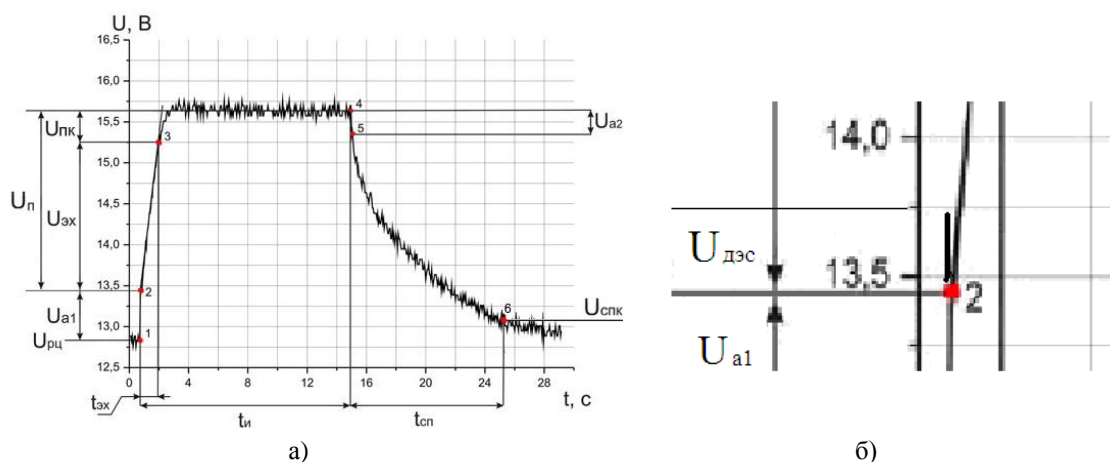


Рис.1. Форма сигнала отклика химического источника тока на импульсное воздействие.

Из (4) следует, что  $\delta$  является функцией только заряда ионов и концентрации электролита, при этом емкость ДЭС увеличивается с уменьшением  $\delta$  в силу увеличения концентрации в нем ионов за счет повышения плотности электролита в поровом пространстве активных масс. Следовательно, величина напряжения двойного электрического слоя  $U_{дэс}$ , полученная из сигнала отклика, позволяет определить плотность электролита в поровом пространстве ХИТ из выражения:

$$\rho = k U_{дэс}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность электролита,  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Анализ формы участков 1 – 2 и 4 – 5 позволяет контролировать статические параметры процесса, к которым относятся падения напряжений на активном сопротивлении  $U_{а1}$  и  $U_{а2}$ , величина напряжения разомкнутой цепи  $U_{рц}$ , а также значение плотности электролита в поровом пространстве активных масс электродов на момент воздействия тестового импульса.

Операции по идентификации статических параметров электрохимического процесса с параметрами и характеристиками ХИТ осуществляют путем подстановки полученных значений параметров СО в соответствующие выражения. Так, по значениям координат точек 1 и 2 определяют величину падения напряжения на активном сопротивлении источника тока в момент подачи тестового импульса, затем по известному выражению рассчитывают величину сопротивления  $R_{a1} = U_{a1} / I_3$ , где  $U_{a1}$  – падение напряжения на активном сопротивлении,  $B$ ;  $I_3$  – амплитуда тока зарядного тестового импульса,  $A$ . Аналогичным образом определяем значение активного сопротивления источника тока в момент снятия тестового импульса по значениям точек 3 и 4:  $R_{a2} = U_{a2} / I_3$ , где  $U_{a2}$  – падение напряжения на активном сопротивлении,  $B$ . По разнице значений сопротивлений  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$  оценивают степень активности участвующих в электрохимических реакциях реагентов.

Формы участков 2 – 4 и 5 – 6 позволяют контролировать динамические параметры процесса, обусловленные особенностями его распространения по объему порового пространства активных масс электродов. Для этих целей определяют значения напряжений поляризации  $U_n$  и деполяризации  $U_{\partial n}$ .

С целью более точного определения динамических показателей процесса участок 2 – 4, отображающий стадию поляризации разбивают на две части, соответствующие электрохимической поляризации 2 – 3 и концентрационной поляризации 3 – 4. Электрохимическая поляризация  $U_{\text{эх}}$  отражает скорость протекания реакции, физической мерой которой является величина плотности тока, и в общем виде описывается известным в электрохимии выражением  $I = i_0 k \exp U_{\text{эх}}$ , где  $I$  – амплитуда тока тестового импульса;  $i_0$  – плотность тока обмена;  $U_{\text{эх}}$  – величина напряжения электрохимической поляризации;  $k$  – коэффициент, содержащий электрохимические константы. Плотность тока обмена является не измеряемой величиной, но качественно о его значении можно судить по углу наклона линии  $U_{\text{эх}}$ , учитывая тот факт, что ток обмена тем больше, чем меньше угол наклона между этой прямой и осью ординат. Из этого следует, что угол наклона можно использовать в качестве информационного параметра, характеризующего скорость электрохимической реакции и, соответственно, коэффициент использования зарядного тока в режиме зарядки ХИТ. Для количественной оценки этого параметра нами предложен термин «крутизна электрохимической реакции», который определяется из выражения

$$k_{\text{эх}} = \frac{U_{\text{эх}}}{t_{\text{эх}}} . \quad (6)$$

По аналогии предложен также параметр

$$k_{\partial n} = \frac{U_{\partial n}}{t_{\partial n}} , \quad (7)$$

отражающий скорость процесса саморазряда ХИТ после снятия тестового импульса.

Концентрационная поляризация  $U_k$  возникает по причине торможения переноса продуктов электрохимической реакции в приэлектродном диффузионном слое, в результате чего их концентрация на поверхности порового пространства активных масс отличается от концентрации в межэлектродном пространстве. При этом распределение концентрации в направлении, перпендикулярном поверхности активных масс, определяется уравнением нестационарной диффузии.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} ,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $x$  – расстояние от поверхности активной массы электрода,  $c$  – текущее значение концентрации электролита у поверхности активных масс при наличии тока во внешней цепи ХИТ.

Концентрационная поляризация отражает процесс распределения концентрации электролита в поровом пространстве активных масс электродов, соответствующий распределению заряда и потенциала по его объему. Этот процесс по своей физической природе аналогичен процессу зарядки объемно-пористого конденсатора, величина емкости которого определяется емкостью двойного электрического

слоя на границе раздела электролит – активная масса электродов в соответствии с выражением (3) и пропорциональна площади реагирующей поверхности активных масс электродов.

Оценить эффективность работы электрохимического накопителя энергии можно путем анализа его энергетических характеристик. Химический источник тока как технический объект в целом можно охарактеризовать определяющим информационным параметром  $C$  – разрядная емкость, который служит мерой качества этого объекта. Емкость ХИТ, изменяясь в процессе работы или хранения, может достигнуть критического значения, после которого ХИТ считается неработоспособным. В настоящее время в распоряжении обслуживающего персонала обычно имеется небольшая информация о случайных процессах изменения емкости ХИТ. На протяжении всего срока эксплуатации емкость химического источника тока может измеряться лишь периодически, поскольку такие измерения связаны с необходимостью проведения зарядно-разрядных циклов ХИТ с обязательным отключением его от сети потребителя, что достаточно сложно обеспечить в штатном режиме работы накопителя энергии. Следует отметить, что даже при наличии встроенных систем автоматического контроля вряд ли удастся получить более полную картину изменения емкости при измерении ее традиционными методами в процессе эксплуатации ХИТ. Такое положение сохранится, по-видимому, и в обозримом будущем. Поэтому очень важно для практических целей иметь удобный, сравнительно простой, но достаточно информативный метод текущего контроля изменения энергетического состояния ХИТ в процессе его эксплуатации.

Учитывая, что емкость ХИТ в ампер-часах в соответствии с законом Фарадея представляет меру протекающих в нем реакций и определяется удельным расходом активных материалов [8], представляется возможным использовать полученную информацию о величине емкости ДЭС для определения энергетического состояния электрохимического накопителя энергии с привлечением обобщенного энергетического показателя – коэффициента использования активных материалов. Величина коэффициента использования активных материалов находится в прямой зависимости от площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс и, соответственно, от емкости двойного электрического слоя. Предложенный нами импульсный метод контроля энергетического состояния химического источника тока [9] основан на отмеченной выше электротехнической аналогии емкости порового пространства и емкости электрического конденсатора. Переходные процессы в системах с емкостными составляющими можно описать во временной области, используя в качестве информационного параметра постоянную времени процесса  $\tau$ , которая в общем виде представлена как  $\tau = R_n C_n$ .

Величина емкости определялась косвенным путем из известного в электротехнике выражения

$$C_n = \frac{\tau}{R_n}, \quad (8)$$

где  $\tau$  – постоянная времени процесса,  $R_n$  – сопротивление поляризации.

По характеру электрохимического поведения активных веществ поляризационные параметры  $R_n$  и  $C_n$  являются переменными во времени.

Такой подход позволяет описать процесс распределения заряда по объему порового пространства активных масс во временной области с использованием функциональной зависимости  $\tau(t)$ , которая описывается выражением

$$\tau_n(t) = - \frac{t}{\ln \left( 1 - \frac{\Delta U_n}{\Delta U_n(t)} \right)}. \quad (9)$$

Полученная зависимость  $\tau(t)$ , устанавливающая связь между формой участка 2 – 4 и энергетическим состоянием ХИТ, в графическом виде представлена на рис.2.

Критерием энергетического состояния ХИТ служит угол наклона линии  $\tau(t)$  к оси абсцисс, величина которого обратно пропорциональна значению обобщенного энергетического параметра. На практике потребителя интересует не столько абсолютная величина остаточной емкости ХИТ, сколько прогноз его работоспособности. Предложенный метод текущего контроля энергетического состояния ХИТ позволяет сравнительно просто получить необходимую информацию.

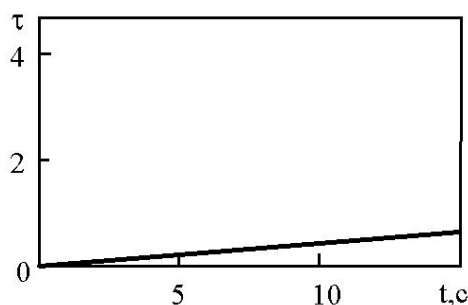


Рис. 2. Проінтегрована залежність  $\tau(t)$  для хімічних джерел струму.

Предложенный импульсный гальваностатический метод контроля состояния накопителей энергии на основе химических источников тока реализован на стенде [10] с использованием оригинального алгоритма автоматизации операций контроля.

#### Выводы

Авторами предложен и испытан на серии свинцово-кислотных аккумуляторных батарей импульсный метод контроля электрических и энергетических параметров ХИТ, представляющий собой дальнейшее развитие и практическое применение используемого в электрохимии импульсного гальваностатического метода. Предложенный метод основан на математическом анализе формы сигнала отклика источника тока на тестовый импульс тока. Показано, что форма сигнала отклика содержит информацию о параметрах протекающего в источнике тока электрохимического процесса и установлена связь параметров процесса с параметрами сигнала отклика. Их идентификация с параметрами источника тока позволяет получить информацию о текущем состоянии ХИТ. Разработанные алгоритмы обработки сигнала отклика и программы на их основе дают возможность осуществлять многопараметрический контроль электрохимических накопителей энергии на базе химических источников тока в различных режимах работы автономной энергосистемы при минимальных затратах времени. Предложенный метод реализован на экспериментальном стенде, схемотехническое решение которого может быть использовано при разработке систем автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии в составе электротехнических комплексов и систем.

#### Список литературы

1. Груздев А.И. Концепция построения систем контроля и управления высокоэнергоемких литиевых аккумуляторных батарей [Текст] / А.И. Груздев // Электрохимическая энергетика. – 2005. – Т. 5. – № 2. – С. 90-93.
2. Дамаскин Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику [Текст] / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: «Высшая школа», 1985. – 400 с.
3. Сиденко С.В. Диагностирование аккумуляторов энергоустановок летательных аппаратов импульсным током [Текст] / С.В. Сиденко, К.В. Безручко, А.О. Давидов // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2007. – № 9/2. – С. 126-132.
4. Дзензерский В.А. Контроль состояния стартерных свинцовых аккумуляторов хронопотенциометрическим методом [Текст] / В.А. Дзензерский, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, И.И. Соколовский // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 13-18.
5. Дзензерский В.А. Автоматизированная диагностика химических источников тока [Текст] / В.А. Дзензерский, М.А. Беда, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. – 2011. – № 1-2. – С. 6-9.
6. Дзензерский В.А. Метод обработки сигналов отклика химических источников тока на импульсное воздействие [Текст] / В.А. Дзензерский, М.А. Беда, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2013. – № 1. – С. 35-39.
7. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии [Текст] / Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
8. Дасоян М.А. Стартерные аккумуляторные батареи: Устройство, эксплуатация и ремонт [Текст] / М.А. Дасоян, Н.И. Курзуков, О.С. Тютрюмов, В.М. Ягнятинский. – М.: Транспорт, 1991. – 255 с.
9. Дзензерский В.А. Контроль энергетического состояния химического источника тока импульсным методом [Текст] / В.А. Дзензерский, С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – № 13(89). – С. 131-139.
10. Плаксин С.В. Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом [Текст] / С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2012. – Вып. 89. – С. 58- 63.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.3.078

**М.В. Куваєв**

(Україна, м. Дніпро, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)

## КОМПЕНСАЦІЯ СТАТИЧНОЇ ПОХИБКИ ЗА ШВИДКІСТЮ ПРИ НАЛАШТУВАННІ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ НА МОДУЛЬНИЙ ОПТИМУМ

**Анотація.** Використання високомоментних машин в електроприводах з високою динамікою призвели до необхідності забезпечувати високу швидкість роботи електропривода та мінімізувати час та амплітуду перехідних процесів. В роботі були наведені шляхи підвищення швидкості системи керування. Був наданий шлях розрахунку та компенсації статичної похибки за швидкістю при налаштованому на модульний оптимум контурі швидкості. Був запропонований спостерігач моменту навантаження для даної системи компенсації, подані результати моделювання, які доказують, що використання запропонованого методу компенсації статичної похибки разом з розробленим спостерігачем моменту навантаження дозволяють отримати контур швидкості, який володіє перевагами симетричного та модульного оптимумів.

**Ключові слова:** технологія ServoDirekt, високомоментна машина, контур швидкості, статична похибка, компенсація статичної похибки.

**Аннотация.** Использование высокомоментных машин в электроприводах с высокой динамикой привели к необходимости обеспечить высокое быстродействие работы электропривода и минимизировать время и амплитуду переходных процессов. В работе были приведены пути повышения быстродействия систем управления. Был предоставлен путь расчёта и компенсации статической ошибки по скорости при настройке на модульный оптимум контура скорости. Был предложен наблюдатель момента нагрузки для данной системы компенсации, предоставлены результаты моделирования, которые доказывают, что использование предложенного метода компенсации статической ошибки вместе с разработанным наблюдателем момента нагрузки позволяют получить контур скорости, который имеет преимущества симметричного и модульного оптимумов.

**Ключевые слова:** технология ServoDirekt, высокомоментная машина, контур скорости, статическая ошибка, компенсация статической ошибки.

**Annotation.** The requirement to provide high performance of electric drives and to minimize the duration and magnitude of transient process have arisen due to wide using of high torque electrical machine. Recommendations about using the methods of increasing the performance of the electric drives with of high torque electrical machine are given. The way of the static error calculation and compensation is given. The load torque observing system is proposed. The results of simulation, which confirm the efficiency of the proposed compensation way are presented.

**Keywords:** technology ServoDirekt, high torque electrical machine, speed loop, static error, compensation of the static error.

**Вступ.** У сучасному машинобудуванні з'явився новий тип пресів – так звані сервопреси, що виконуються за технологією ServoDirekt [1], які мають більшу продуктивність, ніж аналогічні за потужністю класичні преси, і дозволяють реалізувати весь спектр режимів кування/пресування на відміну від класичних пресів, що спеціалізуються на окремих режимах роботи. Такі преси побудовані на базі кривошипно-шатунних/ексцентрикових пресів, але на відміну від цих пресів у них відсутній маховик та гальма, а замість частотно-керованого двигуна змінного струму, що обертається з постійною швидкістю та однаковим напрямом, мають гнучкий у керуванні високомоментний двигун, який можливо використовувати у сервоприводі. У таких пресах кінематика повзуна вільно програмується відповідно до потрібного режиму кування/пресування, що висуває підвищені вимоги до статичних і динамічних характеристик приводу сервопреса, його швидкодії. Зокрема, такі приводи мають забезпечити мінімальний час перехідного процесу та мінімальну динамічну похибку за швидкістю при нахилі статичного моменту навантаження.

Швидкодія системи керування залежить від найменшої некомпенсованої сталої часу та від того, на який оптимум налаштовані регулятори. Найменша некомпенсована стала часу  $T_d$  визначається перетворювачем частоти. Вона залежить від тактової частоти перемикання транзисторів. Теоретично її можливо

визначити за теоремою Котельникова (інша назва теорема відліків Віттакера - Найквіста - Котельникова - Шеннона) [2], тобто за допомогою комутації ключів можливо отримати сигнал з максимальною частотою, яка буде вдвічі меншою за тактову частоту перемикання ключів:

$$f_s = \frac{f_{IGBT}}{2}, \quad (1)$$

де  $f_s$  - частота сигналу,  $f_{IGBT}$  - тактова частота IGBT.

З урахуванням необхідності забезпечити максимальну швидкодію контур току налаштовують за модульним оптимумом [3] з мінімально можливою некомпенсованою сталою часу.

Класичним для контуру швидкості (рис. 1) приводу сервопреса є налаштування на симетричний оптимум (ПІ-регулятор швидкості), оскільки дане налаштування забезпечує астатизм електромеханічної системи за збуренням.

Моделювання перехідного процесу приводу сервопреса при розгоні від 0 до номінальної швидкості та подальшому нахиді статичного моменту 22,4 кНм довело, що статична похибка за швидкістю відсутня, перерегулювання швидкості при розгоні склало 43 %, а тривалість перехідного процесу дорівнює 105 мс. При нахиді навантаження динамічна похибка швидкості склала 25 %, а час перехідного процесу – 50 мс. Такий перехідний процес не відповідає вимогам сервопреса, перш за все, через велику тривалість перехідного процесу.

Швидкодію контуру швидкості можливо також збільшити, якщо налаштувати його на модульний(технічний) оптимум.

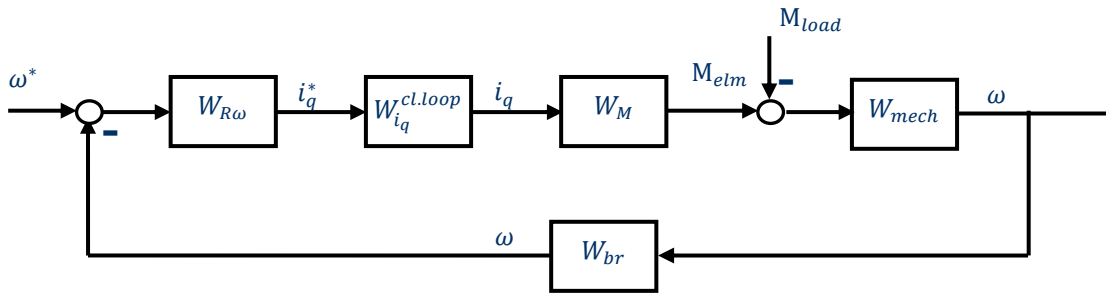


Рис 1. Структурна схема контуру швидкості електропривода електромеханічної системи преса

де  $W_{R\omega}$  – передатна функція регулятора швидкості;  $W_{i_q}^{cl.loop}$  – передатна функція замкнутого контуру струму;  $W_M$  – передатна функція ланки, яка визначає момент;  $W_{mech}$  – передатна функція механічної ланки;  $W_{br}$  – передатна функція датчика швидкості;  $\omega^*$  – завдання на швидкість;  $i_q^*$  – завдання на струм  $i_q$ ;  $M_{elm}$  – електромагнітний момент;  $M_{load}$  – момент навантаження.

Регулятор швидкості при налаштуванні на модульний оптимум є пропорційним регулятором (ПІ-регулятором) на відмінну від регулятора швидкості при налаштуванні на симетричний оптимум. Його передатна функція має такий вигляд:

$$W_{R\omega} = \frac{J}{3T_{\mu\omega}p\Psi_{pm}}, \quad (2)$$

де  $J$  – момент інерції;  $T_{\mu\omega}$  – стала часу контуру швидкості;  $p$  – кількість пар полюсів;  $\Psi_{pm}$  – потокозчеплення ротора.

Моделювання перехідного процесу приводу сервопреса, що налаштований на модульний оптимум, при нахиді статичного моменту 22,4 кНм засвідчило, що перерегулювання швидкості відсутнє, статична похибка склала 32 %, а тривалість перехідного процесу – 36 мс. Такий перехідний процес відповідає вимогам сервопреса за тривалістю перехідного процесу, але не влаштовує за велику статичну похибку швидкості, яка неприпустима у разі реалізації режиму із заданим шляхом пересування та заданою швидкістю повзуна преса.

**Рішення.** При застосуванні ПІ-регулятора швидкості статичну похибку можливо нівелювати іншим шляхом. У момент, коли починає діяти навантаження треба статичну похибку компенсувати додатковим сигналом на завдання. Величину статичної похибки можливо знайти аналітично, знаючи значення навантаження. Для того, щоб вирахувати статичну похибку, перетворимо схему на рис 1 у схему на рис. 2, користуючись правилами перетворення структурних та лінійних схем [4].

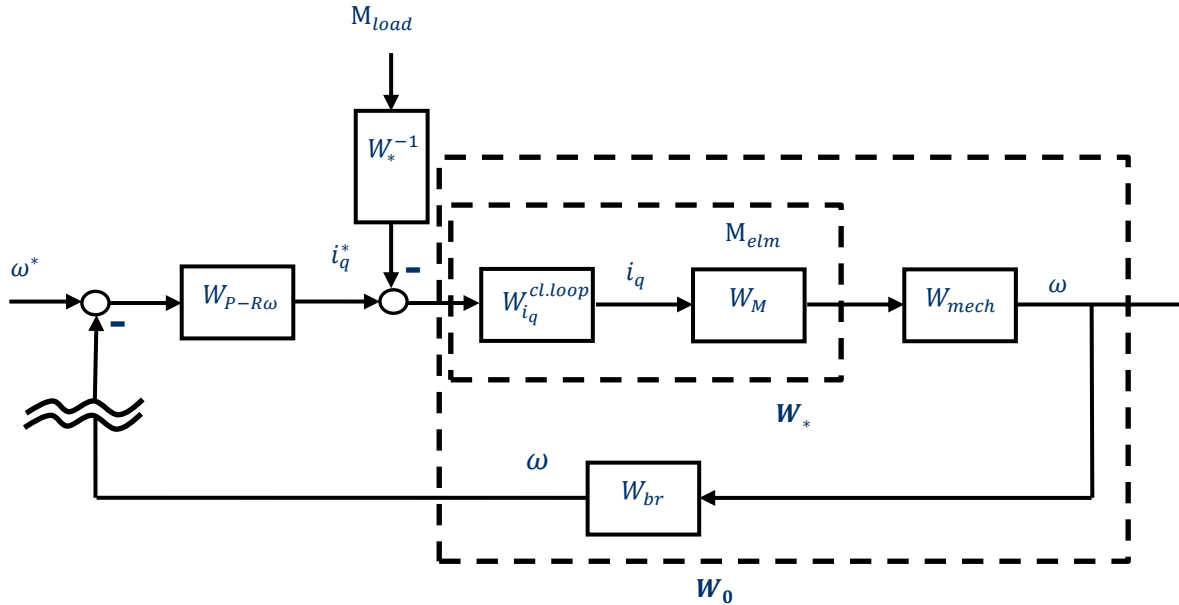


Рис 2. Перетворена структурна схема контуру швидкості електропривода електромеханічної системи преса

де  $W_{P-R\omega}$  – передатна функція П-регулятора швидкості.

Тоді згідно з роботою [4] статична помилка в замкнутій системі буде дорівнювати:

$$x = \frac{W_0 M_{load} W_*^{-1}}{1 + W}, \quad (3)$$

де  $W = W_0 W_{P-R\omega}$  – передаточна функція розімкненої системи, а

$$W_0 = W_{i_q}^{cl.loop} W_M W_{mech} W_{br}. \quad (4)$$

Підставивши у (2) значення передатних функцій, отримаємо значення статичної похибки:

$$x = \frac{\frac{1,5p\Psi_{pm}}{2T_\mu s + 1} \cdot \frac{1}{J_s} \cdot M_{load} \cdot \frac{2T_\mu s + 1}{1,5p\Psi_{pm}}}{1 + \frac{J}{3T_{\mu\omega} p\Psi_{pm}} \cdot \frac{1,5p\Psi_{pm}}{2T_\mu s + 1} \cdot \frac{1}{J_s}} = \frac{\frac{1}{J_s} \cdot M_{load}}{1 + \frac{1}{2T_{\mu\omega}} \cdot \frac{1}{2T_\mu s + 1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (5)$$

З урахуванням цього структурна схема на рис. 1 прийме вигляд, як наведено на рис. 3.

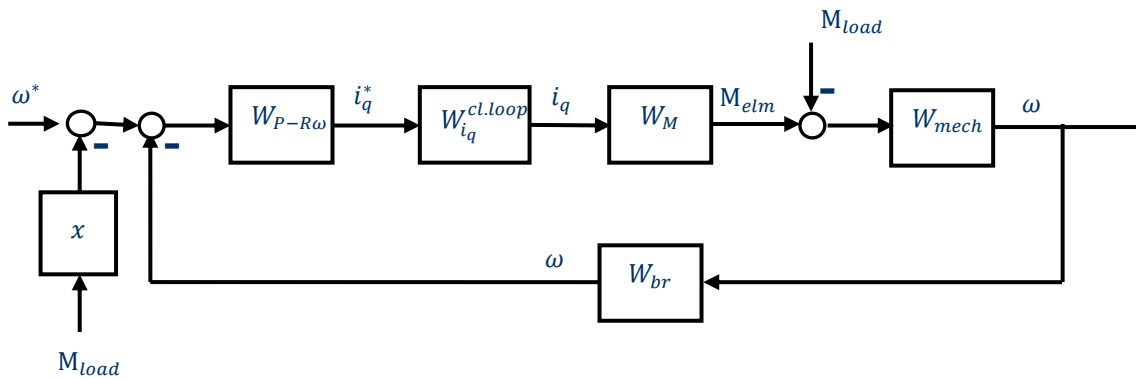


Рис 3. Структурна схема контуру швидкості електропривода електромеханічної системи преса з П-регулятором швидкості та з блоком розрахунку і компенсації статичної похибки, при відомому значенні  $M_{load}$ .

Якщо відняти від завдання розраховане значення статичної похибки  $x$  починаючи з моменту дії моменту навантаження, то у результаті статична похибка буде скомпенсована. На діаграмах (рис. 4) наданий результат моделювання роботи електромеханічної системи преса з П-регулятором швидкості та з блоком розрахунку та компенсації статичної похибки при відомому значенні моменту навантаження та часу його накиду. Умови моделювання такі самі, як і при моделюванні без компенсатора статичної похибки.

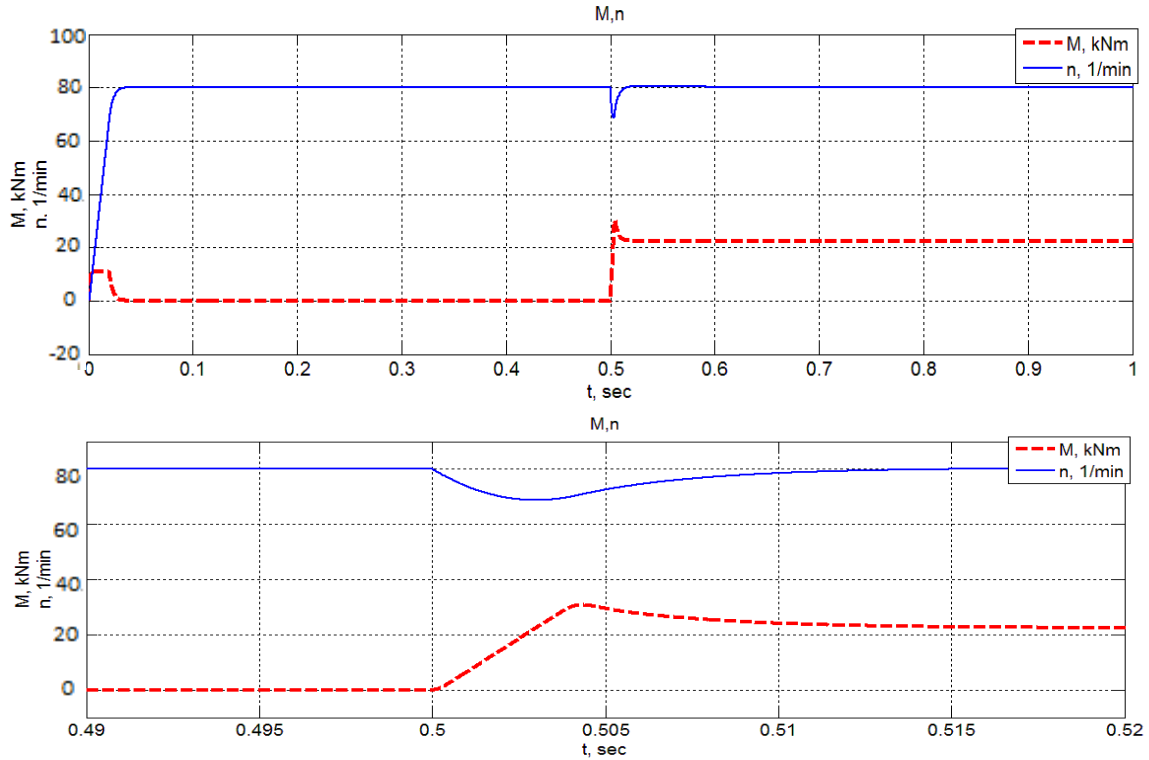


Рис. 4. Діаграми швидкості та моменту електропривода преса з П-регулятором швидкості (модульний оптимум для контуру швидкості) та компенсацією статичної похибки за відомим навантаженням що діє з 0,5 с.

Сучасний розвиток електроніки та обчислювальної техніки робить можливим вдосконалення наданого шляху компенсації статичної похибки так, а саме додається автоматичне визначення величини сигналу компенсації без попереднього завдання. Поточне значення моменту навантаження можливо визначити користуючись основним рівнянням руху:

$$M_c = M_{elm} - J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

де  $M_c = M_{load} + M_{dod}$ ,  $M_{dod}$  – додатковий момент, який може бути викликаний технічними особливостями електропривода, як то тертя, зубцевий момент та інші. Зазвичай моментом  $M_{dod}$  можливо знехтувати.

Електромагнітний момент знаходиться таким чином:

$$M_{elm} = 1,5p(i_d i_q (L_d - L_q) + i_q \Psi_{pm}), \quad (7)$$

де  $i_d, i_q$  – струми по осям  $dq$ ,  $L_d, L_q$  – індуктивності по осям  $dq$ .

Підставивши у вираз (6) значення  $M_{elm}$ , знайдемо поточне значення  $M_{load}$ :

$$M_{load} = 1,5p(i_d i_q (L_d - L_q) + i_q \Psi_{pm}) - J \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$



тобто, користуючись даними датчиків струмів, можливо розрахувати поточне значення  $M_{load}$ . Підставивши вираз (8) у рівняння (5) отримаємо формулу для розрахунку статичної похибки:

$$x = \frac{\frac{1}{J_s} \cdot (1,5p(i_d i_q (L_d - L_q) + i_q \Psi_{pm}) - J \frac{d\omega}{dt})}{1 + \frac{1}{2T_{\mu\omega}} \cdot \frac{1}{2T_{\mu s} + 1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (9)$$

Для розробленого методу компенсації статичної похибки було виконано моделювання, за результатами якого отримані діаграми (рис.5).

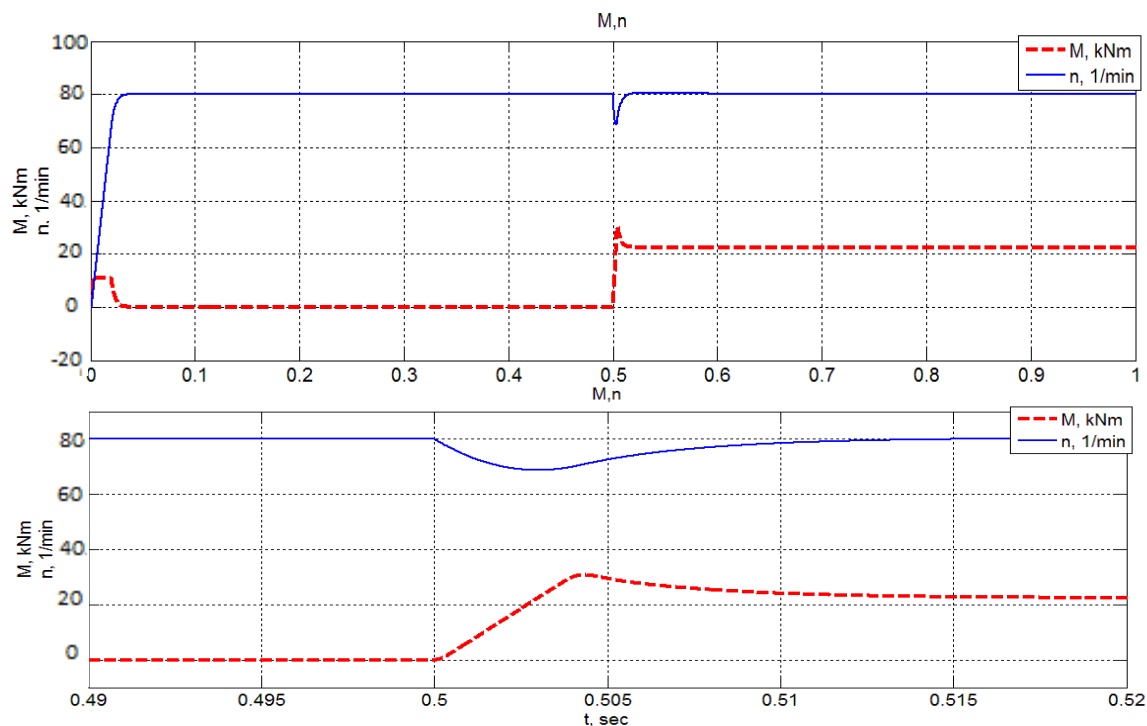


Рис. 5. Діаграми швидкості та моменту електропривода преса з П-регулятором швидкості (модульний оптимум для контуру швидкості) та автоматичною компенсацією статичної похибки зі спостерігачем моменту навантаження, яке діє з 0.5 с.

Як бачимо рис. 5 абсолютно ідентичний рис. 4. На рис. 4 та 5 характеристика розгону відповідає налаштуванню контуру швидкості на модульний оптимум.

**Висновок.** Налаштування контуру швидкості на модульний оптимум дає електромеханічній системі більшу швидкодію, значно зменшує пере регулювання. Це означає менші втрати електродвигуна та більш високу виробничу потужність сервопреса, а застосування модифікованого способу компенсації статичної похибки надає контуру швидкості налаштованого на модульний оптимум головну перевагу симетричного оптимуму – астатизм по навантаженню. Використання ж додатково спостерігача моменту навантаження дає можливість автоматизувати процес компенсації статичної похибки.

#### Список літератури.

1. Firma Schuler Pressen GmbH: Massivumformung mit ServoDirekt Technologie.
2. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорема\\_відліків\\_Віттакера\\_—\\_Найквіста\\_—\\_Котельникова\\_—\\_Шеннона](https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорема_відліків_Віттакера_—_Найквіста_—_Котельникова_—_Шеннона)
3. D. Schröder: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen, Edition 3, bearbeitete Auflage, 2015, Druckerei: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-30096-7
4. Бессекерский В.А., Попов Е.П.: Теория систем автоматического управления/ В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – С.Пб.: «Профессия», 2003.-752 с.

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Казачковським М.М.*

О.М. Галушко канд. тех наук

(Украина, Днепропетровский ГВУЗ «Национальный горный университет»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ БАРАБАНЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ МАШИН ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрены модели барабанных промывочных машин (дизинтеграторов) оснащенных системой автоматического регулирования. В зависимости от задач, предъявляемых к данному оборудованию, исследовалось влияние системы автоматического регулирования на процесс эффективности промывки и потребляемую приводами мощность. В процессе моделирования доказана работоспособность предложенных систем регулирования.

**Ключевые слова:** барабанная промывочная машина, система автоматического регулирования, эффективность промывки, потребляемая мощность.

**Аннотация.** Рассмотрены модели барабанных промывочных машин (дизинтеграторов) оснащенных системой автоматического регулирования. В зависимости от задач, предъявляемых к данному оборудованию исследовалось влияние системы автоматического регулирования на процесс эффективности промывки и потребляемую приводами мощность. В процессе моделирования доказана работоспособность предложенных систем регулирования.

**Ключевые слова:** барабанная промывочная машина, система автоматического регулирования, эффективность промывки, потребляемая мощность

**Abstract.** The paper deals with the models of barrel rinsing machines (disintegrator) with automatic control system. The influence of automatic control system's parameters in rinsing efficiency and its dependence on consumed energy was evaluated depending on application demand. New structure for control system is offered and its viability is proven by the simulation.

**Keywords.** Barrel rinsing machine, automatic control system, rinsing efficiency, consumed energy.

Потребности Украины в прогрессивном, высокопроизводительном оборудовании предъявляют к оборудованию для рудоподготовки, в частности к барабанным промывочным машинам (дизинтеграторам), повышенные требования. В настоящее время актуален вопрос замены устаревшего оборудования на более современное с применением систем автоматического управления. Это позволит снизить энергозатраты на единицу продукции и увеличить эффективность технологического процесса.

Дизинтеграторами, которые отвечают требованиям современных реалий, являются представители типоразмерного ряда с интенсифицированным способом размывки: ДКИ 2,7 x 6,0 и ДВИ 2,5 x 6,0. В зависимости от места установки в технологической цепочке дезинтеграторы выполняют различные функции: обеспечение пропускной способности для первой стадии и обеспечение необходимой эффективности процесса дезинтеграции на второй и третьей стадиях.

В результате экспериментальных исследований работы дезинтеграторов получены уравнения регрессии. Моделирование САР осуществляется на основе регрессионных зависимостей эффективности процесса дезинтеграции  $\varepsilon\%$  и мощности  $P$  кВт. Для ДКИ эти параметры будут зависеть от входной производительности  $Q$  т/час и скорости вращения барабана  $n_b$  об/мин [1], [2]. Для ДВИ кроме указанных параметров необходимо учесть скорость вращения интенсификатора  $n_{II}$  об/мин [3].

Для первой стадии дезинтеграции наиболее важным является обеспечение пропускной способности. Структура САР задания частоты вращения представляет собой апериодическое звено с постоянной времени вдвое превышающей наибольшую постоянную времени дезинтегратора. В реальных условиях этим обеспечивается изменение частоты вращения уже заполненного или частично опорожненного барабана при колебаниях входного потока. При этом частота вращения барабана должна соответствовать значению усредненного потока обрабатываемого материала за время большие времени промывки. Если для 400 т/час эта частота составляет 30 об/мин, то для 520 т/час составляет 36 об/мин.

На рис. 1 представлена модель дезинтегратора ДКИ 2,7 x 6,0 1 стадии дезинтеграции с регулятором частоты вращения барабана. На рис. 2. и рис. 3 временные диаграммы его параметров. Из сопоставления диаграмм неуправляемого и управляемого дезинтеграторов следует, что равном значении средней эффективности среднее значение потребляемой проводом мощности снизилось на 11%.

Для обеспечения наибольшей эффективности процесса дезинтеграции применяют дезинтегратор типа ДВИ 2,5 x 6,0. Его модель с САР представлена на рис. 4. В соответствии с назначением рабочих органов : барабана и интенсификатора частота вращения первого должна определяться потоком обрабатыва-

емого материала, а частота вращения второго требуемой эффективностью дезинтеграции. Таким образом САР ДВИ 2, 5 x 6,0 имеет два контура регулирования: частоты вращения барабана и частоты вращения интенсификатора. На рис. 5 и рис. 6 представлены временные диаграммы параметров ДВИ 2,5 x 6,0. Сравнительный анализ БПМ с САР и без нее показал, что при одинаковой эффективности процесса дезинтеграции около 80%, потребляемая мощность снизилась на 7,7%.

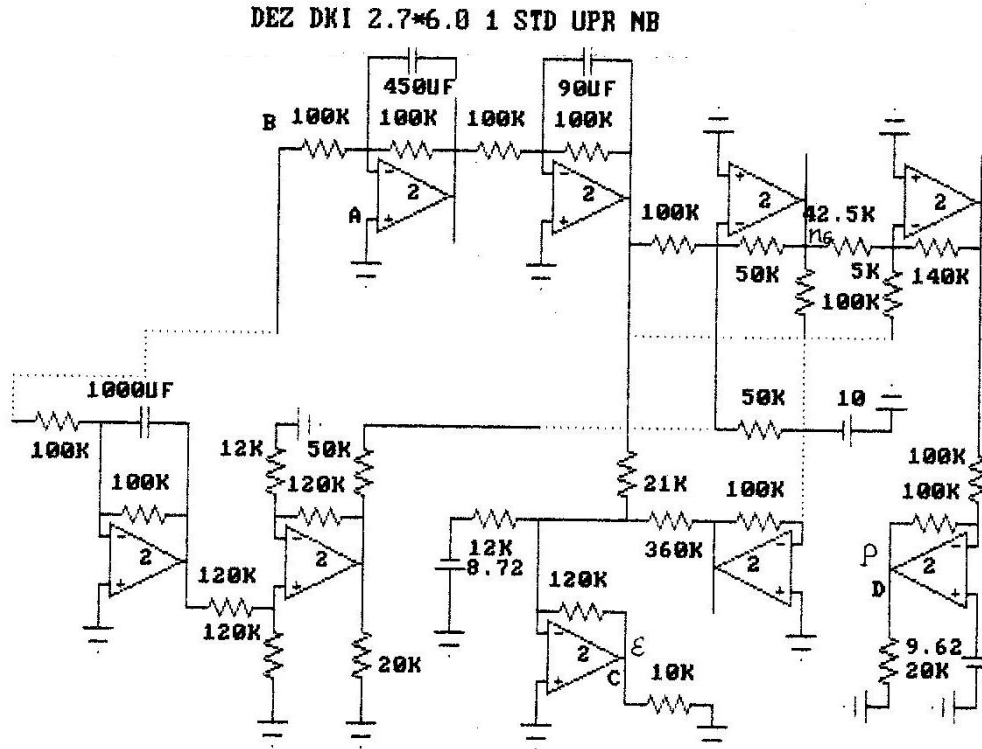


Рис. 1. Модель дезинтегратора ДКИ 2,7 x 6,0 1й стадии дезинтеграции с регулятором частоты

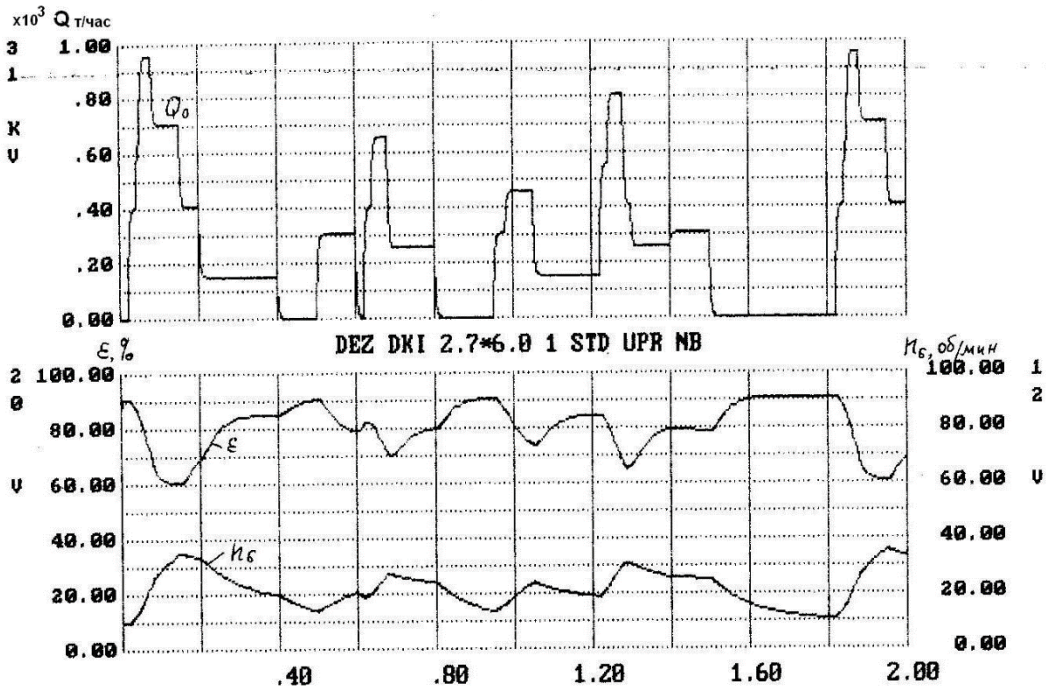


Рис. 2. Временные диаграммы параметров дезинтегратора ДКИ 2,7 x 6,0 1й стадии дезинтеграции с регулятором частоты вращения

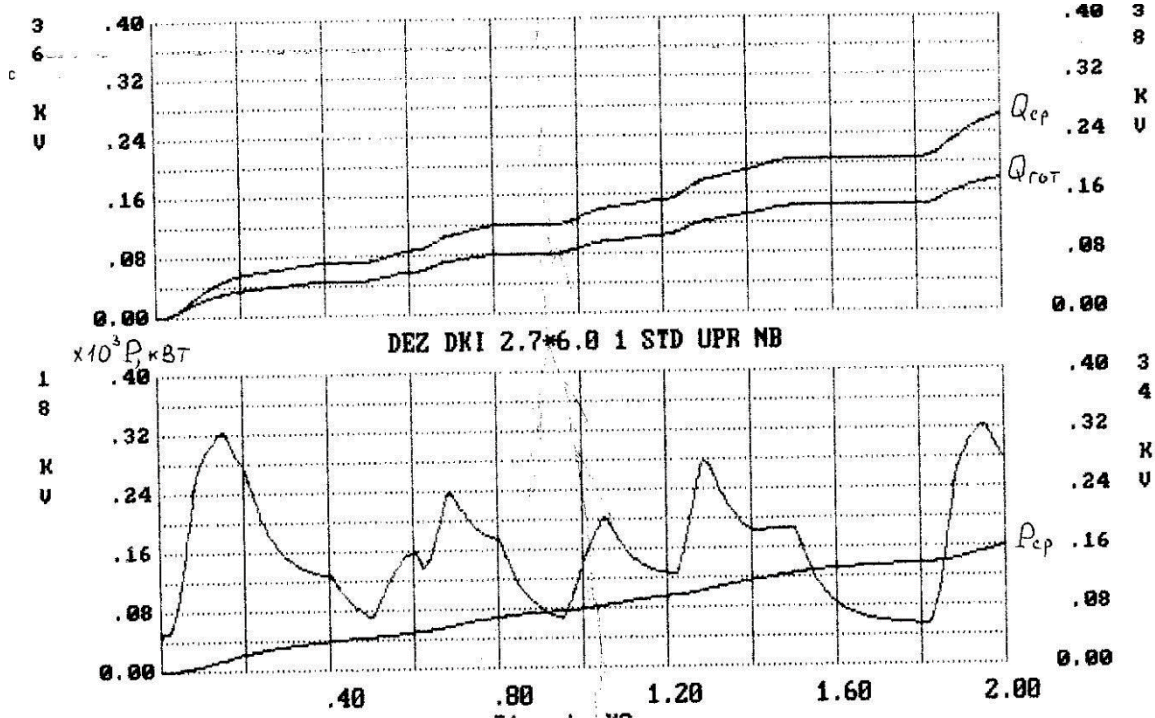


Рис. 3. Временные диаграммы параметров дезинтегратора ДКИ 2,7 x 6,0 1й стадии дезинтеграции с регулятором частоты вращения

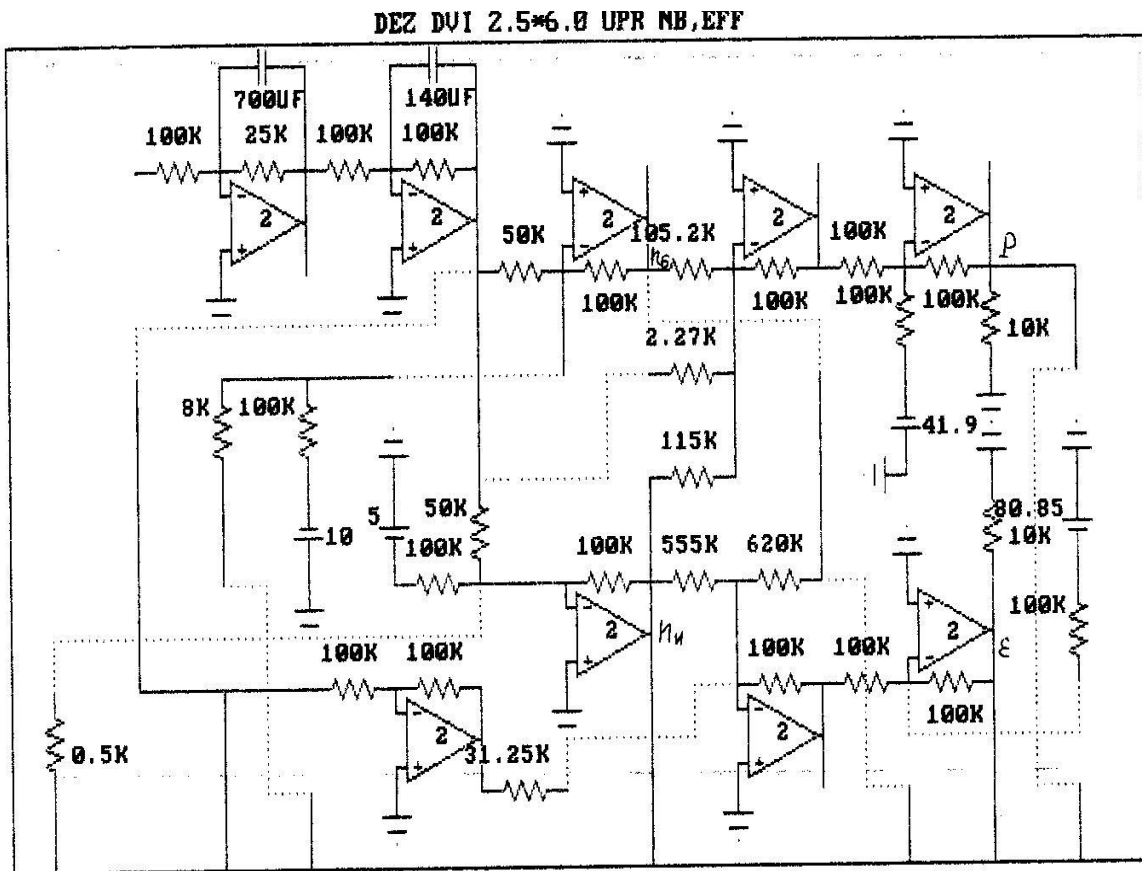


Рис. 4. Модель дезинтегратора ДВИ 2,5 x 6,0 с САР пропускной способности и эффективности.

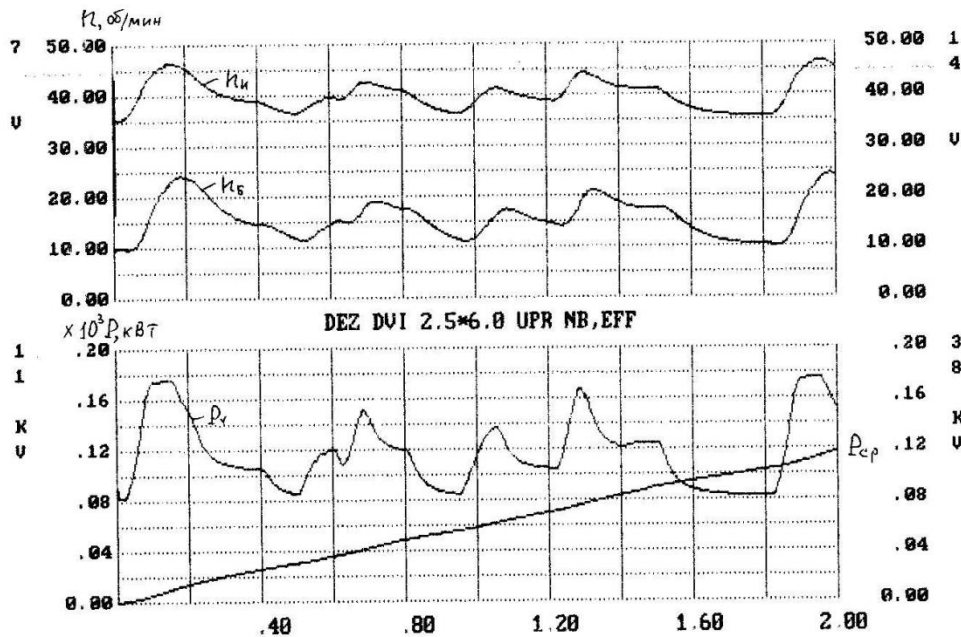


Рис. 5. Временные диаграммы ДВИ 2,5 х 6,0 с САР пропускной способности и эффективности

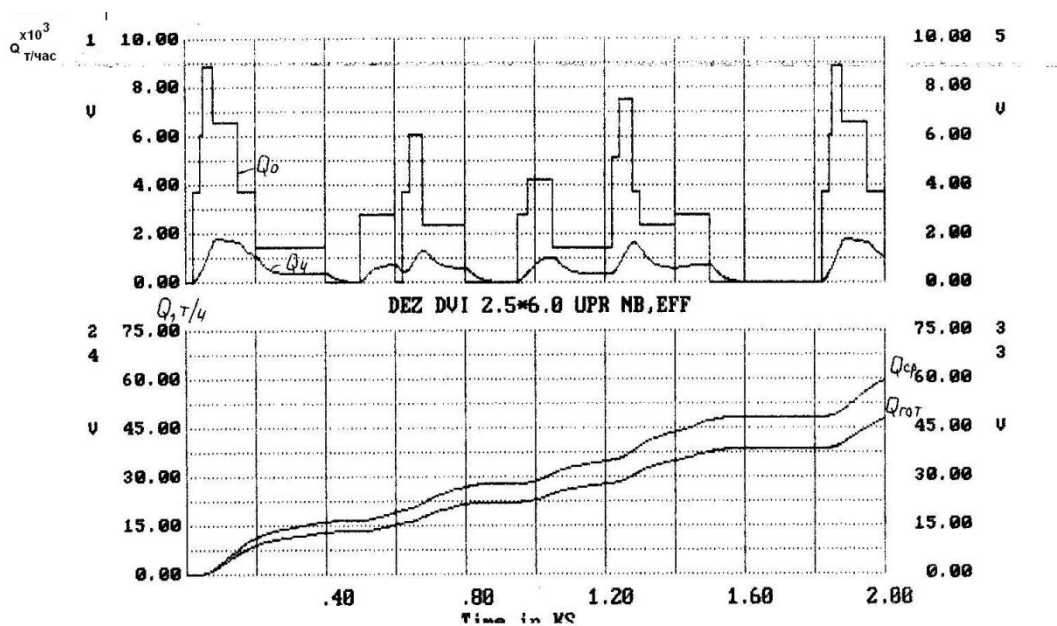


Рис. 6. Временные диаграммы ДВИ 2,5 х 6,0 с САР пропускной способности и эффективности

Из выше изложенного следует вывод об эффективности применения современного оборудования с системой управления, что позволяет снизить энергозатраты на единицу продукции и обеспечить необходимую эффективность процесса дезинтеграции.

Список используемых источников

1. Воробьев А.А. Об интенсификации дезинтеграции глинистых руд россыпных месторождений/ А.А. Воробьев, О.М. Гаркуша, В.И. Соколов // Проблемы повышения качества переработки минерального сырья на обогатительных фабриках и пути их решения: Тез. док. респ. конф. – Днепропетровск: 1979. – С. 22-23.
2. Воробьев А.А.. Управление барабанными промывочными машинами с одним рабочим органом/ О.М. Галушко А.А. Букин // Известия ВУЗов. Гор. Журнал .1990 - №2. – С. 120 – 130.
3. Петренко Р.А. Регрессионные зависимости дезинтегратора с вращающимся интенсификатором и электроприводов рабочих органов // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: 2010. - №4/ (63). Частина 1.- С. 91 -93.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, профессором Івановим О.Б.

Р.А. Петренко

(Украина, Днепропетровск, ГВНЗ «Национальный горный университет»)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ЭФФЕКТА ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрено сопротивление движению тела в жидкой среде при учете режима волнообразования, возникающего при работе барабанной промывочной машины с вращающимся интенсификатором. На основе экспериментальных данных получено уравнение регрессии описывающее число Фруда. Учет этого коэффициента позволит более точно определять необходимую мощности двигателей рабочих органов.

**Ключевые слова:** барабанная промывочная машина, волнообразование, число Фруда, уравнение регрессии.

**Анотація.** Розглянут опір руху тіла в рідкій середі при урахуванні режиму хвилютворення, яке виникає при роботі барабанної промивної машини з обертаючимся інтенсифікатором. По експериментальним даним отримано рівняння регресії яке описує число Фруда. Урахування цього коефіцієнта дозволить більш точно визначити необхідну потужність двигунів робочих органів.

**Ключові слова:** барабанная промивная машина, хвили утворення, число Фруда, рівняння регресії.

**Abstract.** The resistance to the movement of the body in a liquid medium, taking into account the mode of wave formation that occurs in operation of drum washing machine with a rotating intensifier is considered. Based on experimental data the regression equation describing Froude number is obtained. Consideration of this factor will allow more precise determination of the necessary motors power of working bodies.

**Keywords:** drum washing machine, wave formation, Froude number, regression equation.

При работе барабанной промывочной машины с вращающимся интенсификатором на встречу другу другу движутся лопасти барабана и интенсификатора. В результате будет возникать турбулентное движение обрабатываемого материала.

При турбулентном течении жидкости, ее скорость и давление быстро и нерегулярно изменяются во времени.

При движении плоской пластины в жидкой среде, двигающейся под некоторым углом к направлению движения, вихри будут отходить от переднего и заднего краев пластины рис. 1 [1].

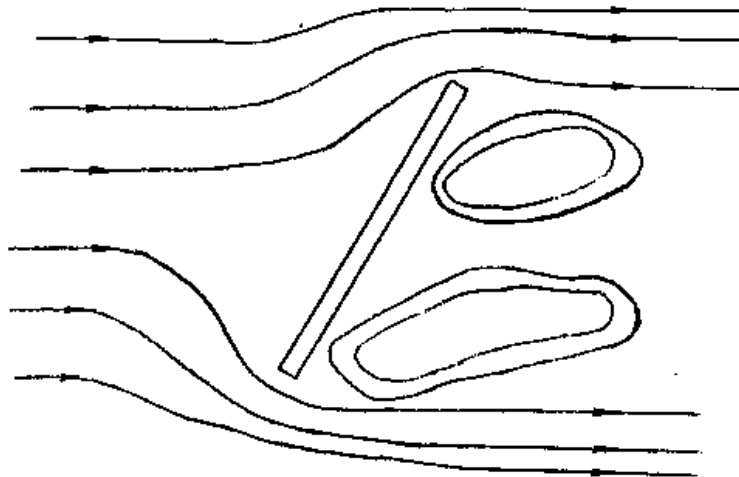


Рис. 1. Образование вихрей за косопоставленной по отношению к потоку пластиной

Таким образом, величина сопротивления движению тела будет зависеть, с одной стороны, от интенсивности вихреобразования вокруг тела, т.е. от структуры потока, а с другой стороны, от свойств самой жидкости. Следовательно, можно сказать, что сопротивление движущихся в жидкости тел зависит от свойств жидкости, которые определяют плотностью, вязкостью и поверхностным натяжением, а также от размеров тела, его скорости движения в жидкости, от формы тела и, наконец, от наличия веса у жидкости, которое определяется ускорением сил тяжести.

В работах В.Л. Александрова [1] и Л.В. Гогиш [2] показано, что сопротивление движению тела пропорционально плотности, площади характеризующей размеры тела и квадрату относительной скорости движения тела в жидкости.

На основании вышеизложенного, общее выражение для определения сопротивления движению тела в жидкой среде, определяется следующей зависимостью [1].

$$R_c = \rho l^2 V^2 f(\rho, l, V, \mu, \alpha, g, c_0), \text{ Н} \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  - линейные размеры тела, м;  $V$  - скорость движения тела в жидкости, м/с;  $\mu$  - коэффициент вязкости жидкости;  $\alpha$  - коэффициент поверхностного натяжения;  $g$  - ускорение земного притяжения, м/с<sup>2</sup>;  $c_0$  - скорость звука в данной жидкости, м/с;  $f$  - некоторая функция указанных величин.

Выражение (1) можно представить в виде

$$R_c = \rho l^2 V^2 f\left(\frac{\rho l V}{\mu}, \frac{\rho l V^2}{\alpha}, \frac{V^2}{gl}, \frac{V}{c_0}\right), \text{ Н} \quad (2)$$

где  $(\rho l V / \mu) = R_e$  - число Рейнольдса, которое характеризует зависимость сопротивления от вязких свойств жидкости;  $(V^2 / gl) = F$  - число Фруда, которое характеризует зависимость сопротивления от волнообразования;  $(V / c_0) = B$  - число Берстоу, которое характеризует зависимость сопротивления от сжимаемости жидкости;  $(\rho l V^2 / \alpha) = K$  - коэффициент, характеризующий зависимость сопротивления от поверхностного натяжения.

Согласно В. Л. Александрову [1], поверхностное натяжение в большинстве случаев играет небольшую роль, и его влияние не рассматривают. Число Берстоу имеет большое влияние при скоростях, приближающихся к скорости звука, при малых скоростях им можно пренебречь. Следовательно, в нашем случае на величину сопротивления будут влиять два числа, а именно, числа Рейнольдса и Фруда.

Из выше изложенного следует, что для расчета сопротивления движению тела в жидкости, мы можем пользоваться формулой (3), преобразовав формулу (2) к виду.

$$R_c = \rho F_m V^2 f\left(\frac{\rho l V}{\mu}, \frac{V^2}{gl}\right), \text{ Н} \quad (3)$$

где  $F_m$  - некоторая площадь тела, м<sup>2</sup>.

Величина коэффициента  $c_2$ , характеризующая влияние числа Рейнольдса, а именно зависимость сопротивления движению в жидкой среде в зависимости от вязких свойств жидкости была экспериментально определена О. М. Галушко [3].

Следовательно, необходимо определить поправочный коэффициент волнообразования  $C_1$  учитывающего влияние вихревых потоков. Коэффициент  $c_1$  является функцией числа Фруда, т.е. зависит от относительной скорости движения тела в потоке жидкости, его линейных размеров и ускорения земного тяготения.

$$c_1 = f\left(\frac{V^2}{gl}\right) \quad (4)$$

Поскольку линейные размеры тела (лопастей интенсификатора), находящегося в обрабатываемом материале, постоянно меняются и учесть их влияние на коэффициент  $c_1$  не представляется возможным. Величина  $g$  является постоянной. Нам необходимо определить уравнение регрессии, которое описывало бы закон изменения  $c_1$  от изменения относительной скорости движения лопастей интенсификатора и загрузки барабанной промывочной машины  $V_{om}$ .

Для решения данной задачи были сняты осциллограммы токов, напряжений, частоты вращения интенсификатора и барабана на промышленном образце барабанной промывочной машины ДВИ 2,5 x 6,0.

Для определения формы кривой, которая будет описывать изменение  $c_1$  от  $V_{om}$ , полученные значения нанесены на точечную диаграмму рис. 2, которая выражает зависимость  $c_1 = f(V_{om})$ . В результате получено поле корреляции.

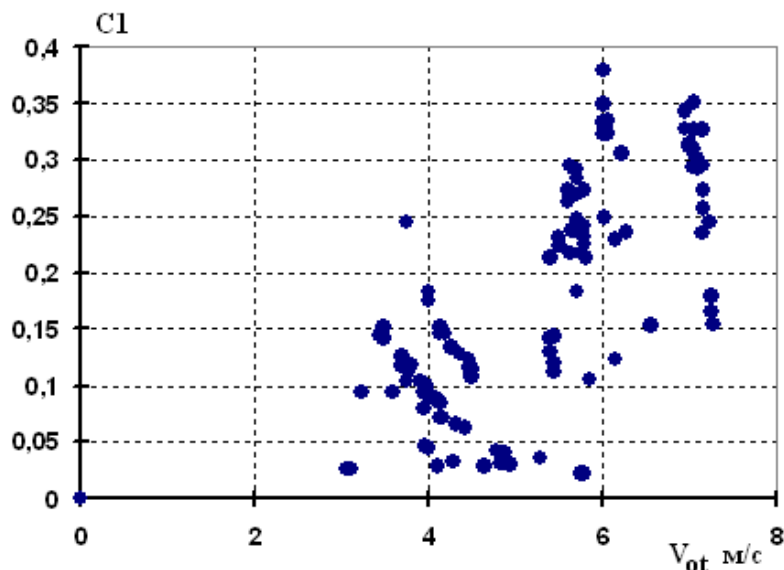


Рис. 2. Точечная диаграмма распределения  $c_1$  от  $V_{om}$

Исходя из визуального анализа аналитического выражения, можно сделать вывод, что уравнение регрессии, которое будет описывать изменение  $c_1$  от  $V_{om}$ , может быть представлено уравнением параболы

$$Y = a + bX + cX^2. \quad (5)$$

Для определения коэффициентов уравнения регрессии воспользуемся методикой предложенной в [4]. В результате, получено уравнение регрессии

$$c_1 = -0,025 + 0,0139V_{om} + 0,0045V_{om}^2. \quad (6)$$

Было определено, что стандартная ошибка,  $\bar{S}_{y.f(x)} = 0,07$ . На рис. 3 представлена зависимость изменения  $c_1$  от  $V_{om}$ , коэффициент  $c_1$ , оцененный по кривой регрессии и зона вероятных значений, которые может принимать  $c_1$ , указанная стандартной ошибкой.

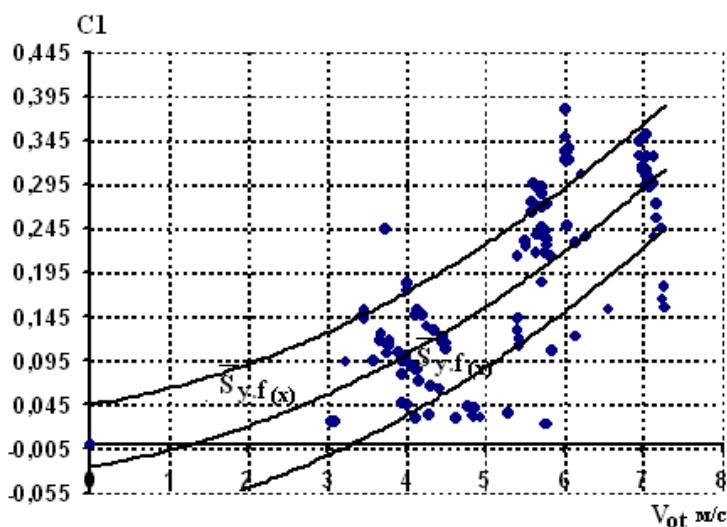


Рис. 3. Зона вероятных значений, которые может принимать  $c_1$ , указанная стандартной ошибкой



Это означает, что в 2-х случаях из 3-х можно ожидать, что расхождения между истинным значением и определенными нами не выйдут за пределы  $\pm 0,07$ .

Как указывалось выше, коэффициент  $c_1$ , зависящий от числа Фруда, описывается зависимостью  $c_1 = f(V^2/gl)$ . Зависит он не только от относительной скорости движения, но и от геометрических размеров самой пластины. Возникает вопрос о том, какую часть вариации зависимой переменной  $c_1$  можно объяснить влиянием независимой переменной  $V_{om}$ , пренебрегая при этом геометрическими размерами пластины. Для данных целей служит величина, носящая название индекса корреляции.

В результате расчета получено, что индекс корреляции,  $i_{xy} = 0,77$ , т.е. величина изменения коэффициента волнообразования  $c_1$  на 77% зависит от величины изменения  $V_{om}$ .

Определение уравнения регрессии, описывающее число Фруда, позволит более точно определять необходимую мощность приводов барабана и интенсификатора.

**Список использованных источников.**

1. Александров В.Л. Техническая гидромеханика//Изд 2-е исп. И доп. М. Л.ЦНТИ 1936г. С.-208.
2. Гогиш Л.В. Турбулентные отрывные течения./Л.В. Гогиш. Г.Ю. Степанов//м. Статистика 1966. С. -361
3. Галушко О.М. Двухдвигательный регулируемый привод барабанных промывочных машин с интенсифицированным способом размыва//Дис.кан.тех наук. Днепрпетровск 1985.С. -200
4. Езекиел М. Методы анализа корреляции и регрессии линейных и криволинейных/М. Езекиел, К.А. Фокс//М. Статистика 1966. С. 555 – 558

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Ивановим О.Б.*

УДК 629.127:551.46.077:681.52

*А.Б. Иванов, И.А. Кириллов канд-ти. техн. наук, С.И. Федоров  
(Украина, г. Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

**БЕСПРОВОДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ**

***Анотація.** Розглянуто способи управління бездротовими телекерованими підводними апаратами, проведено аналіз стосовно до апаратів малого класу. Запропоновано спосіб обміну інформацією за допомогою ультразвуку. Наведено блок-схема управління ТПА ультразвуком, що розробляється авторами.*

***Ключові слова:** бездротові телекеровані підводні апарати, управління, передача інформації, ультразвук.*

***Аннотация.** Рассмотрены способы управления беспроводными телеуправляемыми подводными аппаратами, проведен анализ применительно к аппаратам малого класса. Предложен способ обмена информацией с помощью ультразвука. Приведена блок-схема управления ТПА ультразвуком, разрабатываемая авторами.*

***Ключевые слова:** беспроводные телеуправляемые подводные аппараты, управление, передача информации, ультразвук.*

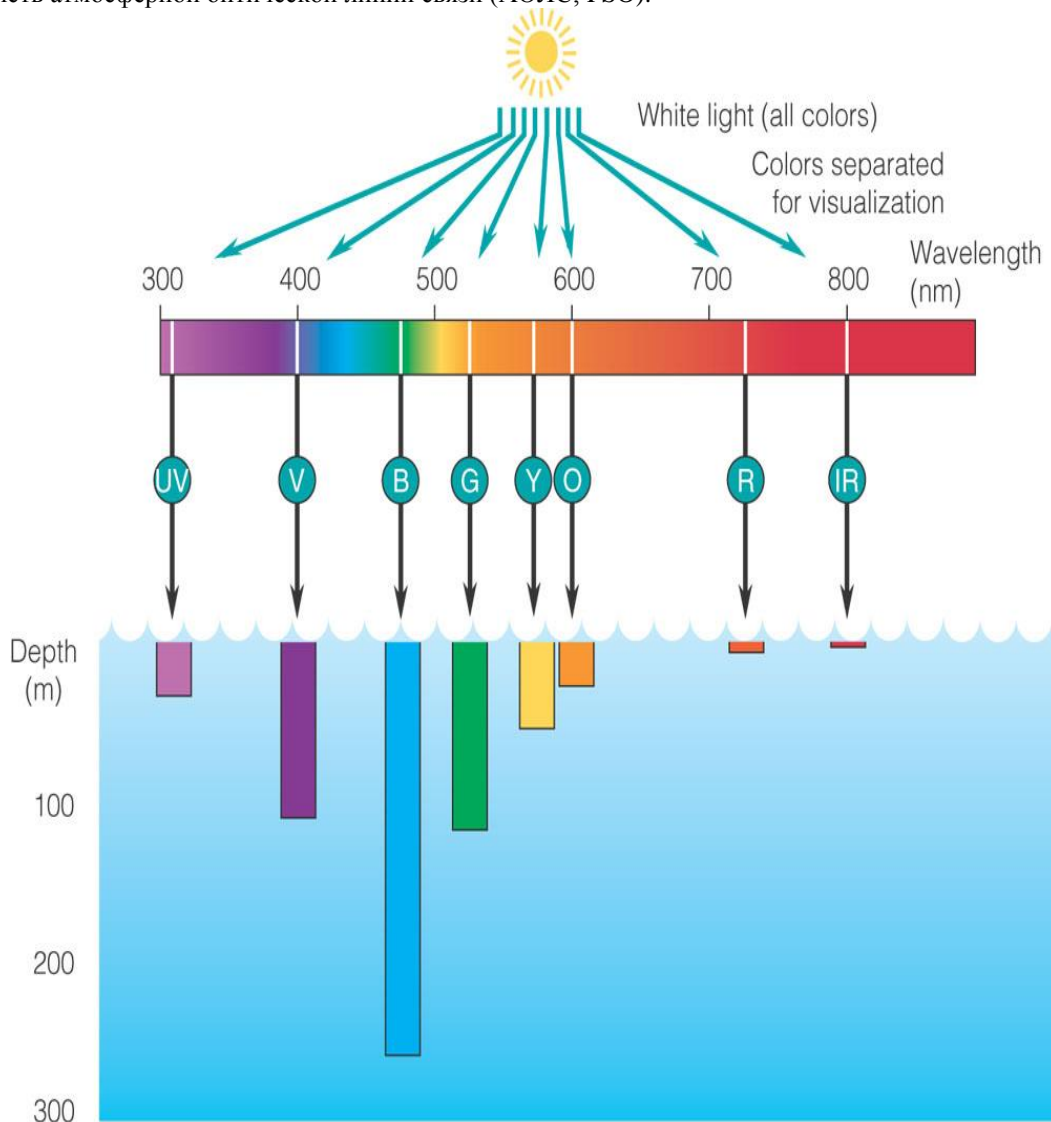
***Annotation.** The methods of control of wireless remotely operated vehicles are considered, the analysis applied to apparatuses of small class is carried out. A method for exchanging information via ultrasound is proposed. Control structure diagram of remotely operated vehicles via ultrasound, developed by the authors, is reported.*

***Keywords:** wireless remote controlled underwater vehicles, control, communication, ultrasound.*

Беспроводные телеуправляемые подводные аппараты (ТПА, ROV), разработка которых активно ведется в последнее время за рубежом, имеют ряд преимуществ по сравнению кабельными устройствами. Они позволяют расширить площадь поиска и увеличить скорость обследования акватории, работать в условиях недоступных для кабельных аппаратов, обеспечить возможность простого управления ими вододлазами, имеют лучшую маневренность.

Основными способами управления беспроводными ТПА являются: оптический, способ на основе низкочастотного радиоволнового излучения и ультразвуковой [1].

Оптический способ управления может быть реализован с учетом поглощения света водой (рис 1.) [2]. Как видно из рисунка наименьшее поглощение лежит в синей части спектра. Следует отметить, что в разных источниках приводятся различные значения длины волны, при которой наблюдается минимальное поглощение. Возможно, это связано с различными условиями проведения экспериментов, а также с тем, что на прозрачность и цвет воды влияют множество факторов: примеси, приносимые реками (лесс), микроорганизмами (Красное море), выносы торфа, соленость и температура воды и др. [3] Указанный способ, например, может быть реализован с помощью синих лазеров на основе уже разработанных устройств атмосферной оптической линии связи (АОЛС, FSO).



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

Рис. 1. Диаграмма поглощения света водой

В 2013 году Woods Hole Oceanographic Institution (США) анонсировал разработку коммуникационной системы оптического обмена информацией со скоростью 10-20 Мбит в секунду на расстоянии до 100 метров. Достоинством оптических систем связи является возможность передачи больших объемов информации, включая сигналы видеокамер. Недостаток этих систем - ограниченное расстояние передачи сигнала и его потеря при низкой прозрачности воды и наличии плавающих предметов, животных и рыб, а также относительная сложность реализации широкой диаграммы направленности при мощном излучении лазера.

В многих случаях работы ТПА не требуется передача больших объемов информации между ТПА и базовой станцией, например, при исследовании радиоактивности, загрязненности, солености воды сканировании дна для исследования его свойств, обнаружения металлических объектов и др. В этом случае

возможна передача информации низкочастотным радиосигналом. Такая связь возможна на сотни километров и более практически независимо от параметров воды. Так, в диапазоне SLF (30-300 Гц) обеспечивается связь с подводными лодками (США, Россия). Однако это требует весьма габаритных антенн неприемлемых для ТПА. Кроме того, на этих частотах невозможно оперативное управление движущимся аппаратом. Повышение частоты также не решает проблему, так как уже в диапазоне VLF (3-30 кГц) дальность связи не превышает 20 м, а антенны остаются недопустимо большими. Это сказывается на динамике движения ТПА, увеличенными потерями энергии аккумуляторов, а также сложности управления ими водолазами.

Анализ акустических шумов моря и рек (звуки прибой, движущихся плавсредств, драг, опор мостов, сточных вод и др.) показывает, что их основная интенсивность лежит в звуковом диапазоне. Поэтому представляет интерес обеспечение связи с ТПА ультразвуком. В этом случае относительно легко обеспечивается требуемая диаграмма направленности, малые габариты антенн, высокая эффективность преобразования электрических сигналов в ультразвук.

На рис. 2 показана упрощенная блок-схема управления ТПА ультразвуком, разрабатываемая авторами. Особенностью устройства является беспроводное управление ТПА, аналогичным проводному RMD-1(JW Fishers).

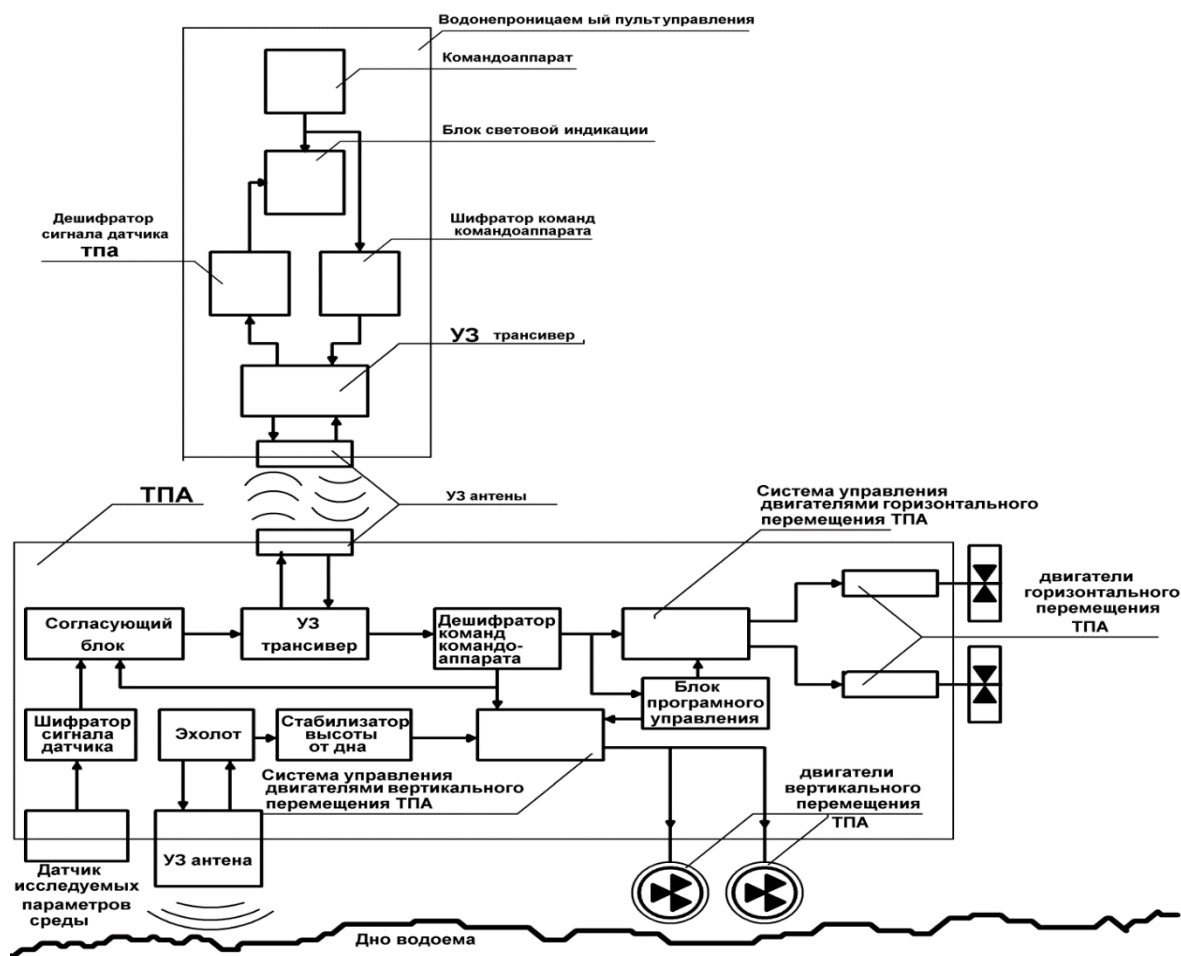


Рис. 2. Упрощенная блок-схема управления ТПА ультразвуком

Устройство может применяться при разминировании акватории, поиска затонувших плавсредств и других металлических предметов. Оно состоит из водонепроницаемого пульта управления движением аппарата, на котором находится блок индикации передаваемых команд и сигналов датчика ТПА и самого ТПА. Сигнал с командоаппарата преобразуется шифратором в соответствующий код и далее через трансивер подается на пьезокерамическую ультразвуковую антенну. Сигнал принимается антенной ТПА и после усиления трансивером раскодируется. Раскодируемый сигнал поступает на блок управления двигателями и блок программного управления. В зависимости от переданной команды включаются соответствующие двигатели для выполнения заданной команды или двигатели работают в соответствии с программой, заданной блоком программного управления. В этом случае ТПА сканирует акваторию по за-

данной программе без вмешательства оператора. В случае работы с металлодетектором важно обеспечить максимально возможное приближение его датчика ко дну с учетом рельефа последнего. Для этого используется эхолот со своей антенной, причем в отличие от общедоступных эхолотов его минимальное определяемое расстояние должно быть не более нескольких сантиметров. При поступлении сигнала с датчика исследуемых параметров (обнаружении металла), он кодируется шифратором сигнала датчика и через согласующий блок и трансивер подается на антенну ТПА.

Согласующий блок при этом обеспечивает согласованную работу антенн пульта управления и ТПА на одной частоте. Принимаемый сигнал антенной пульта управления усиливается трансивером, декодируется дешифратором сигнала датчика ТПА и выводится на блок индикации. Следует отметить, что при работе устройства на мелководье, а также в водоемах с ограниченным объемом, сигналы антенн подвержены эффекту реверберации ультразвука, что необходимо учитывать при кодировке команд. К настоящему моменту разработаны и проверены в бассейне основные узлы устройства, включая подводные двигатели с магнитной муфтой, систему передачи команд с учетом реверберации, систему управления двигателями с ограничением пусковых токов и защитой от коротких замыканий (стопорение вала с винтом), эхолот.

#### **Выводы.**

1. Реализация оптического способа целесообразна на основе лазерных систем синего спектра излучения.
2. При незначительном объеме информации с датчика ТПА беспроводную систему управления целесообразно выполнять на основе ультразвуковой передачи сигналов.
3. При разработке системы управления ультразвуком необходимо учитывать отраженные сигналы от дна, береговой кромки и поверхности водоема, а также подводный техногенный шум.

#### **Список литературы**

1. <http://www.who.edu/website/optical-communications/introduction> (Claudio Paschoa, August 11, 2014)
2. Smith R.C. and K.S. Baker. Optical Properties of the Clearest Natural Waters (200-800 nm). Applied Optics, Vol.20/177 1981
3. Попов Н.И., Федоров К.Н. Орлов В.М. Морская вода. Справочное руководство, -М. Наука, 1979.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Корсуном В.І.*

# ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 625.622:689.21

**A.G. Monia, PhD, associate professor**

(Ukraine, Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukraine)

## ANALYTICAL DEFINITION OF THE WHEEL ROLLING CHARACTERISTICS ON THE RAIL IN THE PRESENCE OF THE INTERMEDIATE MEDIUM

**Анотація.** Мета статті – розробка, розв’язок і аналіз математичної моделі руху колеса по рейці за наявності в зоні контакту проміжного середовища. Для визначення характеристик кочення колеса по рейці за наявності проміжного середовища в режимах розгону і гальмування розв’язані рівняння руху в’язкої нестисливої рідини. Задоволення граничним умовам проведено методом зважених відхилів у вигляді поточної колокації. На основі проведених розрахунків і аналізу встановлено, що за наявності проміжного середовища в режимах розгону та гальмування відносно ковзання по-різному впливає на коефіцієнт зчеплення коліс з рейками. Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними.

**Ключові слова:** фрикційна пара, коефіцієнт зчеплення, колесо локомотива, рейкова колія, рівняння Нав’є – Стокса, метод зважених відхилів.

**Аннотация.** Цель статьи – разработка, решение и анализ математической модели движения колеса по рельсу при наличии в зоне контакта промежуточной среды. Для определения характеристик качения колеса по рельсу при наличии промежуточной среды в режимах разгона и торможения решены уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Удовлетворение граничным условиям проведено методом взвешенных невязок в виде поточечной коллокации. На основе проведенных расчетов и анализа установлено, что при наличии промежуточной среды в режимах разгона и торможения относительное скольжение по-разному влияет на коэффициент сцепления колес с рельсами. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** фрикционная пара, коэффициент сцепления, колесо локомотива, рельсовый путь, уравнения Нав’є – Стокса, метод взвешенных невязок.

**Annotation.** Article purpose – development, the decision and the analysis of mathematical model of the movement of a wheel on a rail in the presence in a zone of contact of the intermediate environment. For definition of characteristics of swing of a wheel on a rail in the presence of the intermediate environment in the modes of dispersal and braking the equations of the movement of a viscous incompressible fluid are solved. The satisfaction to boundary conditions is carried out by method of the weighed discrepancies in the form of a pointwise collocation. On the basis of the carried-out calculations and the analysis it is established that in the presence of the intermediate environment in the modes of dispersal and braking relative sliding differently influences coefficient of coupling of wheels with rails. Results of calculations will well be coordinated with experimental data.

**Keywords:** frictional couple, coupling coefficient, a locomotive wheel, a railway line, Navier – Stokes equations, a method of the weighed discrepancies.

Steel wheels possess rather stable frictional properties and are widely used on rail transport and in hoisting-and-transport equipment. Kinematic and dynamic properties of frictional couple a wheel rail are defined by their geometrical parameters, external loadings and existence of the intermediate environment. The railway line in mines is covered with the considerable polluting fine layer representing mix of breed, particles of wear of brake shoes and wheels in soil waters. When braking the locomotive, the liquid or multidisperse environment which is on rails considerably influences coefficient of coupling of a wheel with a rail and force of resistance to swing. Now process of interaction of a wheel with a rail in the presence of the intermediate environment is studied insufficiently.

In work [1] changes of pressure in a zone of contact of a wheel and a rail at various characteristics of the intermediate environment are established. It is shown that at change of load of a wheel of the locomotive moving on the railway line covered with the intermediate environment, the bearing ability of the visco-plastic environment can reduce coupling coefficient up to the size of internal friction of the environment. At the same time the

wheel will be in the hydroplaning mode. In work [2] on the basis of the equations of the hydrodynamic theory of greasing interaction of a brake shoe wheel-block brakes with a wheel in the presence of the intermediate environment in the form of dispersion of products of wear of lubricants and inorganic pollution in contact zones a block - a wheel and a wheel - a rail is considered.

**Article purpose** - development, the decision and the analysis of mathematical model of the movement of a wheel on a rail in the presence in a zone of contact of the intermediate environment.

These researches are continuation of works [3, 4]. Here in addition to earlier conducted researches process of dispersal of a wheel in the presence of the intermediate environment is considered and the comparative analysis of characteristics of coupling in the modes of dispersal and braking is made. For improvement of quality of modeling and specification of the received results the number of points of a collocation is increased to 15 that led to bigger number of the equations in system.

The model of the movement of the Newtonian viscous incompressible liquid [5] is applied to establishment of characteristics of swing of a steel wheel on a rail in the presence of the intermediate environment. To the rotating steel wheel on a normal to a rail force which part is perceived by the intermediate environment is applied. In the course of swing of a wheel it is affected by the moment of dispersal or braking  $M_{pr}$  (fig. 1).

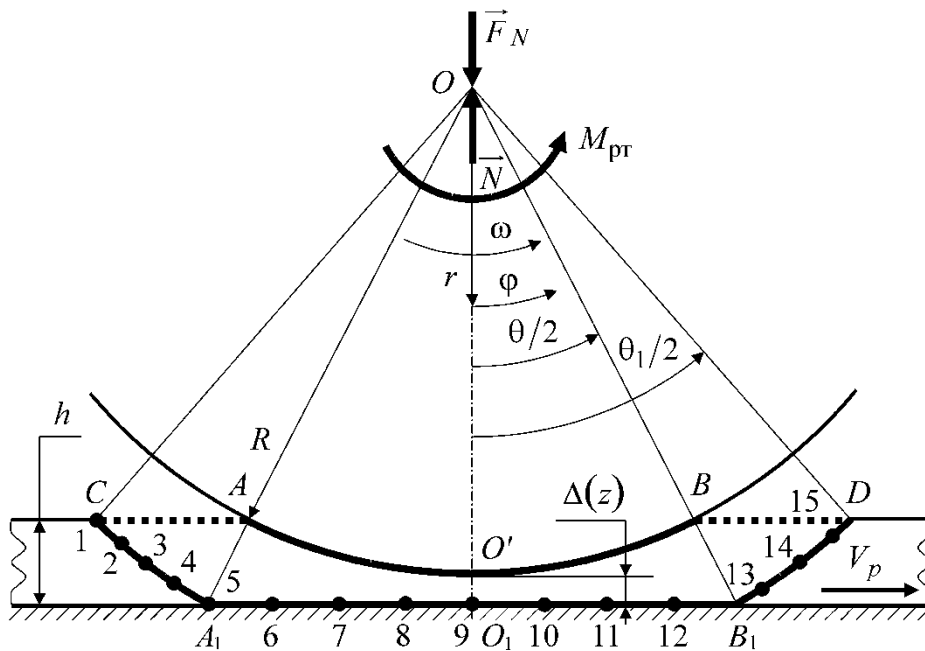


Fig. 1. The rated scheme of the movement of a wheel in the presence of the intermediate environment

In fig. 1 the following designations are accepted:  $R$  – radius of a circle of driving of a wheel;  $\omega$  – angular speed of a wheel;  $\vec{F}_N$  – normal force;  $\vec{N} = \vec{F}_n + \vec{F}_p$ ;  $\vec{F}_n$  – lifting force of the intermediate environment;  $\vec{F}_p$  – reaction of a rail;  $r$  – current radius;  $\varphi$  – current angular coordinate;  $h$  – thickness of a layer of the intermediate environment;  $\Delta(z)$  – the gap between a wheel and a rail in the plane  $z = const$  (the axis of  $Oz$  is directed perpendicularly to the drawing plane in such a way that if to look from its end, then positive values of angular movements  $\varphi$  are represented occurring against the course of an hour hand) filled with the intermediate environment;  $V_p$  – the speed of a rail of rather geometrical center of a wheel equal on absolute value of speed of the locomotive; 1,2,3,..., 15 – collocation points;  $\theta$ ,  $\theta_1$  – the corners defined geometrically

$$\frac{\theta}{2} = \arccos \frac{R - h + \Delta(z)}{R},$$

$$\frac{\theta_1}{2} = \arccos \frac{R - h + \Delta(z)}{OD} = \arccos \frac{R - h + \Delta(z)}{OB_1} = \arccos \frac{(R - h + \Delta(z)) \cos \frac{\theta}{2}}{OO_1} = \arccos \frac{(R - h + \Delta(z))^2}{R(R + \Delta(z))}.$$

Neglecting "end effects" and believing that the wheel and a rail have infinite length in the direction of a wheel pivot, we will consider that the movement of the intermediate environment in a gap between a wheel and a rail is flat. Thus, the task is reduced to consideration of the movement of viscous incompressible liquid between the wheel rotating with angular speed  $\omega$  which geometrical center is not mobile and is a pole  $O$  of polar system of coordinates, and the rail moving progressively concerning a pole  $O$  in the direction of rotation of a wheel with a speed  $V_p$ . Rail speed in the mode of dispersal is less than circumferential speed of a wheel, and in the braking mode - exceeds it. Thus, between working surfaces of a wheel and a rail slipping takes place.

Let's use Navier – Stokes equations in polar system of coordinates [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r V_\varphi}{r} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left( \nabla^2 V_\varphi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right); \\ \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} &= 0; \quad \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \end{aligned}$$

where  $V_r$  – a velocity vector projection in the direction of the current radius;  $V_\varphi$  – a velocity vector projection in the direction of the current angular coordinate;  $t$  – time;  $\rho$  – liquid density;  $p$  – pressure;  $\nu$  – kinematic coefficient of viscosity.

The gap between a wheel and a rail is very small in comparison with wheel radius  $R$ . We will consider the movement of liquid in a gap slow as inertial members in comparison with the members considering viscous forces and change of pressure can be neglected. Then the linearized Navier – Stokes equations in which there are no inertial members in polar coordinates will take the following form

$$\mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi}, \quad \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} = \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad (1)$$

where  $\mu = \nu \rho$  – the dynamic coefficient of viscosity of liquid depending on temperature.

By drawing up these equations the relative trifle of a gap in comparison with wheel radius allowing to consider that is considered

$$\begin{aligned} V_\varphi \gg V_r; \quad \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} \gg \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi}, \quad \frac{V_\varphi}{r^2}; \\ \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} \gg \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}, \quad \frac{V_r}{r^2}; \quad \frac{\partial V_r}{\partial r} \gg \frac{V_r}{r}; \quad \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} \ll \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2}. \end{aligned}$$

Follows from the first two equalities of system (1) that

$$r \frac{\partial p}{\partial r} \ll \frac{\partial p}{\partial \varphi}.$$

It allows to accept further

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad p = p(\varphi).$$

Besides, in system of the equations (1) it is possible to replace out of a derivative sign  $r$  on  $R$ , and from a variable  $r$  ( $R \leq r \leq (R + \Delta(z)) / \cos(\theta/2)$ ) to pass to the variable  $\zeta = r - R$  changing in an interval  $0 \leq \zeta \leq (R + \Delta(z)) / \cos(\theta/2) - R$ . Then  $\partial/\partial r = \partial/\partial \zeta$  and Navier – Stokes equations will register so:

$$\mu \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \zeta^2} = \frac{1}{R} \frac{dp}{d\varphi}; \quad \frac{\partial V_r}{\partial \zeta} = -\frac{1}{R} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}. \quad (2)$$

Normal  $\sigma_{rr}$  and tangent  $\tau_{r\varphi}$  stresses according to the generalized law of Newton for incompressible viscous liquid in expanded form in polar system of coordinates according to work [5] are determined by formulas

$$\sigma_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial \zeta}; \quad \tau_{r\varphi} = \mu \left( \frac{1}{R} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \zeta} - \frac{V_\varphi}{R} \right). \quad (3)$$

Let's find distribution  $V_\varphi = V_\varphi(r, \varphi)$   $V_r = V_r(r, \varphi)$ ,  $p = p(\varphi)$  in the  $CABDB_1A_1$  area belonging to the plane  $z = const$  (fig. 1).

At the solution of the specific objectives connected with a flow of firm surfaces viscous liquid boundary conditions have to be used [5]: particles of liquid "stick" to a firm wall, without getting through it, and in a common ground of their speed match speeds of points of a moving firm surface; on removal from a streamline body the speed and pressure, in any point of a flow are set.

Let's write down boundary conditions taking into account that environment speed on border medium - a wheel is equal to wheel speed, on border medium - a rail is equal to rail speed; medium does not get through borders; on removal from a wheel the speed of the environment is equal to rail speed, pressure is equal to zero. Thus:

at  $\zeta = 0$ ,  $|\varphi| < \theta/2$  ( $AO'B$  line)

$$V_\varphi = \omega R = V_p(S+1), \quad V_r = 0, \quad (4)$$

where  $S = \frac{\omega R - V_p}{V_p}$  – relative sliding of a wheel on a rail;

at  $\zeta = \frac{R + \Delta(z)}{\cos \varphi} - R$ ,  $|\varphi| < \theta/2$  (line  $A_1B_1$ )

$$V_\varphi = V_p \cos \varphi, \quad V_r = V_p \sin \varphi; \quad (5)$$

at  $\zeta = \frac{(R + \Delta(z))}{\cos(\theta/2)} - R$ ,  $\theta/2 < |\varphi| < \theta_1/2$  (line  $CA_1$  and  $B_1D$ )

$$V_\varphi = V_p \cos \varphi, \quad V_r = V_p \sin \varphi, \quad p = 0. \quad (6)$$

The approximation of the decision satisfying to Navier – Stokes equations (2) and to boundary conditions (4) it is identical, we will choose in a look

$$\left. \begin{aligned} V_\varphi &= \omega R + (a\zeta - \zeta^2) \left( \sum_{i=1}^n a_i \cos \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} + \sum_{i=1}^k b_i \sin \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} \right); \\ V_r &= \frac{2\pi}{R\theta_1} \left( \frac{\zeta^3}{3} - \frac{a\zeta^2}{2} \right) \left( -\sum_{i=1}^n a_i i \sin \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} + \sum_{i=1}^k b_i i \cos \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} \right) + f(\varphi); \\ p &= -\frac{\mu R \theta_1}{\pi} \left( \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{i} \sin \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} - \sum_{i=1}^k \frac{b_i}{i} \cos \frac{2i\varphi\pi}{\theta_1} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

where  $a = \Delta(z) \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arctg S \right)$ ;  $f(\varphi) = \begin{cases} V_p \sin(\theta_1(\varphi + \theta/2)/(\theta_1 - \theta)), & \text{at } -\theta_1/2 \leq \varphi < -\theta/2; \\ 0, & \text{at } |\varphi| \leq \theta/2; \\ V_p \sin(\theta_1(\varphi - \theta/2)/(\theta_1 - \theta)), & \text{at } \theta/2 < \varphi \leq \theta_1/2. \end{cases}$



We will also define unknown coefficients  $a_i$  and  $b_i$  so that the chosen approximation of the decision met boundary conditions (5), (6). For satisfaction of functions  $V_\varphi$  and  $V_r$  to boundary conditions (5) and (6), and also function  $p$  to a boundary condition (6) we will use method of the weighed discrepancies in the form of a pointwise collocation [6]. We will choose points of a collocation on the  $CA_1B_1D$  line asymmetrically rather direct  $\varphi = 0$ .

From system of the equations (7) we have

$$\sum_{i=1}^n K_{ji}a_i + \sum_{i=1}^k M_{ji}b_i = L_j, \quad (8)$$

where  $K_{ji} = \cos \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $M_{ji} = \sin \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $L_j = \frac{V_p (\cos \varphi_j - S - 1)}{a\zeta_j - \zeta_j^2}$  – for the first equation of system (7);

$K_{ji} = -i \sin \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $M_{ji} = i \cos \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $L_j = \frac{R\theta_1 (V_p \sin \varphi_j - f(\varphi_j))}{2\pi \left( \frac{\zeta_j^3}{3} - \frac{a\zeta_j^2}{2} \right)}$  – for the second equation of system (7);

$K_{ji} = \frac{1}{i} \sin \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $M_{ji} = -\frac{1}{i} \cos \frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$ ,  $L_j = 0$  – for the third equation of system (7);  $\zeta_j = \frac{R + \Delta(z)}{\cos \varphi_j} - R$  on

the line  $A_1B_1$ ;  $\zeta_j = \frac{R + \Delta(z)}{\cos(\theta/2)} - R$  on lines  $CA_1$  и  $B_1D$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  ( $m$  – total quantity of the equations of system (8)).

The total number of unknown  $a_i$  and  $b_i$  has to be equal in system of the linear algebraic equations (8) to number of the equations. Thus, the number of members of ranks in decomposition (7) depends on quantity of points of a collocation. For carrying out numerical calculations we will take 15 points of a collocation. Points on an entrance to the  $CABDB_1A_1$  area we will arrange more densely, than at the exit (fig. 1). Then the system (8) will consist of thirty eight equations and it is possible to accept  $n = 19$ ,  $k = 19$ . Considering  $R = f(z) = const$ ,  $\Delta(z) = const$ , we will determine the carrying power of the intermediate environment and force of the viscous resistance caused by existence of the intermediate environment as functions of relative sliding on formulas

$$F_n = b \int_{AB} \sigma_{rr} \cos \varphi dl = \frac{b\mu R^2 \theta_1^2}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{i} \left( \frac{1}{2i\pi - \theta_1} \sin \frac{(2i\pi - \theta_1)\theta}{2\theta_1} + \frac{1}{2i\pi + \theta_1} \sin \frac{(2i\pi + \theta_1)\theta}{2\theta_1} \right); \quad (9)$$

$$F_c = b \int_{AB} \tau_{r\varphi} \cos \varphi dl = bR\mu \left( a\theta_1 \sum_{i=1}^n a_i \left( \frac{1}{2i\pi - \theta_1} \sin \frac{(2i\pi - \theta_1)\theta}{2\theta_1} + \frac{1}{2i\pi + \theta_1} \sin \frac{(2i\pi + \theta_1)\theta}{2\theta_1} \right) + 2\omega \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad (10)$$

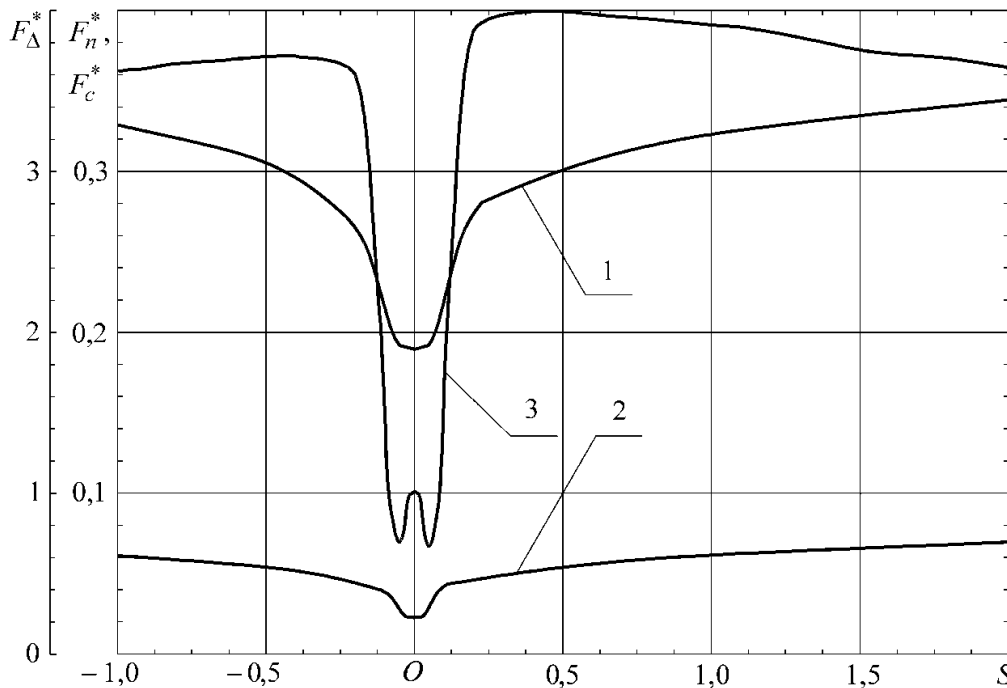
where  $b$  – width of a zone of contact of a wheel and intermediate environment;  $dl = \sqrt{r^2 + r'^2} d\varphi = R d\varphi$  – curve arch differential.

The decision of system of the linear algebraic equations (8) was executed by the Gauss method for the sizes of relative sliding changing in the range from minus units (the skid mode) to two (slipping drafts in the mode with the district speed of a wheel three times exceeding rail speed concerning a wheel). Further taking into account formulas (9) and (10) the relative carrying power of the intermediate environment  $F_n^* = F_n/F_N$ , the relative force of viscous resistance caused by existence of the intermediate environment  $F_c^* = F_c/F_N$  and the relation of increase in relative carrying power to increase in relative force of viscous resistance in comparison with values of these sizes at free swing were found  $F_n^* = F_n/F_N$   $F_c^* = F_c/F_N$

$$F_{\Delta}^* = \frac{F_n^*(S) - F_n^*(0)}{F_c^*(S) - F_c^*(0)}$$

as functions of relative sliding at the following input datas:  $R = 0,27$  m ;  $V_p = 5$  m/s ;  $h = 5 \cdot 10^{-3}$  m ;  $\Delta(z) = 10^{-3}$  m ;  $b = 5 \cdot 10^{-2}$  m ;  $F_N = 1,25 \cdot 10^4$  N ;  $\mu = 5,214$  N·s/m<sup>2</sup> . Calculations were carried out by means of a standard package of the application programs "Mathematica 7.0" for 15 points of a collocation (fig. 1). Increase in number of points of a collocation (more than 15) significantly will not influence the decision as even at nine points of a collocation [3] difference of the decision does not exceed 7%. It speaks about good convergence of ranks (7).

From fig. 2 it is visible that dependences of relative carrying power and relative force of viscous resistance increase with increase  $|S|$ . And, on an interval  $0 < |S| < 0,05$  increase of function  $F_c^* = F_c^*(S)$  reaches bigger size, than function increase  $F_n^* = F_n^*(S)$ . At the relative sliding, equal  $\pm 0,05$ , function  $F_{\Delta}^* = F_{\Delta}^*(S)$  has minima ( $F_{\Delta}^*_{min} = 0,62$  and  $F_{\Delta}^*_{min} = 0,64$  respectively). On an interval  $0,05 < |S| < 0,2$  the function graph  $F_n^*(S)$  has significantly sharper rise, than a function graph  $F_c^*(S)$ . On this interval of value of function  $F_{\Delta}^*(S)$  increase in the braking mode by 5,6 times (with 0,64 to 3,60), passing through unit at  $S = -0,085$  and in the dispersal mode - by 6,2 times (with 0,62 to 3,87), passing through unit at  $S = 0,085$ . It promotes reduction of an absolute value of coefficient of coupling  $\psi$ . Further, at  $0,2 < |S| < 1$  value of function  $F_{\Delta}^*(S)$  changes slightly and makes about 3,65 in the mode of braking and 3,9 in the dispersal mode. At  $1 < S < 2$  value of function  $F_{\Delta}^*(S)$  it is approximately equal to 3,85. Function  $F_{\Delta}^*(S)$  at  $0 < |S| < 0,1$  in the mode of dispersal accepts smaller values, than in the braking mode, and at  $0,1 < |S| < 1$  on the contrary - great values.



**Fig. 2. Dependences of relative carrying power and relative force of viscous resistance on relative sliding: 1 – relative carrying power  $F_n^*$ ; 2 – relative force of viscous resistance  $F_c^*$ ; 3 – relation of increase in relative carrying power to increase in relative force of viscous resistance  $F_{\Delta}^*$**

### Conclusions

1. On the basis of the carried-out calculations and the analysis it is established that in the presence of the intermediate environment in the modes of dispersal and braking relative sliding differently influences coefficient of coupling of wheels with rails;
2. For stabilization of coefficient of coupling  $\psi$  during dispersal and braking in the presence between a wheel and a rail of the intermediate environment it is necessary to limit absolute value of relative sliding of 8,5%.

### References

1. Сердюк, А.А. Качение колеса по рельсу с разделяющей их промежуточной средой / А.А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. – 1999. – №2. – С.77-79.
2. Таран, И.А. Влияние промежуточной среды на взаимодействие тормозной колодки и колеса / И.А. Таран // Металлургическая и горнорудная промышленность (специальный выпуск). – 1997. – № 1-2. – С. 33-35.
3. Мона, А.Г. Решение уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости для установления характеристик качения колеса по рельсу при наличии промежуточной среды / Мона А.Г. // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 88. – С. 101-107.
4. Мона, А.Г. Математическая модель качения колеса по рельсу при наличии разделяющей их промежуточной среды / А.Г. Мона, И.А. Таран // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2006. – №24. – С. 97-105.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
6. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*

УДК 614.89

*С.І. Чеберячко, д-р. тех. наук, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін канд. тех. наук  
(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)*

### ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ НА ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРЕТНИХ ФІЛЬТРІВ

***Анотація.** Визначено термін дії захисних властивостей поліпропіленових фільтрів, коефіцієнт проникнення, перепад тиску, пилоємкість фільтрів протипилового респіратору у лабораторних умовах. Отримано залежності між коефіцієнтом проникнення поліпропіленових фільтрів та величиною електростатичного заряду на їх волокнах в умовах підвищеної вологості повітря. Виявлено закономірності погіршення величини поверхневого потенціалу на фільтрувальних матеріалах під дією різної відносної вологості, а також безпечний термін зберігання фільтрів.*

***Ключові слова:** Протипиловий респіратор, перепад тиску, опір диханню, запиленість, дисперсний склад пилу.*

***Аннотация.** Определены срок действия защитных свойств полипропиленовых фильтров, коэффициент проникновения, перепад давления, пылеемкость фильтров противопылевого респиратора в лабораторных условиях. Получены зависимости между коэффициентом проникновения полипропиленовых фильтров и величиной электростатического заряда на их волокнах в условиях повышенной влажности воздуха. Установлены закономерности ухудшения величины поверхностного потенциала на фильтровальных материалах под действием различной относительной влажности, а также безопасный срок хранения фильтров.*

***Ключевые слова:** Противопылевой респиратор, перепад давления, сопротивление дыханию, загрязненность, дисперсный состав пыли.*

***Annotation.** The aim of the work is to determine the validity the protective properties of polypropylene filters. Determination of penetration, pressure drop, dust capacity filter dust mask in the laboratory carried. The resulting relationship between the coefficient penetration of polypropylene filter and the amount electrostatic*

*charge on the fibers in conditions of high humidity. Identified patterns deterioration in the value of the surface potential filter materials under different relative humidity. It established a safe shelf life filters.*

**Keywords:** dust mask, differential pressure, breathing resistance, dust, disperse composition of dust.

### Постановка проблеми

Умови праці на вугільних підприємствах здебільшого визначаються пиловим фактором, тобто залежать від вмісту пилу в повітрі робочої зони, обсягів його викидів та пиловідкладення поблизу джерел пилу. При цьому властивості пилу обумовлюють вибір відповідних заходів для боротьби з ним.

Діючими нормативними документами з охорони праці встановлюються санітарно-гігієнічні норми, а у разі неможливості їх забезпечення встановлюються безпечні рівні пилового навантаження гірників. Також для їх захисту передбачено видачу засобів індивідуального захисту органів дихання. Вибір останніх регламентований декількома стандартами [1]. Вважається, що при правильному виборі фільтрувального респіратора він надійно захищає людину від захворювання на пневмоконіози і пилові бронхіти. Однак, незважаючи на те, що використання індивідуальних засобів захисту є обов'язковим, кількість хворих на пилову етіологію з кожним роком зростає [2]. Тому дослідження ефективності використання протипилових фільтрувальних респіраторів у виробничих умовах є досить актуальними.

### Виділення невирішеної проблеми

Значної популярності для виготовлення фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання набули поліпропіленові матеріали, які характеризуються незначним опором диханню. Однак їх захисні властивості значно залежать від наявності електростатичного заряду. Проведені дослідження виявили, що при швидкостях фільтрування до 0,006 м/с, ефективність електростатичного механізму уловлювання аерозольних частинок сягає 80 % від сумарної дії інших механізмів [1]. При цьому він є нестабільним, а поведінка може бути непередбачувана, особливо під дією підвищеної вологості і температури повітря [3]. Враховуючи, що гірничі виробки вугільних шахт характеризуються несприятливими кліматичними умовами, особливо високою вологістю повітря то виникає досить актуальна задача – дослідження її впливу на захисну ефективність фільтрів з поліпропілену для визначення обмеження терміну захисної дії.

### Короткий огляд публікацій

Публікації щодо оцінки впливу вологості повітря на ефективність уловлювання аерозолію електретними фільтрами значно різняться одна від одної. У деяких роботах показано погіршення захисних властивостей, яке пов'язане зі зменшенням величин зарядів частинок і волокон, які потрапляють в такі умови [4]. В інших, навпаки, спростовують наведений висновок. Наприклад, автори роботи [5] стверджують, що вологість повітря майже не впливає на коефіцієнт проникнення аерозольних частинок діаметром до 100 нм. Експерименти проводилися при відносній вологості від 40 до 92 %. Однак існують дослідження, котрі показують, що при збільшенні вологості, уловлювання великих частинок покращується, пояснюючи цей ефект зростанням капілярних сил [6]. Інша річ електретні фільтри, які виготовлені методом електро-спінінгу, коли утворюється спеціальне покриття, більш стійке до вологи [7]. А в роботах [8, 9] була зроблена спроба розв'язати завдання зі збільшення терміну служби електрета за рахунок уведення у структуру фільтра різних композиційних домішок. Однак у наведених дослідженнях не має чіткої відповіді, чи здатні електретні фільтри забезпечити достатню захисну ефективність під час роботи в умовах підвищеної вологості, а саме під час однієї робочої зміни?

### Формулювання задачі

Дослідження взаємозв'язку між коефіцієнтом проникнення поліпропіленових фільтрів з різними хімічними домішками у їх структуру з величиною електростатичного заряду в умовах підвищеної вологості повітря для визначення часу стікання заряду.

### Матеріали і методи дослідження

Дослідження проводили з декількома зразками поліпропіленових фільтрів, які виготовлені з матеріалів у структуру яких при формуванні додавали різні хімічні домішки: технічний вуглець (ПМТВ), алмазну шихту (ПМАШ), оксид алюмінію (ПМОА). Кількість наповнювачів складала від 4 - 6 % від загальної маси. Зразки отримували методом екструзії – шляхом видавлювання розплаву полімеру крізь формуючу головку (філь'єру) потрібного профілю, де волокна витягувалися гарячим повітрям (рис. 1). Діаметр волокон склав 1 – 3 мкм, товщина фільтрувального шару – 4 мкм, поверхнева щільність знаходилась у діапазоні 40 – 45 г/см<sup>2</sup>.

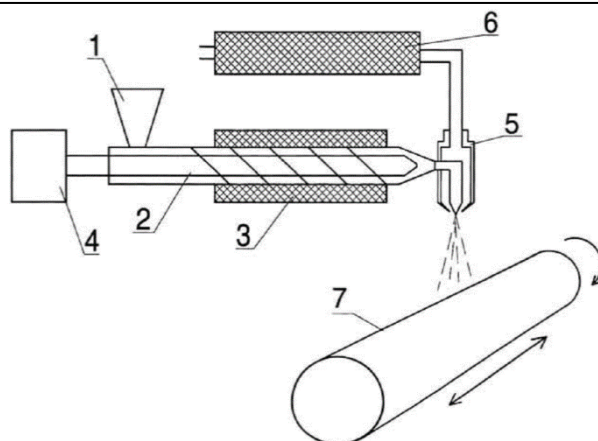


Рис. 1. Схема виготовлення поліпропіленових волокон:

1 – бункер для завантаження гранул; 2 – шнек; 3, 6 – нагрівач; 4 – електродвигун; 5 – фільт'єр; 7 – барабан

Електростатичний заряд наносили шляхом заряджання волокон у полі коронного розряду. Поляризація проходила на спеціальній установці (рис. 2), яка складається із системи коронувальних електродів 3, на які подається напруга від 10 до 50 кВ. Фільтрувальний матеріал 4 розташовується на станині 5, яка заземлена. Швидкість руху фільтрувального матеріалу може змінюватися від 0,01 до 0,1 м/с. Відстань  $a$  становить 0,5 мм, а величина  $b$  дорівнює 50 - 70 мм. Напругу на електродах можна регулювати за допомогою блока керування 2. Її величину збільшують до появи коронувального розряду. Відстань між електродами становила 20 мм.

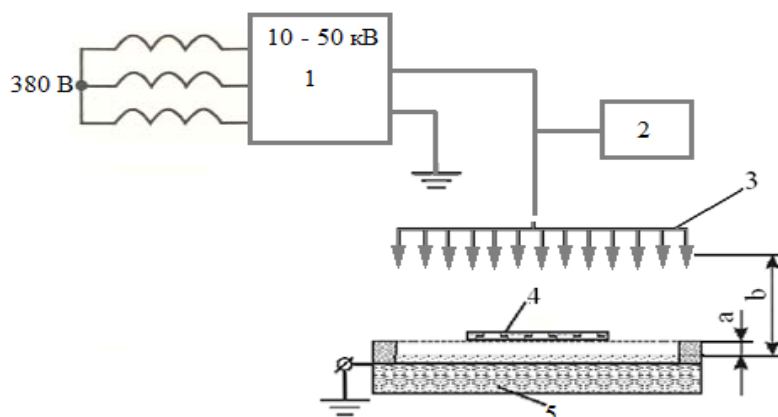


Рис. 2. Схема установки для заряджання фільтруючого матеріалу:

1 – трансформатор; 2 – блок керування; 3 – електроди; 4 – фільтрувальний матеріал; 5 – станина

Величину електростатичного заряду визначали відповідно до методики, описаної в ГОСТ 25209-82 «Пластмассы и пленки полимерные. Методы определения поверхностных зарядов электретов». Сутність методики полягає у визначенні напруги, яка подається на вимірювальний електрод для компенсації електретного поля, що ініціюється електретом.

Установка для вимірювання потенціалу поверхні електрета наведена на рис. 3. Вона складається із двох блоків (вимірювального та індикації). Перший дозволяє виміряти ефективну напругу на поверхні електрета до 1000 В. Принцип дії оснований на використанні в як нуль-індикатору електронно-променевого вольтметра з відображенням компенсаційної напруги на цифровому вольтметрі.

На зразку фільтрувального матеріалу (рис. 4) розміщували вимірювальний електрод у точках на відстані одна від одної 20 мм. Поверхневу щільність заряду на зразку фільтрувального матеріалу оцінювали за формулою

$$\sigma_{\text{еф}} = \varepsilon \varepsilon_2 V_e / S, \text{ Кл/м}^2, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність повітря;  $\varepsilon_2$  – діелектрична проникність матеріалу електрета;  $V_e$  – потенціал поверхні електрета, В;  $S$  – площа вимірювального електрода, м<sup>2</sup>.

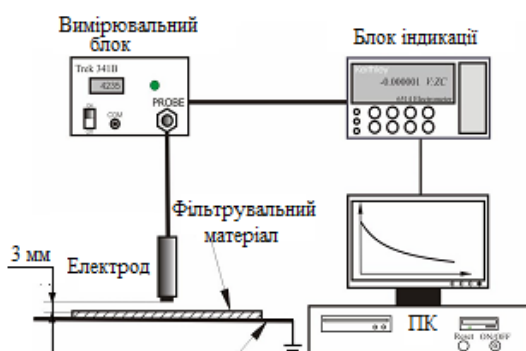


Рис. 3. Схема установки з вимірювання електростатичного потенціалу на поверхні фільтрувального матеріалу

Для оцінки впливу вологості повітря на стікання електростатичного заряду скористалися методикою описаною у ДСТУ EN 149 (п. 8.3 вплив вологи). Дослідження проводили на спеціальному стенді, який імітує процес дихання людини (рис. 5). Він складається із зволожувача 1, блока індикації датчика вологості 2, фільтра 3, камери з оргскла 4, датчика вологості повітря 5, дихальної машини 6. При дослідженнях встановлювали такі режими: перший – температура повітря 23 °С і вологість 60 %; другий – 26 °С і 95 % і третій – 37 °С, 95 % відповідно.

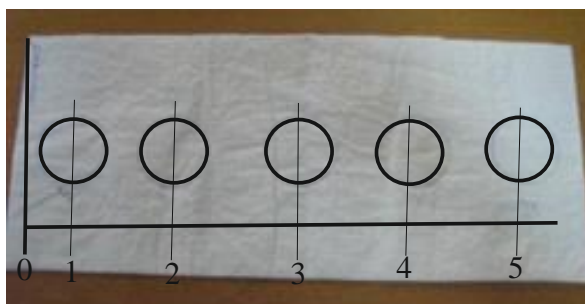


Рис. 4. Точки розташування електрода для заміру поверхневого потенціалу на поверхні фільтрувального матеріалу

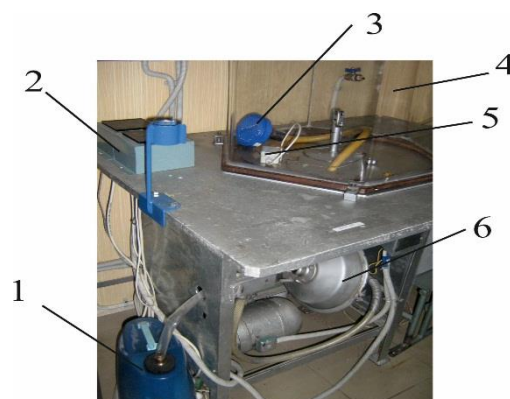


Рис. 5. Установка для моделювання впливу вологості повітря на фільтри

Дихальна машина була відрегульована на 25 циклів за хвилину з обсягом 2 дм<sup>3</sup> за хід. Час експерименту відповідав тривалості робочої зміни на вугільних підприємствах. Із зразків фільтрувальних матеріалів виготовляли по п'ять фільтрів до респіратора РПА, які потім розміщували по черзі в камері. Після проведеної процедури фільтри розгортали і визначали залишок електростатичного заряду.

Коефіцієнт проникнення поліпропіленових фільтрів після впливу вологи визначали за тест-аерозолем з парафінової оливи із середнім діаметром частинок 0,4 мкм при витраті повітря 95 л/хв. Методика досить детально описана у ДСТУ EN 149 і публікації [10].

### Результати дослідження

У результаті проведених досліджень було встановлено максимальну величину електростатичного заряду кожного із зразків при стандартних умовах (табл. 1). З отриманих даних можна зробити висновок, що хімічні наповнювачі можуть значно збільшити величину поляризованого заряду на поверхні фільтра. Це пояснюється тим, що у їх структурі формуються спеціальні комірки, де накопичується заряд [11]. Крім того, хімічні домішки збільшують ступінь кристалічності фільтрувальних матеріалів, що дозволяє утримувати заряд здебільшого на міжфазних границях полімеру, тобто так званий ефект Максвелла – Вагнера. Найкраще він проявляється для композицій з різною діелектричною проникністю [12]. Так, композиція з алмазною шихтою має майже втричі більший потенціал відносно до звичайного зразка з поліпропілену.

Значення максимального поверхневого електростатичного заряду на зразках фільтрувальних матеріалів

Зразки	Значення максимального поверхневого потенціалу матеріалу, В	Значення максимального поверхневого електростатичного заряду, нК/см <sup>2</sup>
ПМ	300	3,6
ПМТВ	450	4,2
ПМАШ	750	16,5
ПМОА	610	13,4

Утім величина електростатичного заряду на поверхні поліпропіленових волокон є нестабільною і значно відрізняється на різних ділянках. Цей факт є відомим [11], але у запропонованих матеріалів з домішками до процесу також приєднувались коливання розподілу вкраплень наповнювача за товщиною зразків, що вносить певну нестабільність у розподіл заряду (рис. 6).

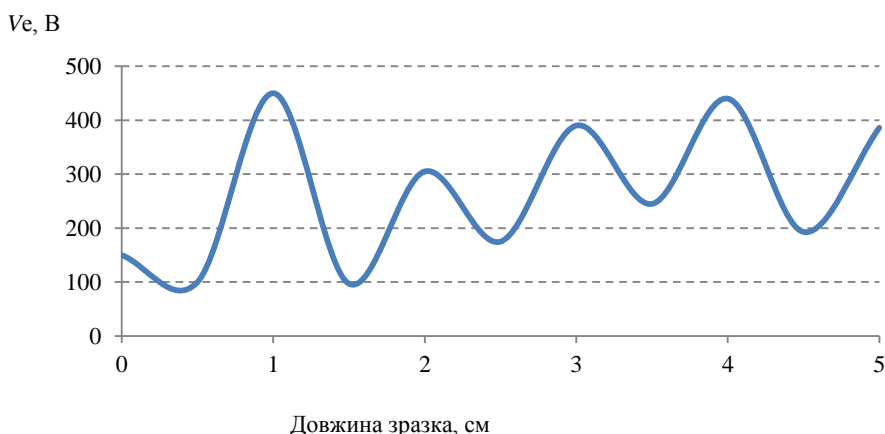


Рис. 6. Крива розподілу поверхневого потенціалу за довжиною фільтрувального зразка з чистого поліпропілену

Величина поверхневого заряду електрету є одною з основних характеристик, тому дослідження стабільності цього показника являє собою принципову задачу. Стікання заряду з часом залежить від низки як внутрішніх, так і зовнішніх релакційних процесів. Основними, з яких рахуються три – релаксація інжекційних зарядів дипольної поляризації, релаксація зарядів, які сконцентровані на границі поділу фаз (поляризація Максвелла-Венгера) та інжектований заряд, який концентрується при поверхневому шарі, заповнюючи спеціальні комірки. Однак осатаній є нестабільним оскільки з часом він вивільнюється під дією різних зовнішніх чинників. У середньому цей процес може тривати від декількох годин до декількох років. Результати проведених досліджень показують, що значне зменшення заряду поліпропіленових матеріалів у звичайних умовах (при температурі 20 – 22 °С, вологості 50 – 60 %) відбувається протягом одного – двох місяців (рис. 7), а потім значний час він тримається на одному рівні.

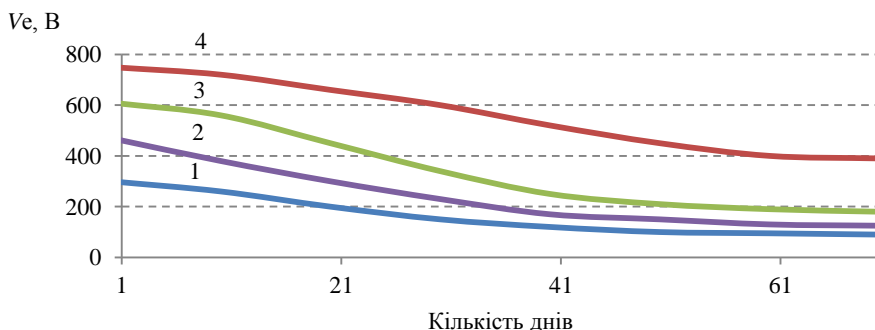


Рис. 7. Криві стікання електростатичного заряду при вологості повітря 60 % і температурі 23 °С на поліпропіленових фільтрах ПМ (1); ПМТВ (2); ПМОА (3); ПМАШ (4)

Децю інакше відбувається стікання поверхневого заряду під дією підвищених температури і вологості повітря (рис. 8, 9). Дія цих зовнішніх чинників сприяє утворенню всередині електрету каналів, що

суттєво прискорюють процес стікання зарядів. Ці канали також шунтують поверхню зразка, що призводить до значної неоднорідності поверхневої електропровідності [13].

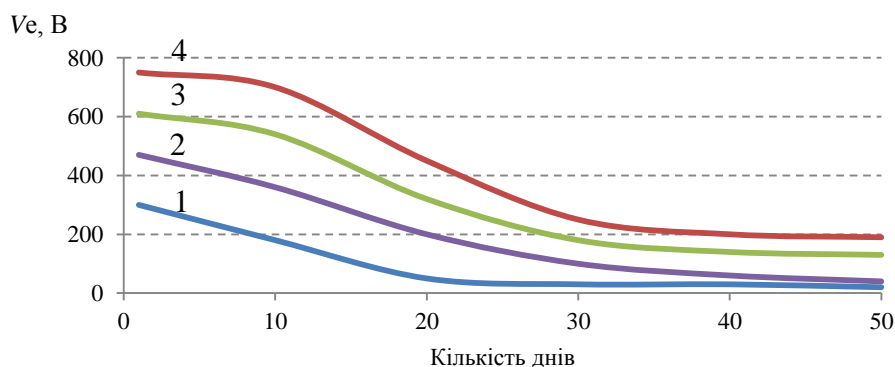


Рис. 8. Криві стікання електростатичного заряду при вологості повітря 95 % і температурі 26 °С на фільтрах ПМ (1); ПМТВ (2); ПМОА (3); ПМАШ (4)

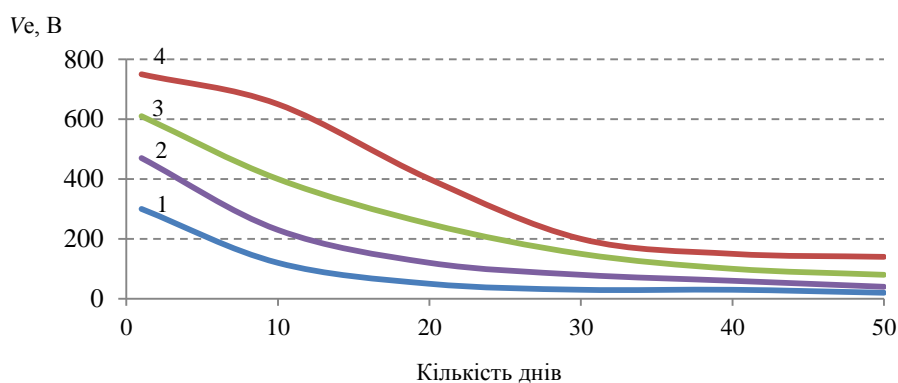


Рис. 9. Криві стікання електростатичного заряду при вологості повітря 95 % і температурі 37 °С на фільтрах ПМ (1); ПМТВ (2); ПМОА (3); ПМАШ (4)

Аналіз отриманих результатів виявив, що у композиційних зразків процес релаксації відбувається повільніше. Перш за все за рахунок того, що комірки, в яких розміщуються заряди, розташовані за всім об'ємом фільтрувального шару, а не тільки на поверхні, що сприяє покращенню дії інжекційного механізму, який певний час підтримує деякий рівень заряду у суміжних більш слабких зародків. Крім того, у структурі таких матеріалів утворюються у міжволоконному просторі так звані кристаліти, які виявляються дуже ефективними бар'єрами, що стримують стікання заряду.

Термін захисної дії респіраторів з такими фільтрами можна визначити виходячи із залежності коефіцієнта проникнення вугільного пилу із середнім діаметром 2 мкм від величини поверхневого потенціалу (рис. 10). Так, для якісних фільтрів відповідно до стандарту ДСТУ EN 143 значення коефіцієнта проникнення має складати 0,05 %, що досягається при величині поверхневого потенціалу, яка не менше 250 В.

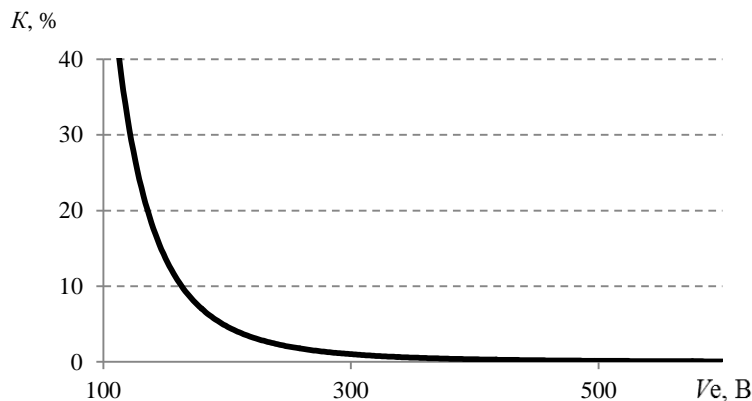


Рис. 10. Крива залежності коефіцієнта проникнення за аерозолем вугільного пилу поліпропіленового фільтра від величини поверхневого потенціалу на волокнах



Результати експериментів засвідчили, що після шестигодинного впливу вологості в діапазоні 60 – 90 % у всіх зразків залишається достатня величина поверхневого потенціалу для забезпечення високих захисних властивостей. Тоді як при десятиденному зберіганні – тільки у двох матеріалів зберігся необхідний рівень заряду (табл. 2). У той самий час в останніх зафіксовано значно повільніша втрата поверхневого потенціалу.

Таблиця 2

**Зміна величини поверхневого електростатичного заряду на зразках фільтрувальних матеріалів під дією відносної вологості протягом шести годин**

Вологість повітря, %	Зразки поліпропіленових матеріалів із визначеним поверхневим потенціалом на поверхні, В							
	Безпосередньо після заряджання				Через 10 днів			
	ПМ	ПМТВ	ПМАШ	ПМОА	ПМ	ПМТВ	ПМАШ	ПМОА
60	300	450	750	610	220	380	690	540
75	242	433	745	591	118	188	446	295
85	231	418	736	563	115	179	440	284
95	204	409	722	539	95	173	432	274

Як бачимо із аналізу перевірені зразки відразу після їх виготовлення мають досить високий електростатичний заряд. Однак все ж таки існує певний ризик, що фільтри можуть його втрати за проміжок часу, який необхідний для доставки їх на виробництво. Тому, враховуючи і результати проведених досліджень був встановлений безпечний термін зберігання високих захисних властивостей фільтрувальних елементів (табл. 3).

Таблиця 3

**Термін безпечної зберігання захисних властивостей поліпропіленових фільтрів при різній вологості повітря**

Матеріал фільтра	Термін безпечної експлуатації фільтрів (днів) при вологості, %,			
	60	75	85	95
ПМ	20	18	12	6
ПМП	35	33	27	20
ПМАШ	50	46	40	30
ПМОА	90	83	74	55

**Висновки**

1. Значення поверхневого потенціалу на електретних фільтрах при однакових умовах нанесення заряду для матеріалів з різними домішками відрізняються у два – три рази.
2. Зменшення поверхневого потенціалу у зразках з композиційних матеріалів при різній вологості повітря за час однієї робочої зміни у шість годин за рахунок розміщення зарядів за всім об'ємом фільтрувального шару, а також збільшення ступеня кристалічності таких матеріалів.
3. При значення поверхневого потенціалу, менших за 250 В, коефіцієнт проникнення фільтра за тест-аерозоллю парафінова олива значно зростає, що говорить про погіршення захисних властивостей.
4. Композиційні зразки з домішками оксиду алюмінію й алмазної шихти зберігають достатній поверхневий потенціал після впливу відносної вологості повітря протягом шести годин і тим самим забезпечують достатній ступінь захисту в умовах гірничих виробок.
5. Для отримання достовірних висновків про ефективність використання як фільтрувальний матеріал для виготовлення фільтрів поліпропілену з різними домішками необхідно провести комплексне дослідження з урахуванням кліматичних умов, режиму експлуатації та запиленості повітря.

**Список використаних джерел**

1. Голінко В.І. Застосування респіраторів на вугільних і гірничорудних підприємствах: Монографія. / В.І. Голінко, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, / – Д.: НГУ, 2008 – 99 с.
2. Кравцов А. Г., Brunig Н. Электретный эффект в волокнах полипропилена, обработанных коронным разрядом // ВМС. Сер. Б. 2000. Т. 42. С. 1074–1077.
3. Kuzmin Yu.I., Pshchelko N.S., Sokolova I.M., Zakrzhevskiy V.I. The percolation behaviour of electret at presence of water condensation. In: Proc. of the 8th Int. Symp. on Electrets, Ed. by J. Lewiner, D. Morisseau, C. Alqui'e, ESPCI, IEEE. 1994, Paris, France. P. 124-129.
4. ROMAY, F.J. Experimental study of electrostatic capture mechanisms in commercial electret filters, Aerosol Science and Technology, Vol. 28 (1998) Nr 3, pp. 224-234.
5. ACKLEY, M.W., Degradation of electrostatic filters at elevated temperature and humidity, Filtration and Separation, Vol. 22 (1992) Nr 4, pp. 239-242.
6. MOYER, E. S. & STEVENS, G. A., Worst Case aerosol testing parameters: II. Efficiency dependence of commercial respirator filters on humidity pretreatment. American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 50 (1989), pp. 265-270.

7. Chen C.C., M. Lehtimaki and K. Willeke: Aerosol penetration through filtering facepieces and cartridges. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 53: 566–574 (1992)
8. Schmidt, F.; Breidenbach, A.; Däuber, E.; Ergebnisse der RLT-Filterprüfung nach EN 779 im Vergleich zu Messungen an Filtern aus dem Betrieb; *Chem. Ing. Techn.*; 84, No. 6, 808-812 (2012)
9. Lathrache R. And H.J. Fissan: Enhancement of particle deposition in filters due to electrostatic effects. *Proc. Filtration Soc.* 1987. Pp. 418–422.
10. Дослідження захисної ефективності вітчизняних одноразових протипилових респіраторів за європейськими стандартами / В.І. Голінько, М.М. Наумов, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук // *Металургійна та гірничорудна промисл-сть.* – 2011. – № 5. – С. 118 – 121.
11. Абдуллаев Э.Д., Джуварлы Ч.М., Курбанов К.Б., Мехтизаде Р.Н. Накопление заряда в композиционных структурах с пористым неорганическим наполнителем. Сб. Ст. По электрофизике и электроэнергетике. Под ред. Акад. Ч.М. Джуварлы. Баку, «ЭЛМ», 1994, с. 26-29
12. Яблоков М.Ю. Электретные свойства нанокмпозиционных материалов на основе полипропилена / М.Ю. Яблоков, А.С. Кечекьян, А.Б. Гильбман // тезисы док. Международной научно-технической конференции [Intermatic-2011] (Москва, 20-23 декабря, 2011 г.) / – М.: Издательство «МИРЭА», 2011. – С. 78 – 80.
13. Кузьмин, Ю.И. Перколяционное шунтирование электризованной поверхности / Ю.И. Кузьмин // *Письма в ЖТФ.* 1999. - Т.25. - Вып.21. - С.78-85.
14. Шуваев, В.П. О механизме релаксации электретного заряда в полимерных пленках при повышенной влажности / В.П. Шуваев, Б.И. Турышев, О.С. Романовская, А.М. Лобанов, В.П. Воробьев, Г.Д. Мясников, О.Д. Кузнецова // *Высокомолек. соед. – Сер. А.* – 1977. – Т. 19. – № 3. – С. 603-606.
15. Yovcheva T. A., Mekishev G. A., Marinov A. T. A percolation theory analysis of surface potential decay related to corona charged polypropylene (PP) electrets // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2004. V. 16. P. 455–464.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Голінько В.І.*

УДК 622.673+539.4

**І.В. Бельмас, д-р техн. наук**

*(Україна, Дніпродзержинськ, Дніпродзержинський державний технічний університет)*

**Д.Л. Колосов, д-р техн. наук**

*(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)*

### НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БАРАБАНА ПРИ БОБІННІЙ СХЕМІ НАМОТУВАННЯ ПЛОСКОГО КАНАТА

**Анотація.** Отримані аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану барабана підйомної машини з бобінною схемою намотування плоского каната, що відповідають точному рішенню для окремого випадку навантаження барабана рівномірно розподіленою силою. Встановлені залежності можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні барабанів підйомних машин з бобінною схемою намотування плоского каната.

**Ключові слова:** підйомна машина, плоский канат, бобінна схема намотування, барабан, напружено-деформований стан.

**Анотация.** Получены аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния барабана подъемной машины с бобинной схемой намотки плоского каната, соответствующие точному решению для частного случая нагружения барабана равномерно распределенной силой. Установленные зависимости могут быть использованы в инженерной практике при проектировании барабанов подъемных машин с бобинной схемой намотки плоского каната.

**Ключевые слова:** подъемная машина, плоский канат, бобинная схема намотки, барабан, напряженно-деформированное состояние.

**Annotation.** The analytical dependences for determining the stress-strain state of a winder drum with a scheme of a bobbin winding by a flat rope corresponding to exact solution for the particular case of a loading of a drum by evenly distributed forces, are obtained. Established relationships can be used in engineering practice in the design of the winders with bobbin winding scheme of a flat rope.

**Keywords:** winder, flat rope, scheme of a bobbin winding, drum, and stress-strain state.

**Вступ.** Умови видобутку корисних копалин на підземних гірничих підприємствах постійно ускладнюються. Їх видобуток здійснюється з більших глибин, зростають потреби в обсягах добутих корисних копалин, вимоги до енергозбереження, металомісткості устаткування, включаючи й обладнання для шахтного підйому.

**Стан питання та постановка задачі дослідження.** Одним з напрямків зменшення металомісткості підйомних установок є впровадження машин з бобінною схемою намотування плоского каната на барабан [1]. За такої схеми тиск каната на барабан залежить лише від тиску трьох ближніх до барабана шарів [2], тоді як, у разі застосування традиційних схеми намотування та конструкції каната, такий тиск зростає з кожним новим витком. Зменшення навантажень дозволяє зменшувати металомісткість барабана підйомної машини. Впровадження багатошарової схеми намотування плоского каната в практику гірничого машинобудування вимагає розробки методики розрахунку напруженого стану барабана.

Барабан підйомної машини складається з трьох основних елементів – циліндричної обичайки та двох лобовин. В дисертаційній роботі [3] показано, що напружений стан барабана можна розглядати, як комбінацію напружених станів вказаних елементів. В ній розроблено алгоритми розрахунку напружено-деформованого стану усіх складових барабана підйомної машини, тяговим органом якої є круглий канат. Таким чином отримані результати дозволяють виконувати розрахунки на міцність лобовин барабана підйомної машини з плоским тяговим органом, але не дозволяють визначати напружений стан барабана, на який в декілька шарів намотаний плоский канат. Відповідно, встановлення закономірностей напружено-деформованого стану барабана підйомної машини з бобінною схемою намотування плоского каната для обґрунтування технічних рішень щодо створення підйомних машин з плоским тяговим органом, є **актуальною науково-технічною задачею**.

**Основний зміст роботи.** Розглянемо обичайку барабана підйомної машини, як круговий полий циліндр довжиною  $2h$ , виконаний з пружного матеріалу з лінійними механічними характеристиками. Внутрішній та зовнішній радіуси становлять  $a$  та  $b$ , відповідно. Вісь циліндру прийемо за вісь  $z$ . Початок осі розташуємо в середньому перерізі барабана. Радіус-вектор позначимо  $r$ .

Виконані раніше дослідження [4-6] показали, що при намотуванні плоского каната на бобину, сили тиску практично рівномірно розподілені по ширині барабана, коли поздовжня вісь каната нормальна до твірної та дотична до спрямної зовнішньої поверхні барабана. В умовах використання плоского каната для підводного видобутку корисних копалин, внаслідок можливих коливань підйомної машини разом з судном, можливий поворот осі набігання каната відносно твірної барабана. В такому випадку тиск канату на барабан змінюється лінійно по його ширині. При застосуванні барабана біконічної форми сили тиску також будуть змінюватися за лінійним законом, але симетрично середини барабана. Надання канату трубчастої форми або застосування барабана з криволінійною твірною також призводить до порушення рівномірності розподілу тиску. Тиск каната на барабан за такої умови, в першому наближенні, можна вважати розподіленим за параболічним законом.

Прийmemo, що плоский канат тисне на барабан симетрично відносно середини останнього. Інтенсивність тиску  $p$ . Сформулюємо граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{по поверхні } r = a & \quad R_r = -p, \quad Z_r = 0; \\ \text{по поверхні } r = b & \quad R_r = 0, \quad Z_r = 0; \\ \text{по поверхні } z = h & \quad Z_r = Z_z = 0; \\ \text{по поверхні } z = 0 & \quad u_z = 0. \end{aligned} \tag{1}$$

Скористаємося функцією напружень в наступній формі

$$\phi(r, z) = \sum_{k=0}^4 f_k(r) z^k, \tag{2}$$

де

$$\begin{aligned} f_0 &= C_0 r^2 + D_0 r^2 \ln(r) + \frac{9}{4} B_4 + \frac{1}{2} D_2 - \frac{3}{2} A_4 - C_2 r^4 - \frac{3B_4 + 2D_2}{8} r^6; \\ f_1 &= B_1 \ln(r) + C_1 r^2 + D_1 r \ln(r) - \frac{3}{4} C_3 r^4; \\ f_2 &= B_2 \ln(r) + C_2 r^2 + D_2 r^2 \ln(r) - \frac{3}{2} C_4 r^4; \\ f_3 &= A_3 + B_3 \ln(r) + C_3 r^2; \\ f_4 &= A_4 + B_4 \ln(r) + C_4 r^2, \end{aligned}$$

де  $B_1, C_1, D_1, B_2, C_2, D_2, A_3, B_3, C_3, A_4, B_4, C_4$  – невідомі сталі.

Прийнята функція задовольняє умові

$$\Delta^2 \Delta^2 \phi = \left( \frac{\partial^4}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} + 2 \frac{\partial^4}{\partial r^2 \partial z^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3}{\partial r \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial z^4} \right) \phi = 0,$$

чим забезпечується відповідність функції умовам рівноваги та нерозривності деформацій. При цьому деформації та напруження визначаються наступними залежностями

$$u_r = -\frac{1}{2G} \frac{\partial^2}{\partial r \partial z}; \quad u_z = \frac{1}{2G} \left[ 2(1-\mu) \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \phi + \delta; \quad R_r = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi; \quad B_\beta = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \Delta^2 - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \phi;$$

$$Z_z = \frac{\partial}{\partial z} \left( (2-\mu) \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi; \quad R_z = Z_r = \frac{\partial}{\partial r} \left( (1-\mu) \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi; \quad u_\beta = 0; \quad R_\beta = B_r = Z_\beta = 0.$$

Прийнята одна функція (2) не дозволяє забезпечити повне виконання граничних умов (1) по усім поверхням. Замінімо граничні умови (1) менш жорсткими – такими, що в цілому по поверхні (інтегрально), їм відповідають. Прийmemo граничні умови (1) в наступній формі:

$$\begin{aligned} \text{по поверхні } r = a \quad R_r = -p, \quad \int_0^h Z_r dz = 0; \\ \text{по поверхні } r = b \quad R_r = 0, \quad \int_0^h Z_r dz = 0; \\ \text{по поверхні } z = h \quad \int_b^a Z_r dr = \int_b^a Z_z dr = 0; \\ \text{по поверхні } z = 0 \quad u_{z\left(r=\frac{a+b}{2}\right)} = 0, \quad \int_b^a Z_r dr, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $p = p_1 + p_2 z + p_3 z^2 + p_4 z^3$ .

З урахуванням граничних умов, розподілів переміщень та напружень, були знайдені невідомі сталі. Значення останніх дозволило визначити напружено-деформований стан циліндричного тіла барабана підйомної машини з бобиною схемою намотування каната. При цьому, для випадку прикладення рівномірно розподіленого навантаження, невідомі сталі  $D_1 = B_2 = C_2 = D_2 = B_3 = C_3 = A_4 = B_4 = C_4 = 0$ , відповідно, функція напружень (2) має вигляд

$$\phi(r, z) = \left( B_1 \ln(r) + C_1 r^2 \right) z + A_3 z^3 + C_0.$$

Отримана функція забезпечує виконання граничних умов (1). Вказане може розглядатися як підтвердження достовірності отриманих результатів, оскільки рішення для окремого випадку є достовірними.

На рис. 1 наведені поверхні, що демонструють вказаний стан для чотирьох окремих випадків: на поверхню барабана зовнішнім та внутрішнім радіусами 0,8 м та 0,75 м довжиною 0,3 м прикладена рівномірно розподілена сила та сила, що вздовж осі барабана зростає лінійно, за параболічною залежністю та за кривою третього порядку. Для зручності порівняння напружених станів, максимальні значення розподілених сил прийняті рівними одиниці. Графіки побудовані у відносних координатах  $z_0 = z \cdot \frac{h}{10}$ ,

$r_0 = r \cdot \frac{r_a - r_b}{5}$ . На рисунку показані поверхні, що графічно описують розподіл нормальних радіальних напружень.

З наведених графічних залежностей можна зробити висновок, що закон зміни інтенсивності вздовж осі барабана впливає на закономірність розподілу нормальних напружень по товщині обичайки барабана. Виконаний аналіз показує також, що навантаження, інтенсивності яких залежні від степені координати  $z$ , зумовлюють появу нормальних осьових напружень  $Z_z$ , практично лінійно розподілених вздовж осі барабана. При цьому такі напруження для випадку рівномірного розподілу навантажень близькі до нуля. Практично лінійно по товщині та по довжині обичайки розподілені і приведені напруження та радіальні переміщення.

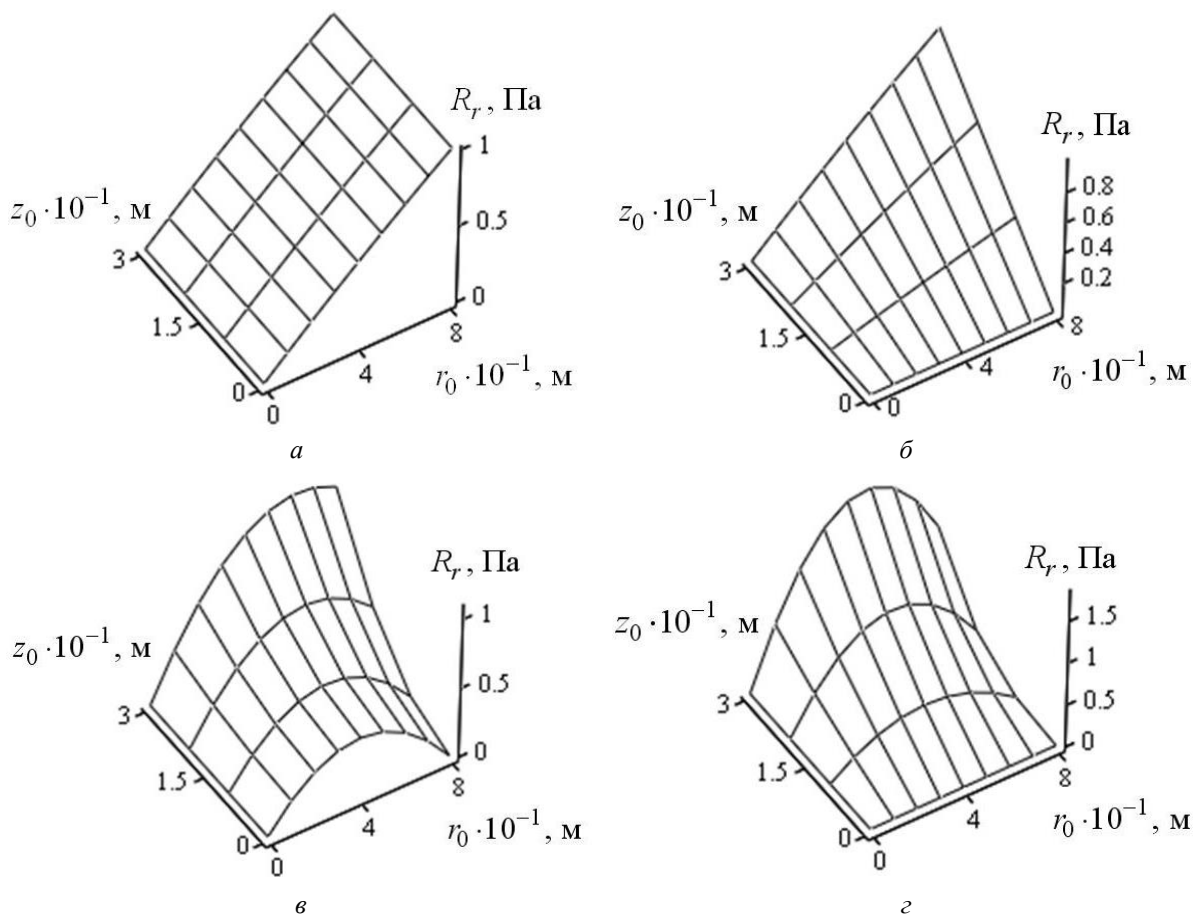


Рис. 1. Розподіл нормальних напружень  $R_r$  вздовж осі барабана  $z_0$  та в напрямку радіуса-вектора  $r_0$  у разі прикладення до поверхні барабана розподіленого тиску інтенсивності:

а)  $p = p_1 = 1, \text{ Па}$  ; б)  $p = p_2 = \frac{z}{h}, \text{ Па}$  ; в)  $p = p_3 = \left(\frac{z}{h}\right)^2, \text{ Па}$  ; г)  $p = p_4 = \left(\frac{z}{h}\right)^3, \text{ Па}$

**Висновки.** Отримане аналітичне рішення та встановлені математичні залежності для визначення напружено-деформованого стану барабана підйомної машини з бобінною схемою намотування плоского каната можна вважати достовірними, оскільки вони забезпечують отримання результатів, які відповідають точному рішенню для окремого випадку навантаження барабана рівномірно розподіленою силою, що дозволяє рекомендувати їх для застосування при проектуванні барабанів підйомних машин з бобінною схемою намотування плоского каната.

#### Список літератури

1. Заболотный К.С. Исследование особенностей механики и выбор рациональных параметров бобинных подъемных машин с резинотросовым канатом / К.С. Заболотный. – Дис... канд. техн. наук: 05.05.06. – Д., 1979. – 248 с.
2. Панченко Е. В. Определение расчетных нагрузок в витках многослойной намотки резинотросового каната / Е.В. Панченко. – Дис...канд. техн. наук: 05.02.09. – Д., 2007. – 206 с.
3. Рутковский М.О. Обґрунтування та розробка методу визначення розрахункових навантажень барабану шахтної піднімальної машини / М.О. Рутковский. – Дис... канд. техн. наук: 05.05.06. – Д., 2013. – 253 с.
4. Колосов Д.Л. Особливості навантаження плоского тягового органу в механізмі з бобінним виконавчим органом / О.І. Білоус, Д.Л. Колосов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 5. – С. 119-121.
5. Блохин С.Е. Напряженно-деформированное состояние плоского резинотросового тягового органа на барабане / С.Е. Блохин, Д.Л. Колосов, А.Л. Колосов // *Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. – 2009. – № 30. – С. 88-91.
6. Колосов Д.Л. Визначення впливу змінної ширини гумотросового каната на розподіл напружень в бобіні, утвореної його багат шаровим намотуванням / Д.Л. Колосов // *Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Зб. наук. праць ПАТ НДІГМ ім. М.М. Федорова*. – 2010-2011. – Вип. 104-105. – С. 232-239.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.*

*А.В. Бубликов, Р.А. Мазур, канд-ти техн. наук, П.Ю. Огеенко  
(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ “Национальный горный университет”)*

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАЗРУШАЕМОГО МАТЕРИАЛА РЕЗЦАМИ ШНЕКА ДОБЫЧНОГО КОМБАЙНА НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА РЕЗАНИЯ

*Анотація.* Мета досліджень – визначення інформативної ознаки для розпізнавання типу матеріалу, що руйнується різцями шнека видобувного комбайна, на основі статистичного аналізу потужності електродвигуна приводу різання. Проведенні дослідження засвідчили, що максимальна амплітуда періодичної складової потужності електродвигуна приводу різання залежить від опірності матеріалу різанню, але водночас є випадковою величиною. Отже, ця статистична оцінка потужності може бути прийнята за одну з інформативних ознак типу матеріалу, що руйнується, за умови мінімізації впливу її випадкової складової. Отримані результати будуть використані для створення системи підтримки прийняття рішень оператором видобувного комбайна.

**Ключові слова:** видобувний комбайн, різання вугілля і породи, інформативна ознака.

*Аннотация.* Цель исследования – определение информативного признака для распознавания типа разрушаемого материала резцами шнека добычного комбайна на основе статистического анализа мощности электродвигателя привода резания. Проведенные исследования показали, что максимальная амплитуда периодической составляющей мощности электродвигателя привода резания зависит от сопротивляемости материала резанию, однако при этом является случайной величиной. Следовательно, данная статистическая оценка мощности может быть принята за один из информативных признаков типа разрушаемого материала при условии минимизации влияния ее случайной составляющей. Полученные результаты будут использованы для создания системы поддержки принятия решений оператором добычного комбайна.

**Ключові слова:** видобувних комбайн, різання вугілля і породи, інформативна ознака

*Annotation.* The purpose of the article is the determination of an informative criterion for the recognizing of the type of material, which is destroyed by the cutters of the shearer, on the basis of statistical analysis of the power of drive motor of cutting. The investigations showed, that maximal amplitude of the periodical component of power of drive motor of cutting depends from resistance of material to cutting, but at the same time it is a random value. So, this statistical estimation of power can to be by one of the informative criterions of the type of material, which is destroyed by the cutters, on condition of minimizing of influence of its random component. The results of investigations will are used for creation of decision support system for operators of shearers.

**Keywords:** mining combine, cutting coal and rock, informative sign

#### Введение

Зольность угля является одним из основных параметров данного сырья, который влияет на его энергетические свойства и определяет себестоимость на рынке. Особенно этот параметр актуален для тонких пластов, которых в Украине более 90 %, поскольку для тонких пластов намного чаще имеет место присечка породы из-за того, что выемка постоянно ведется по границе «порода-уголь». Для Украины, где управление по высоте исполнительным органом в сложных горно-геологических условиях осуществляет оператор, показатель зольности угля очень высок и может достигать 40 %. Поэтому поиск способов автоматизации процесса регулирования исполнительного органа добычного комбайна по границе «порода-уголь» является актуальным. Автоматизация данного процесса невозможна без разработки эффективных способов отслеживания границы «порода-уголь».

В 70–80-ых годах прошлого столетия были предложены разные способы отслеживания границы «порода-уголь»: наблюдение за старой машинной дорогой, сохранение в памяти информации о гипсометрии пласта в функции перемещения комбайна и с помощью датчиков открытой или скрытой границы «порода-уголь». Первые два способа не оправдали себя, поскольку мощность пласта меняется не только вдоль забоя, но и в направлении продвижения лавы вглубь пласта. Третий способ оказался наиболее перспективным. Некоторые датчики границы «порода-уголь» находились на стадии доводки до серийного производства («Рубин», «Квант»), но широкого применения на шахтах так и не нашли [1].

Отслеживание границы «порода-уголь» с помощью двухпозиционных, конструктивно простых датчиков, которые фиксируют различие между углем и породой по отдельному физическому свойству, не дало положительного результата, поскольку свойства угля и пород меняются случайным образом и в широких пределах как в пространстве (по длине пласта и в его поперечном срезе из-за отжима), так и во

времени под влиянием влажности и технологии выемки пласта. Поэтому невозможно настроить датчик на фиксированное отличие физических свойств угля и породы.

### Постановка задачи

В статье поставлена задача определения информативного признака для отслеживания границы «порода-уголь» на основе анализа физических процессов, которые протекают в системе «Массив – Исполнительный орган – Электродвигатель привода резания» при резании угля и породы резами шнека, посредством статистической обработки энергетических информационных сигналов комбайна.

В связи с этим объектом исследования является процесс разрушения угля и породы резами шнекового исполнительного органа добычного комбайна.

Предметом исследования являются методы статистического анализа мощности электродвигателя привода резания добычного комбайна с целью идентификации типа разрушаемого материала на основе его сопротивляемости резанию.

### Решение задачи

Для получения выборки мощности электродвигателя привода резания (ЭДПР) комбайна с целью обоснования методов ее статистического анализа разработана имитационная модель «Массив – Исполнительный орган – ЭДПР» [2]. Входными величинами модели являются горно-геологические параметры пласта С<sub>5</sub> шахты «Павлоградская» и конструктивные параметры добычного комбайна УКД300, выходной – активная мощность ЭДПР комбайна. Выборка мощности ЭДПР получена для средней скорости подачи комбайна 4 м/мин и средней скорости вращения шнека 78 об/мин.

Периодические колебания момента сопротивления на шнеке вызваны неравномерностью расположения резцов на шнеке, из-за чего средние нагрузки меняются в процессе вращения исполнительного органа даже при постоянстве сопротивляемости угля резанию и скорости подачи. Результаты имитационного моделирования процесса разрушения угля шнеком показали, что для рассматриваемого режима работы комбайна периодическая (конструктивная) составляющая момента сопротивления на исполнительном органе при средней сопротивляемости угля резанию 200 Н/мм изменяется по закону, близкому к синусоидальному, в пределах от 6000 до 7600 Н·м и с периодом 0,38 с (рис. 1). Данный период соответствует полупериоду вращения исполнительного органа и угловой частоте 16,5 рад/с.

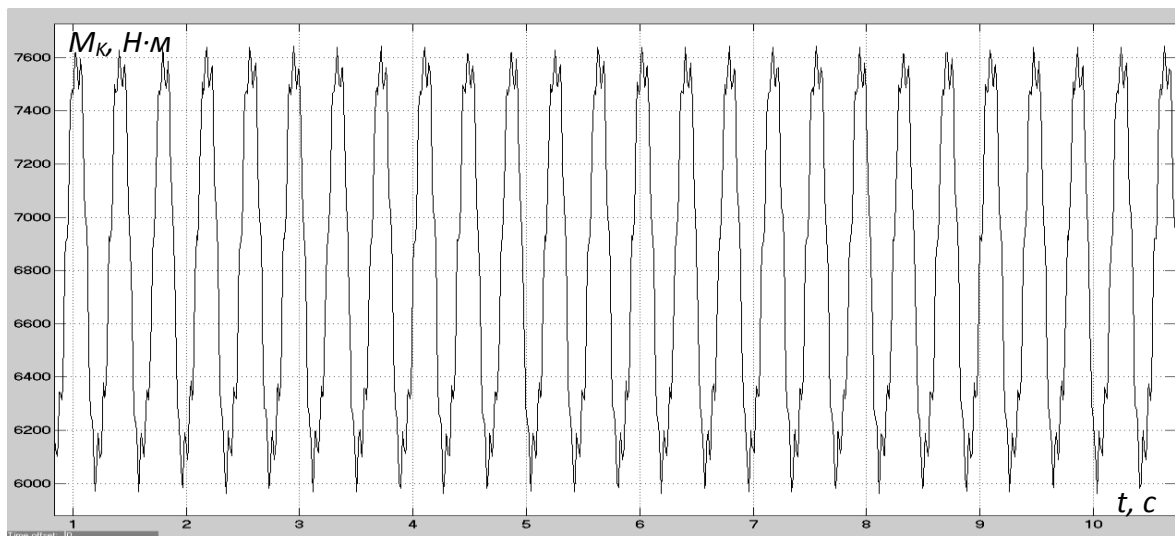


Рис. 1. Динамика конструктивной составляющей момента сопротивления на шнеке

Вследствие неравномерности распределения крепости угля в сечении пласта, а также из-за особенности физической природы процесса взаимодействия резца с угольным массивом на резце имеют место высокочастотные колебания силы резания, из-за чего момент сопротивления на шнеке в диапазоне частот от 3 до 50 Гц имеет высокочастотную случайную составляющую [3]. Результаты имитационного моделирования процесса разрушения угля резами шнека для рассматриваемого режима работы комбайна показали, что высокочастотная составляющая момента сопротивления на шнеке изменяется в пределах среднего значения момента сопротивления случайным образом в диапазоне значений от –2700 до 3000 Н·м с частотным спектром в области полезной информации, близким к спектру «белого шума». Ниже приведен график изменения во времени момента сопротивления на двулопастном шнеке комбайна УКД300 при его скорости подачи 4 м/мин и средней сопротивляемости угля резанию 200 Н/мм с учетом конструктивной и высокочастотной составляющих (рис. 2).

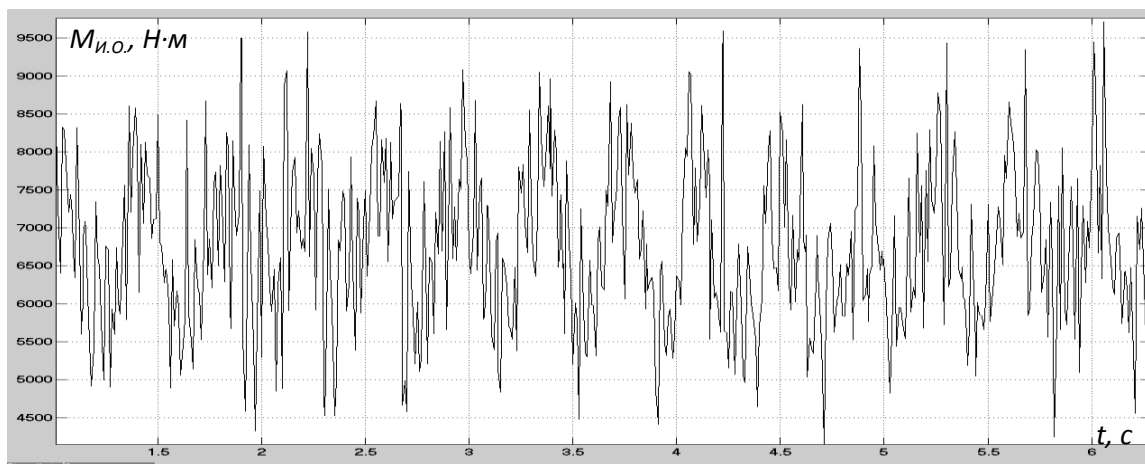


Рис. 2. Динамика момента сопротивления на двулопастном исполнительном органе добычного комбайна УКД300

Из рис. 2 мы видим, что в динамике момента сопротивления на шнеке прослеживается периодическая составляющая, амплитуда которой зависит от сопротивляемости резанию. Период данной составляющей, как было отмечено ранее, равен половине периода вращения шнека, т. е. 16,5 рад/с. Однако кроме момента сопротивления на шнеке на динамику мощности двигателя привода резания существенное влияние оказывают электромагнитная и механическая части привода резания (рис. 3).

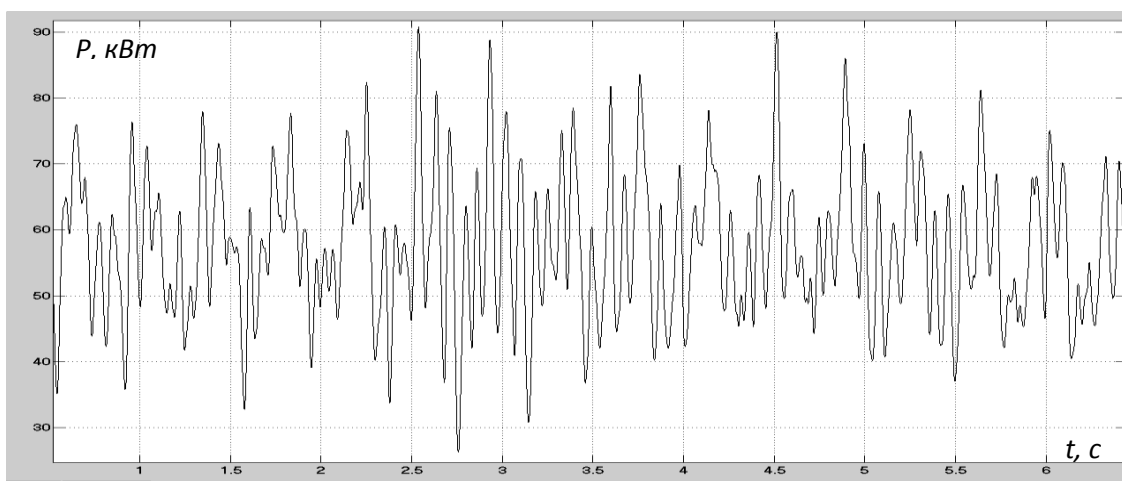


Рис. 3. Динамика мощности электродвигателя привода резания добычного комбайна УКД300

Из рис. 3 можно сделать вывод, что в динамике мощности ЭДПР в отличие от динамики момента сопротивления на шнеке (рис. 2) отсутствуют резкие выбросы сигнала в полосе высоких частот. Вместо этого в высокочастотном диапазоне в основном прослеживаются колебания мощности на резонансной частоте ЭДПР комбайна УКД300 (около 10 Гц). Также из рис. 3 заметно, что в динамике мощности ЭДПР периодическую (конструктивную) составляющую проследить намного труднее, чем в динамике момента сопротивления на шнеке (рис. 2), т. е., влияние электромагнитной и механической частей привода резания внесло существенное искажение в динамику мощности ЭДПР в зоне частоты 16,5 рад/с.

Для разработки метода статистического анализа мощности электродвигателя привода резания добычного комбайна с целью фиксирования изменения сопротивляемости резанию необходимо обосновать статистическую оценку, по которой будет проводиться идентификация разрушаемого материала. Данная статистическая оценка должна однозначно и предсказуемо изменяться при изменении сопротивляемости угля и породы резанию, а также оставаться нечувствительной к влиянию других внешних факторов. Параметры конструктивной составляющей момента сопротивления на исполнительном органе являются детерминированными и предсказуемыми величинами. Кроме того, при определенной конструкции исполнительного органа и типов резцов, установленных на нем, амплитуда колебаний конструктивной составляющей момента сопротивления на исполнительном органе, а значит и мощности ЭДПР, зависит только



от сопротивляемости резанию (при неизменной толщине стружки). Следовательно, данную статистическую оценку можно взять за основу при разработке метода статистического анализа мощности ЭДПР комбайна с целью фиксирования изменения сопротивляемости резанию.

Как было установлено, конструктивная составляющая мощности ЭДПР представляет собой периодический, близкий к синусоиде сигнал с угловой частотой 16,5 рад/с. Поэтому, чтобы из всего частотного спектра мощности ЭДПР добычного комбайна выделить только данные колебания мощности, предлагается использовать полосовой фильтр с его аппроксимацией по Кауэру (эллиптическая аппроксимация). Данный вид аппроксимации фильтра, по сравнению с аппроксимациями по Баттерворту и Чебышеву, позволяет минимизировать порядок фильтра при заданном коридоре в логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ).

С учетом угловой частоты периодической составляющей в динамике мощности ЭДПР комбайна (16,5 рад/с) установим следующий коридор в ЛАЧХ:

- нижняя частота заграждения – 10 рад/с;
- нижняя частота пропускания – 12 рад/с;
- верхняя частота пропускания – 20 рад/с;
- верхняя частота заграждения – 22 рад/с;
- неравномерность в полосе пропускания – 1 Дб;
- уровень подавления в полосе заграждения – 40 Дб.

Передаточная функция полосового эллиптического фильтра имеет следующий вид

$$H_{ПФ}(s) = \frac{b_9 \cdot s^9 + b_8 \cdot s^8 + b_7 \cdot s^7 + b_6 \cdot s^6 + b_5 \cdot s^5 + b_4 \cdot s^4 + \dots}{a_{10} \cdot s^{10} + a_9 \cdot s^9 + a_8 \cdot s^8 + a_7 \cdot s^7 + a_6 \cdot s^6 + a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + \dots} \cdot \frac{\dots + b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0}{\dots + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}$$

Результаты расчета коэффициентов передаточной функции полосового эллиптического фильтра Кауэра сведены в табл. 1.

Таблица 1.

**Коэффициенты передаточной функции эллиптического полосового фильтра Кауэра**

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
0	37994,71	0	830,987	0	5,8351
$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$		
0	$1,4427 \cdot 10^{-2}$	0	$1,1452 \cdot 10^{-5}$		
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
24301044,92	747655,72	556123,55	13476,22	4865,68	86,57
$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	
20,2735	0,23396	$4,0228 \cdot 10^{-2}$	$2,2534 \cdot 10^{-4}$	$3,052 \cdot 10^{-5}$	

На рис. 4, б и в представлен результат статистической обработки мощности ЭДПР с помощью полосового фильтра Кауэра для условий перемещения комбайна УКД300 со скоростью подачи 4 м/мин и сопротивляемости резанию 200 Н/мм до 50-й секунды моделирования, после чего сопротивляемость резко меняется до 240 Н/мм (увеличение на 20%). Динамика мощности ЭДПР до статистической обработки показана на рис. 4, а.

Из рис. 4, б заметно, что амплитуда колебаний мощности ЭДПР после фильтрации, которая соответствует амплитуде колебаний конструктивной составляющей мощности, является случайной величиной. Исследования показали, что среднеквадратическое отклонение мощности ЭДПР до фильтрации равно 10,8 кВт, а после – 5,1 кВт, т. е., почти половина всех колебаний мощности ЭДПР прошла через полосовой фильтр, в то время как доля среднеквадратического отклонения конструктивной составляющей в частотном спектре момента сопротивления на исполнительном органе составляет 22,6%. Отметим, что в результате влияния собственных динамических свойств ЭДПР в высокочастотном диапазоне спектра мощности в основном присутствуют резонансные колебания около 10 Гц (рис. 4, а). Они не пропускаются полосовым фильтром, однако их дисперсия модулирована средней силой резания на резце, которая изменяется во времени, примерно, с той же частотой, что и конструктивная составляющая момента сопротивления на исполнительном органе. Из-за этого приблизительно 28 % случайной составляющей мощности ЭДПР проходит через полосовой фильтр и оказывает влияние на

амплитуду колибаний конструктивної складової потужності. Іменно цим вызвані випадкові змінення амплитуди колибаний потужності ЕДПР після фільтрації (рис. 4, б).

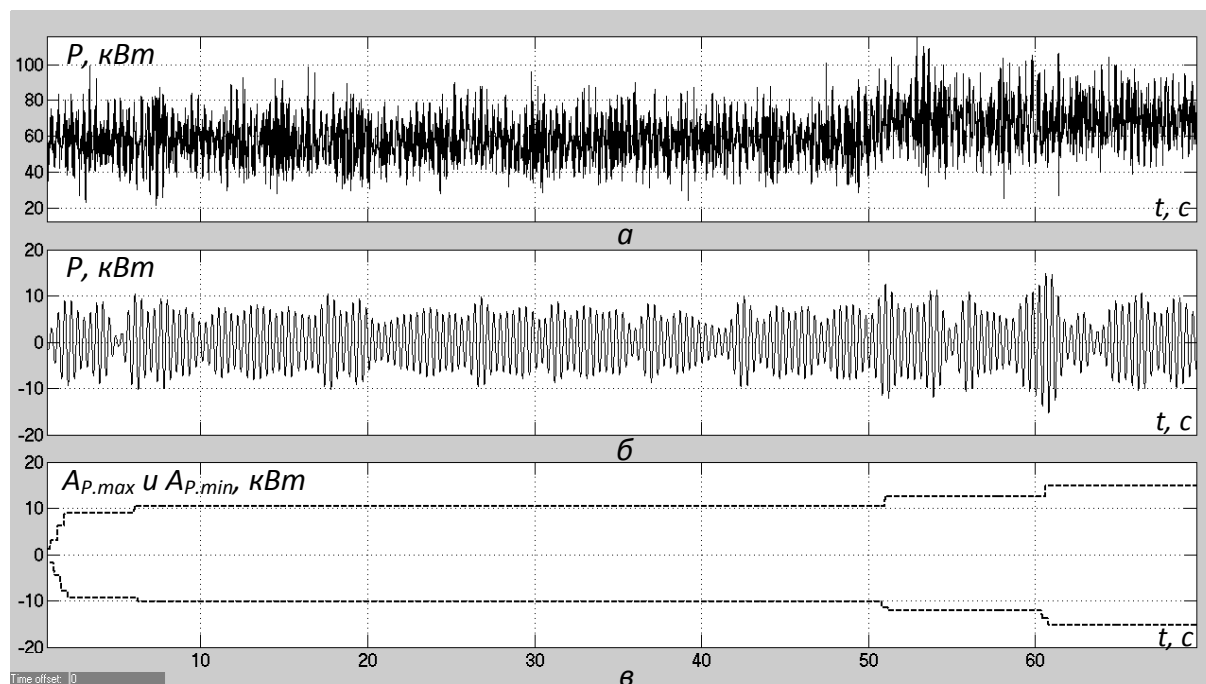


Рис. 4. Динаміка потужності ЕДПР до (а) і після (б) фільтрації, а також границь діапазона колибаний потужності ЕДПР після фільтрації (в)

На рис. 4, б і в видно, що, незважаючи на випадкові змінення амплитуди отфільтрованої потужності ЕДПР, її максимальне і мінімальне значення до 50 с залишаються незмінними і становлять 10,5 і  $-10,3$  кВт. Після збільшення опору різання до  $240$  Н/мм максимальне значення отфільтрованої потужності ЕДПР починає змінюватися на  $51,07$  с і збільшується до  $12,44$  кВт, а мінімальне – до  $-12,1$  кВт на  $50,99$  с (рис. 4, в). Таким чином, після збільшення опору різання на  $20\%$  максимальна амплітуда отфільтрованої потужності ЕДПР збільшилася на  $17,8\%$ . Однак описані закономірності являються єдиничним випадком – із-за впливу випадкової складової потужності ЕДПР фіксація змінення опору різання руйнуваної породи за проведеною статистичною оцінкою відбувається, як показали дослідження, з часовою затримкою, яка носить випадковий характер і змінюється в діапазоні від  $1$  до  $3$  с.

## Висновки

Амплітуда отфільтрованої потужності ЕДПР в діапазоні частот від  $12$  до  $20$  рад/с, яка відповідає амплітуді конструктивної складової моменту опору на шнеку, пропорційно залежить від опору різання і може бути використана як статистична оцінка потужності для фіксації змінення опору різання руйнуваної породи. Однак при цьому необхідно мінімізувати вплив її випадкової складової, яка присутня із-за модуляції резонансних високочастотних колибаний потужності низькочастотними колибанями середньої сили різання на різцях виконавчого органу. По цій причині час фіксації змінення опору різання руйнуваної породи також буде випадковою величиною, яка змінюється в діапазоні від  $1$  до  $3$  секунд, що є неприйнятним.

## Список літератури

1. Автоматизація технологічних процесів підземних гірничих робіт : підручник / А.В. Бубликов, М.В. Козарь, С.М. Проценко та ін. – Д. : Національний гірничий університет, 2012. – 320 с.
2. Bublikov A.V. Control automation of shearers in term of auger gumming criterion / A.V. Bublikov, V.V. Tkachov, M.L. Isakova // Energy efficiency improvement of geotechnical systems – Dnipropetrovs'k : Taylor & Francis Group, 2013. – Рр. 137-145.
3. Позин Е. З. Разрушение углей выемочными машинами / Е. З. Позин, В. З. Меламед, В. В. Тон. — М. : Недра, 1984. — 288 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Ткачовим В.В.

*І.В. Бельмас, д-р техн. наук, М.О. Мажжєєв*

*(Україна, Дніпродзержинськ, Дніпродзержинський державний технічний університет)*

## НАПРУЖЕНИЙ СТАН ГУМОТРОСОВОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА НОРІЇ

**Анотація.** Досліджено механізм деформування плоского гумотросового тягового органа норії. Аналітично визначено напружено-деформованого стан гумотросової стрічки та встановлено максимальні внутрішні сили розтягу тросів армування. Отримані залежності дозволяють обґрунтовано вибрати тип гумотросового тягового органа при проектуванні норії, що дає змогу збільшити її продуктивність, висоту транспортування та підвищити енергоефективність експлуатації.

**Ключові слова:** норія, плоский гумотросовий тяговий орган, напружено-деформований стан.

**Аннотация.** Исследован механизм деформирования плоского резинотросового тягового органа нории. Аналитически определено напряженно-деформированное состояние резинотросовой ленты и установлены максимальные внутренние силы растяжения армирующих тросов. Полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать тип резинотросового тягового органа при проектировании нории, что дает возможность увеличить ее производительность, высоту транспортирования и повысить энергоэффективность эксплуатации.

**Ключевые слова:** нория, плоский резинотросовый тяговой орган, напряженно-деформированное состояние.

**Annotation.** A deformation of a flat rubber-rope traction body of bucket elevator is investigated. Analytically determined the stress-strain state of a rubber-rope belt, and found the maximum internal tensile forces of reinforcing cables. The obtained dependencies allow reasonably choose the type of a rubber-rope traction body in the design of bucket elevators, which makes it possible to increase its performance, a conveying height, and the energy efficiency of operation.

**Keywords:** bucket elevator, flat rubber-rope traction body, and stress-strain state.

**Вступ.** Для вертикального переміщення зерна, як правило, застосовують норії з плоским тяговим органом – гумотканинною стрічкою, до якої приєднані ковші. Для цього в стрічці виконують отвори, які впливатимуть на міцність тягового органа. У зв'язку з цим, є доцільним замінити гумотканинну стрічку гумотросовою зі збільшеним кроком укладання тросів. В такій конструкції отвори для елементів кріплення ковшів, наприклад болтів, мають виконуватися в частині стрічки, де відсутні троси. Кожен ківш за допомогою болтів буде взаємодіяти лише з сусідніми, а не з усіма тросами армування. Вказане призведе до локального навантаження тросів тягового органа. Локальне навантаження зумовлює локальний нерівномірний розподіл сил поміж тросами. Умови руйнування більш навантажених тросів визначатимуть умови руйнування тягового органа в цілому.

**Стан питання та постановка задачі дослідження.** В роботах [1, 2] досліджено залежність напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа за наявності розривів тросів армування.

Вивчення механізму деформування гумотросової стрічки, аналітичне визначення її напруженого стану та максимальних внутрішніх сил розтягу тросів для їх урахування при проектуванні норії – **актуальна науково-технічна задача**. Її розв'язання дозволить застосовувати гумотросові стрічки замість гумотканинних, чим збільшити продуктивність норії та термін роботи її тягового органа.

**Основний зміст роботи.** Розглянемо стрічку, до якої симетрично відносно середини, з постійним кроком  $l$  приєднано  $M$  ковшів з матеріалом. Маса кожного ковша з матеріалом зумовлює силу тяжіння  $Q$ . Канат будемо розглядати як композитну шарувату конструкцію з м'якими шарами, приєднану до барабана по твірній. Напружено-деформований стан визначимо з системи рівноваги тросів каната, записаної в переміщеннях. Рішення знайдемо в замкненій аналітичній формі.

Кількість тросів в тяговому органі позначимо  $2N$ . Основний крок розташування тросів –  $t$ , їх діаметр  $d$ . Парна кількість тросів дозволяє вважати, що нульового троса немає, а троси з номерами  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm N$  розташовані симетрично. Відсутні троси позначимо номерами  $\pm k$  (рис. 1).

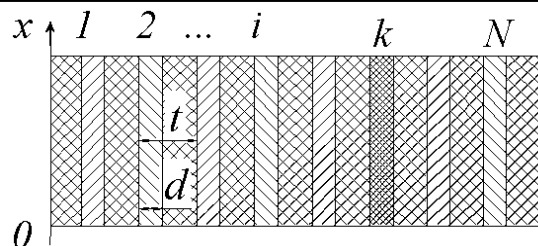


Рис. 1. Тяговий орган з пропущеним  $k$ -тим тросом

Локальною зміною кроку розташування тросів знехтуємо. Таке спрощення не внесе значної похибки, тому що троси, яким передається сила тяжіння ковша, навантажені практично однаково. Деформуються вони також практично однаково. В гумі поміж ними не виникають напруження зсуву.

Переміщення та сили навантаження тросів відповідно визначаються залежностями [1, 2]

$$u_i = \frac{1}{E F} \sum_{n=1}^{N-1} (A_n e^{\beta_n x} + B_n e^{-\beta_n x}) \cos(\mu_n (i-0,5)) + \frac{P x}{E F} + c; \quad (1)$$

$$p_i = \sum_{n=1}^{N-1} (A_n e^{\beta_n x} - B_n e^{-\beta_n x}) \beta_n \cos(\mu_n (i-0,5)) + \frac{\rho}{2 N} x + \frac{p_0}{2 N} + a, \quad (2)$$

де  $\beta_n = \sqrt{2 \frac{G d}{h E F K_G} (1 - \cos \mu_n)}$ ;  $\mu_n = \frac{\pi n}{N}$ ;  $P$  – середнє внутрішнє зусилля розтягу тросів стрічки;

$A_n$ ,  $B_n$ ,  $c$  – сталі інтегрування.

Наведена задача лінійна та допускає застосування методу суперпозиції. Спочатку знайдемо рішення для випадку навантаження стрічки власною масою. До нього додамо напружено-деформовані стани стрічки, які зумовлені навантаженням силами тяжіння ковшів з матеріалом. Визначимо деформації та сили натягнення тросів, зумовлені першим напруженим станом

$$u_{1,i} = \frac{\rho \left( l M - \frac{x}{2} \right) + p_0}{N E F} x; \quad (3)$$

$$p_{1,i} = \frac{\rho \left( l M - x \right) + p_0}{N},$$

де  $\rho$  – сила тяжіння стрічки одиничної довжини;  $p_0$  – сила, створена пристроєм натягнення стрічки.

Для визначення наступних напружених  $M-1$  станів, перерізом кріплення ковша розділимо стрічку на дві ділянки. Першій ділянці надамо номер 1, другій – 2. Вказані ділянки та відношення параметру до  $m$ -того стану позначимо додатковим індексом  $1m$  та  $2m$ , відповідно. Сформулюємо граничні умови для стрічки з приєднанням до неї одним ковшем.

Переріз набігання стрічки на барабан натягнення ( $x = 0$ ) вважаємо нерухомо закріпленим

$$x = 0, \quad u_i = 0. \quad (4)$$

В перерізах приєднання  $m$ -того ковша деформації тросів не мають розривів і сили розтягу тросів, суміжних з  $k$ -тим, зростають на величину, що дорівнює половині ваги ковша з матеріалом та поділена порівну поміж двома тросами:

якщо  $x = l m$  ( $1 \leq m \leq M$ ), то

$$u_i(x) = u_i(x + \varepsilon), \quad (5)$$

$$p_i(x) = \begin{cases} p_i(x + \varepsilon) & (i \neq k-1 \vee i \neq k+1); \\ p_i(x + \varepsilon) + \frac{Q}{4} & (i = k-1 \vee i = k+1), \end{cases} \quad (6)$$

де  $\varepsilon$  – мала лінійна величина.

Переріз набігання стрічки на барабан натягнення

$$x = l M, \quad p_i = 0. \quad (7)$$

Умова (4) може бути виконана, якщо

$$A_{1m,n} = -B_{1m,n}, \quad c_{1m} = 0. \quad (8)$$

Умова (7) – якщо

$$\begin{aligned} A_{2m,n} &= B_{2m,n} e^{-2\beta_n l M}, \\ a_{2m} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Умова (5) призводить до наступного співвідношення поміж невідомими сталими

$$\begin{aligned} (A_{1m,n} - A_{2m,n}) e^{\beta_n l m} + (B_{1m,n} - B_{2m,n}) e^{-\beta_n l m} &= 0, \\ (a_{1m} - a_{2m}) l m + c_{1m} - c_{2m} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Гранична умова (6) має вигляд розривної функції номерів тросів. Подамо її у вигляді суми ряду Фур'є на відріжку  $0 - N$ . Кількість членів ряду обмежимо кількістю тросів в половині стрічки, оскільки тільки точки, що відповідають номерам тросів, створюють вісь координат номерів тросів. Врахуємо симетричність деформування та навантаження стрічки відносно середньої точки осі номерів тросів. Геометрично ця точка розташована поміж тросами з номерами  $-1$  та  $1$ , відстань поміж якими в стрічці дорівнює кроку укладання тросів

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \left[ (A_{1m,n} - A_{2m,n}) e^{\beta_n l m} - (B_{1m,n} - B_{2m,n}) e^{-\beta_n l m} \right] \beta_n \cos(\mu_n (i - 0,5)) + \\ + a_{1m} - a_{2m} = \alpha_0 + \sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(\mu_n (i - 0,5)). \end{aligned} \quad (11)$$

Значення коефіцієнтів ряду задамо наступними залежностями

$$\alpha_0 = \frac{Q}{4 N}, \quad \alpha_n = \frac{Q}{2 N} \left[ \cos(\mu_n (k - 0,5)) + \cos(\mu_n (k + 0,5)) \right]. \quad (12)$$

Залежності (11) з урахуванням (12) призводять до наступних співвідношень

$$\begin{aligned} (A_{1m,n} - A_{2m,n}) e^{\beta_n l m} - (B_{1m,n} - B_{2m,n}) e^{-\beta_n l m} &= \frac{Q}{2 N \beta_n} \left[ \cos(\mu_n (k - 0,5)) + \cos(\mu_n (k + 0,5)) \right], \\ a_{1m} - a_{2m} &= \frac{Q}{4 N}. \end{aligned} \quad (13)$$

Сумісне розв'язання наведених залежностей дозволяє знайти невідомі сталі

$$\begin{aligned} A_{1m,n} = -B_{1m,n}, \quad A_{2m,n} = B_{2m,n} e^{-2\beta_n l M}, \quad B_{1m,n} = B_{2m,n} \frac{(e^{\beta_n l (m-2M)} + e^{-\beta_n l m})}{(e^{-\beta_n l m} - e^{\beta_n l m})}, \\ B_{2m,n} = -\frac{\alpha_n (e^{-\beta_n l m} - e^{\beta_n l m})}{2\beta_n (e^{\beta_n l (m-2M)} + e^{-\beta_n l m} - e^{-2\beta_n l m} + 1)}, \quad c_{2m} = \alpha_0 l m, \quad a_{1m} = \alpha_0. \end{aligned} \quad (14)$$

Врахуємо і те, що внаслідок подовження першої ділянки, друга, як ціле, переміщується на величи-

ну  $a_{1m}$ . Отримані невідомі сталі дозволяють визначати напружено-деформований стан стрічки норії

$$u_i = \frac{\rho \left( l M - \frac{x}{2} \right) + p_0}{N E F} x + \frac{1}{E F} \sum_m \sum_{n=1}^{M-1, N-1} \left( A_{m,n} e^{-\beta_n x} + B_{m,n} e^{-\beta_n x} \right) \cos(\mu_n (i-0,5)) + \phi_m x + \varphi_m, \quad (15)$$

де

$$A_{m,n} = \begin{cases} A_{1,m,n}, & (x \leq l m); \\ A_{2,m,n}, & (x > l m); \end{cases} \quad B_{m,n} = \begin{cases} B_{1,m,n}, & (x \leq l m); \\ B_{2,m,n}, & (x > l m); \end{cases}$$

$$\phi_m = \frac{Q}{2 N E F} \cdot \begin{cases} 0, & (x \leq l m); \\ 1, & (x > l m); \end{cases} \quad \varphi_m = \frac{Q l m}{2 N E F} \cdot \begin{cases} 0, & (x \leq l m); \\ 1, & (x > l m); \end{cases}$$

$$p_i = \frac{\rho (l M - x) + p_0}{N} + \sum_m \sum_{n=1}^{M-1, N-1} \left( A_{m,n} e^{-\beta_n x} - B_{m,n} e^{-\beta_n x} \right) \beta_n \cos(\mu_n (i-0,5)) + \phi_m E F. \quad (16)$$

**Висновки.** Отримані результати відтворюють механізм деформування плоского гумотросового тягового органа та дозволяють обґрунтовано вибирати його тип при проектуванні норії, що дає змогу збільшити її продуктивність, висоту транспортування та підвищити енергоефективність експлуатації.

#### Список літератури

1. Бельмас І.В. Залежність міцності гумотросового тягового органу норії від поривів тросів / І.В. Бельмас, І.Т. Бобильова, І.Ю. Соколянський // *Moderni vymozenosti vedi 2014: Materialy X mezinarodni vedecto-prakticra conference.* – Praha: Praha Publishing House Education and Siens s.t.o., 2014. – Dil. 37. – S. 55-58.
2. Бельмас И.В. Определение напряженно-деформированного состояния резиноканевоы ленты с отверстиями / И.В. Бельмас, Ю.М. Перфильева, Н.А. Данияров, А.Ж. Карсакова // *Труды Карагандинского государственного технического университета.* – Казахстан. – 2013. – №4. – С. 60-64.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.*

УДК 622.673+539.4

*Д.Л. Колосов, д-р техн. наук*

*(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)*

*О.І. Білоус, канд. техн. наук, Г.І. Танцура, канд. техн. наук*

*(Україна, Дніпродзержинськ, Дніпродзержинський державний технічний університет)*

### ВПЛИВ ПОВОРОТУ ПОСУДИНИ В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПЛОСКОГО КАНАТА ПІДЙОМНОЇ МАШИНИ

**Анотація.** Встановлені аналітичні залежності для визначення напруженого стану плоского головного каната шахтної підйомної машини з урахуванням відхилень геометричних параметрів армування стовбуру від проектних значень. Отримані результати можуть бути враховані при аналізі допустимості безпечного підняття сировини в шахтних стовбурах з порушенням розташування напрямних підйомної посудини.

**Ключові слова:** шахтна підйомна установка, плоский гумотросовий канат, армування стовбура, геометричні параметри, напружений стан, безпечність експлуатації.

**Анотация.** Установлены аналитические зависимости для определения напряженного состояния плоского головного каната шахтной подъемной машины с учетом отклонений геометрических параметров армровки ствола от проектных значений. Полученные результаты могут быть учтены при анализе допустимости безопасного поднятия сырья в шахтных стволах с нарушенным расположением направляющих подъемного сосуда.

**Ключевые слова:** шахтная подъемная установка, плоский резиноканат, армровка ствола, геометрические параметры, напряженное состояние, безопасность эксплуатации.

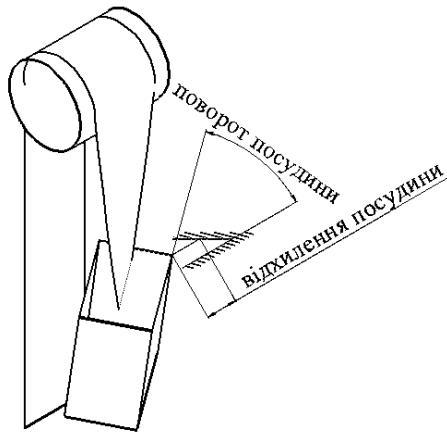
**Annotation.** Obtained analytical dependences for determining the stress state of the flat head rope of mine hoist, taking into account variations of geometrical parameters of the trunk reinforcement from the design values. The results can be taken into account when analyzing the admissibility of a safe lifting of raw materials in the mine shafts with impaired arrangement of the lifting vessel guides.

**Keywords:** hoisting engine, flat rubber-rope cable, trunk reinforcement, geometrical parameters, stress state, and operational safety.

**Вступ.** Основний обсяг видобутку руд чорних і кольорових металів здійснюється за рахунок розробки родовищ, що залягають на великих глибинах. При цьому основні стовбури вугільних і рудних шахт України експлуатуються вже понад 40-50 років й у більшості з них через складні гірничо-геологічні і технічні умови відбулося порушення вертикальності осей просторового характеру. Як слід – геометричні параметри армування стовбурів шахт, у т.ч. після аварій, можуть мати відхилення від проектних значень.

Використання плоских гумотросових канатів як врівноважувальних показує, що термін їх експлуатації значно перевищує термін роботи звичайних сталевих канатів. Розтяг такого каната силою, що за напрямом збігається з віссю каната та розподілена за його шириною, призводить до рівномірного навантаження усіх тросів. При цьому агрегатна міцність каната наближається до суми максимальних сил, що можуть витримати троси. Зміщення рівнодіючої сили тяжіння посудини з осі каната може бути зумовлене випадковим розміщенням центру маси матеріалу в посудині, станом армування стовбура, поривом троса, з яким канат буде працювати до моменту визначення пошкодження, включно і внаслідок аварії.

**Стан питання та постановка задачі дослідження.** Переміщення посудини в підйомній системі в армуванні з порушеною геометрією провідників суттєво впливає на розподіл зусиль поміж тросами каната, відповідно на його міцність та безпеку експлуатації шахтної підйомної установки. Відомі дослідження напружено-деформованого стану гумотросових стрічок, канатів [1-7] не стосуються питань згину тросів каната в його площині. Тому визначення напруженого стану плоского головного каната підйомної машини з урахуванням впливу порушеної геометрії стовбура для обґрунтування вимог до безпечної експлуатації шахтного підйомного комплексу, є **актуальною науково-технічною задачею.**



**Рис. 1.** Схема зміщення посудини відносно проектного розташування

$$r_i = (|i| - 0,5)t\varphi. \quad (1)$$

Відносні подовження тросів, що набули гвинтової форми на ділянці каната довжиною  $L$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left( \sqrt{\left( \frac{\left( k - \frac{M}{2} \right) t\varphi}{L} \right)^2 + 1} - 1 \right) \cos(\mu_m(k-0,5)) \cos(\mu_m(i-0,5)), \quad (2)$$

де  $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$ ;  $t$  – крок розташування тросів в канаті.

Подовження троса буде складатися з двох складових – з подовження, зумовленого набуттям тросом форми гвинтової лінії та подовження внаслідок зміни внутрішнього зусилля його розтягу. Відповідно до закону Гука для другої ділянки

$$p_i = EF \cdot \left( \frac{du_i}{dx} + \varepsilon_i \right), \quad (3)$$

де  $E$  – приведений модуль пружності троса на розтягнення;  $F$  – площа перерізу троса каната.

Будемо вважати, що канат нерухомо приєднаний до барабана. Переріз приєднання посудини повертається на кут  $\varphi$ . Посудина діє на канат силою  $P$ . Початок осі координат  $x$  розташуємо в перерізі приєднання каната до барабана. Розв’язок системи рівноваги тросів в гумотросовому канаті в переміщеннях будемо шукати у формі [8]

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} (A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x}) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{Px}{MEF} + c, \quad (4)$$

де  $A_m, B_m, c$  – сталі інтегрування;  $\beta_m = \sqrt{\frac{2k[1-\cos(\mu_m)]}{EF}}$ ;  $k$  – жорсткість на зсув гумової обкладинки, розташованої поміж тросами на ділянці одиничної довжини;  $P$  – сила натягнення каната.

З метою визначення впливу відхилення розташування посудини на напружено-деформований стан головного каната, силу розтягу каната враховувати не будемо. Приймемо  $P = 0$ .

Сили розтягу тросів з урахуванням (3) становлять

$$p_i = EF \sum_{m=1}^{M-1} [(A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x}) \beta_m + D_m] \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{P}{M}. \quad (5)$$

Враховавши умови відсутності деформацій каната в перерізі його приєднання до барабана та відсутності подовжніх деформацій тросів каната в перерізі його приєднання до посудини, маємо

$$p_i = EF \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left( \sqrt{\left( \frac{\left( k - \frac{M}{2} \right) t \varphi}{L} \right)^2 + 1} - 1 \right) \cos(\mu_m (k-0,5)) \cos(\mu_m (i-0,5)). \quad (6)$$

Відповідно до отриманого виразу та фізичного процесу закручування, сили розтягування тросів каната, закрученого внаслідок повороту посудини в горизонтальній площині, зростають від середини каната до його країв. Максимальні внутрішні сили діють в крайніх тросах. Довжина каната підйомної машини значно перевищує його ширину, тому кут повороту посудини не може бути значним. Вказане дозволяє зробити висновок, що

$$\left( \frac{\left( k - \frac{M}{2} \right) t \varphi}{L} \right)^2 \ll 1.$$

Відповідно, в інженерних розрахунках залежність (6) можна спростити. Максимальне зусилля натягнення тросів, зумовленого його гвинтовою формою, можливо визначати за залежністю

$$p_{\max} = \frac{EF}{2} \left( \frac{t\varphi}{L} \right)^2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left( k - \frac{M}{2} \right)^2 \cos(\mu_m (k-0,5)) \cos(\mu_m (M-0,5)).$$

Отриманий вираз показує, що зростання зусиль, зумовлених поворотом посудини в горизонтальній площині, пропорційне квадрату добутку кута повороту посудини та кроку укладання тросів в канаті та зворотно пропорційне квадрату відстані від горизонтальної площини розташування осі обертання приводного барабана до площини підвішування посудини. У разі застосування барабанів відхилення головних канатів – зворотно пропорційне квадрату відстані поміж горизонтальною площиною розташування осі обертання барабанів відхилення канатів та площиною підвішування посудини.

Знайдені величини дозволяють визначати і допустимі кути повороту посудини. Так, з умови міцності, маємо



$$\varphi \leq \frac{L}{t} \sqrt{\frac{2 \left( P_{load} - \frac{P}{M} \right)}{EF \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left( k - \frac{M}{2} \right)^2 \cos(\mu_m (k - 0,5)) \cos(\mu_m (M - 0,5))}},$$

де  $P_{load}$  – допустиме навантаження на трос.

Аналіз показує, що зростання довжини каната призводить до практично лінійного зростання допустимих кутів повороту посудини, а збільшення кількості тросів в канаті та збільшення кроку укладання тросів в ньому веде до зменшення допустимих кутів повороту перерізів приєднання кінців каната до барабана та до посудини.

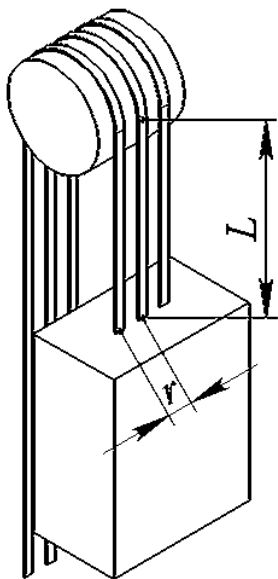


Рис. 2. Багатоканатна схема підвішування посудини

Розглянемо схему підвішування посудини на трьох канатах, за якої вісь середнього каната залишається нерухомою. Переріз каната повертається на кут повороту посудини  $\varphi$  – канат набуває форми гелікоїда. Як розглянуто вище, перерізи суміжних канатів відхиляються в площині каната – по нормалі до неї та повертаються на кут  $\varphi$ .

Відхилення канатів в їх площині відбувається симетрично та силового впливу на напрямні не спричиняє. Горизонтальні сили призводять до деякого стискання металокопункції приєднання канатів до посудини. Відхилення перерізів не центрального каната в напрямку, нормальному до його площини, не викликає нормальних деформацій осі розташування тросів – вони залишаються прямолінійними.

Два розглянутих переміщення осі каната призводять до додаткового середнього подовження тросів не центрального каната. Відносно подовження викликало би додаткове зусилля

$$P_{add} = EFM \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\Omega + \Delta}{L} \right)^2} - 1 \right),$$

де  $\Delta, \Omega$  – відхилення осі симетрії перерізів не центрального каната в площині каната та в напрямку, нормальному до неї.

Значення відхилень залежать від кроку розташування канатів та кута повороту посудини

$$\Delta = 2r \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)^2,$$

$$\Omega = 2r \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi}{2}\right).$$

З урахуванням малих значень кута повороту посудини, зусилля натягнення середнього каната

$$P_{mid} = \frac{X}{3M} - EF \frac{\Omega + \Delta}{3L},$$

де  $X$  – максимальне робоче зусилля натягнення канатів підйомної машини.

Середнє зусилля натягнення крайнього каната

$$P_{ext} = \frac{X}{3M} + \frac{EF}{2} \left(\frac{\Omega + \Delta}{L}\right)^2.$$

З наведеного можна зробити висновок, що у разі підвішування посудини на трьох канатах, найбільш навантаженими є троси крайніх канатів, для яких

$$P_{max} = \frac{EF}{2} \left(\frac{t\phi}{L}\right)^2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^M \left(k - \frac{M}{2}\right)^2 \cos(\mu_m(k-0,5)) \cos(\mu_m(M-0,5)) + \frac{X}{3M} + \frac{EF}{2} \left(\frac{r}{L}\right)^2 \left(\phi \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \frac{\phi^2}{2}\right)^2.$$

**Висновки.** Отримані залежності показують, що крок розташування канатів у разі багатоканатного підвішування посудини, призводить до зростання внутрішніх сил розтягнення найбільш навантажених тросів канатів. Зростання пропорційне квадрату кроку розташування канатів (для схеми підвішування на трьох канатах) та пропорційне квадрату відстані осі симетрії тросів крайніх канатів від осі симетрії розташування тросів в усіх канатах системи підвішування посудини. Зростання внутрішніх сил розтягнення найбільш навантажених тросів канатів підвішування зворотно пропорційне квадрату відстані від осі барабана підйомної машини до перерізу підвішування посудини при повороті останньої в горизонтальній площині і зумовлене як відхиленням напрямних від проектного розташування, так і внаслідок коливань, пов'язаних з обертанням посудини в горизонтальній площині.

Відстань від барабана підйомної машини до перерізу приєднання посудини до канатів перевищує декілька десятків метрів. Таким чином, незначні зміщення осьових ліній крайніх тросів можна вважати такими, що не впливають на прямолінійну форму ліній симетрії не крайніх тросів. Відповідно, поворот перерізу приєднання каната до посудини можна вважати таким, що призводить до набуття канатом форми прямого гелікоїда, а тросів – гвинтових ліній. Оскільки канати пропонується використовувати однакової конструкції, то і додаткові сили розтягу тросів від набуття ними форми гвинтових ліній, мають виражатися за вищенаведеними залежностями.

Отримані результати мають бути враховані при аналізі допустимості безпечного підняття сировини в шахтних стовбурах з порушеним розташуванням напрямних підйомної посудини.

#### Список літератури

1. Zabolotny K. Definition of rating loading in spires of multilayer winding of rubberrope cable / K. Zabolotny, E. Panchenko // *New Techniques and technologies in Mining*. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2010. – P. 223-229.
2. Carbogno A. Stan naprezen i odkształcen powłoki gumowej liny wyrównawczej płaskiej na bebnie zawieszenia górnictwego wyciągu szybowego / A. Carbogno, V. Ropaj, V. Zajczenko // *Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie*. Praca zbiorowa. Monografia. Ledziny. – Polska. – 2011. – S. 63-70.
3. Ropaj V. Wpływ tarczy zawieszenia bebnowego na stan naprezen powłoki gumowej liny RTK / V. Ropaj, V. Zajczenko // *Transport szybowy*. Praca zbiorowa. Monografia. Gliwice. – Polska. – 2011. – S. 389-398.
4. Kolosov D. The stress-strain state of the belt on a drum under compression by flat plates / D. Kolosov, O. Dolgov, A. Kolosov // *Annual Scientific-Technical Collection. Mining of Mineral Deposits*. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2013. – P. 351-357.
5. Бельмас И.В. Исследование напряженно-деформированного состояния резинотросового каната на участке перехода к трубчатой форме / И.В. Бельмас, Д.Л. Колосов, А.Л. Колосов // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2014. – №12. – С. 48-55.
6. Kolosov D. Analytical determination of stress-strain state of rope caused by the transmission of the drive drum traction / D. Kolosov, O. Dolgov, A. Kolosov // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2014. – P. 499-504.

7. The stress-strain state of the belt in the operating changes of the burdening conveyor parameters / D. Kolosov, O. Dolgov, O. Bilous, A. Kolosov // *New Developments in Mining Engineering: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2015. – P. 585-590.

8. Бельмас І.В. Врахування дотичних напружень при автоматичному конструюванні ступінчастого канату / І.В. Бельмас, Д.Л. Колосов, І.Т. Бобильова // *Стальные канаты*. – 2009. – № 7. – С. 147-152.

9. Переобладнання клітьовою підйомної установки шахти «Зоря» шахти «Жовтнева» під головні гумотросові канати / Робоча документація. Технологічні рішення. Пояснювальна записка // ДП «ДПІ Кривбаспроект» – Кривий Ріг. – 2011.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.*

УДК 622

**С.В. Самуся,**

*(Україна, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)*

**М.В. Холоменюк, Ю.А. Комиссаров, Д.А. Федоряченко**

*(Україна, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)*

### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ МОБИЛЬНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

**Анотація.** У статті представлено гальмівний пристрій шахтної підйомної машини, яке є важливою складовою частиною системи управління і кінцевою ланкою в ланцюзі захисту підйомної установки, забезпечує виконання заданої діаграми швидкості і стопоріння барабана під час технологічних пауз (робоче гальмування), а також запобіжне гальмування при виникненні аварійної ситуації. Виконано обґрунтування параметрів згідно з вимогами правил безпеки і правил технічної експлуатації, що регламентують основні вимоги до режимів гальмування. Вибрані параметри гальмівного приводу і обґрунтовані параметри його системи управління.

**Ключові слова:** Математична модель, Динаміка мобільної підйомної установки, Запобіжне гальмування

**Аннотация.** В статье представлено тормозное устройство шахтной подъемной машины, которое является важной составной частью системы управления и конечным звеном в цепи защиты подъемной установки, обеспечивает выполнение заданной диаграммы скорости и стопорение барабана во время технологических пауз (рабочее торможение), а также предохранительное торможение при возникновении аварийной ситуации. Выполнено обоснование параметров согласно требованиям правил безопасности и правил технической эксплуатации, регламентирующих основные требования к режимам торможения. Выбраны параметры и наладки тормозного привода и обоснованы параметры его системы управления.

**Ключевые слова:** Математическая модель, Динамика мобильной подъемной установки, Предохранительное торможение

**Abstract.** The article provides a brake unit for mining hoisting machine, which is an important part of management and the final link in the security of the elevator installation chain system ensures, that the steady speed and drum locking during processing pauses (service braking), as well as a safety brake in case of emergency. The justifications parameters according to the requirements of safety regulations and rules of technical operation of regulating the basic requirements for the braking mode. Chose parameters of the brake actuator and justified parameters of its management system.

**Keywords:** Mathematical model, Dynamics of hoisting machine, Preventive braking

Тормозное устройство шахтной подъемной машины, которое является важной составной частью системы управления и конечным звеном в цепи защиты подъемной установки, обеспечивает выполнение заданной диаграммы скорости и стопорение барабана во время технологических пауз (рабочее торможение), а также предохранительное торможение при возникновении аварийной ситуации.

Требования Правил безопасности [1] и Правил технической эксплуатации [2] регламентируют основные требования к режимам торможения, выполнить которые можно только при правильном выборе параметров и наладке тормозного привода и его системы управления.

В состав подъемной установки АСППУ-6,3 входит вмещающая 8 человек аварийно-спасательная клеть, имеющая полную массу  $Q = 2880$  кг. Привод гидropружинного тормоза рассчитан на обеспечение нормативной кратности тормозного усилия при максимальной концевой нагрузке и максимальной глубине подъема 1400 м. Тормозное усилие для вертикального одноконцевого подъема определяется из условия

$$F_m \geq 3F_{cm}, \quad (1)$$

где  $F_{cm} = (Q + \rho l_k) \cdot g$  – максимальное статическое усилие в верхнем сечении каната;  $Q$  – расчетная масса концевого груза;  $\rho$  – линейная плотность каната;  $l_k$  – максимальная длина отвеса каната.

Результаты экспериментальных исследований режимов предохранительного торможения мобильной подъемной установки АСППУ-6,3 [3] свидетельствуют о выполнении указанных требований нормативных документов. Так, например, быстрдействие тормоза, определяемое временем холостого хода и временем срабатывания, не превышает максимальных значений  $t_{xx} \leq 0,3$  с и  $t_{сраб} \leq 0,8$  с. Кратность тормозного усилия для максимальной статической нагрузки составляет  $\gamma = 3,2$ , что позволяет обеспечить максимальное замедление при торможении поднимающейся грузовой клетки –  $4,73$  м/с<sup>2</sup> и минимальное замедление для опускающейся клетки –  $2,66$  м/с<sup>2</sup>.

Допустимые замедления при подъеме и спуске расчетного груза определяются как средние замедления, то есть отношение фактической скорости ко времени, которое прошло с момента начала торможения до полной остановки подъемной машины [2]. При этом величина среднего замедления подъемной установки, как при предохранительном, так и при рабочем (в экстренных случаях) торможении при подъеме расчетного груза не должна превышать  $5$  м/с<sup>2</sup>.

Однако, для мобильной подъемной установки, которая характеризуется значительной массой каната по отношению к массе концевого груза, необходимо при выборе допустимых замедлений учитывать влияние динамических процессов в отвесе и струне каната на возможность набегания подъемного сосуда на канат даже при выполнении требований нормативных документов к режимам торможения.

С помощью разработанной математической модели [4] проведены исследования динамики мобильной подъемной установки АСППУ-6,3 для определения допустимых замедлений и тормозных усилий из условия нерасслабления каната в нижнем сечении при предохранительном торможении для различных масс концевого груза.

Это условие выполняется в том случае, когда динамическое усилие в нижнем сечении каната не превышает вес поднимающегося сосуда

$$F_{дин} \leq Q \cdot g, \quad (2)$$

что исключает его набегание на канат и последующий растягивающий удар по канату.

При моделировании варьировались длина отвеса каната с шагом 50 м и максимальная кратность тормозного усилия, обеспечивающая выполнение условия (2). На рис. 1 показаны зависимости допустимых замедлений от длины отвеса каната для режима торможения из условий ненабегания сосуда на канат при подъеме грузовой клетки ( $Q = 2880$  кг) и бабьи ( $Q = 720$  кг) при длине струны  $l_{стр} = 75$  м. Сплошными линиями показаны зависимости допустимых замедлений, полученных с учетом поперечных колебаний струны каната, пунктирными – без учета поперечных колебаний.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что учет влияния динамики струны снижает величину допустимых замедлений на 7...12%, причем, это влияние усиливается при уменьшении длины отвеса каната и массы концевого груза.

Кроме того, для больших глубин из-за усиления влияния динамических процессов в отвесе каната выполнение требований Правил безопасности  $a_n \leq 5$  м/с<sup>2</sup> обеспечивает ненабегание клетки на канат только до глубины подъема 800 м, а бабьи – до 480 м (горизонтальная линия 3 на рис. 1). При использовании мобильной подъемной установки в конкретных условиях необходимо учитывать этот фактор и ограничивать максимально допустимое замедление значением, значительно меньшим, чем  $5$  м/с<sup>2</sup>. Так, например, для глубины подъема 1200 м допустимые замедления при подъеме клетки и бабьи составляют  $3,56$  м/с<sup>2</sup> и  $2,48$  м/с<sup>2</sup> соответственно.

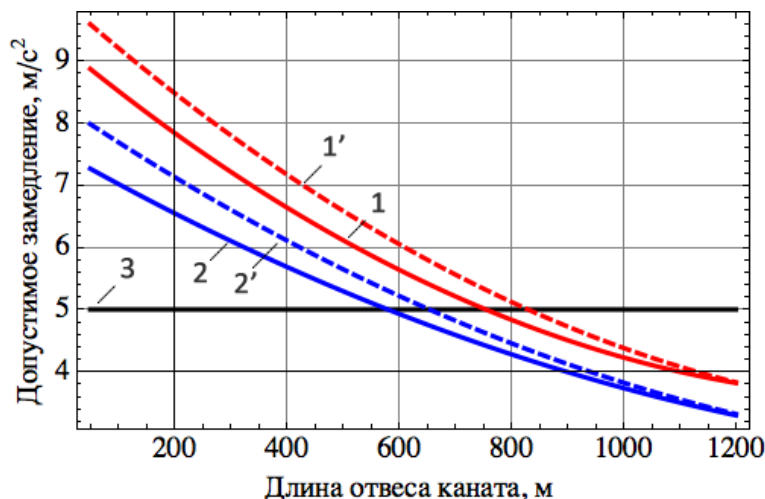


Рис. 1. Зависимости допустимых замедлений от длины отвеса каната для различных масс концевого груза:  
 1 и 1' – для  $Q = 2880$  кг; 2 и 2' – для  $Q = 720$  кг;  
 3 – максимально допустимое замедление при подъеме груза

На рис. 2 показаны максимальные кратности тормозного усилия, обеспечивающие нерасслабление каната в нижнем сечении для различных вариантов применения подъемного сосуда и наладки предохранительного тормоза.

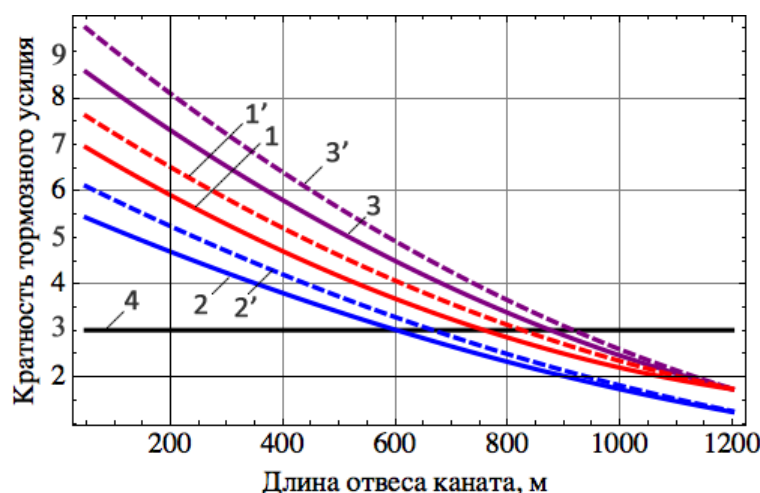


Рис. 2. Зависимости максимально допустимой кратности тормозного момента от длины отвеса каната:  
 1 и 1' – для  $Q = 2880$  кг с учетом и без учета динамических процессов в струне каната;  
 2 и 2' – для  $Q = 720$  кг с таким же тормозным усилием;  
 3 и 3' – для  $Q = 720$  кг со скорректированным значением  $T_{ст}$  ;  
 4 – минимально допустимая кратность тормозного усилия

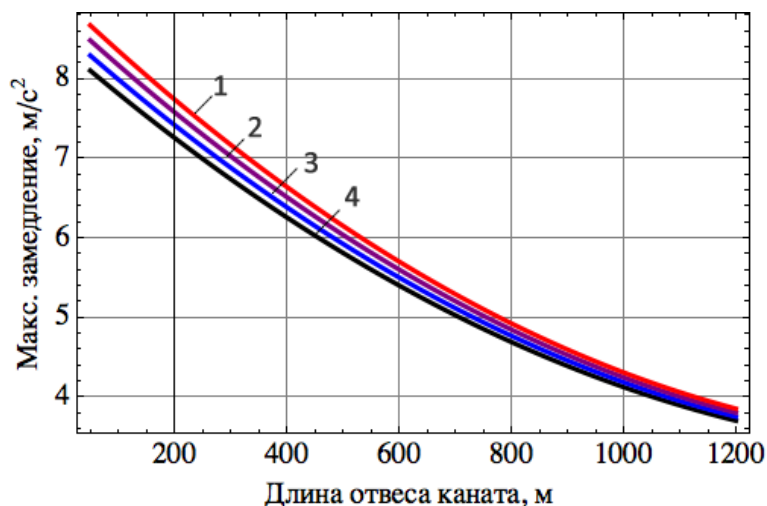
Анализ полученных графиков показывает, что применение в качестве подъемного сосуда бадьи при такой же наладке тормоза (кривые 2 и 2') значительно уменьшает допустимую кратность тормозного момента по сравнению с применением клетки (кривые 1 и 1'). Для выполнения требований Правил безопасности необходимо в этом случае пересчитать максимальное значение тормозного усилия в соответствии с уменьшением статического усилия в канате и произвести переналадку тормоза (кривые 3 и 3').

При максимальной массе подъемного сосуда (линии 1 и 1') необходимость ограничения кратности тормозного усилия появляется при глубине подъема около 1200 м, а при использовании бадьи в качестве подъемного сосуда это ограничение необходимо применять уже с глубины подъема 860 м (линии 2 и 2'). Так как фактический запас тормозного момента не должен быть менее трех, то одним из способов обеспечения ненабегания сосуда на канат в этом случае может быть уменьшение тормозного усилия пропорционально массе концевого груза.

Для реализации этого способа необходимо для каждого конкретного условия применения мобильной подъемной установки рассчитывать и реализовывать необходимое тормозное усилие при наладке тормозного привода.

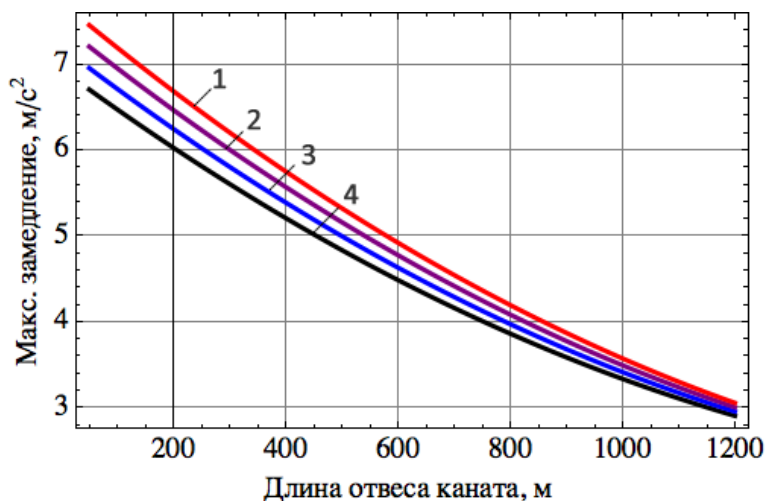
Однако анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что при длине отвеса каната 1200 м и более необходимо применение двухступенчатого торможения, так как допустимая кратность тормозного усилия становится меньше трех, что противоречит требованиям Правил безопасности. При этом максимальное тормозное усилие с  $\gamma = 3$  можно прикладывать только после остановки барабана подъемной машины.

На рис. 3 показаны допустимые замедления при подъеме груженого сосуда, полученные при математическом моделировании режимов торможения



**Рис. 3.** Допустимые замедления при подъеме клетки ( $Q = 2880$  кг) для разных длин струны каната: 1 – 30 м; 2 – 60 м; 3 – 90 м; 4 – 120 м для различных соотношений длины отвеса каната, массы концевой груза и длины струны каната с учетом динамических процессов в струне каната

На рис. 4 показаны допустимые замедления при подъеме груженой бадьи.



**Рис. 4.** Допустимые замедления при подъеме бадьи ( $Q = 720$  кг) для разных длин струны каната: 1 – 30 м; 2 – 60 м; 3 – 90 м; 4 – 120 м

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о необходимости учета динамических процессов в струне каната, что приводит к уменьшению допустимых замедлений с увеличением ее длины. Сравнение графиков на рис. 3 и рис. 4 показывает, что при одинаковом тормозном усилии допустимые замедления уменьшаются на 10...15% для меньшей массы подъемного сосуда. Необходимость замены клетки на бадью может быть вызвана состоянием армировки в стволе при ликвидации последствий аварии или несоответствием проводников и направляющих устройств клетки.

Поэтому обязательным условием обеспечения безопасности эксплуатации мобильной подъемной установки является правильная наладка максимального тормозного усилия, обеспечивающая ненабегание подъемного сосуда на канат в режиме подъема груза при выполнении требований к кратности тормозного усилия и минимальному замедлению для режима спуска расчетного груза.

Для этого необходимо определить максимальное тормозное усилие с учетом допустимого замедления при подъеме [5]:

$$F_m \leq [a_n] \cdot m_i - F_{cm}, \quad (3)$$

где  $[a_n]$  – допустимое замедление из условий ненабегания сосуда на канат;  $m_i$  – приведенная масса движущихся элементов подъемной установки;  $F_{cm}$  – максимальное статическое усилие в верхнем сечении каната.

Используя полученное максимальное значение тормозного усилия необходимо проверить выполнение условия (3):

$$\gamma = \frac{F_m}{F_{cm}} \geq 3, \quad (4)$$
$$a_{cm} = (F_m - F_{cm}) \cdot m_{np} \geq 1,5m/c^2.$$

Если эти условия выполняются, то необходимо по известной методике [5] рассчитать величину затяжки пружинного блока гидropружинного привода тормоза:

$$H_\delta = \frac{F_m - gG_n}{z}, \quad (5)$$

где  $F_m$  – необходимое тормозное усилие;  $G_n$  – масса подвижных деталей привода тормоза, участвующих в предохранительном торможении;  $z$  – жесткость пружинного блока (по данным завода-изготовителя);  $g$  – ускорение свободного падения.

При большой глубине подъема и, соответственно, большой массе каната по отношению к массе концевого груза возможно, что условие 3 не выполняется при расчетном значении тормозного усилия. В этом случае необходимо применять систему избирательного торможения, что дает возможность прикладывать максимальное тормозное усилие только при снижении скорости барабана до минимальной скорости резкого торможения.

Как показывает анализ конкретных условий применения мобильной подъемной установки АСППУ-6,3, такая необходимость возникает при глубинах подъема более 900...1000 м и вынужденном применении в качестве подъемного сосуда легкой проходческой бабды. В этом случае после размещения подъемной установки около шахтного ствола согласно проекту ее применения необходима дополнительная наладка пружинного блока привода тормоза.

### Выводы

1. Получены зависимости допустимых замедлений при торможении в режиме подъема груза для различных соотношений длины отвеса каната, массы концевого груза и длины струны каната с учетом и без учета динамических процессов в струне каната. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что учет влияния динамики струны снижает величину допустимых замедлений на 7...12%, причем, это влияние усиливается при уменьшении длины отвеса каната и массы концевого груза.

2. При использовании мобильной подъемной установки для глубоких шахт из-за усиления влияния динамических процессов в отвесе каната выполнение требований Правил безопасности  $a_n \leq 5m/c^2$  обеспечивает ненабегание клетки на канат только до глубины подъема 800 м, а бабды – до 480 м. Так, например, для глубины подъема 1200 м допустимые замедления при подъеме клетки и бабды составляют  $3,56m/c^2$  и  $2,48m/c^2$  соответственно.

3. Разработанная методика выбора рациональных параметров режимов торможения позволяет обеспечить правильную наладку тормозного привода из условий ненабегания подъемного сосуда на канат в режиме подъема груза при выполнении требований к кратности тормозного усилия и минимальному замедлению для режима спуска расчетного груза.

4. Применение разработанной методики специалистами проектных организаций и горноспасательной службы позволит обеспечить эффективное и безопасное применение подъемной установки АСППУ-6,3 при ликвидации последствий аварий в шахтных стволах и эвакуации людей с подземных горизонтов.

### Список литературы

1. Правила безпеки в вугільних шахтах (НПАОП 10.0 –1.01–05). – К.: Відлуння, 2005. – 398 с.
2. Правила технічної експлуатації вугільних шахт (СОУ 10.1 – 00185790 – 002 – 2005). – Київ: Мінвуглепром України. – 2005. – 353 с.
3. Самуся С.В. Анализ результатов экспериментальных исследований динамических процессов в струне и отвесе каната мобильной подъемной установки / С.В. Самуся // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 83. – С . 118–126.
4. Ільїн С.Р. Дослідження взаємодії коливальних процесів в струні та виску каната при гальмуванні мобільної підйомної установки / С.Р. Ільїн, С.В. Самуся // Зб. наук. праць НГУ. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2007. – №27. – С. 94–98.
5. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок / В.Р. Бежок, В.Г. Калинин, В.Д. Коноплянов, Е.М. Курченко. – Донецк: Донеччина, 2009. – 672 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.*



# ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

**О.Ю. Шестаков**

(Україна, м. Дніпро, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)

## CONSIDERATION OF CONDITION TO GETTING MAXIMUM POWER FROM RENEWABLE ENERGY SOURCE, LIKE PHOTOVOLTAIC PANELS

**Анотація.** Стаття освітлює можливий алгоритм роботи фотоелектричної панелі для досягнення максимальної потужності на виході. Виконано аналіз алгоритмів і представлено схемотехнічне рішення фотоелектричної системи живлення. Представлено висновки відносно залежності остаточної ефективності роботи перетворювача від внутрішніх компонентів.

**Ключові слова:** ВДЕ, фотоелектрична комірка, ПТМП, перетворювач

**Аннотация.** Статья освещает возможный алгоритм работы фотоэлектрической панели для достижения максимальной мощности на выходе. Выполнен анализ алгоритмов и представлен схемотехнические решения фотоэлектрической системы питания. Представлены выводы относительно зависимости окончательной эффективности работы преобразователя от внутренних компонентов.

**Ключевые слова:** ВИЭ, фотоэлектрическая ячейка, ПТММ, преобразователь.

**Annotation.** Possible work algorithm of photovoltaic system for getting maximum output power is described. Analyze of different algorithms and schemotechnic result of photovoltaic supply system is carried out. Depending on the findings regarding the final performance of the converter of the internal components is drawn.

**Key words:** RES, photovoltaic cell, MPPT, inverter

**Introduction.** In autonomous electric supply systems more and more are used renewable energy sources. They are not sources with constant power. So, in common scheme we should add inverter. Inverter will provide electromagnetic compatibility and maximum power point tracking algorithm.

**Main.** The electric current generated in the semiconductor is extracted by contacts to the front and rear of the cell. Light generated electron-hole pairs on both sides of the junction. The minority carriers-electrons from the p-side and holes from the n-side then diffuse to the junction and are swept away by the electric field, thus producing electric current across the device. The p-n junction separates the carriers with opposite charge, and transforms the generated current  $I_g$  between the band into an electric current across the p-n junction.

The external characteristics of a solar cell are the property of current versus voltage (Figure 1). An ideal characteristic would be rectangular in shape.

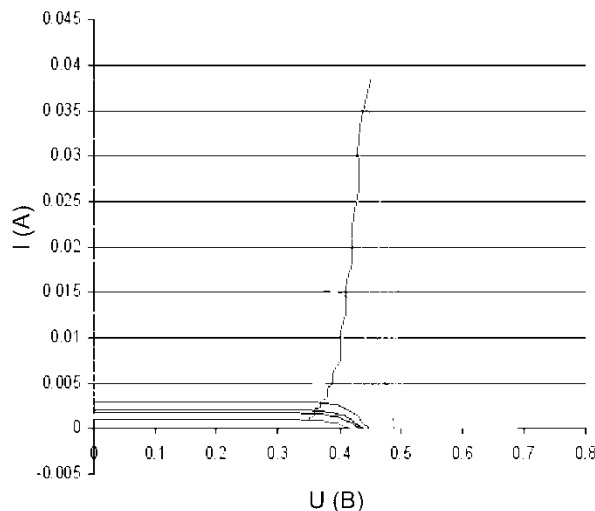


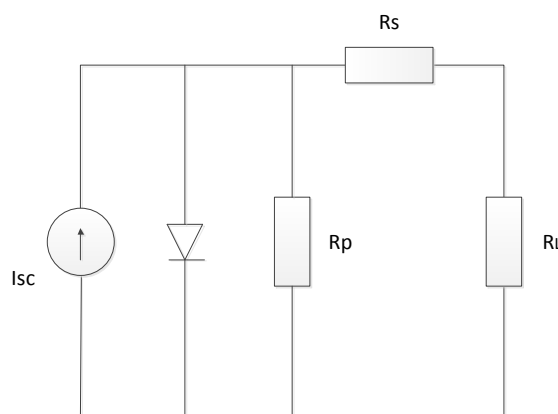
Figure 1 – IV-curve with maximum power point

As shown in Figure 1, each different level of incident radiation results in a different characteristic. The intercept of a characteristic on the current axis represent zero voltage drop across the cell terminals and is the short circuit current  $I_{SC}$ , which is directly proportional to the incidental light intensity. The intercept of a characteristic on the voltage axis represents zero current and is the open-circuit voltage  $V_{OC}$ . Most cells operate with a working direct voltage level of less than 1V.

Most solar cell loads are resistive in nature. A load resistor  $R_L$  can be represented in the I-V plane by a straight line through the origin. Load resistance can vary from zero for short circuit to infinity for open circuit operation. In order to deliver the maximum possible power, for a specified level of insolation,  $R_L$  must satisfy the relationship

$$R_L = R_{MP} = V_{MP} / I_{MP}.$$

The electrical scheme of a photovoltaic cell can be approximated by the equivalent circuit shown on Fig. 2.



**Figure 2 – Equivalent circuit model of a solar cell**

A current source which delivers its short circuit current  $I_{SC}$ . There is a diode shunt connected across the current source representing the diffusion current through the p-n junction. Internal series and parallel resistances are represented by  $R_S$  and  $R_p$  respectively. The former is due to transmission of electric current produced by the solar cell involves omics losses. It is seen that series resistance affects the cell operation mainly by reducing the FF.

On Figure 6(a) presented equivalent scheme that can be described by equation

$$I_L = I_{nd}(W) - I_0 \left[ \exp \frac{qU_L}{kT} - 1 \right] \Leftrightarrow U_L = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_{nd}(W) - I_L}{I_0} + 1 \right].$$

Where  $I_L$  - current on the load,  $I_0$  - reverse current of saturation,  $q$  - charge of electron,  $T$  - absolute temperature,  $k$  - Boltzmann constant,  $U_L$  - voltage on the load,  $I_{nd}$  - minority carrier current, which generated by luminous flux.

To get maximum power from one solar cell is used electronic algorithm Maximum Power Point Tracking (MPPT). MPPT is a fully electronic system that varies the electrical operating point of the modules so that the modules are able to deliver maximum available power from solar module. Additional power harvested from the modules is then made available as increased battery charge current.

Photovoltaic cells have a complex relationship between their operating environment and the maximum power that they can produce. In tabulated data it is often used to estimate the maximum power that a cell can provide with an optimal load under given conditions,

$$P = FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC},$$

where  $FF$  - is fill factor of solar module,  $V_{OC}$  - open-circuit voltage and  $I_{SC}$  - short-circuit current.

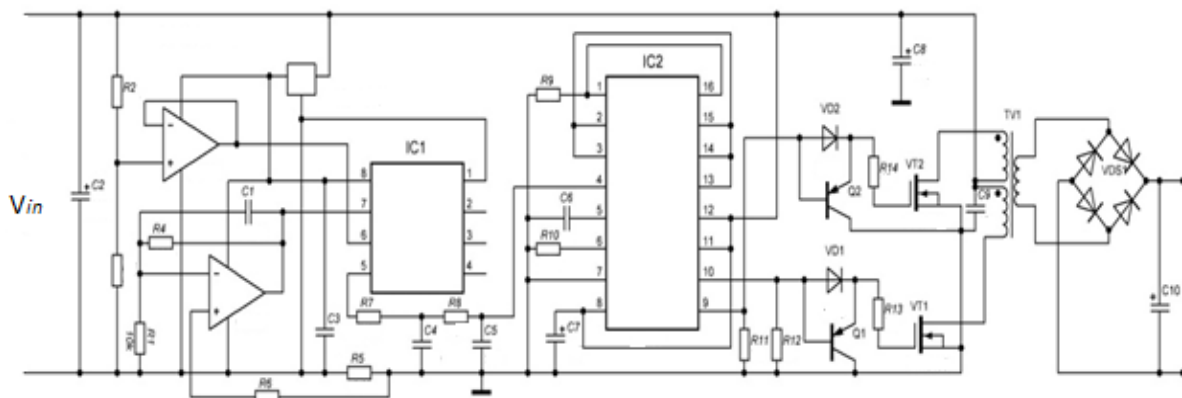
For most purposes  $FF$ ,  $V_{OC}$  and  $I_{SC}$  are enough information to give a useful approximate model of the electrical behavior of a photovoltaic cell under typical conditions. For any given set of operational conditions, cells have a single operating point where the values of the current ( $I$ ) and Voltage ( $V$ ) of the cell result in a maximum power output. These values correspond to a particular load resistance, which is equal to  $V/I$  as specified by Ohm's. The power  $P$  is given by  $P=V \cdot I$ . A photovoltaic cell, for the majority of its useful curve, acts as a

constant current source. However, at a photovoltaic cell's MPP region, its curve has an approximately inverse exponential relationship between current and voltage. From basic circuit theory, the power delivered from or to a device is optimized where the derivative (graphically, the slope)  $dI/dV$  of the I-V curve is equal and opposite the  $I/V$  ratio (where  $dP/dV=0$ ). This is known as the maximum power point (MPP) and corresponds to the "knee" of the curve.

A load with resistance  $R=V/I$  equal to the reciprocal of this value draws the maximum power from the device. This is sometimes called the 'characteristic resistance' of the cell. This is a dynamic quantity which changes depending on the level of illumination, as well as other factors such as temperature and the age of the cell. If the resistance is lower or higher than this value, the power drawn will be less than the maximum available, and thus the cell will not be used as efficiently as it could be. Maximum power point trackers utilize different types of control circuit or logic to search for this point and thus to allow the converter circuit to extract the maximum power available from a cell. Controllers usually follow one of three types of strategies to optimize the power output of an array. Maximum power point trackers may implement different algorithms and switch between them based on the operating conditions of the array. The quantity of output power function derivate on voltage should be equal zero in maximum power point. Signal of mismatch is defined by formula:

$$e = \frac{I(n) - I(n-1)}{U(n) - U(n-1)} + \frac{I(n)}{U(n)}.$$

On the scheme that presented on Figure 3 used microcontroller to calculate the value of filling coefficient. Special algorithm was developed for getting maximum power point in using solar panel.



**Figure 3 – Electronic structure scheme for maximum power point tracking algorithm**

This algorithm has next steps:

- 1). during 20 milliseconds is control point of comparing voltage and current of photovoltaic panel;
- 2). after every 20 milliseconds microcontroller make a decision what will be next;
- 3). compare going on with the rated value of photovoltaic panel. If getting voltage value less than rated microcontroller decrease duty cycle of pulse width modulation;
- 4). If the value on photovoltaic panel more than rated value program going to compare with previous results;
- 5). First of all it is checking what was in previous cycle;
- 6). If it was decreasing of duty cycle and voltage is increase – continue decreasing;
- 7). If it was increasing of duty cycle and result become better – added one more time to duty cycle.

Program always try to find point of maximum power but not less than rated value of voltage. It is simple and useful method. Here is also other types of power point tracking: perturb and observe, incremental conductance, current sweep, constant voltage.

Both perturb and observe, and incremental conductance, are examples of "hill climbing" methods that can find the local maximum of the power curve for the operating condition of the PV array, and so provide a true maximum power point.

The perturb and observe method can produce oscillations of power output around the maximum power point even under steady state irradiance.

Some example of algorithm:

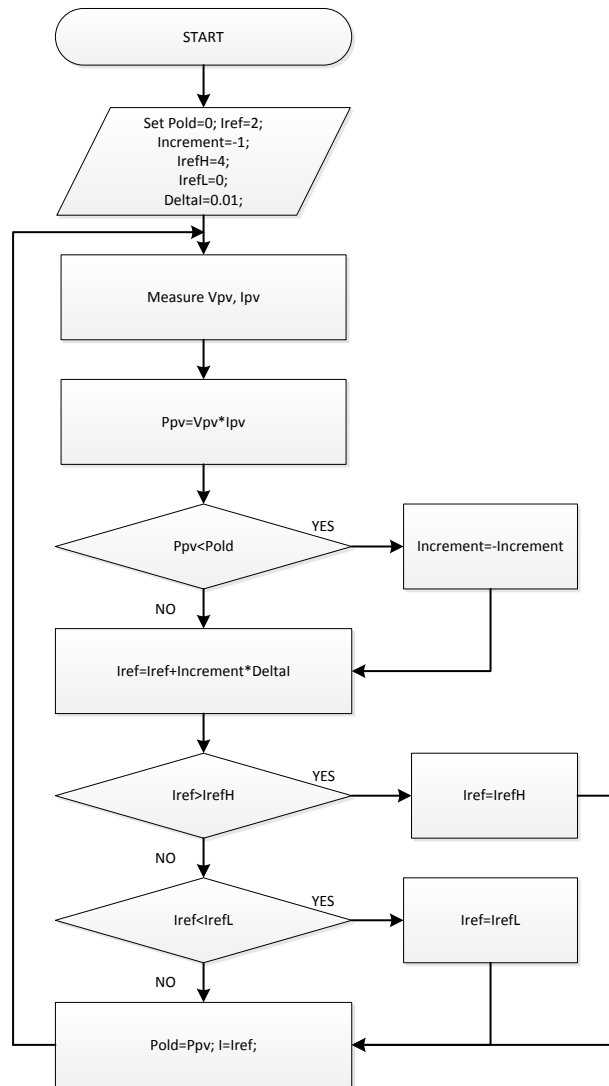


Figure 4 – Example of incremental algorithm

The incremental conductance method has the advantage over the perturb and observe method that it can determine the maximum power point without oscillating around this value. It can perform maximum power point tracking under rapidly varying irradiation conditions with higher accuracy than the perturb and observe method. However, the incremental conductance method can produce oscillations and can perform erratically under rapidly changing atmospheric conditions. The computational time is increased due to slowing down of the sampling frequency resulting from the higher complexity of the algorithm compared to the P&O method.

In the constant voltage ratio method, the current from the photovoltaic array must be set to zero momentarily to measure the open circuit voltage and then afterwards set to a predetermined percentage of the measured voltage, usually around 76%. Energy may be wasted during the time the current is set to zero. The approximation of 76% as the  $MPP/V_{OC}$  ratio is not necessarily accurate though. Although simple and low-cost to implement, the interruptions reduce array efficiency and do not ensure finding the actual maximum power point. However, efficiencies of some systems may reach above 95%.

Another problem that occurs during using renewable complex is losing power in inverter by transformation. Since inverter is one link in whole chain of transformation energy converting occur with losses, i.e. only part of input energy that consumed inverter go to end user. Another part of energy is heat losses. The efficiency is used to describe loss effect, that is ratio of consumed power by inverter to output power. According to this is the more value of efficiency inverter has, so we have fewer losses (Figure 3).

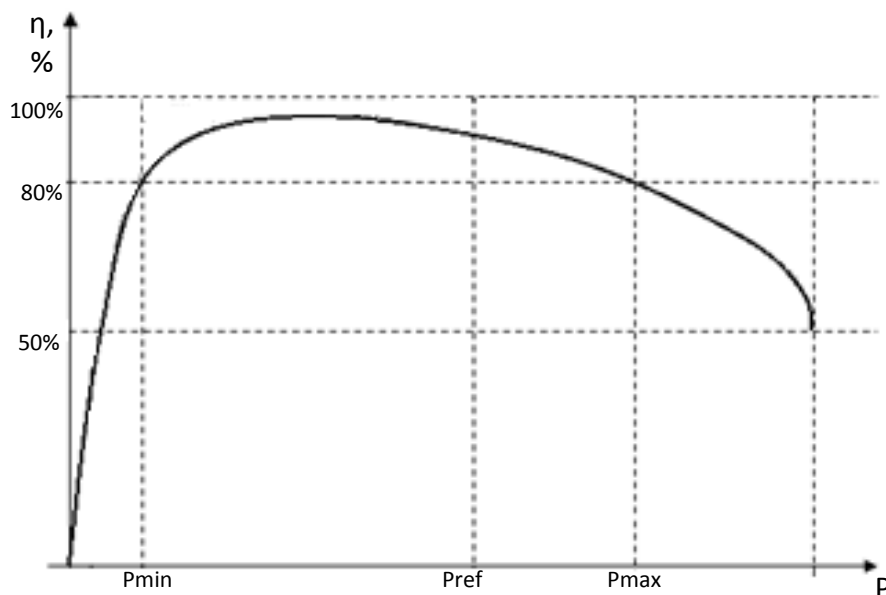


Figure 5 – Analytical graph depending of efficiency from output power

There are two modes of inverter working: continuous and periodic. During work in continuous mode calculation of efficiency is making by known formula: ratio of inverter output power to input power. During use inverter in a periodic mode efficiency will be consist efficiency in time of work plus value in open-circuit work.

**Conclusion.** For best using of renewable sources we need to include not only parameters of maximum power of solar module itself, but also take into consideration value of losses of all part of the scheme.

**References:**

1. Bose, Bimal K. (2001), “Modern power electronics and AC drives”, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River
2. “Basic photovoltaic principles and methods”, U.S. Department of energy by the Midwest research Institute
3. International journal of precision engineering and manufacturing green technology “Mathematical Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Review on Small Hydro-Solar-Wind Power Generation” ; Vol. 1, No. 2, ;pp. 157-173

*Рекомендовано до друку к.т.н., професором Азюковським О.О.*

УДК 620.92+621.311

**В.І. Панченко, М.Д. Тратніков**

*(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”)*

**ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОУСТАНОВОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ**

**Анотація.** Метою роботи було навести приклади способів використання вітрогенераторів для отримання теплової та електричної енергії. Було вдосконалено конструкцію машинно- трансформаторного агрегату, наведено конструкцію комбінованої енергетичної установки та методу розрахунку співвідношень для визначення основних показників нагрівача води.

**Ключові слова:** синхронний генератор , асинхронний генератор, електронагрівачі води, машинно-трансформаторний агрегат.

**Аннотация.** Целью работы было привести примеры способов использования ветрогенераторов для получения тепловой и электрической энергии. Была усовершенствована конструкция машинно- трансформаторного агрегата, приведена конструкция комбинированной энергетической установки и методу расчета соотношений для определения основных показателей нагревателя воды.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, асинхронный генератор, электронагреватели воды, машинно-трансформаторный агрегат.

**Abstract.** The aim of this work was to give examples of ways to use wind turbines to produce thermal and electrical energy. Was upgraded the design of machine-transformer assembly. Was described the design of a combined powerplant and calculation methodology of ratios to quantify the main characteristics of the water heater.

**Keywords:** synchronous generator, asynchronous generator, electric water heaters, machine-transformer assembly.

**Вступ.** Вітроустановки в більшості випадків використовують для отримання електричної енергії за допомогою синхронних або асинхронних генераторів. При значних швидкостях вітру для створення достатнього гальмівного моменту для вітроколеса застосовують додаткове(баластне) навантаження електрогенераторів, яким може бути, як варіант, електронагрівачі води. Таке джерело тепла не є постійним в часі; при цьому перенавантажуються струмом обмотки генераторів, що вимагає більш ефективного їх охолодження. Відомо використання вітроустановки як джерела тільки теплової енергії. Така установка з ротором Дар'є має вертикальний вал, в нижній частині якого закріплено диск із магнітом'якого заліза. На внутрішній поверхні диску, по колу визначеного діаметра закріплено плоскі постійні магніти, намагнічені в осьовому напрямку, тобто перпендикулярно площині диска, і поперемінно по колу. Нижче магнітів, з деяким проміжком, розміщена ємність у виді порожнистого циліндра, яка заповнена проточною водою. Циліндр, або принаймні його верхня частина, зроблені з магнітом'якого матеріалу. При обертанні вітроколесом диска з постійними магнітами у верхній частині циліндра виникають вихрові струми, електрична енергія яких перетворюється у теплову, що потім нагріває воду.

**Постановка завдання.** Привести приклади та розрахунки одночасного отримання від вітроустановки електричної і теплової енергії.

**Викладення основного матеріалу.** Таку можливість надає використання в якості електрогенератора машинно-трансформаторного агрегата (МТА) [1, 2]. Конструктивно МТА складається з двох частин – машинної (рис. 1, зверху) і трансформаторної (рис.1., знизу), які мають загальний магнітопровід у вигляді агрегату пакети зафіксовано шляхом заливки проміжків між ними немагнітним сплавом, який утворює корпус цієї частини. У радіальному напрямку пакети 1 опираються на циліндричні боковини 2 і 3, в яких зроблені відповідні отвори для їх проходу. В трансформаторній частині агрегату на пакетах 1 розміщено котушки 4 трифазної обмотки. Нижні торці пакетів 1 притиснено до кільцевого ярма 5, навитого з ізолюваної феромагнітної стрічки. Нижня частина пакетів з котушками 4 на них та ярмо 5 розміщені у закритій ємності 6, яку заповнено електроізоляційною рідиною, наприклад, трансформаторним маслом. В середній частині ємності розміщено змійовик 7 з трубами, виведеними зовні ємності. В змійовику може протікати вода для охолодження масла та обмотки МТА, або він може бути випарником теплового насоса, виконуючи такі ж функції по охолодженню МТА. поздовжніх пакетів 1 з ізолюваних пластин електротехнічної сталі. По довжині машинної частини

На валу 8 МТА закріплено втулку ротора 9, на зовнішній поверхні якої розміщені зубчасті радіальні пакети 10 і 11, зроблені з ізолюваних пластин електротехнічної сталі і взаємно зміщені в осьовому напрямку. Крім того, зубці у вказаних пакетах взаємно зсунуто по колу на геометричний кут  $\frac{\pi}{z_2}$ , де  $z_2$  – кількість зубців в одному пакеті. У проміжку між пакетами ротора розміщено нерухому кільцеву обмотку збудження 12, прикріплену по її зовнішній поверхні до поздовжніх пакетів 1 і зроблену з провідникової стрічки. Передбачено живлення обмотки 12 постійним струмом.

При обертанні ротора МТА вітродвигуном з вертикальною віссю обертання зубці ротора безперервно змінюють своє положення відносно поздовжніх пакетів статора, що приводить до зміни розміру і напрямку магнітних потоків збудження в останніх. При цьому в котушках трифазної обмотки виникає змінна електрорушійна сила (ЕРС) з частотою  $f = \frac{z_2 n}{60}$ , де  $n$  – частота обертання ротора, об/хв.

Потужність вітродвигуна  $P_{\text{в}}$  запишемо у виді  $P_{\text{в}} = P_{\text{ел}} + \Sigma p \approx P_{\text{ел}} + P_{\text{т}}$ , де  $P_{\text{ел}}$  – електрична потужність генератора;  $\Sigma p$  – сумарні втрати потужності в ньому;  $P_{\text{т}}$  – потужність, яка перетворюється в генераторі в теплоту. Тепло від механічних втрат розсіюється у навколишньому середовищі. Тепло від електричних – виділяється в котушках обмотки статора, від магнітних – у поздовжніх пакетах та в ярмі й далі, як і від обмотки, передається трансформаторному маслу. Це тепло можна використати для опалення та гарячого водопостачання приміщень і для технологічних цілей. Очевидно, що для отримання необхідної теплової потужності необхідно відповідним чином змінити(збільшити) втрати потужності в

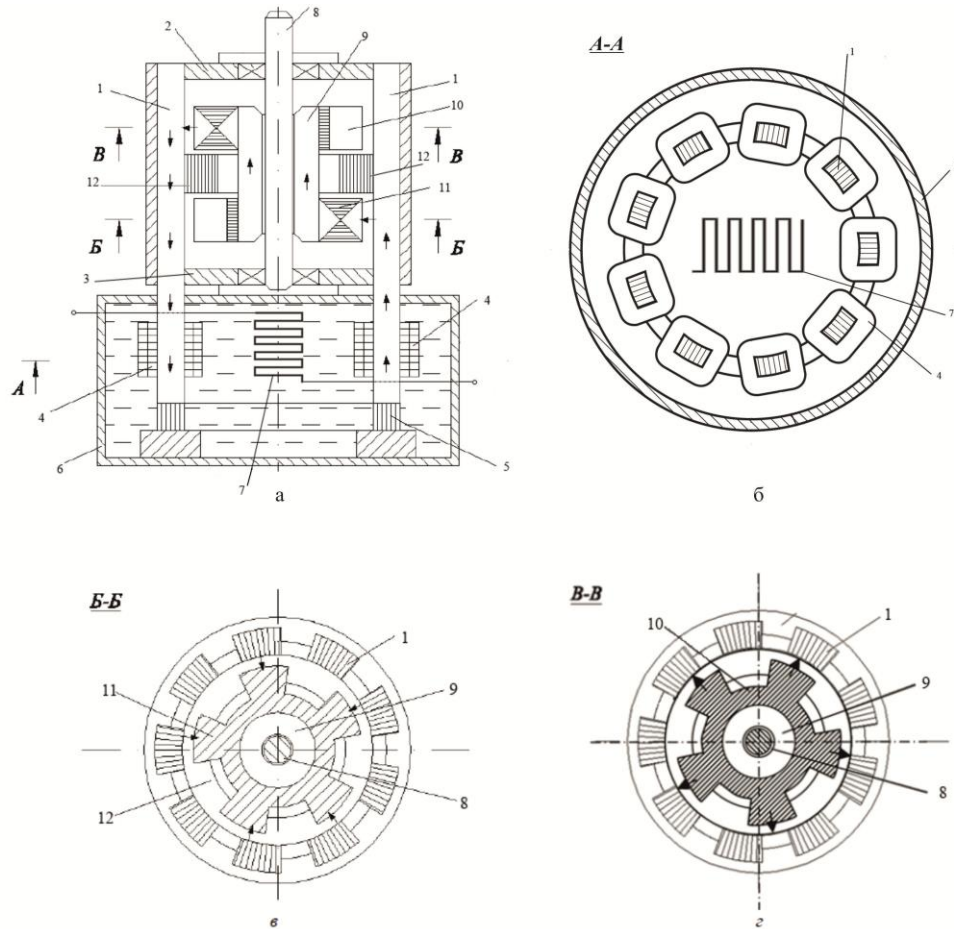


Рис.1 Конструкція машинно-трансформаторного агрегату

генераторі, тобто розрахувати генератор на відповідні значення електричної і теплової потужності за умови не перевищення допустимих температур в об'ємі трансформаторного масла. Магнітні втрати потужності не залежать від навантаження генератора і на їх розмір впливати практично неможливо. Втрати потужності в обмотці статора визначають за формулою:

$$p_{\text{ел}} = m I_{\phi}^2 R_{\phi} = j^2 \rho V_{\text{н}}, \quad (1)$$

де  $j = \frac{I_{\phi}}{S_{\text{пр}}}$  – густина струму;  $I_{\phi}$ ,  $R_{\phi}$  – фазний струм і активний опір фазної обмотки,  $m$  - число фаз;  $\rho$  – питомий опір проводу;  $S_{\text{пр}}$  – площа поперечного перерізу проводу;  $V_{\text{н}} = m S_{\text{пр}} l_{\phi}$  – об'єм міді обмотки статора;  $l_{\phi}$  – довжина проводу фазної обмотки. Збільшувати розмір  $p_{\text{ел}}$  за рахунок більшого об'єму  $V_{\text{н}}$  недоцільно, тому залишається єдиний шлях для цього – це збільшення густини струму. При заданій електричній потужності струм  $I_{\phi}$  залишиться незмінним. Густина струму  $j_1 = \frac{I_{\phi}}{S_{\text{пр}_1}} = \frac{I_{\phi}}{S_{\text{пр}}} \cdot k = jk$ , де  $S_{\text{пр}_1} = \frac{S_{\text{пр}}}{k}$ ,  $k > 1$ . Площа поперечного перерізу проводу буде зменшена в  $k$  разів, об'ємі міді  $V_{\text{н}_1} = m S_{\text{пр}_1} l_{\phi} = \frac{V_{\text{н}}}{k}$ , втрати потужності  $p_{\text{ел}_1} = (jk)^2 \frac{V_{\text{н}}}{k} \rho = \rho j^2 V_{\text{н}} k = p_{\text{ел}} k$  збільшаться у  $k$  разів при відповідному зменшенні площі поперечного перерізу проводу, тобто масо в цьому випадку значну економію міді.

Отримати одночасно електричну і теплову енергію можливо іншим шляхом, і знову за допомогою МТА, конструкція якого представлена на рис. 2. Магнітопровід статора тут зроблено з окремих поздовжніх пакетів 1 і 2, складених із взаємно ізолюваних пластин електротехнічної сталі і розміщених у два ряди (внутрішній і зовнішній) по колам різного діаметру. Кількість пакетів у кожному ряді  $Z_1 = 2p \pm k$ , де  $p$  – число пар полюсів;  $k=1,2,3 \dots$ . Внутрішній ряд пакетів розміщено по колу з діаметром розточки, тобто зовні ротора і з проміжком між ним. Поздовжні пакети обох рядів по краях сполучено між собою радіальними шихтованими пакетами 3. Конструкція ротора аналогічно представленій на рис.1. Зовнішні

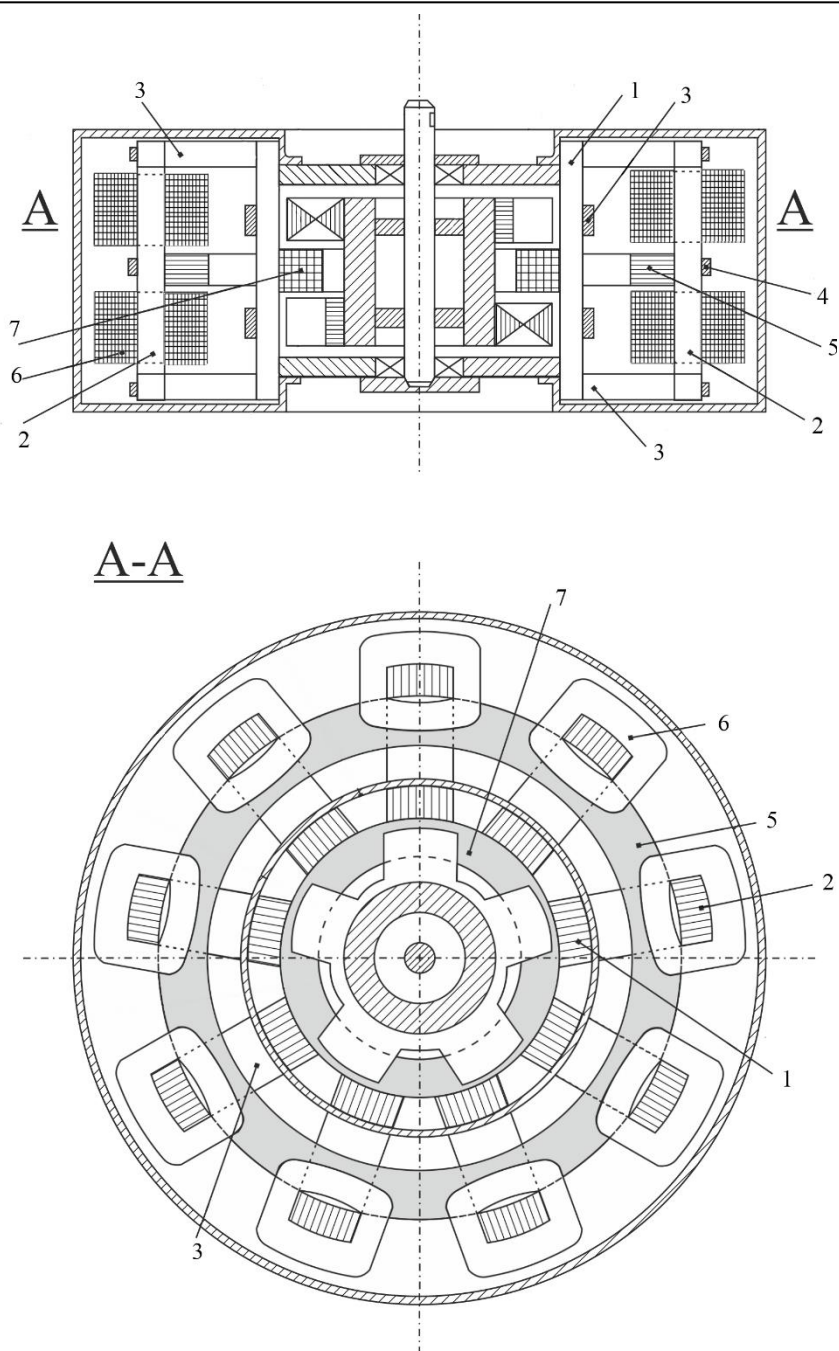


Рис.2 Поздовжній і поперечний переріз другого варіанта конструкції МТА

пакети 2 у своїй середній частині притиснено хомутом 4 до кільцевого шихтованого яра 5. Котушки 6 обмотки статора закріплено на поздовжніх пакетах 2 по обидва боки від яра. Обмотка збудження 7 зроблена кільцевою і по своїй зовнішній поверхні притиснена до внутрішніх поздовжніх пакетів. Котушки обмотки статора виконано з порожнистих провідників у вигляді мідних труб прямокутного поперечного перерізу. Передбачено безпосереднє охолодження котушок дистильованою водою, яка за допомогою насоса проходить у порожнистих провідниках і відбирає від них тепло. Нагріта таким чином вода поступає у водозбірний колектор і далі у теплообмінник, де віддає тепло, наприклад, випарнику теплового насоса. Конструкція МТА (рис.2), в якій зовнішні поздовжні пакети статора розміщені по колу значного діаметра, дозволить виконати котушки обмотки із порожнистих провідників із значними поперечними розмірами. Це забезпечить протікання в них води в об'ємі, достатньому для охолодження обмотки і отримання теплової енергії в потрібному розмірі. Максимальну за значенням і тільки теплову енергію можна отримати в режимі короткого замикання обмотки статора.



Збільшення густини струму в обмотці статора можна забезпечити за рахунок зростання розрахункового значення фазного струму  $I_{\Phi_1} = k_1 I_{\Phi}$ , де  $k_1 > 1$ . При цьому збільшується в  $k_1$  раз розрахункова потужність МТА. При одночасному зменшенні площі поперечного перерізу провідникової частини поводу в  $k_2$  раз, електричні втрати в обмотці  $p_{\text{вт1}} = \rho(j k_1 k_2)^2 \frac{V_{\text{ст}}}{k_2} = \rho j^2 k_1^2 k_2 V_{\text{ст}} = p_{\text{вт}} k_1^2 k_2$  збільшаться більш помітно в порівнянні з попереднім випадком, коли потужність МТА залишилась незмінною.

Отже, при роботі вітроустановки і використанні конструкцій МТА (рис.1,2) можливе отримання електричної і, в меншій мірі, теплової енергії, причому розмір теплової енергії залежить від електричного навантаження МТА, що в деяких випадках є неприйнятним.

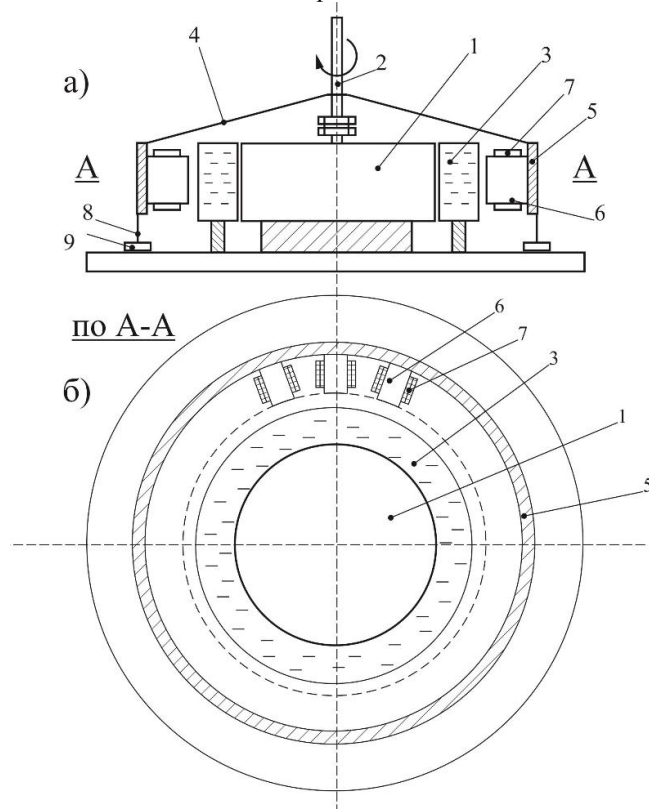


Рис.3 Комбінована енергетична установка

На рис. 3 показано конструкцію комбінованої установки, яка дозволить отримати електричну і теплову енергію незалежно одне від одного. До складу установки входить електричний генератор 1, вал якого сполучено з вертикальним валом 2 вітродвигуна. Генератор має циліндричний корпус, який вмонтовано в середню частину кільцевого бака 3, заповненого протічною водою. На опорах 4, приєднаних до валу 2, закріплено індуктор з ярмом 5 у вигляді порожнистого циліндра з магнітом'якого матеріалу та полюсів з осердями 6 і з котушками 7 обмотки збудження на них. Осердя закріплені на внутрішній поверхні ярма. З протилежного від ярма боку осердя 6 можуть мати полюсні наконечники. Між ними та зовнішньою поверхнею бака 3, яка виконує функцію якоря, має місце повітряний проміжок. Котушки 7 сполучені між собою таким чином, щоб забезпечити поперемінну зміну полярності полюсів при живленні обмотки збудження постійним струмом. Виводи обмотки збудження сполучені з контактними кільцями, закріпленими на валу 2 з відповідною електричною ізоляцією між ними та валом. Ярмо 5 опирається на стрижні 8, знизу яких закріплені коліщата 9, що зменшить навантаження на опори 4. При обертанні валу 2 силою вітру і живленні обмотки збудження постійним струмом магнітні потоки полюсів, які рухаються разом з ярмом, пронизують зовнішню стінку кільцевого бака і викликають появу в ній вихрових струмів. Стінка бака нагрівається і це тепло передається воді, яка відповідним чином рухається – спочатку оминаючи внутрішню поверхню бака з метою охолодження обмоток генератора 1, далі до зовнішньої стінки бака для досягнення нею потрібної температури. Регулюючи розмір струму живлення можна змінювати температуру та об'єм нагрітої води і таким чином впливати на навантаження вітродвигуна, особливо при великій швидкості вітру. Електричний генератор 1 працює незалежно від процесу нагріву води. Зважаючи на роботу [3], наведемо формули для розрахунку деяких показників нагрівача води. На рис. 4 показана схема для ілюстрації розрахункових співвідношень з позначенням деяких розмірів.

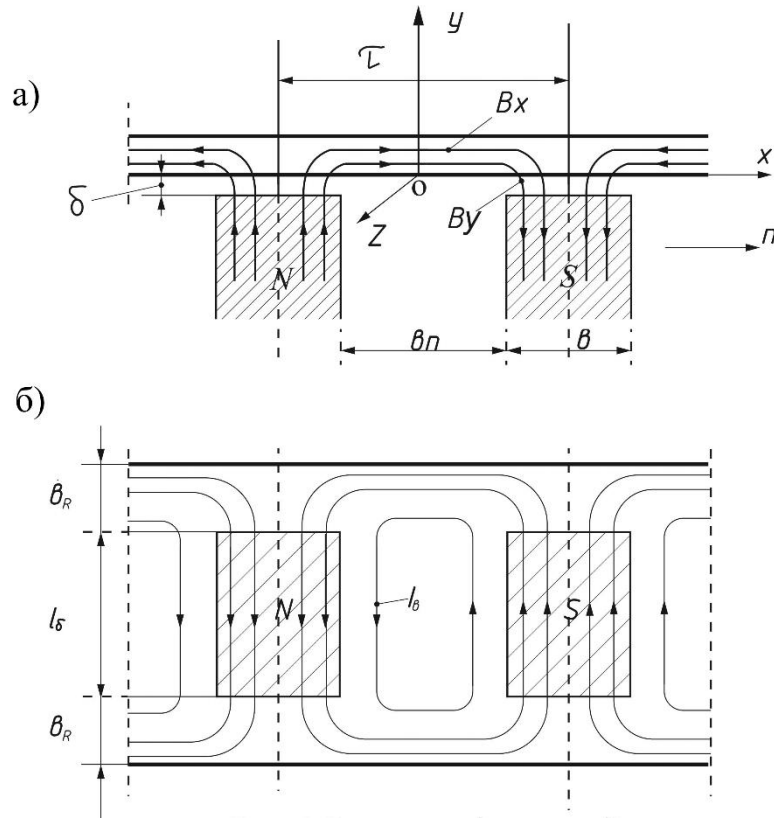


Рис.4 Схеми для ілюстрації розрахункових співвідношень

Пропонується наступний порядок розрахунків:

1) Задають електромагнітну (теплову) потужність нагрівача, як частину загальної потужності вітро-двигуна.

$$P_{em} = P_T = w\pi D l_{\delta}, \quad (2)$$

де  $w$  –питомі втрати потужності (на одиницю поверхні якоря),  $\frac{Вт}{м^2}$ ;  $D$  -зовнішній діаметр якоря, м;  $l_{\delta}$  - осьова довжина полюса, м.

2) Вибирають матеріал якоря або бака в цілому. По відомій кривій намагнічування  $B_m(H_m)$  будують залежності  $\mu_s = f_1(H_m)$  і  $\sqrt{\mu_s} H_m = f_2(H_m)$ , де  $\mu_s$  – статична магнітна проникність матеріалу;  $B_m, H_m$  - амплітудні значення магнітної індукції і напруженості магнітного поля.

3) Із порівняння кривих  $B_m(H_m)$  і  $\sqrt{\mu_s} H_m = f_2(H_m)$  приймають граничне значення  $(\sqrt{\mu_s} H_m)_{гр}$ , тобто таке, що дає змогу уникнути значного магнітного насичення якоря і визначають графічно відповідні величини  $\mu_s$  і  $H_m$ .

4) Розраховують глибину проникнення електромагнітної хвилі в якір

$$y_k = 6,72 \sqrt{\frac{\rho_p}{\pi n \mu_s}}, \quad (3)$$

де  $\rho_p = \xi \rho$ ;  $\rho$  –питомий електричний опір матеріала якоря;  $\xi$ -коефіцієнт, що враховує кінцевий ефект;  $\rho$  – число пар полюсів індуктора;  $n$ - частота обертання індуктора, об/хв.

Товщина якоря(стілки бака) повинна бути не меншою значення  $y_k$ .

5) Питомі втрати потужності (максимальне значення)

$$w = \frac{1,1 H_{m \max}^2 \rho_p}{y_k}, \quad (4)$$

де  $H_{mx_0}$  – амплітудне значення напруженості магнітного поля на поверхні якоря при  $x = 0$  (рис.4), яке дорівнює  $H_m$ , визначеному в пункті 3.

6) Осьова довжина полюса

$$l_\delta = \frac{P_{эм}}{\pi D w}, \quad (5)$$

де діаметр  $D$  визначають, виходячи із діаметра корпусу генератора і радіального розміру бака.

7) Конструктивна висота якоря

$$l = l_\delta + 2b_R, \quad (6)$$

де сумарну довжину кінцевих частин  $2b_R$  згідно [2] можна прийняти такою :  $2b_R = 0,13\tau$ ,  $\tau = \frac{\pi D}{2p}$  – полюсна поділка індуктора.

8) Магнітна індукція у повітряному проміжку

$$B_\delta = \frac{\sqrt{\mu_s H_m}}{0,1 k_y \tau \sqrt{p_p}}, \quad (7)$$

де  $k_y = \sin\left(\frac{b_p \pi}{\tau}\right)$  – коефіцієнт;  $b_p = b + 2\delta$  – розрахункова ширина полюса,  $b$  – його реальна ширина;  $\delta$  – повітряний проміжок, м. Це значення індукції є максимально допустиме, виходячи із магнітного насичення якоря, і воно бажано, щоб не перевищувало 1,2 Тл.

9) Рівняння магніторушійних сил (МРС) для контура, що включає два полюси, два повітряних проміжка та відповідні частини якоря і ярма індуктора має вид :

$$\begin{aligned} 2F_1 &= 2F_\delta + 2F_R + 2F_n + k_{ад} F_2 = \\ &= 2F_\delta(1 + \gamma) + k_{ад} F_2 = 2I_k w_k, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $F_\delta, F_R, F_n$  – скадові МРС для подолання магнітним потоком збудження, відповідно, повітряного проміжку, ярма, якоря та полюса ;  $F_2$ - амплітуда МРС реакції якоря на пару полюсів ;  $\gamma = \frac{F_R + F_n}{F_\delta}$  – коефіцієнт;

$I_k, w_k$  – струм і число витків котушки полюса;  $k_{ад}$  – коефіцієнт реакції якоря,  $k_{ад} = 0,8 \div 0,85$ .

Модуль МРС котушки

$$2F_1 = \sqrt{4F_\delta^2(1 + \gamma)^2 + (F_2 k_{ад})^2 + 4F_\delta(1 + \gamma)F_2 k_{ад} \sin \varphi}, \quad (9)$$

де  $F_\delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ ;  $F_2 = \frac{2\tau}{\pi} H_{mx_0} = \frac{D}{p} H_m$ ;  $\gamma = 0,4 \div 0,6$ ;  $\sin \varphi = 0,59$ ,  $\varphi = 36^\circ$ .

10) Задають густину струму  $j$  в котушці , наприклад,  $j = 3,5 \frac{А}{мм^2}$  і діаметр провідника  $d$ . Тоді площа його поперечного перерізу  $s_{пр} = \frac{\pi d^2}{4}$  і розмір струму в котушці  $I_k = j s_{пр}$ .

11) Число витків котушки

$$w_k = \frac{F_1}{I_k}. \quad (10)$$

12) Площа “вікна” для розміщення котушки

$$S_k = \frac{F_1}{j \cdot K_{эм}}, \quad (11)$$

де  $K_{эм}$  – коефіцієнт заповнення площі міддю,  $K_{эм} \cong 0,65$ .

13) Приймаючи значення коефіцієнта  $K_y = \sin\left(\frac{b_p}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,75$ , знаходять відношення  $\frac{b_p}{\tau} = 0,54$ . Тоді ширина полюса  $b = b_p - 2\delta$ . Ширина паза  $b_n = \tau - b = 0,46\tau + 2\delta$ . В пазу розміщують дві котушки. Ширина однієї з них  $b_k \approx 0,5b_n \approx 0,23\tau + \delta = 0,23\tau$ . Висота котушки

$$h_k = \frac{S_k}{b_k} \quad (12)$$

14) Гальмівний момент, який створює індуктор нагрівача ,

$$M_T = 9,55 \frac{P_{зм}}{n} \quad (13)$$

Із наведених співвідношень слідує, що для отримання максимального значення  $w$  і прийнятної  $V_\delta$ , необхідно зробити індуктор з достатньо великою кількістю полюсів. При цьому треба зважати на мінімально допустимий розмір полюсної поділки, виходячи при цьому із конструктивних міркувань.

#### **Висновки.**

1. Розглянуто дві конструкції машинно-трансформаторного агрегату, розрахованих на отримання електричної і теплової енергії при їх використанні у вітроенергетичних установках.
2. Описано конструкцію комбінованої енергетичної установки, в якій за допомогою вітродвигуна можливо отримати незалежно і електричну і теплову енергію з можливістю регулювання розміру останньої.
3. Запропоновано методику розрахунку і наведено співвідношення для визначення основних показників нагрівача води, що входить до складу комбінованої енергетичної установки.

#### **Список літератури**

1. Патент UA 103685 . Машинно – трансформаторний агрегат / В.І. Панченко / Промислова власність, 2013, Бюл. № 21 .
2. Panchenko V.I. Machine-transformer Units for Wind Turbines / V.I. Panchenko, D.V. Tsyplenkov, A.M. Grebeniuk, M.S. Kyrychenko. // Electrical engineering & electromechanics. – Kharkiv. NTU "KhPI". 2016. № 1. – P. 33-37.
3. Поздеев А.Д., Розман Я.Б. Электромагнитные муфты и тормоза с массивным якорем, М.-Л., Госэнергоиздат, 1963,104 с.

*Рекомендовано до друку к.т.н., доцентом Циценковим Д.В.*

УДК 621.311

**В.В. Бердник**

*(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ «Національний гірничий університет»)*

### **ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ**

**Анотація.** Розглянуто можливість використання відновлюваних джерел з метою забезпечення живлення споживачів малої та середньої потужності. Виконано аналіз та класифікацію електроустановок, які потрапляють до категорій мобільних, пересувних та автономних. Представлено аналіз існуючих систем резервного живлення малопотужних споживачів електроенергії. Наведено порівняння, щодо ефективності використання названих систем відносно до систем резервного живлення на базі генераторів електроенергії.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, резервне живлення, генератор електроенергії, електроустановка, фермерські господарства, геологорозвідувальне обладнання, системи електроживлення.

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования возобновляемых источников с целью обеспечения питания потребителей малой и средней мощности. Выполнены анализ и классификация электроустановок, попадающих в категории мобильных, передвижных и автономных. Представлен анализ существующих систем резервного питания маломощных потребителей электроэнергии. Приведено сра-

*внение ефективности использования названных систем по отношению к системам резервного питания на базе генераторов электроэнергии.*

**Ключевые слова:** *возобновляемые источники энергии, резервное питание, генератор электроэнергии, электророзстановка, фермерские хозяйства, геологоразведочное оборудование, системы электропитания.*

**Abstract.** *The usage of renewable sources aimed at providing power supply for low and average power facilities is described. The analysis and classification of electrical installations that fall within the categories of mobile, portable and autonomous are presented. The analysis of existing standby power systems which supply low-power consumers is mentioned. The efficiency of standby power systems based on renewable sources of energy usage is compared with that of standby power systems based on electricity generators.*

**Keywords:** *renewable energy, standby power supply, generator of electricity, electrical installation, farm enterprises, prospecting equipment, systems of electrical power supply.*

**Вступ.** Нині, у зв'язку з необхідністю обґрунтування технічної та економічної доцільності створення систем доставки електроенергії, питання забезпечення електроенергією мобільних, пересувних та автономних установок невеликої потужності стають досить актуальними. При цьому поки що, неопрацьовані можливості використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії для живлення зазначених споживачів.

**Мета.** Описання можливості створення систем живлення на базі відновлюваних джерел енергії.

**Основна частина.** До мобільних споживачів енергії належать портативні електронні пристрої невеликого розміру та потужності. Такими пристроями можна вважати обладнання для геофізичних робіт. Геофізичними роботами називають [1] групу методів, заснованих на вивченні природних і штучно створених фізичних полів (електричних, акустичних та ін.), фізичних властивостей гірських порід, пластових флюїдів, змісту і складу різних газів у буровому розчині. Геофізичне обладнання можна поділити на категорії залежно від призначення для того чи іншого виду робіт.

Електророзвідувальне обладнання призначене для [1] створення електромагнітного поля та вимірювання параметрів постійної та змінної напруги при проведенні геофізичних робіт з метою геологічного картування, пошуку корисних копалин та ін. Для вивчення невеликих глибин (до 500 м) використовуються переносні прилади та обладнання: генератори сигналів, вимірювачі, тощо. Розвідка великих глибин (понад 0,5 км) здійснюється за допомогою електророзвідувальних станцій (ЕРС). Потужні ЕРС являють собою комплект апаратури, змонтованої на транспортному засобі і призначеної для виконання електророзвідувальних робіт. До складу ЕРС зазвичай входить генераторна група, що включає в себе потужне (10-20 кВт) джерело в якості генераторів постійного струму, ротори яких обертаються від двигуна автомобіля, через спеціальну коробку відбору потужності, а також вимірювальна лабораторія, яка забезпечує перетворення сигналу електромагнітного поля (посилення, фільтрацію, тощо) до виду, зручного для реєстрації його в цифровій або аналоговій формі.

За типом транспортного засобу виділяють:

- наземні електророзвідувальні станції, що встановлюються на автомобілях або всюдиходах;
- аероелектророзвідувальні станції, що розміщуються на літаках або вертольотах;
- морські – на кораблях.

– За призначенням:

- універсальні електророзвідувальні станції для роботи декількома електророзвідувальними методами (магнітотелуричного поля, опорів, електромагнітного зондування);
- спеціалізовані станції для дослідження одним методом (методом викликаної поляризації або аероіндуктивними методами).

Прискорене геологічне картування і пошук корисних копалин на глибинах до 200 м виконується за допомогою аероелектророзвідувальних станцій.

Геофізичними роботами також вважаються сейсмозвідка та магнітометрія. Сейсмозвідувальне обладнання призначене для [1] дослідження земної кори, розвідки корисних копалин та оцінки вібровпливу на будинки та ґрунтові масиви за рахунок вивчення поширення пружних хвиль, які визвані невибуховими або вибуховими джерелами сейсмічної активності. До таких належать: переносні сейсмостанції, регістратори сейсмічних сигналів, сейсмоприймачі тощо. Обладнання для магнітометрії використовується при виконанні наземної магніторозвідки, з метою пошуку родовищ корисних копалин або пошуку прихованих намагнічених об'єктів.

Електророзвідувальні станції, отримують живлення переважно від дизельних або бензогенераторів малої (до 10кВт) потужності. Враховуючи ймовірну нестачу електроенергії при тривалій експлуатації

приладів, а також високу вартість бензину та його вплив на навколишнє середовище, існує необхідність створення систем основного і резервного живлення, в якості портативних зарядних пристроїв на сонячних елементах, тощо.

До пересувних споживачів відносять ті, які розміщуються на візках, волокушах, тощо та пересуваються за допомогою транспортних засобів, або змонтовані на них [2]. Даний тип споживачів характеризується більшою вагою, габаритами та споживаною потужністю у порівнянні з мобільними. Прикладом може бути геологорозвідувальне обладнання.

Установки для геологорозвідувальних робіт живляться переважно від пересувних або тимчасових ліній електропередачі чи дизельних генераторів середньої (від 10 до 100 кВт) потужності. Згідно РД 05-334-99 [2], пересувними ЛЕП називають повітряні лінії електропередачі, які виконуються на опорах з наземними основами та які періодично переміщуються за допомогою транспортних засобів. Тимчасовими ЛЕП – стаціонарні лінії електропередачі з обмеженим терміном експлуатації, від 5 до 7 років.

Геологорозвідувальні роботи – це комплекс різних спеціальних екологічних та інших робіт, які проводяться з метою пошуку, виявлення та підготовки до промислового освоєння родовищ корисних копалин [3]. До переліку обладнання, використовуваного при геологічних розвідках, відносять:

- бурові установки (БУ) [3] та самохідні БУ для буріння вертикальних та похилих геологорозвідувальних свердловин. Самохідні БУ використовують переважно для буріння свердловин у віддалених регіонах;
- глиномішалки для приготування розчинів з грудкових глин та глинопошків на бурових та глинистих станціях;
- дегазатори. Обладнання, за допомогою якого здійснюється вивільнення циркулюючого через геологорозвідувальну свердловину розчину від надлишків газу;
- бурові поршневі насоси. Призначені для нагнітання промивних розчинів у свердловину при геологорозвідувальних роботах, виконання промивних і продувних робіт та ін.

Обладнання для геологорозвідувальних робіт використовується для тимчасових операцій, переважно на відкритій місцевості. Встановлення або підведення пересувних ЛЕП в деяких випадках є економічно недоцільним у зв'язку з великою вартістю монтажних робіт, зі старінням, розкраданням ЛЕП. Тимчасові ЛЕП встановлюються на 5-7 років, що значно більше ніж термін виконання робіт. Використання дизельних станцій також економічно недоцільно через постійну необхідність у паливі. За таких умов існує необхідність створення систем основного і резервного живлення на базі відновлюваних джерел енергії. Такими системами можуть бути мобільні сонячні, вітрові або гібридні електростанції, які використовують декілька джерел ВДЕ.

До віддалених та автономних належать споживачі електроенергії, які через економічну недоцільність проведення стаціонарних або тимчасових ліній електропередачі не залежать від зовнішньої електромережі, а тому живляться від власних електростанцій, бензинових або дизельних генераторів, вітряків, сонячних панелей тощо. Прикладами таких установок можуть бути віддалені будинки в гірській місцевості, фермерські господарства, роботи вахтовим методом та ін., для живлення яких використовують пересувні електростанції з дизельними або бензиновими (карбюраторними) двигунами внутрішнього згоряння малої та середньої потужності.

Фермерські господарства (ФГ) використовують електроенергію, через велику кількість електрифікованих технологічних процесів, наприклад з сортування овочів, завантаження зерна та ін. Практично вся споживана ФГ електроенергія виробляється традиційними джерелами енергії за рахунок використання приводів тракторів, бензогенераторів тощо. До основного обладнання [4] ФГ належать:

- багатоядерні змотувачі крапельних трубок, які використовуються для оперативного, механізованого змотування м'якої, багаторічної (і однорічної) крапельної стрічки систем крапельного зрошення в кінці сезону, агрегатуються з тракторами;
- пневматичний навантажувач, призначений для перевантаження сипких продуктів на борт вантажного транспорту, працює від валу відбору потужності трактора;
- машини для сортування (калібрування) сферичної сировини струнного або роликового типу для калібрування, сортування (поділу на категорії за діаметром) овочів та фруктів невеликих розмірів з твердою структурою (яблука, огірки, морква тощо);
- машини для сухої чистки коренеплодів призначені для часткового сухого очищення коренеплодів від легко віддільного, сухого ґрунту та інших аналогічних забруднень. Процес очищення відбувається шляхом динамічного впливу на поверхню продукту щіткових валів.

Також на фермерських господарствах часто використовують різні зерноподрібнювачі, кормоцехи, роликові інспекційні транспортери тощо.

Існує також тип робіт, який характеризується потребами в автономному резервному живленні, так звані роботи вахтовим методом. Це особливі форми здійснення трудового процесу поза місцем постійного проживання працівників, тобто робота в умовах, коли не може бути забезпечене щоденне повернення

працівників до місця їх постійного проживання, наприклад, електромонтажні роботи або ремонт доріг. У таких випадках широко постає питання електрозабезпечення робочих ділянок потужністю, яка б задовольнила побутові та робочі потреби в електроенергії, а саме живлення силового обладнання, наприклад, зварювальних апаратів чи відбійних молотків та побутового (свромодулів). До тепер необхідну кількість електроенергії генерують бензинові та дизельні генератори.

Підведення стаціонарних або тимчасових ЛЕП для живлення віддалених споживачів економічно не вигідно, оскільки потребує значних капітальних вкладень. Використання дизельних генераторів має масу недоліків, від необхідності своєчасного ремонту до малого терміну служби. З метою економії пального, зниження залежності від зовнішніх поставок енергоресурсів, впливу на екологію, а також для забезпечення безперебійності роботи обладнання існує необхідність у створенні автономних систем основного і резервного живлення на базі відновлюваних джерел енергії.

При аналізі споживачів електроенергії, було визначено, що:

- мобільними споживачами електроенергії можна вважати малопотужні (до 10 кВт) електроустановки переважно 3-ї категорії надійності електроживлення, які відрізняються портативністю та споживанням електроенергії від дизельних або бензогенераторів;
- пересувними споживачами – середньої (від 10 до 100 кВт) потужності електрообладнання здебільшого 2-ї категорії надійності, яке отримує енергію від пересувних або тимчасових ліній електропередачі та має можливість пересування на невеликі відстані за допомогою транспортних засобів;
- автономні споживачі електроенергії – об'єкти середньої потужності, 2-ї, у деяких випадках 3-ї категорії, які через неможливість живлення від стаціонарних ЛЕП отримують енергію від приводів електродвигунів, дизельних чи бензогенераторів, акумуляторних батарей, тощо.

Системи резервного електропостачання широко використовуються на транспорті, в авіаційно-космічній та суднової техніці, на стаціонарних об'єктах, крім того, останнім часом вони знаходять застосування і в сільськогосподарському виробництві. Резервні системи живлення забезпечують електроенергією здебільшого відповідальні споживачі (споживачі 1-ї та 2-ї категорії надійності) якими є комп'ютерні системи управління, зв'язку та обробки інформації, автоматичні системи управління технологічними процесами і цілими виробничими комплексами. Крім того, важлива функція відводиться транспортним системам, які забезпечують електроенергією споживачів у важкодоступних районах, в тому числі, при виникненні аварійних ситуацій [5].

Основним джерелом електроенергії в стаціонарних системах резервного живлення є зовнішня енергосистема (атомні, теплові та інші електростанції), а в якості резервних джерел застосовуються автономні джерела електроенергії - дизель-електричні станції, відновлювані джерела енергії, акумуляторні батареї, тощо. Тип і кількість автономних джерел енергії, перетворювачів електроенергії і резервних джерел визначаються вимогами споживачів.

Необхідність включення перетворювачів електроенергії або вторинних джерел до складу системи визначається вимогами споживачів до їх живлення. Більшість споживачів потребує електроенергію з параметрами відмінними від тих, що генерує зовнішня мережа або автономні джерела.

Існує велика кількість систем резервного живлення. На рис. 1 наведена узагальнена структурна схема стаціонарних систем резервного живлення [5], де позначено: дизель-електрична станція – ДЕС; акумуляторні батареї – АБ; статичні перетворювачі – випрямлячі В1 і В2, інвертор – І, конвертор – К; електромашинні перетворювачі – двухмашинний, виконаний на базі двигуна постійного струму М1 і синхронного генератора СГ1, і трьохмашинний перетворювач, виконаний на базі двигуна змінного і постійного струму відповідно М2 і М3, та синхронного генератора СГ2; шини гарантованого електропостачання змінного Ш1 і постійного Ш2 струмів.

Типові структурні схеми транспортних систем резервного живлення [5], виконаних на базі статичних перетворювачів енергії, розглянуті на рис. 2, де позначено: ПД – приводний двигун; Г – генератор електроенергії; ШГП1 і ШГП2 – шини гарантованого живлення змінного і постійного струму відповідно; ТВП – трансформаторно-випрямний перетворювач; ІТП – інверторно-трансформаторний перетворювач; ПНП – перетворювач напруги постійного струму; АБ – акумуляторні батареї. Особливістю конструкції даних схем є відсутність введів електропостачання від зовнішніх джерел електроенергії, але вони можуть бути передбачені. Надійність роботи таких систем підвищується за рахунок додаткових резервних автономних джерел і перетворювачів електроенергії (на рис. 2 не показані).

В основному режимі роботи стаціонарних систем живлення споживачів електроенергією забезпечується по основному вводу «зовнішня мережа 1» або по додатковому вводу «зовнішня мережа 2». Дизель-електрична станція ДЕС є резервним джерелом електроенергії, акумуляторні батареї АБ – аварійним джерелом. Для підвищення надійності електропостачання автономні джерела, напівпровідникові і електромашинні перетворювачі мають резерв однотипних джерел і перетворювачів.

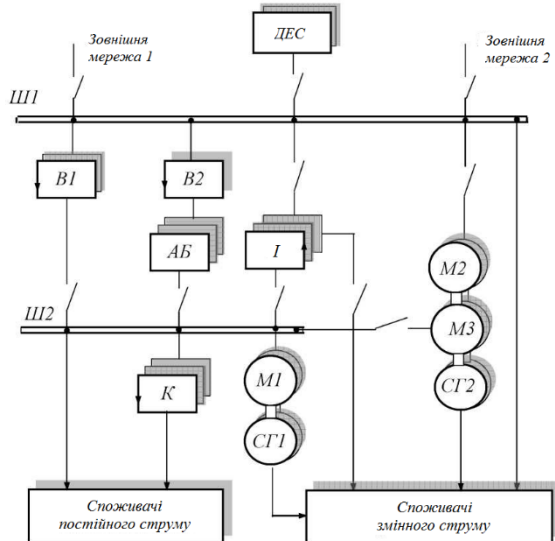


Рис. 1 Узагальнена структурна схема стаціонарних систем резервного живлення

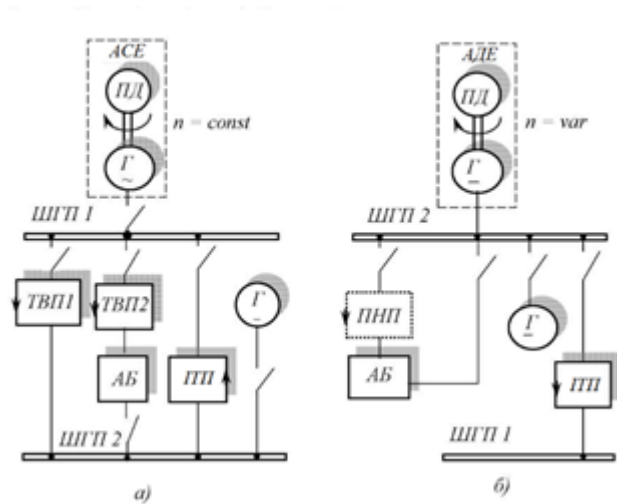


Рис. 2 Типові структурні схеми транспортних систем резервного живлення

Коли джерелами живлення виступають зовнішня мережа або ДЕС, – включені контактори К1 або К2, або К3 і, відповідно, контактор К6. Споживачі постійного струму отримують живлення від шини Ш2, а змінного – від шини Ш1. У цих режимах акумуляторні батареї АБ знаходяться в режимі безперервного підзаряду від випрямляча В2. Для забезпечення безперервності електропостачання при зникненні напруги на двох зовнішніх вводах, на час запуску ДЕС (30 – 50 с) споживачі змінного струму отримують живлення від двухмашинного перетворювача електроенергії М1 – СГ1, живлення якого, як і споживачів постійного струму, здійснюється від акумуляторних батарей АБ. Тривалість перерви електропостачання споживачів змінного струму в цьому випадку визначається часом запуску двухмашинного перетворювача і знаходиться в межах 2 – 3 с.

Якщо ж споживачі електроенергії не допускають розриву кривої напруги живлення, то застосовуються структури систем з використанням трьохмашинних перетворювачів. Споживачі змінного струму в цьому випадку отримують живлення від постійно діючого трьохмашинного перетворювача М2 - М3 - СГ2. При цьому в нормальному режимі роботи привід синхронного генератора СГ2 запускається асинхронним двигуном М2, а при припиненні електропостачання від шини Ш1 привід СГ2 здійснюється двигуном постійного струму М3, джерелом живлення якого є акумуляторні батареї АБ [5].

Іноді в системах резервного живлення з двухмашинними перетворювачами використовуються інерційні маховики, які розміщуються на валу між електричними машинами. В цьому випадку при припиненні електропостачання від зовнішньої мережі, за рахунок маси маховика (його інерційності) забезпечується безперервне електропостачання споживачів в інтервалі часу, необхідному для запуску ДЕС.

Системи резервного живлення на базі статичних ПЕ мають переваги у порівнянні із системами, виконаними на електромашинних перетворювачах, за показниками надійності і часу необслугованої роботи.

Автономне джерело енергії (рис. 2, а) генерує змінний струм промислової частоти, резервним джерелом електроенергії є генератор постійного струму Г, привід якого, як правило, приводиться в рух від коробки відбору потужності двигуна. Інверторно-трансформаторний перетворювач ІТП працює при відключенні автономного джерела, тобто, коли джерелом електроенергії є акумуляторні батареї АБ або генератор постійного струму Г. ТВП2 виконує функції зарядного пристрою.

Автономне джерело енергії (рис 2, б) є джерелом напруги постійного струму. Залежно від величини напруги постійного струму, що генерується, автономна система електропостачання (АСЕ) може мати перетворювач напруги постійного струму ПНП, що виконує функції зарядного пристрою.

При класифікації систем резервного живлення основною ознакою виступає їх призначення: для стаціонарних або транспортних споживачів електроенергії. Другими за важливістю класифікаційними ознаками є типи використовуваних основних, резервних і аварійних джерел та перетворювачів електроенергії. Крім того, системи резервного живлення можуть класифікуватися за схемами підключення до споживачів електроенергії (централізовані, децентралізовані і комбіновані), поділом їх за родом струму, перервами в електропостачанні, типами комутаційної апаратури та ін. [5]. На рис. 3 наведено загальну класифікацію систем резервного електропостачання.



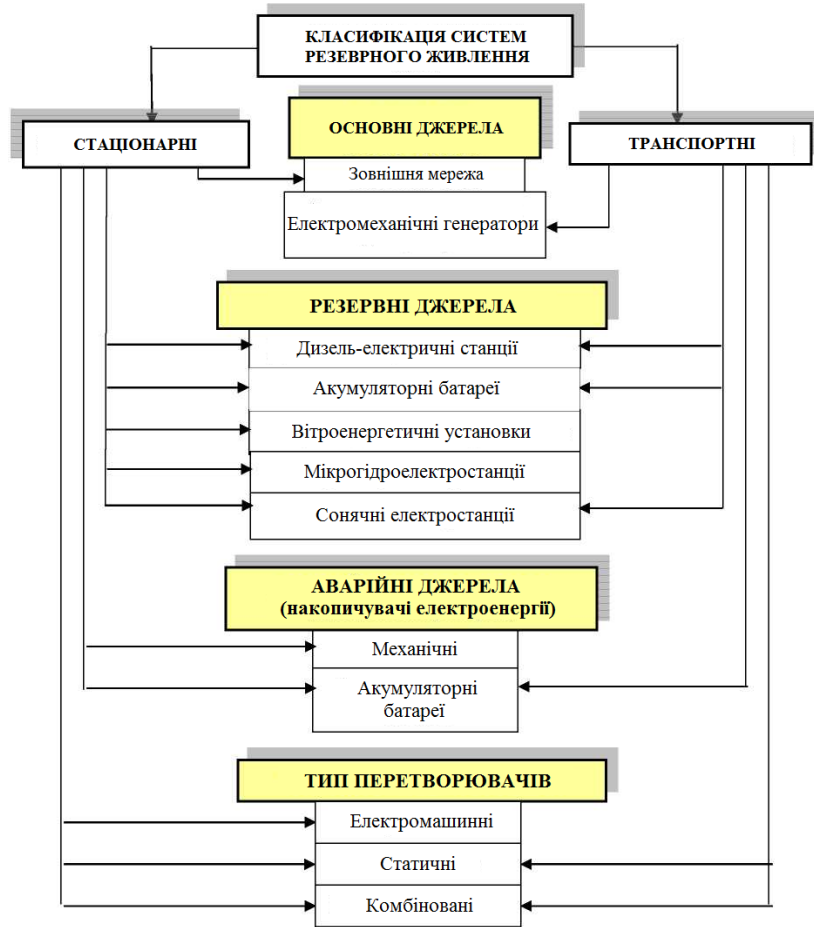


Рис. 3 Загальна класифікація систем резервного електропостачання

Зазвичай використовують резервні системи на основі електрогенераторів, але вони є не найкращим рішенням через такі причини.

1) Термін служби дизельних генераторів преміум-класу за умови правильного своєчасного обслуговування може досягати 20000 мотогодин. Ресурс дешевших електростанцій (особливо бензинових і газових) становить від 1000 до 4000 мотогодин, за рахунок наявності в конструкції рухливих частин. Термін служби резервної системи живлення на базі відновлюваних джерел живлення може досягати 10 – 15 років.

2) Дизельній або бензиновій електростанції з блоком АВР (автоматичного вводу резерву) буде потрібно 10 – 15 секунд на включення, а в холодну пору року і того більше, що не забезпечує безперебійності електроживлення. Електростанції з мотором, що працює на повітряному охолодженні, можуть мати серйозні проблеми із запуском в холодну пору року, а в спеку, навпаки, швидко перегріватися і вимикатися. Тоді як час переключення на роботу від акумуляторів становить не більше 10 мс. Блоки безперебійного живлення з акумуляторами зазвичай встановлюються в технічних приміщеннях, де температура взимку не падає нижче 0 градусів. Робочий діапазон температур таких систем – від  $-20$  до  $+50$  °С.

3) Генератори малої потужності (до 10 кВт), особливо бензинові і газові, на відміну від інверторних систем резервного живлення, зазвичай не мають стабілізації напруги за частотою – це супроводжується гармонійними викривленнями виробленого струму, що може призвести до некоректної роботи і виходу з ладу чутливого устаткування.

4) У порівнянні із сонячними батареями генератори при роботі створюють шум близько 65dB.

5) Наявність виділень вихлопних газів (CO, CO<sub>2</sub>, NO та ін.) при роботі генераторної установки.

6) Витрати на паливо, у випадку використання генераторів за час експлуатації можуть перевищувати вартість самого генератора в п разів.

7) Необхідність постійного технічного контролю генераторів в середньому кожні 100 – 200 мотогодин (дешеві моделі – частіше): долив палива, заміна мастила, охолоджуючої рідини, фільтрів, регулювань і т.д. Тут слід також врахувати ціни на комплектуючі витратні матеріали, такі як фільтри, масло тощо. Інверторні резервні системи живлення є повністю необслуговуваними.

У разі створення систем живлення на базі відновлюваних джерел енергії, наприклад, вітрогенераторів або сонячних батарей, слід враховувати сезонність та енергоємність відповідних енергоносіїв. Так,

при урахуванні середнього рівня сонячної радіації для регіонів України [6], можна дійти до висновку, що сонячні батареї доцільніше використовувати в червні, серпні та липні. Взимку корисна потужність буде значно нижчою (приблизно в 5 разів). На рис. 4 [6] видно, що сонячна активність переважає на півдні країни.

Потужність електроенергії, виробленої за рахунок сонця, окрім регіону і часу використання фотомодулів, також залежить від ККД самих сонячних батарей та їх кількості. Хоча теоретичний максимальний ККД кремнієвих фотомодулів може сягати 33,7 %, середній ККД сучасних батарей не перевищує 15 – 20%.

При встановленні сонячних фотомодулів слід враховувати їх нахил до горизонту, оскільки від цього залежить кількість перетворюваного сонячного випромінювання, а також необхідну площу, яку вони потребуватимуть для монтажу. Якщо це мобільна сонячна установка, то необхідно створити умови для безпечної комплектації модулів з метою уникнення їх пошкодження при перевезенні, а також враховувати можливість збільшення потужності за рахунок встановлення додаткових батарей.

У разі генерування електроенергії за рахунок вітру, для того щоб визначити потужність вітрогенератора, необхідно врахувати швидкість вітру в тому чи іншому регіоні та площу вітрового потоку (лопатеї вітряка). На рисунку 5 показано середню швидкість вітру для міст України [7]. При чому найдоцільніше використовувати вітряні генератори на заході та півдні країни, де швидкість вітру більше 6 м/с.

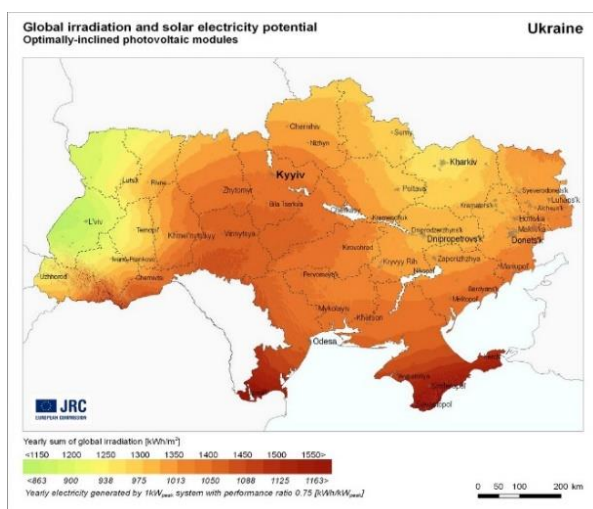


Рис. 4 Карта сонячної активності в Україні

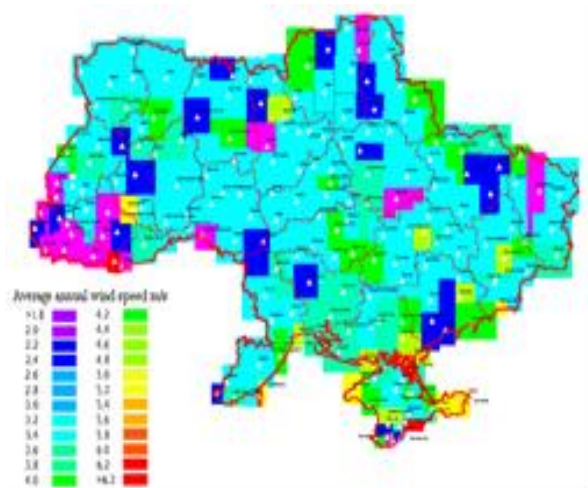


Рис. 5 Карта середньої швидкості вітру в Україні

Слід зазначити, що швидкість вітру залежить від часу, наприклад, в зимові місяці сила вітру буде більшою, але ця різниця не така суттєва, як у випадку із сонячною радіацією.

На відміну від сонячних фотомодулів вітряки можливо використовувати й уночі, але при генеруванні великих значень потужності слід враховувати збільшені габарити вітряної установки. Наприклад, для генерування 250 Вт електроенергії при середній швидкості вітру 5 м/с необхідний діаметр лопатеї повинен становити близько 4 м.

Для досягнення найбільшої ефективності мобільної системи резервного живлення варто дослідити можливість сумісного генерування сонячної та вітрової енергії, тобто створення так званої гібридної системи електропостачання.

Також при проектуванні систем резервного живлення необхідно пам'ятати, що електропостачання характеризується надійністю і якістю. На якість електроенергії впливають різні порушення і викривлення форми напруги живлення. Згідно з ГОСТом 13109-97 [8] існують нормально допустимі та гранично допустимі норми якості електроенергії, які слід враховувати при створенні систем електропостачання.

Іншою серйозною вимогою до систем електропостачання є надійність. Вона обумовлюється наявністю резервних джерел електроенергії з метою забезпечення умов безперебійності живлення важливих споживачів. У правилах улаштування електроустановок (ПУЕ 1.2.17.) розрізняють три категорії [9], залежно від вимог до надійності і часу усунення несправок, при цьому в першій категорії виділяють особливу групу. Так, обладнання фермерських господарств та прилади для геологорозвідувальних робіт мають 2-гу категорію надійності, оскільки перерва в їх електропостачанні може призвести до масового простою робочих, а у випадку з фермерськими господарствами ще й до масового недовипуску продукції. Такі споживачі, згідно з ПУЕ повинні забезпечуватися електроенергією від двох незалежних взаємно резервованих джерел живлення.

З метою запобігання виходу з ладу установок та виникненню аварійних ситуацій, при створенні систем живлення для представлених об'єктів, необхідно врахувати показники якості, які наведені у ГОСТ 13109-97 [8].

За рахунок наявності в системах основного та резервного живлення, на основі відновлюваних джерел енергії напівпровідникових пристроїв (інвертрів та випрямлячів), а також фотоелектричних елементів та вітрогенераторів, з'являється необхідність виконання вимог щодо якості електроенергії з метою зменшення шкідливого впливу вищих гармонік на споживачі.

**Висновки:**

1. У наш час системи резервного живлення малопотужних установок та об'єктів середньої потужності використовують як джерело електроенергії, вироблену за рахунок спалювання викопного палива в дизельних або бензинових електрогенераторах. Резервне живлення необхідне для відповідальних категорій споживачів у випадку, якщо виникають аварійні ситуації в електромережі, а зупинка в роботі установок може спричинити значні збитки. За певною низкою згаданих причин у більшості випадків живлення від генераторів не є як економічно, так і енергетично доцільним, на відміну від систем резервного живлення на основі відновлюваних джерел енергії.

2. Існує необхідність створення систем резервного живлення на базі відновлюваних джерел: вітру, сонця та ін. З метою досягнення більшої енергоефективності можливе впровадження так званих гібридних систем, які використовують одночасно декілька видів відновлюваних джерел. Такі системи вже існують, але вони призначені здебільшого для стаціонарного використання, наприклад, у разі резервного живлення окремих позаміських будинків.

3. У результаті аналізу споживачів електроенергії, які потрапляють до категорій мобільних, пересувних та автономних, виникла необхідність у створенні мобільної гібридної системи живлення на базі відновлюваних джерел, яка б дозволила покрити попит на доставку електроенергії для живлення об'єктів, які за рядом економічних причин не можуть під'єднатися до електромережі та використовують, як було зазначено, системи на основі викопних видів палива.

**Список літератури**

1. Горбачев Ю.И. Геофизическое исследование скважин / Ю.И. Горбачев. – М.: Недра, 1990.–398 с.
2. РД 05-334-99 Нормы безопасности на электроустановки угольных разрезов и требования по их безопасной эксплуатации. – Введ. 1999-24-12. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 19 с.
3. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И.С. Афанасьев, Г.А. Блинов, Н.Н. Бухарев, Н.Г. Егоров, Э.К. Егоров, О.В. Иванов, А.И. Кулес, Ю.Т. Морозов, А.И. Осецкий, П.П. Пономарев. – С.Пб.: Недра, 2000.–712 с.
4. Каталог механизмов и оборудования для фермерских хозяйств. – КЭМЗ, 2016. [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://www.kemz.com.ua/oborudovanie\\_i\\_mehanimzy\\_dlya\\_fermerskih\\_hozyajstv.html](http://www.kemz.com.ua/oborudovanie_i_mehanimzy_dlya_fermerskih_hozyajstv.html).
5. Классификация и оценка эффективности систем бесперебойного электроснабжения / А.В. Винников, А.Е. Усков, А.Е. Хицкова, В.А. Горбачев // КубГАУ. – 2015. – №107 (03). – С. 1 – 14.
6. Средний месячный уровень солнечной радиации в городах Украины. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.atmosfera.ua/stati-geliosistemy/solar-insulation-ukraine/>.
7. Средняя годовая скорость ветра для городов Украины. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://businessviews.com.ua/ru/economy/id/dengi-na-veter-radi-energii-vetrjanye-fermy-v-evrope-366/>.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – М.: ИПК Изд-тво стандартов, 1998. – 38 с.
9. Правила улаштування електроустановок. Вид. 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України. 2010. – 736 с. Рекомендовано до друку

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, професором Шкрабцем Ф.П.*

УДК 621.313.132

**С.В.Плаксин, д-р физ-мат. наук, Ю.В.Шкиль**

*(Украина, г.Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»)*

**СОЛНЕЧНАЯ ПУТЕВАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ТРАНСПОРТА**

*Анотація. Розглянуто побудову структури сонячної шляхової енергетичної установки як основного елемента розподіленої фотоелектричної системи, яка забезпечує гарантоване електроживлення лінійного синхронного тягового електродвигуна магнітолевитаційного транспортного засобу.*

**Ключові слова:** гарантоване енергозабезпечення, накопичувач енергії, фотоелектрична система, високоскоростний наземний транспорт, силовий інвертор, магнітний підвіс

**Анотація.** Рассмотрено построение структуры солнечной путевой энергетической установки как основного элемента распределённой фотоэлектрической системы обеспечивающей гарантированное электропитание линейного синхронного тягового электродвигателя магнитолевитационного транспортного средства.

**Ключевые слова:** гарантированное энергообеспечение, накопитель энергии, фотоэлектрическая система, высокоскоростной наземный транспорт, силовой инвертор, магнитный подвес.

**Abstract.** It is considered the construction of the track structure of the solar power plant as a basic element of a distributed PV system provides guaranteed power linear synchronous traction motor magnetogravitational vehicle..

**Keywords:** guaranteed energy supply, energy storage, photovoltaic system, high-speed ground transportation, power inverter, magnetic suspension.

### Введение

Наземный транспорт с магнитной левитацией (МАГЛЕВ) характеризуется высокой скоростью и экологической привлекательностью в связи с тем, что он использует не традиционный принцип взаимодействия колеса и рельса, а принципиально иной способ – магнитный подвес [1]. Имеется два основных типа магнитного подвеса. К первому относятся электродинамические системы подвеса (ЭДМП), ко второму – электромагнитные системы подвеса (ЭМП). Электродинамическая левитация основана на возникновении в проводящих материалах вихревых токов и в результате появления сил отталкивания. В электромагнитных системах сила притяжения генерируется между нормальным электромагнитом и ферромагнитным проводником

Для разгона и продвижения, также как и для торможения, в обеих МАГЛЕВ-системах используется линейный синхронный тяговый электродвигатель (ЛСТЭД). Действие такой бесконтактной системы продвижения и торможения вытекает из принципа функционирования вращающегося электромотора, статор которого рассечен и растянут вдоль обеих сторон путевой структуры. Вместо вращающегося магнитного поля мотор генерирует бегущее электромагнитное поле. Магниты подвеса на вагоне функционируют как возбудитель электромотора. В обоих вариантах системы МАГЛЕВ, с ЭДМП или ЭМП, статор ЛСТЭД, вмонтированный в путевую структуру, состоит из множества тяговых секций, которые запитываются электроэнергией только в момент прохождения над ними вагона. Секции в свою очередь набраны из путевых катушек.

Традиционно энергопитание двигателя на перегоне осуществляется централизованно от тяговых подстанций с прокладкой к секциям многокилометровых силовых кабелей вдоль путевой структуры. Альтернативой централизованной системе может быть распределённая система с использованием солнечной энергии. При этом каждая секция имеет автономный источник питания от солнечной панели с централизованным управлением режимами работы, которые определяются трафиком движения поездов. В пределах погонный размер секции может быть доведен до размера катушки 1 – 2 метра и это является существенным, чтобы можно было эффективно применять солнечные путевые энергетические установки (СПЭУ).

Каждая установка в момент прохождения над ней вагона должна отдавать в секцию в течение долей секунды мощность 40-50 кВт, что предъявляет серьёзные (технически решаемые) требования ко всем узлам СПЭУ и в особенности к накопителю энергии, являющимся обязательным элементом подобной автономной энергоустановки. Совокупность таких установок, размещённых вдоль путевой структуры и функционирующих под общим управлением, представляет собой распределённую фотоэнергетическую систему. При такой структуре энергоснабжения исключается необходимость в передаче больших объемов энергии на большие расстояния, чем достигается значительное снижение общесистемных потерь. Единственным силовым элементом является инвертор, соединённый с накопителем и путевой катушкой. За счет использования большого количества однотипных малоэнергоёмких элементов обеспечивается более высокая степень надежности функционирования системы в целом, улучшается электромагнитная совместимость ее элементов, повышается безопасность эксплуатации, обеспечивается гарантия электропитания высокоскоростного транспортного средства.

**Цель работы** – обеспечение гарантированного электропитания линейного синхронного тягового электродвигателя от распределённой фотоэлектрической системы на основе автономных солнечных путевых энергоустановок.

**Требования к энергонакопителю.**

Как известно, характерной особенностью производства солнечного электричества является его неравномерная выработка в течение суток и года. Независимость системы энергоснабжения от этих колебаний обеспечивается введением в состав СПЭУ накопителя электрической энергии, осуществляющего накопление электроэнергии в период избытка солнечной энергии (день, летний период) и расходование в период недостатка (ночь, зимние месяцы). Преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока осуществляется при помощи инвертора. Преобразованная энергия от инвертора поступает в нужную путевую катушку длиной  $2\tau/3$  м только в нужный момент времени: по сигналу системы управления движением. Таким образом, СПЭУ, состоящая из солнечной панели, накопителя и инвертора, представляет собой идеальный источник энергии, в котором производство электроэнергии и ее потребление разделены во времени.

При движении экипажа в левитирующем режиме с номинальной скоростью время прохождения экипажем расстояния 1 м может составлять величину 250-300 мсек. Следовательно, инвертор должен работать в режиме кратковременной отдачи мощности, и это обстоятельство предъявляет определенные требования к накопителю энергии при проектировании системы управления СПЭУ. Во-первых, он должен работать в циклическом режиме разряда-заряда таким образом, чтобы к очередному разряду накопленная удельная энергия составляла величину не менее чем это необходимо для транспортировки единицы веса на единицу длины. Во-вторых, в течение светлого времени суток он должен накопить достаточно энергии для работы в ночное время. В-третьих, он должен иметь запас энергии для работы в течение нескольких суток при неблагоприятных погодных условиях (туман, облачность). В-четвертых, он должен обладать способностью в летнее время накопить столько энергии (избыточной для этого времени года), чтобы в зимнее время отдавать ее постепенно в нагрузку, тем самым гарантируя независимое круглогодичное энергоснабжение транспортного пути. Кроме того, накопитель должен обладать способностью быстро заряжаться и быстро разряжаться, а для удлинения срока службы иметь малое отношение энергии саморазряда к номинальной емкости.

Подобным требованиям может удовлетворять, например, накопитель, состоящий из аккумулятора, ионистора, электролизера, емкости для хранения водорода и топливного элемента. Поскольку удельные характеристики солнечной панели ниже удельных характеристик аккумулятора и топливного элемента, возможно объединение нескольких групп солнечных панелей на одну группу аккумуляторов и топливных элементов, как предлагается в [2]. Аккумулятор в состоянии обеспечить энергию для работы СПЭУ в течение от одних до нескольких суток, ионистор – обеспечить быстрый собственный заряд и, что особенно важно, быстрый собственный разряд (его удельная энергия разряда огромна), тем самым предохраняя аккумулятор от больших разрядных и зарядных токов. Остальные три элемента накопителя предназначены для обеспечения круглогодичной работы энергосистемы под нагрузкой.

**Структурная схема СПЭУ**

Вариант структурной схемы солнечной путевой энергетической установки приведен на рис. 1.

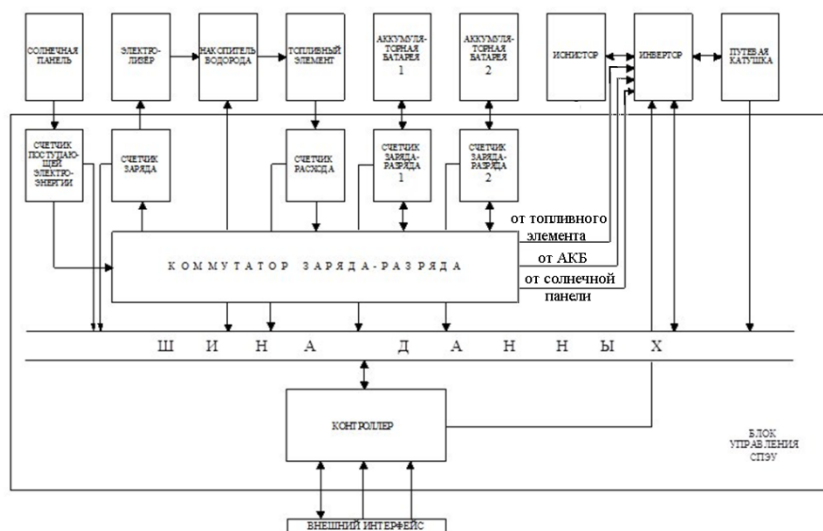


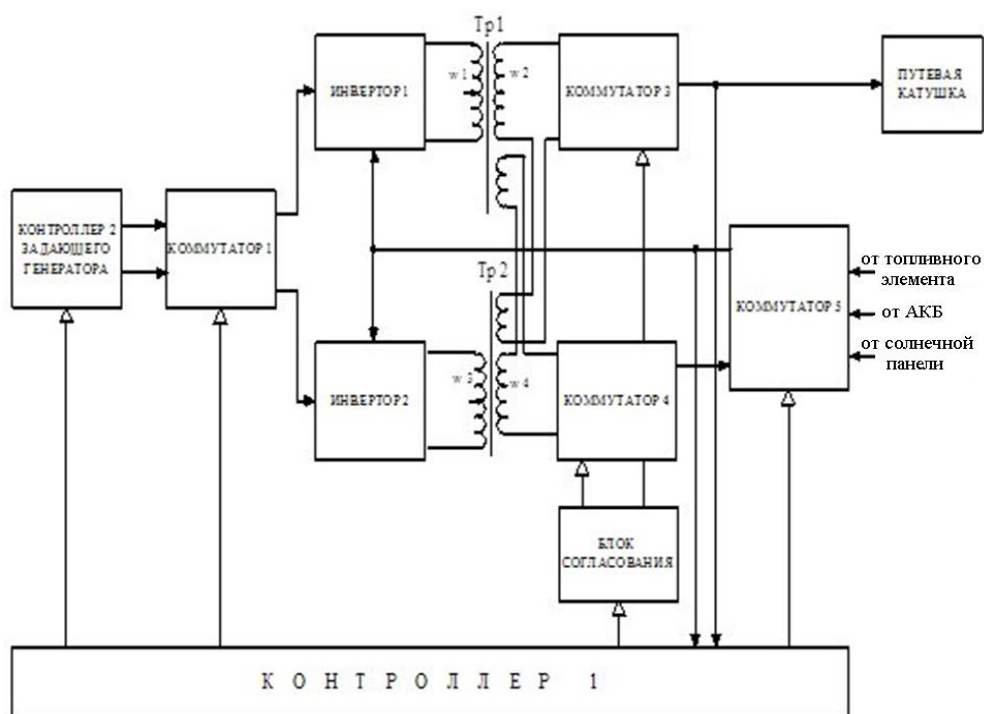
Рис. 1 – Структурная схема СПЭУ

Основными элементами СПЭУ являются, как это показано на схеме, солнечная панель, аккумуляторные батареи, инвертор, путевая катушка и блок управления. Особенностью установки является то, что

она должна обеспечить отдачу энергии большой мощности (десятки киловатт) в путевую катушку за короткий промежуток времени (единицы-сотни миллисекунд). Такой режим оказывает неблагоприятное воздействие на аккумулятор, который заряжается от солнечной энергии и обладает в связи с этим специфическими свойствами, которые не благоприятствуют оптимальному осуществлению требуемого режима. Компромисса можно достичь, например, за счет введения в схему инвертора, работающего на инвертор и способного за короткое время отдавать большие мощности. В установке предусмотрено два аккумулятора, работающих в «постраничном» режиме – когда один аккумулятор заряжается, то второй в это время работает на нагрузку и наоборот. При таком режиме работы повышается надежность всей установки в целом благодаря более регламентированному управлению накоплением и отдачей энергии в условиях неопределенности поступления солнечной энергии и неравномерности потребления энергии путевой структурой. Подробно такой режим работы аккумуляторной группы описан в патенте на изобретение [3].

В общем случае аккумуляторы предназначены для накопления энергии в дневное время, частичного расхода в дневное время и полного расхода в ночное время. Величина емкости аккумулятора должна рассчитываться и с учетом покрытия дефицита солнечной энергии в пасмурные дни. Удельные характеристики аккумуляторов сегодня позволяют удовлетворительно решить эту задачу, однако удовлетворение потребностей нагрузки в зимнее время за счет избыточной энергии, накопленной в летнее время, требует значительной емкости аккумулятора, что неприемлемо с точки зрения сопоставимости массогабаритных характеристик путевого полотна и аккумулятора. В качестве варианта, позволяющего разрешить это противоречие, можно использовать водородный накопитель. С этой целью в состав СПЭУ введены электролизер, накопитель водорода и топливный элемент. За счет избыточной солнечной энергии в летнее время с помощью электролизера вырабатывается водород, который закачивается в специальный резервуар, а в зимнее время недостаток солнечной энергии восполняется энергией, получаемой при сжигании накопленного водорода в топливном элементе. Коэффициент полезного действия такой системы невысокий, однако, имея приемлемые габаритные размеры и обладая способностью длительной консервации солнечной энергии, позволяет решать задачу энергообеспечения путевой структуры ВСНТ круглый год.

Рассмотрим один из возможных вариантов структурной схемы силового инвертора работающего на путевую катушку (см. рис. 2). Тот факт, что накопление солнечной энергии, преобразованной в электрическую, в установке происходит циклами за время порядка 10 – 15 минут в реальном масштабе времени, а отдача накопленной энергии в путевую катушку за время порядка 250-300 мс, дает возможность в двух разных рабочих режимах (накопление – отдача) использовать одни и те же функциональные узлы устройства. В режиме отдачи энергия из накопителя через коммутатор 5 поступает на два идентичных инвертора 1 и 2, импульсные трансформаторы Т1, Т2, коммутатор 3 и далее – на путевую катушку. Для этого режима характерна кратковременная отдача большой мощности в нагрузку. В режиме накопления



**Рис. 2 – Структурная схема силового инвертора**

запитка інверторів 1 і 2 проходить уже не від накопичувача, а від фотоелектричної панелі, яка передає вироблену електричну енергію через інвертори 1 і 2, трансформатор Т1 і Т2, коммутатори 4 і 5 в накопичувач. Удельні потужності в цьому режимі значно менше, ніж в режимі віддачі, що сприяє надійній роботі силових елементів інверторів 1, 2 і імпульсних трансформаторів Т1, Т2. Керування інверторами 1 і 2, що працюють в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), здійснюється від контролера 2 задаючого генератора через коммутатор 1, який в свою чергу керується від контролера 1.

Використання ШИМ дозволяє по керуючим сигналам від контролера 1 отримувати імпульсні послідовності з модульованою амплітудою, що несуть інформацію про графік руху магнітолевітуючого екіпажу. В основу регулювання покладено фазовий метод [4], при якому виходи декількох інверторів з'єднані послідовно з загальною навантажкою. При зміні фазового зсуву, наприклад, двох інвертованих напруг, вихідна напруга,

являючися геометричною суммою напруг обох інверторів, плавно регулюється. Фазове регулювання забезпечує суммування потужностей в загальному контурі, при цьому загальна потужність розподіляється між інверторами, що дозволяє уникнути паралельного з'єднання ключових елементів. Виділення, наприклад, на навантаженні низькочастотного квазисинусоїдального напруга здійснюється за допомогою демодуляції сумарного високочастотного напруга обох інверторів

Цю функцію виконують коммутатори 3 і 4. Загальне керування роботою установки здійснюється по командам контролера 1.

Блок керування СПЕУ забезпечує керування компонентами установки відповідно до режимів, задаваними по лініям внутрішнього і зовнішнього інтерфейсів, і включає в свій склад контролер, коммутатор заряду-розряду і набір щитків електроенергії в різних цепях. Крім того блок керування забезпечує контроль і діагностику функціонування всіх вузлів і цепей установки.

#### **Висновки.**

Таким чином, гарантоване енергозабезпечення лінійного синхронного тягового електродвигача високоскоростного транспорту на магнітній підвесі здійснювано від розподіленої фотоелектричної системи основним елементом якої є сонячна шляхова енергетична установка.

#### **Список літератури**

1. В.А.Дзензерський, В.І.Омельяненко, С.В.Васильєв. Високоскоростний магнітний транспорт з електродинамічною левітацією. Київ, Наукова думка, 2001г., – 480с.
2. Пат. на корисну модель №100468, МПК В60L 13/00, В60L 13/04, В60L 13/10, В61В 13/08, Н01L 31/00, Н01L 31/04. Магнітолевітуючий транспорт / Дзензерський В.О., Плаксін С.В., Шкіль Ю. В., Скосар В.Ю.; Заявитель і патентовласник ІГСТ НАН України. – № u2015 01220; заявл. 13.02.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.
3. Деклараційний патент України №67015А, МПК Н02J3/06. Система генерування, накопичування і розподілу електроенергії / Дзензерський В.О., Плаксін С.В., Соколовський І.І., Шкіль Ю. В., Юрко В.В.; Заявитель і патентовласник ІГСТ НАН України. – № 2003043856; заявл. 25.04.2003; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6.
4. Краснопрошина А.А., Скаржепа В.А., Кравець П.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Ч.2. Електронні пристрої промислової автоматики: Учебник / под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. – К.: Вища шк. Головное из-во, 1989. –303с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, професором Шкрабцем Ф.П.*

## ***Відомості про авторів***

Бельмас Іван Васильович	Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Технології машинобудування", Кам'янського державного технічного університету, м. Кам'янське	66; 75
Бердник Владислав Володимирович	Аспірант кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	100
Білоус Олена Іванівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Машинобудування" Кам'янського державного технічного університету, м. Кам'янське, Україна	78
Бубліков Андрій Вікторович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Автоматизація та комп'ютерні системи" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	70
Бялобржеський Олексій Володимирович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Системи електроспоживання та енергетичного менеджменту», Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського	3; 24
Галушко Олег Миколаєвич	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри " Безпека інформації та телекомунікації" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	42
Дзензерський Віктор Олександрович	д-р техн. наук, директор Інституту транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро	31
Житник Микола Явтухович	науковий співробітник відділу систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро	31
Іванов Олексій Борисович	Канд. техн. наук, професор, професор кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	49
Кирилов Ігор Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	49
Колосов Дмитро Леонідович	Д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри "Будівельна, теоретична та прикладна механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	66; 78
Комісаров Юрій Олексійович	Старший викладач кафедри "Гірнична механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	83
Куваєв Микола Володимирович	Аспірант кафедри «Електропривод» Державного ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро	37
Лещенко Леся Василівна	Асистент кафедри «Системи електроспоживання та енергетичного менеджменту», Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського	3
Лісунова Вікторія Вікторівна	провідний інженер відділу систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро	31
Мажаєв Микита Олегович	Студент-магістр V курсу Кам'янського державного технічного університету, м. Кам'янське	75



### *Відомості про авторів*

Мазур Руслан Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Автоматизація та комп'ютерні системи" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	70
Моня Андрій Григорович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Національної металургійної академії України, м. Дніпро	53
Огеєнко Павло Юрійович	Асистент кафедри "Автоматизація та комп'ютерні системи" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	70
Остапчук Олександр Володимирович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	20
Панченко Віктор Іванович	Доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	93
Петренко Руслан Олександрович	Асистент кафедри «Електропривод» Державного ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна.	46
Плаксін Сергій Вікторович	д-р ф.-м. наук, с.н.с., зав. відділом систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро	31; 107
Радченко Віталій Васильович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гідроенергетика" Запорізької державної інженерної академії	9
Радчук Дмитро Ігоревич	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Аерологія та охорона праці" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	59
Самуся Сергій Володимирович	Канд. техн. наук, науковий співробітник відділу гірничої термоаеродинаміки та автоматизованих систем Інституту геотехнічної механіки НАН України ім. М.С. Полякова, м. Дніпро	83
Серов Роман Володимирович	Студент Інституту електромеханіки, енергозбереження та систем управління, кафедри «Системи електроспоживання та енергетичного менеджменту», Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського	24
Танцура Ганна Іванівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Технології машинобудування" Кам'янського державного технічного університету, м. Кам'янське	78
Тратніков Максим Дмитрович	Студент 4-го курсу кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	93
Федоров Сергій Іванович	Старший викладач кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	49
Федоряченко Дар'я Олександрівна	Аспірантка кафедри "Гірнична механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	83
Фофанов Костянтин Петрович	Інженер-конструктор 1 категорії відділу 154 ДП "КБ "Південне", м. Дніпро	13

### *Відомості про авторів*

---

Фрундін Володимир Юхимович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Аерологія та охорона праці" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	59
Хілов Віктор Сергійович	Д-р техн. наук, професор кафедри "Інформаційно-вимірювальні технології" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	13
Холоменюк Михайло Васильович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гірнична механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	83
Чеберячко Сергій Іванович	Д-р тех. наук, доцент кафедри "Аерологія та охорона праці" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	59
Чеберячко Юрій Іванович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Аерологія та охорона праці" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро	59
Шестаков Олексій Юрійович	Аспірант кафедри «Електропривод» Державного ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро	89
Ширман Оксана Ігорівна	інженер I-ї категорії відділу систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН, м. Дніпро	31
Шкіль Юрій Володимирович	М.н.с. 5-го відділу Інституту транспортних систем і технологій НАН, м. Дніпро	107

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Принимаются статьи на украинском, русском или любом иностранном языке.

Статья должна быть оформлена с четким выделением структурных частей:

- индекс УДК;
- полный список авторов с указанием в скобках полного названия организации;
- название статьи;
- аннотация на трех языках (русский, украинский, английский);
- ключевые слова на трех языках (русский, украинский, английский);
- основной текст статьи с названиями структурных частей, например: Введение, Постановка задачи, Решение задачи, ..., Выводы; и т.п.
- список использованных источников
- сведения об авторах на украинском языке.

Параметры страницы: формат А4, все поля по 2,5 см; колонтитулы – по 1,6 см.

УДК – шрифт Times New Roman 10 pt, отступ первой строки – нет, межстрочный интервал одинарный; выравнивание – слева

*А.А. Иванов, д-р (канд.) техн. наук – шрифт Times New Roman 10 pt, полужирный курсив (Страна, Город, Название организации) – шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева.*

**ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ: ШРИФТ TIMES NEW ROMAN 11 PT,  
ПОЛУЖИРНЫЙ, ПРОПИСНЫЕ БУКВЫ, ОТСТУП ДО: 1 СТРОКА,  
ОТСТУП ПОСЛЕ: 1 СТРОКА, ВЫРАВНИВАНИЕ – ПО ЦЕНТРУ**

**Аннотация** подается объемом 75-100 слов. Должна структурироваться по логике описания результатов в статье и иметь следующие элементы: цели и задания работы, результаты, их научная новизна, практическое значение. Аннотация не должна повторять название статьи. Аннотация должна быть представлена на **3-х языках** (русский, украинский, английский) по такому образцу: Шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки 0,75 см, выравнивание – по ширине, расстановка переносов автоматическая.

Основной текст статьи должен быть набран в формате файла текстового редактора Microsoft Word: Основной текст: шрифт Times New Roman 10 pt, отступ первой строки – 0,75 см, выравнивание – по ширине. Стиль: Обычный. Расстановка переносов автоматическая, ширина зоны переносов слов – 0,5 см.

**Основные подзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, полужирный, строчные буквы, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева, до подзаголовка оставлять одну пустую строку.**

*Второстепенные подзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, отступ первой строки – нет, выравнивание – слева, до подзаголовка оставлять одну пустую строку*

**Таблицы** располагать в абзаце со стилем: Обычный. Номер таблицы: стиль Обычный, выравнивание по правому краю. Единицы измерения, желательно в "шапке" таблицы, а не в самой таблице. Таблица должна быть расположена по возможности ближе к первой ссылке на нее.

Таблица 1. шрифт Times New Roman 10 pt,

**Краткий заголовок таблицы: шрифт Times New Roman 9 pt,  
полужирный, отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру**

<b>Заголовок внутри таблицы (шапка): шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный, отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру. До и после заголовка отступать строку не надо.</b>	Длина, м
Текст таблицы: шрифт Times New Roman 9 pt, отступ первой строки – нет, выравнивание – по левому краю. До и после текста внутри таблицы отступать строку <b>не надо</b>	250

**Формулы:** выравнивание – справа. Нумерация формул – в круглых скобках. До и после формул оставлять одну пустую строку. Между формулами оставлять пустую строку **не надо**

$$c^2 = a^2 + b^2. \quad (1)$$

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ**

### **Требования к формулам:**

Размер символов в формулах: Обычный – 10 пт.; Крупный индекс – 8 пт.; Мелкий индекс – 7 пт.; Крупный символ – 12 пт.; Мелкий символ – 8 пт.

Стиль формул: Функция – наклонный; Переменная – наклонный; Скобки – прямые; Цифры – прямые.

**Все обозначения – латинскими символами!!! Кириллица в формулах – недопустима!!!**

**Рисунки.** На все рисунки должны иметься ссылки в тексте, пронумерованные арабскими цифрами (1, 2, 3..) в порядке их упоминания в тексте (например: рис. 1, а). Рисунки в тексте располагаются по центру. Надписи на рисунках должны быть выполнены, по возможности, шрифтом размера не менее 10 или 9 pt. Толщина линий на рисунках должна быть не менее 0,75 pt.

**Подрисуночная подпись** (Рис. 1 Схема...) обязательна: шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру.

После подрисуночной подписи отступать одну строку.

Рисунки - должны быть **сгруппированы и вставлены в текст**. Фотографии – вставлены в текст статьи как объект. Обтекание – "в тексте". Допускаются цветные изображения.

**Ссылки** на литературу должны следовать в порядке их появления в тексте, номер ссылки в квадратных скобках должен следовать за каким-либо утверждением, положением или за фамилией автора.

### **Список использованных источников**

(шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный, выравнивание по центру, до и после заголовка отступать строку)

**Список литературы** должен соответствовать ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Выравнивание по левому краю. Нумерация – автоматическая. шрифт Times New Roman 9 pt.

### **Сведения об авторах:**

Сведения об авторах предоставляются отдельным файлом в произвольной форме. **Обязательно** они должны включать в себя полные фамилию, имя и отчество (**на украинском языке**), ученную степень, ученное звание, должность, место работы (в т.ч. название кафедры, отдела), контактные телефоны, *e-mail* (если есть).

### **Порядок предоставления материала в редколлегию**

1. **Условия публикации:** статьи на русском или украинском языках - **50** грн; на иностранном языке – **40** грн. за каждую страницу оформленного в соответствии с требованиями текста. Оплата - при сдаче материала в печать.
2. **Объем статьи** от 4 до 10 страниц формата А4. Статья должна быть оформлена в соответствии с вышеуказанными требованиями. **Заполнение последней страницы – не менее 80 %.**
3. Статья должна быть представлена в печатном виде в 1 экземпляре и в электронном виде на любом носителе или по электронной почте по адресу:  
**[shkrabetsF@nmu.org.ua](mailto:shkrabetsF@nmu.org.ua)** или **[gea@nmu.org.ua](mailto:gea@nmu.org.ua)**
4. Материалы принимаются только при наличии **экспертного заключения, рецензии и заявления на публикацию статьи.**
5. Решение об опубликовании статьи принимает редакционная коллегия.
6. Принятые в печать материалы авторам **не возвращаются.**
7. В случае несоответствия указанным требованиям, материал статьи к публикации **не принимается.**

### **Редколлегия сборника "Горная электромеханика и автоматика"**

**49005, Украина, г. Днепрпетровск, просп. К.Маркса, 19, Национальный горный университет, кафедра "Возобновляемые источники энергии". Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>**

В научно-техническом сборнике "Горная электромеханика и автоматика" публикуются работы по следующим направлениям: *Электрификация горных работ; электрооборудование горной промышленности; электромеханика; энергосбережение и энергоэффективность, математическое моделирование и автоматизация производственных процессов и проектных работ горной промышленности; контроль технологических процессов; механизация горного производства; горные машины и комплексы; технические приборы обеспечения рудничной аэрологии и охраны труда; научная и производственная реклама.*

## З М І С Т

### **Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ**

<b>Л.В. Лещенко, О.В. Бялобржеський.</b> Вплив процесу енергоспоживання тягової підстанції на вимоги до системи обліку . . . . .	3
<b>В. В. Радченко.</b> Основа поліпредметного підходу в енергетиці . . . . .	9
<b>В.С. Хилов, К.П. Фофанов.</b> Особенности расчета емкости жил кабельной линии при наличии центрального токопровода . . . . .	13
<b>О.В. Остапчук.</b> Технічна реалізація методу захисного шунтування в системі електропостачання глибоких шахт . . . . .	20
<b>Р. В. Сєров, О. В. Бялобржеський.</b> Вплив параметрів накопичувальних елементів конденсаторного пристрою на формування струму збудження синхронної машини . . . . .	24
<b>В.А. Дзензерский, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, В.В. Лисунова, О.И. Ширман.</b> Импульсный метод автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии . . . . .	31

### **ЧАСТИНА II. АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

<b>М.В. Куваєв.</b> Компенсація статичної похибки за швидкістю при налаштуванні контуру регулювання на модульний оптимум . . . . .	37
<b>О.М. Галушко.</b> Исследование различных типов барабанных промывочных машин оснащенных системой автоматического регулирования . . . . .	42
<b>Р.А. Петренко.</b> Экспериментальное определение коэффициента зависящего от эффекта волнообразования . . . . .	46
<b>А.Б. Иванов, И.А. Кириллов, С.И. Федоров.</b> Беспроводное управление подводными аппаратами . . . . .	49

### **ЧАСТИНА III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

<b>A.G. Monia.</b> Analytical definition of the wheel rolling characteristics on the rail in the presence of the intermediate medium . . . . .	53
<b>С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Ю.І. Чеберячко, В.Ю. Фрундін.</b> Експериментальні дослідження впливу вологості повітря на захисні властивості електретних фільтрів . . . . .	59
<b>І.В. Бельмас, Д.Л. Колосов.</b> Напружено-деформований стан барабана при бобінній схемі намотування плоского каната . . . . .	66
<b>А.В. Бубликов, Р.А. Мазур, П.Ю. Огеенко.</b> Идентификация разрушаемого материала резцами шнека добычного комбайна на основе амплитуды периодической составляющей мощности электродвигателя привода резания. . . . .	70
<b>І.В. Бельмас, М.О. Мажасєв.</b> Напружений стан гумотросового тягового органа норії . . . . .	75
<b>Д.Л. Колосов, О.І. Білоус, Г.І. Танцура.</b> Вплив повороту посудини в горизонтальній площині на напружений стан плоского каната підйомної машини. . . . .	78
<b>С.В. Самуся, М.В. Холоменюк, Ю.А Комиссаров, Д.А.Федоряченко.</b> Обоснование параметров тормозной системы аварийно-спасательной мобильной подъемной установки . . . . .	83

**ЧАСТИНА IV. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

<b>О.Ю. Шестаков.</b> Consideration of condition to getting maximum power from renewable energy source, like photovoltaic panels . . . . .	89
<b>В.І. Панченко, М.Д. Тратніков.</b> Використання вітроустановок для отримання електричної та теплової енергії . . . . .	93
<b>В.В. Бердник.</b> Використання відновлюваних джерел енергії для живлення споживачів малої та середньої потужності . . . . .	100
<b>С.В.Плаксин, Ю.В.Шкиль.</b> Солнечная путевая энергоустановка для электропитания линейного двигателя магнитолевитирующего транспорта . . . . .	107
<b>Відомості про авторів</b> . . . . .	112
<b>Вимоги до оформлення статей</b> . . . . .	115

Науково-технічний збірник  
**Гірнича електромеханіка та автоматика**

Випуск 96

Технічний редактор  
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 16. Формат 30x42/4. Папір Captain.  
Ризографія. Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. .  
Тираж 300 прим. Зам. №

ISSN 0201-7814

Надруковано з готових оригінал–макетів  
у редакційно–видавничому комплексі  
Національного гірничого університету

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

# Кафедра ВІДНОВЛЮВАНИХ джерел енергії



## КОНТАКТИ

49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, ДВНЗ «НГУ»

Кафедра відновлюваних джерел енергії

(Головний корпус НГУ, кімн. 32, 42, 43, 46)

тел.: (056) 373-07-70, (056) 370-13-92

Twitter: [vdenmu](#) Група Vkontakte: [vk.com/vdenmu](#)

Web-сторінка кафедри: <http://vde.nmu.org.ua>

E-mail: [vdenmu@gmail.com](mailto:vdenmu@gmail.com)