

**ГІРНИЧА  
ЕЛЕКТРО-  
МЕХАНІКА  
та АВТОМАТИКА**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЗБІРНИК**

**Заснований у 1965 р.**

**95**

**Дніпропетровськ  
2015**

---

## Засновник – Національний гірничий університет

---

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

*(Протокол № 6 від 28 грудня 2015 р.)*

---

*РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:*

*Головний редактор* – Півняк Г.Г., академік НАН України

*Заступник головного редактора* – Шкрабець Ф.П., д-р техн. наук

*Відповідальний секретар* – Ципленков Д.В., канд. техн. наук

*Члени: Бешта О.С., д-р техн. наук; Блохін С.Є., д-р техн. наук; Блюсс Б.О., д-р техн. наук; Вареник Є.О., канд. техн. наук; Випанасенко С.І., д-р техн. наук; Зайка В.Т., д-р техн. наук; Іванов О.Б., канд. техн. наук; Кириченко В.І., д-р техн. наук; Костін М.О., д-р техн. наук; Кузнєцов Г.В., д-р техн. наук; Маліновський А.А., д-р техн. наук; Разумний Ю.Т., д-р техн. наук; Самуся В.І., д-р техн. наук; Сіноліцій А.П., д-р техн. наук; Сивокобиленко В.Ф., д-р техн. наук; Слесарєв В.В., д-р техн. наук; Ткачов В.В., д-р техн. наук; Франчук В.П., д-р техн. наук; Чермалих В.Ф., д-р техн. наук*

---

*Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (постанова президії ВАК України від 10.02.2010, № 1-05/1), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук*

**Адреса редакційної колегії:**

*Україна, 49005, м. Дніпропетровськ, просп. Д.Яворницького, 19.*

*Державний ВНЗ "Національний гірничий університет".*

*Тел. (056) 370-13-92, (056) 373-07-70, факс (056) 370-13-92*

*Е-mail: [ShcrabetsF@nmu.org.ua](mailto:ShcrabetsF@nmu.org.ua). [gea@nmu.org.ua](mailto:gea@nmu.org.ua)*

*Сайт: <http://gea.nmu.org.ua>*

*Збірник зареєстрований у Міністерстві інформації України.*

*Реєстраційний номер КВ № 7498 від 03.07.2003.*

© НГУ, 2015

# ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.311.

**В.Г. Сиченко, д-р техн.наук, Д.О. Босий, канд. техн.наук,**

(Україна, м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна)

**В.В. Кузнецов, канд. техн.наук,**

(Україна, м. Дніпропетровськ, Національна металургійна академія України)

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Анотація.** Встановлено різний характер режимів споживання та генерації реактивної потужності у лініях 27,5, 10 та 0,4 кВ. Виявлено широкий розкид статистичних характеристик показників якості електроенергії та значні спотворення кривих струму, що дозволить більш точно формувати методологію заходів з поліпшення якості електричної енергії у мережах нетягових споживачів.

**Ключові слова:** якість електричної енергії, лінії живлення нетягових споживачів, реактивна потужність, спотворення струму, статистичні характеристики.

**Аннотация.** Установлен разный характер режимов потребления и генерации реактивной мощности в линиях 27,5, 10 и 0,4 кВ. Выявлен широкий разброс статистических характеристик показателей качества электроэнергии и значительные искажения кривых тока, что позволит более точно формировать методологию мероприятий по улучшению качества электрической энергии в сетях нетяговых потребителей.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, линии питания нетяговых потребителей, реактивная мощность, искажение тока, статистические характеристики.

**Abstract.** It was found the different character modes of consumption and generation of reactive power in the lines 27.5, 10 and 0.4 kV. The wide variation in the statistical characteristics of power quality indicators and significant distortion curves current form will allow more accurate methodology measures to improve the quality of electricity networks of non-traction consumers.

**Keywords:** power quality, power lines of non-traction consumers, reactive power, current distortion, statistical characteristics.

### Вступ

Сформовані нині системи тягового електропостачання передбачають електропостачання нетягових залізничних споживачів великих залізничних станцій і вузлів (об'єкти інфраструктури, у тому числі локомотивного і вагонного господарства, культурно-побутові об'єкти, сторонні споживачі та ін.) безпосередньо від підстанцій енергосистем або від тягових підстанцій. Живлення нетягових залізничних споживачів, розташованих на залізничних перегонах і залізничних станціях, що знаходяться на міжпідстанційних зонах (освітлення проміжних станцій, зупинних пунктів, лінійно-колійних будівель, пристроїв автоблокування та ін.), здійснюється, як правило, від ліній поздовжнього електропостачання 6, 10, 35 кВ або від районних електромереж. Основне живлення пристроїв СЦБ і зв'язку здійснюється від ліній електропередачі автоблокування напругою 6, 10 кВ, резервне живлення – від лінії електропередачі “два проводирейки” (ДПР) з номінальною напругою 25 кВ або від лінії електропередачі поздовжнього електропостачання (ПЕ) напругою 6 і 10 кВ. Для живлення сигнальних установок застосовуються однофазні комплектні трансформаторні підстанції (КТП), які монтують на опорах [1].

Від ліній ПЕ та ДПР також отримують живлення сторонні споживачі, промислові підприємства та населення. Відпуск електроенергії цим споживачам за останні п'ять років зріс на 15 % і складає на 01.01.2015 р. майже 8 млн кВт·год [2]. Відбуваються структурні зміни і в характері споживчого навантаження, а саме: збільшення частки побутового устаткування (персональні комп'ютери, сервери, принтери, блоки безперебійного живлення, мікрохвильові печі і тому подібне), яке використовує однофазні джерела живлення, а також регульовані електроприводи систем кондиціонування і вентиляції. Освітлення виконується за допомогою люмінесцентних ламп з електронним баластом. У цієї групи споживачів частка

нелінійного навантаження може значно перевищувати лінійну складову. Як правило, джерела живлення офісного устаткування використовують мостові випрямлячі з ємнісними згладжуючими фільтрами. У випрямлячах, використовуваних в сучасних джерелах електроживлення, напруга мережі подається безпосередньо на діодний міст. Випрямлений струм перетворюється за допомогою комутатора в змінний струм високої частоти, а потім знову випрямляється. Такі джерела живлення викликають значні спотворення форми споживаного струму, істотну частку якого складають компоненти з частотою третьої гармоніки [3].

Знижена якість електроенергії є не лише технологічною проблемою сучасних систем електропостачання, але і причиною істотних економічних втрат для усіх учасників ринку електроенергії. Тому однією з найбільш актуальних проблем побудови сучасного електропостачання таких споживачів є забезпечення якості електроенергії. Разом з відомими причинами погіршення якості електроенергії з'явилася ще одна - широке поширення нелінійних навантажень, що створюють при своїй роботі струми несинусоїдальної форми. Вищі гармоніки чинять несприятливий вплив на роботу силового електроустаткування, пристроїв релейного захисту й автоматики, викликають прискорене старіння ізоляції [4].

Підвищення ефективності використання електроенергії стаціонарними залізничними та сторонніми споживачами є важливою складовою проблеми енергозбереження на залізничному транспорті. Нині існує безліч заходів, спрямованих на зниження втрат і підвищення енергоефективності електроустаткування, які можна об'єднати в три взаємопов'язані напрями: раціональне керування режимами роботи устаткування, керування якістю електроенергії (ЯЕ), підвищення зацікавленості і мотивації технологічного персоналу. Засоби підвищення ЯЕ доцільно вибирати за умовами допустимості режимів і їх оптимізації для виконання нормативних вимог до якості електроенергії. Вибір способів і технічних засобів підвищення ЯЕ з безлічі існуючих - завдання великої складності. Оптимальний вибір за техніко-економічними критеріями з урахуванням безперервного взаємного впливу електричних навантажень дозволить зменшити витрати на спеціальне устаткування і пристрої [5]. Необхідно зазначити, що вирішення зазначених проблем має базуватися на результатах інструментального дослідження якості електричної енергії в процесі її передачі та споживання.

**Метою роботи** є дослідження та аналіз показників якості електроенергії у лініях живлення нетягових промислових споживачів.

### Методика проведення вимірювань

Експериментальні дослідження є основним джерелом інформації для вивчення електромагнітних процесів перетворення і споживання електричної енергії, електромагнітних процесів і завод, а також конкретних електричних пристроїв у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць (СТЕ) [4]. Енергообмінні процеси в системі тягового електропостачання мають імовірнісний характер, а їх параметри є статистичними характеристиками. Тому дослідження ЯЕ базуються на застосуванні статистичних методів обробки та аналізу експериментальних даних, отриманих як в результаті фізичного експерименту, так і в результаті математичного моделювання.

Сучасні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) дозволяють реалізовувати вимірювальні алгоритми високого рівня складності з відповідним збільшенням їх можливостей та високою точністю вимірювань, при цьому частина вимірювальної процедури базується на реалізації її програмними засобами. Для контролю та фіксації якості електромагнітних процесів у колах змінного струму основними ЗВТ, які застосовувались при дослідженні, є портативні аналізатори типу EDL-175xg чи PNA-296 виробництва фірми SATEC побудовані на базі приладу для вимірювання показників якості та обліку електричної енергії PM175.

Як приклад на рис. 1 приведено схему вимірювання показників якості електроенергії на діючій електрифікованій ділянці змінного струму в лінії ДПР.

В процесі експериментальних досліджень оцінювались такі показники якості електричної енергії:

- рівень та відхилення напруги;
- коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги.

Додатково виконувалась оцінка коефіцієнта реактивної потужності та коефіцієнта спотворення струму.

### Результати досліджень та їх аналіз

Вибіркові результати досліджень якості електроенергії в лініях живлення нетягових споживачів ДПР, ПЕ 10 кВ та 0,4 кВ наведені на рис. 2-4, а статистичні характеристики наведені у таблицях 1-3.

Аналіз отриманих показників якості електроенергії в лінії ДПР виявив, що в цілому статистичні характеристики усталеного відхилення напруги в мережі 27,5 кВ знаходяться в межах допустимих значень та за час спостереження змінювались незначно. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...3,63 %, що перевищує нормально допустиме значення, але знаходиться в межах гранично допустимих значень. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...10,5 %, що перевищує і нормально допустиме значення, і гранично допустиме значення.

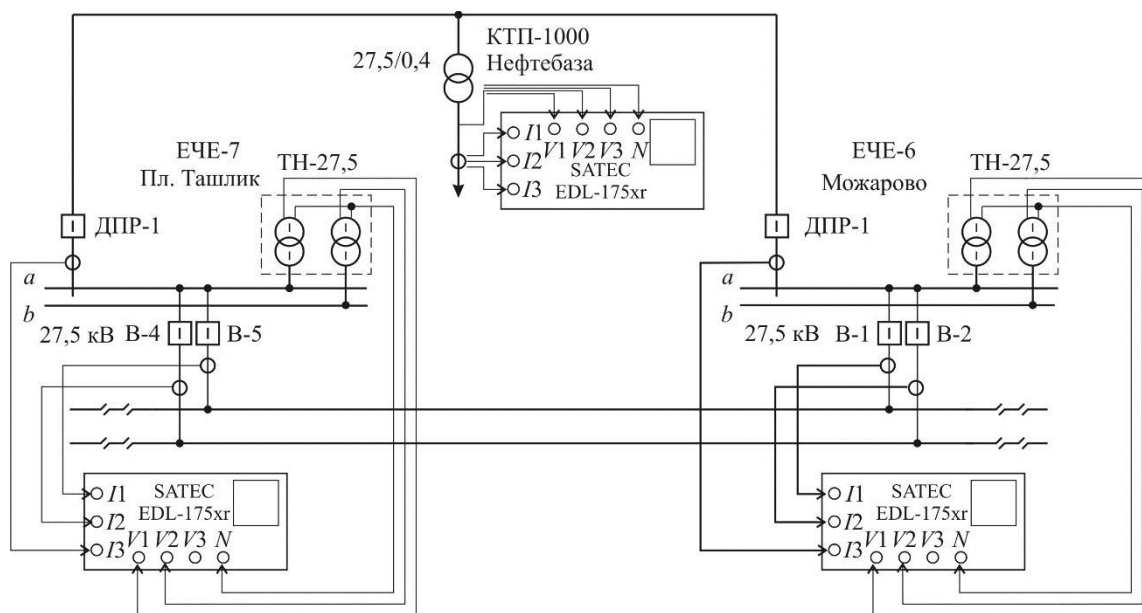


Рис. 1. Схема проведення вимірювань на промисловому об'єкті, що живиться від ДПР.

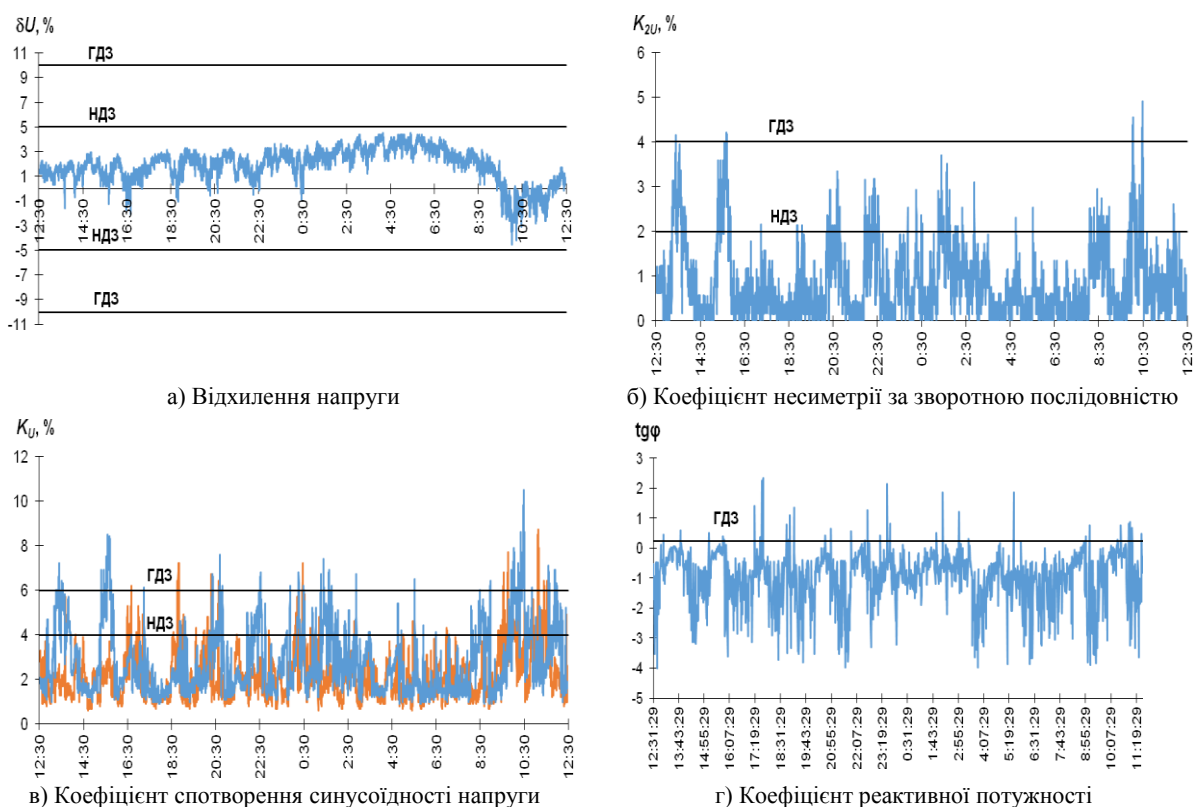


Рис. 2. Якість електроенергії в лінії ДПР.

Аналіз отриманих показників якості електроенергії в лінії 10 кВ виявив, що статистичні характеристики усталеного відхилення напруги знаходяться в нормованих межах та за час спостереження змінювались незначно. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю в лінії 10 кВ змінювався в межах 0...1,58 %, що не перевищує нормально допустимого значення. Проте, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в лінії 10 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...14,4 %, що перевищує і нормально допустиме значення, і гранично допустиме значення.

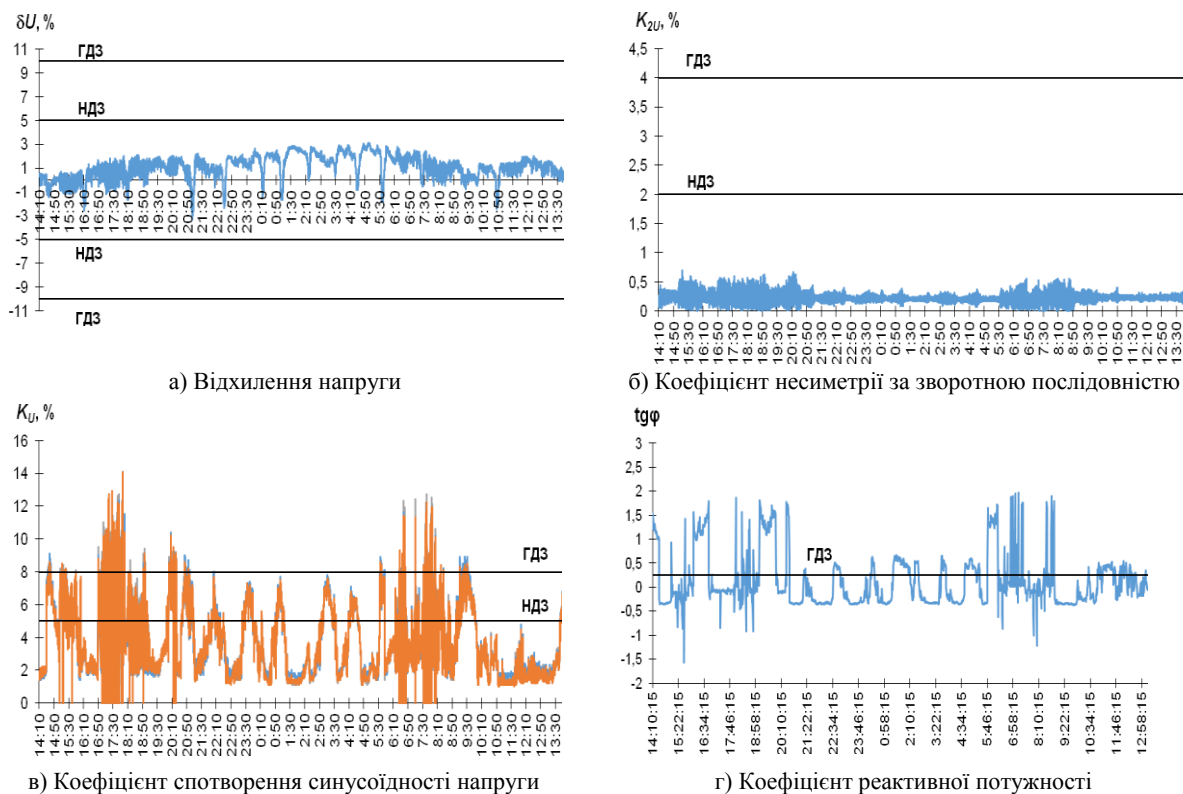


Рис. 3. Якість електроенергії в лінії 10 кВ.

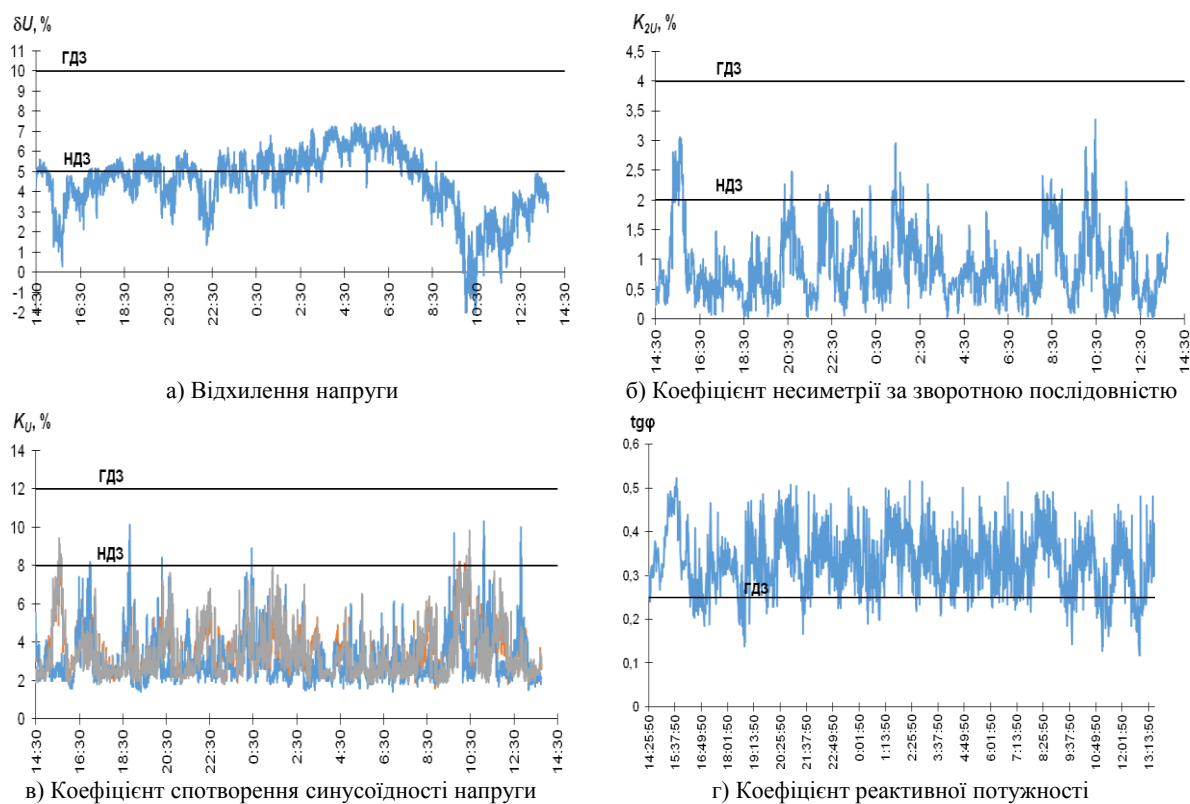


Рис. 4. Якість електроенергії на шинах 0,4 кВ.

## Електропостачання та електроустаткування

Таблиця 1.

**Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії ДПР 27,5 кВ**

Показник	U			$\delta U$	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>			U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>		
M	27844,55	28179,63	28016,05	1,86	0,83	2,76	2,14	0,00	-0,97	
Mo	28034,00	28401,00	28122,00	2,61	0,03	1,40	1,20	0,00	0,00	
Me	27938,00	28305,00	28074,00	2,09	0,56	2,30	1,90	0,00	-0,78	
D	208507,75	166606,06	139821,91	1,87	0,58897	2,14	1,18	0,00	0,80	
s	456,63	408,17	373,93	1,37	0,7674	1,46	1,09	0,00	0,89	
As	-0,93	-0,94	-0,89	-0,89	1,41	1,25	1,60	0,00	-0,88	
Ex	1,67	0,87	0,93	0,96	1,93	1,37	3,74	0,00	1,36	
min	25259,00	26393,00	26313,00	-4,50	0,03	0,90	0,60	0,00	-3,99	6,4
max	28799,00	28974,00	28743,00	4,52	4,90	10,50	8,70	0,00	2,35	41,7

Таблиця 2.

**Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії 10 кВ**

Показник	U			$\delta U$	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>			U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>		
M	10065,14	10052,39	10108,79	0,75	0,36	3,81	3,92	3,70	2,74	
Mo	10077,14	10065,85	10120,38	2,38	0,35	1,80	1,70	1,30	2,05	
Me	10075,34	10062,37	10120,38	0,86	0,37	3,20	3,20	3,00	2,07	
D	9369,75	9323,13	9535,52	0,93	0,01409	5,36	5,37	5,13	2,74	
s	96,80	96,56	97,65	0,96	0,1187	2,32	2,32	2,26	1,65	
As	-0,68	-0,67	-0,62	-0,65	0,12	0,78	0,78	0,74	1,71	
Ex	0,75	0,57	0,35	0,58	2,65	0,04	-0,12	-0,07	1,77	
min	9641,48	9643,22	9678,70	-3,46	0,01	0,00	0,00	0,00	1,10	7,3
max	10260,73	10300,55	10305,71	2,71	1,58	13,60	14,40	13,80	9,13	18,5

Таблиця 3.

**Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії 0,4 кВ**

Показник	U			$\delta U$	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>			U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>		
M	400,06	395,65	395,36	4,48	0,88	3,07	3,69	3,44	0,33	
Mo	400,97	399,68	398,20	5,37	0,59	2,30	2,50	2,30	0,33	
Me	401,14	396,73	396,57	4,74	0,73	2,70	3,50	3,00	0,33	
D	32,96	46,55	38,99	2,50	0,29136	1,39	1,47	1,68	0,01	
s	5,74	6,82	6,24	1,58	0,5398	1,18	1,21	1,30	0,07	
As	-0,88	-1,06	-1,04	-0,96	1,15	1,94	0,98	1,35	0,10	
Ex	0,38	1,87	1,50	1,29	1,23	5,34	0,79	1,68	-0,27	
min	378,56	362,48	366,41	-2,66	0,00	1,40	1,60	1,70	0,12	9,8
max	410,58	408,08	407,90	7,42	3,36	10,30	8,50	9,80	0,52	38,3

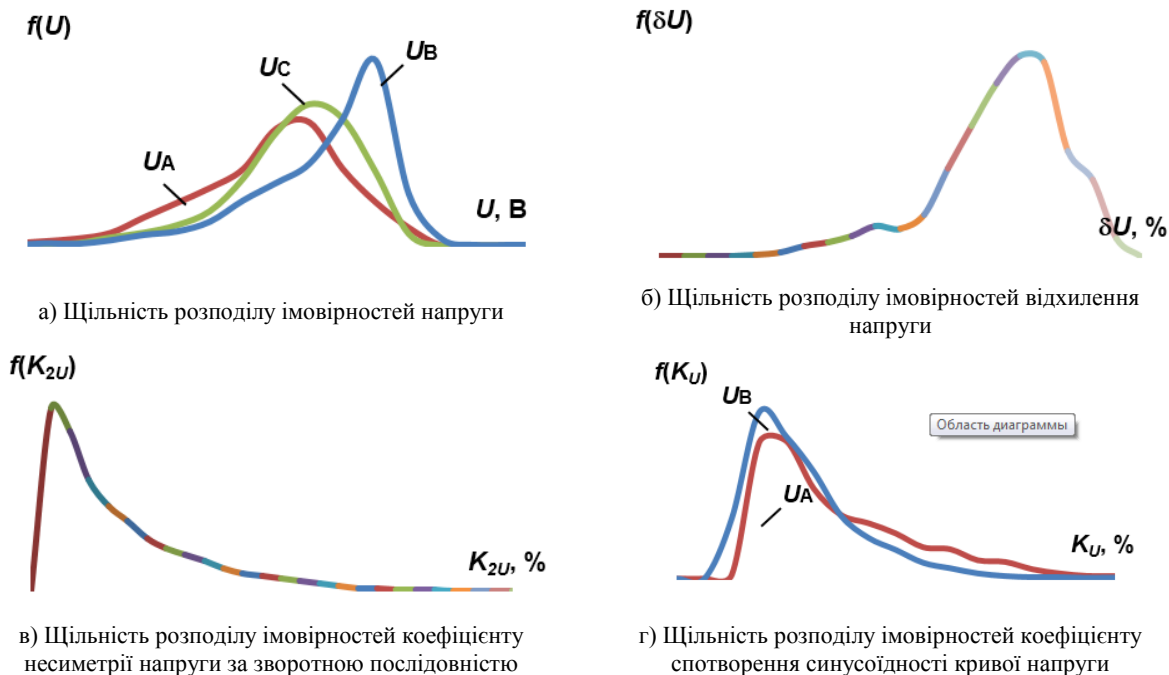
У свою чергу, на приєднаннях 0,4 кВ величина коефіцієнта  $K_U$  знаходиться в межах 1,4...10,3 %, що перевищує нормально допустиме, але в межах гранично допустимого значення. При цьому усталене відхилення напруги змінювалось від - 2,66 % до + 7,42 %, що перевищує нормально допустимі значення. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю на приєднаннях 0,4 кВ змінювався в межах 0...3,43, тобто, в деякі моменти часу перевищував нормально допустимі значення.

Цікавим є спостереження за змінами коефіцієнта реактивної потужності в досліджуваних лініях. Так, у лінії ДПР майже протягом всього часу має місце генерація реактивної потужності. Можна зробити висновок, що вона викликана ємнісною провідністю лінії при незначному рівні навантаження. В лінії 10 кВ режими генерації та споживання реактивної потужності чергуються та викликані циклічністю технологічного процесу нетягового споживача. На приєднаннях 0,4 кВ майже протягом усього часу спостереження має місце споживання реактивної потужності. Значення величини tgφ на всіх досліджуваних рівнях напруги перевищує нормований рівень в 0,25.

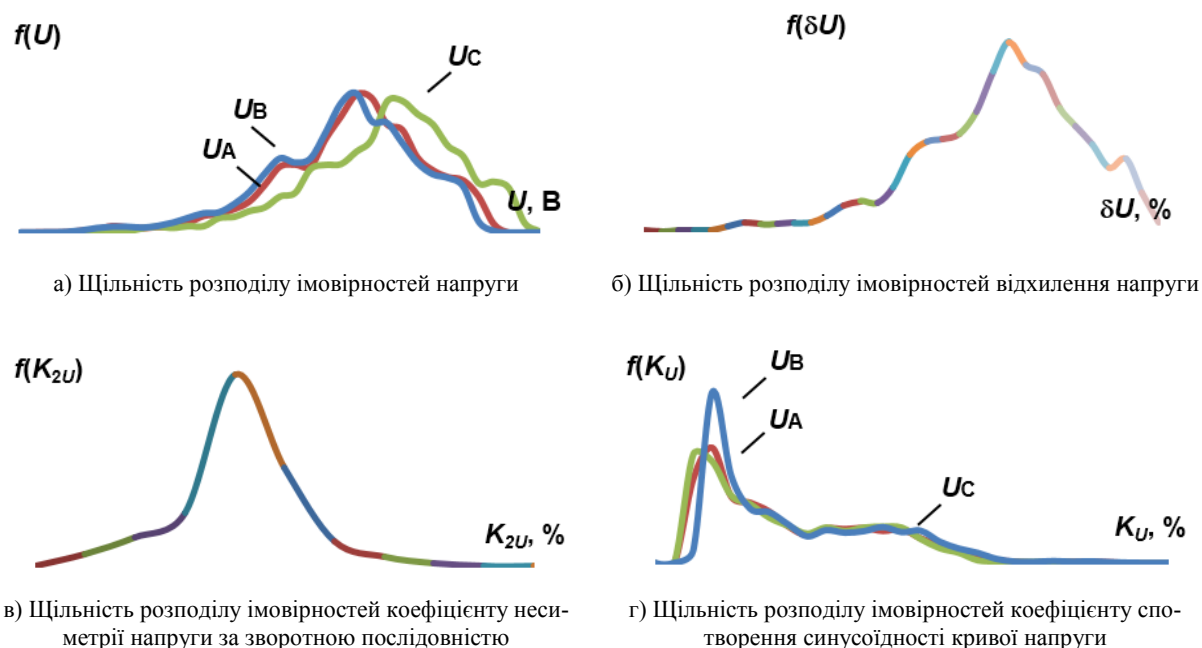
Особливої уваги заслуговує дослідження коефіцієнта спотворення струму. Діючі на території України нормативні документи, що регулюють питання забезпечення якості електроенергії, побудовані на необхідності дотримання показників якості електроенергії, похідних від напруги [4]. В європейській практиці використовується стандарт IEC 519-1992 [6], який визначає максимальні значення струмів непарних гармонік у відсотках від струму навантаження. Відповідно до цього стандарту максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму залежить від відношення струму короткого замикання мережі в точці загального приєднання до струму навантаження. У разі потужної мережі (прийmemo до уваги той факт, що потужність тягової підстанції значно перевищує потужність нетягового на-

вантаження) максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму не має перевищувати 15 %. Струми гармонік порядковими номерами  $n < 11$  мають бути менше 12 % від струму навантаження. Як показують результати розрахунків (табл. 1-3) коефіцієнти спотворення струму в досліджуваних лініях значно перевищують наведені нормативи. При цьому розмахи змін спотворення струму мають більші значення в лінії ДПР та отримуючого живлення від неї споживача 0,4 кВ.

На рис. 5-7 наведено емпіричні закони розподілу досліджуваних показників якості на різних приєднаннях. Їх аналіз вказує на значний розкид значень досліджуваних показників якості, викликаний нестаціонарними енергообмінними процесами, які відбуваються у тягових мережах змінного та постійного струму.



**Рис. 5. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 27 кВ.**



**Рис. 6. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 10 кВ.**



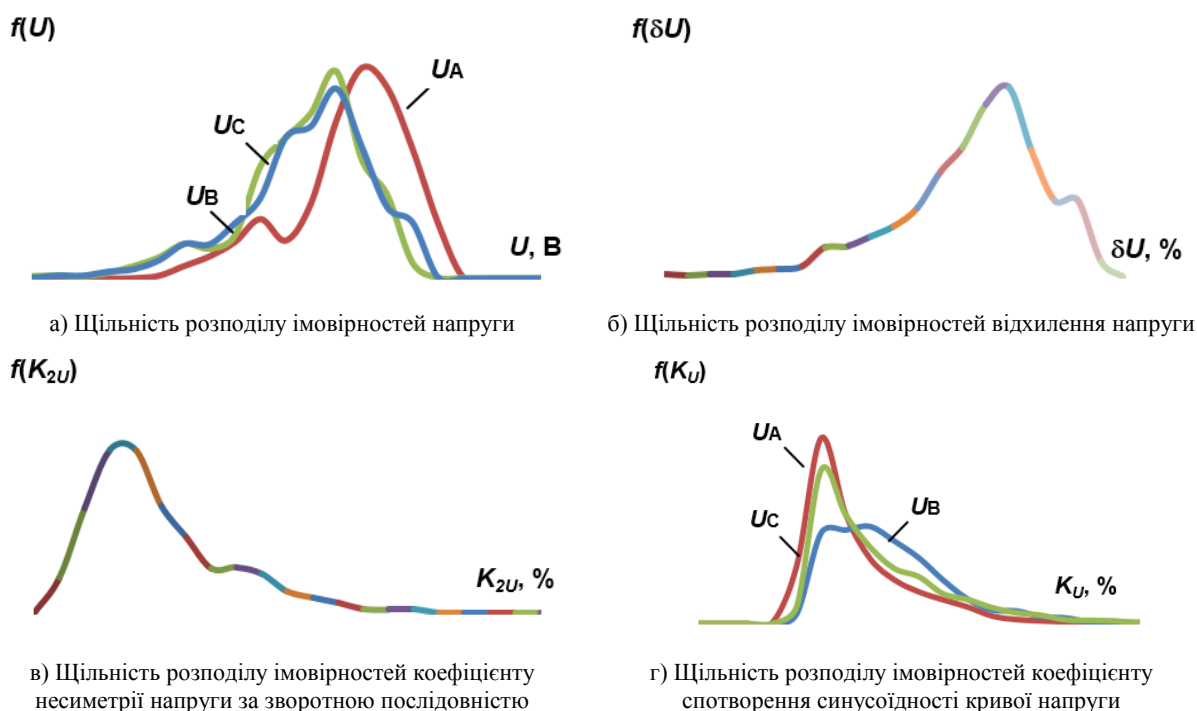


Рис. 7. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 0,4 кВ

При розробці напрямків з підвищення якості електричної енергії в лініях нетягового електропостачання необхідно передбачати заходи, спрямовані не тільки на підтримку якості електроенергії, але й надійності електропостачання, підвищення енергоефективності та зменшення втрат в системах електропостачання.

#### Список літератури

1. Ратнер, М.П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. / М.П. Ратнер, Е.Л. Могилевский. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2014 році. – К. Укрзалізниця, 2015. – 240 с.
3. Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. / С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмаков.// Электронный ресурс, режим доступа: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/9644/1/12\\_Temerbaev.pdf](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/9644/1/12_Temerbaev.pdf).
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саченко, Д.О. Босий. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
5. Третьяков, Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей.// Транспорт Российской Федерации, 2011, № 3, с. 50-54.
6. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.

УДК 621.331

Д.О. Босий, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

## ВЗАЄМОДІЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО З СИСТЕМАМИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**Анотація.** Наведено результати досліджень на узагальнених моделях взаємодії систем електричної тяги постійного і змінного струму із системою зовнішнього електропостачання. В якості методів дослідження використано двовимірний розподіл величини тягового навантаження в припущенні, що ор-

тогональні складові струмів є випадковими та незалежними величинами. Для кількісного визначення гармонійних складових використано спрощені кусково-задані функції пульсуючого струму. Встановлено, що кореляція між складовими струмів тягового навантаження характерна лише системі постійного струму. У системі змінного струму через вплив більшої кількості факторів кореляція між цими складовими відсутня. Практичне значення полягає у ранжуванні систем електричної тяги залежно від емісії струмів вищих гармонік.

**Ключові слова:** електрична тяга, змінний струм, постійний струм, система електропостачання, випадкова величина, двовимірний розподіл, кореляція, якість електроенергії, несиметрія, емісія гармонік.

**Анотація.** Приведены результаты исследований на обобщенных моделях взаимодействия систем электрической тяги постоянного и переменного тока с системой внешнего электроснабжения. В качестве методов исследования использовано двумерное распределение величины тяговой нагрузки в предположении того, что ортогональные составляющие токов являются случайными и независимыми величинами. Для количественного определения гармонических составляющих использованы упрощенные кусочно-заданные функции пульсирующего тока. Установлено, что корреляция между составляющими токов тяговой нагрузки характерна только системе постоянного тока. В системе переменного тока из-за влияния большего количества факторов корреляция между составляющими отсутствует. Практическое значение заключается в ранжировании систем электрической тяги в зависимости от эмиссии токов высших гармоник.

**Ключевые слова:** электрическая тяга, переменный ток, постоянный ток, система электроснабжения, случайная величина, двумерное распределение, корреляция, качество электроэнергии, несимметрия, эмиссия гармоник.

**Abstract.** This article contains the results of studies on the generalization models of AC and DC electric traction systems interaction with the external power supply systems. The two-dimensional distribution of the traction load is used as the methods of investigation by the assumption that the orthogonal components of the currents are random and independent variables. The simplified piecewise-defined function of the pulsating current is used for calculating the harmonic components. It was found that only for the DC traction system the correlation between the components are characterized by the traction load currents. For the AC traction system due to the influence more factors the correlation between the components is absent. The practical value lies in the rankings of electric traction systems depending on the emission of current's harmonic.

**Keywords:** electric traction, alternating current, direct current, power supply system, random value, two-dimensional distribution, correlation, power quality, unbalance, harmonic emission.

### Вступ

Системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць складаються з великої кількості відносно складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою. Складні процеси взаємодії систем тягового та зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи електроустаткування, що застосовується на тягових підстанціях і електрорухомому складі. Через вказані причини та без спеціальних знань та засобів моделювання неможливо побудувати математичні моделі в загальному випадку для вивчення першопричин виникнення проблем в складних експлуатаційних режимах.

Для забезпечення перевізного процесу системами електропостачання постійного та змінного струму виконується споживання електричної енергії з первинної мережі, проте ефективність роботи окремої системи та її вплив на систему зовнішнього електропостачання залишається індивідуальним. З усіх відомих видів впливу, взаємодію з системами тягового електропостачання можна обмежити головними – створення відхилень напруги, спотворення синусоїдності кривої напруги (струму) та розбалансування трифазної системи.

Метою даної роботи є дослідження на узагальнених моделях взаємодії систем тягового електропостачання з системами зовнішнього електропостачання для подальшого використання в задачах вивчення енергообмінних процесів і, відповідно, поліпшення ефективності та забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги.

### Постановка задачі дослідження

Відомо, що будь-яка задача моделювання в динаміці, що пов'язана з розрахунками потоків енергії, зводиться до розв'язання диференціальних рівнянь [1]. Методика вирішення рівнянь повинна враховувати наявність так званих «жорстких» задач, ознакою яких є наявність у досліджуваній системі об'єктів з суттєво різними постійними часу, або об'єктів, які різко змінюють свої параметри в процесі функціонування. Такими в системах тягового електропостачання є силові вентилі, у яких стрибкоподібно змінюється провідність при переході з провідного стану в непровідний.

Кінцевий споживач в системі тягового електропостачання на частоті основної гармоніки є додатним опором. На частотах вищих гармонік споживач виступає генератором, тобто створює емісію через контактну мережу певного набору гармонійних складових, який залежить від типу силового перетворювача. Струми вищих гармонійних складових, замикаючись через тягову мережу, трансформуються відповідним чином до первинної та районної мереж. При чому, відомо, що ступінь впливу тягового навантаження на первинну мережу залежатиме від режиму роботи районного навантаження, що в першу чергу поглинатиме спотворення, викликані, як-то гармонійними складовими, так і наявністю струмів зворотної послідовності.

Використання на залізницях з системою електричної тяги змінного струму статичних перетворювачів на електровозах пов'язано з певними перевагами перед системою постійного струму, які існували на період масової електрифікації ділянок [2]. Разом з тим, однофазні тягові навантаження викликають ряд процесів, які ускладнюють роботу енергосистем та споживачів, що від них живляться. Це пов'язано з тим, що однофазні несинусоїдні навантаження створюють в трифазних мережах високої напруги несиметрію струмів і, як наслідок, несиметрію напруг, в результаті чого збільшуються втрати і зменшується пропускна спроможність ліній електропередач і трансформаторів. Крім цього, знижується наявна потужність генераторів, синхронних та асинхронних машин, випрямних та частотних перетворювачів.

Вплив несиметрії безпосередньо на електрорухомих склад виражається в тому, що рівень напруги в контактній мережі, що живиться від різних фаз трифазної системи, виходить неоднаковим, що впливає на швидкість руху і пропускну спроможність залізниці [3]. Зі збільшенням опору живлячої системи збільшується несиметрія напруги, що в ній виникає. Для європейських країн, де використовуються змінний струм для електричної тяги, прийнято живлення від однофазних трансформаторів. Тому для таких країн з невеликою територією тягове навантаження незначно впливає на систему зовнішнього електропостачання.

Той факт, що електричні мережі України, особливо для промислово розвинених регіонів досить сильно розгалужені, мають велику довжину, значить що при неправильному проектуванні вплив тягових навантажень може досягати великих значень. Крім цього, несиметричний та несинусоїдний режим роботи електричної тяги постійного чи змінного струму є нормальним режимом роботи системи електропостачання.

Вплив тягового навантаження на рівень напруги в мережі зовнішнього електропостачання визначається приведеним опором зовнішньої системи. Для віддалених точок енергосистеми тягове навантаження створюватиме істотний вплив. Для інших – впливом тягового навантаження можна знехтувати. Для нормалізації рівня напруги при надлишку реактивної потужності застосовують шунтові реактори, а відповідно, при недостатці – пристрої компенсації. Досвід експлуатації виявив низький рівень ефективності застосування ступеневих регульованих пристроїв у мережах, що живлять тягові навантаження, з метою регулювання балансу реактивної потужності через обмеженість комутаційного ресурсу.

Більш перспективним на даний час вважається застосування тиристорно-керованих реакторів з можливостями плавного регулювання струму в кожній фазі. Це не тільки підвищує керованість процесу електропостачання, але при додатковому налаштуванні дозволяє знизити несиметрію напруги, яка спричинена специфікою тягового навантаження. Ще більшу гнучкість регулювання мають компенсатори комбінованого типу. До їх складу входять два види регульованих реактивних елементів: керовані реактори та комутуємі конденсатори. Зазвичай для згладження характеристики регулювання на два-чотири конденсаторних блоки використовують один керований реактор однакової потужності. Таким чином, це дає можливість керувати генерацією реактивної потужності від нуля до номінального значення.

Для зменшення впливу гармонійних складових застосовують або фільтруючі пристрої (постійний струм) або фільтро-компенсуючі (змінний). Принцип роботи цих пристроїв полягає у зменшенні частотного опору для окремих гармонік таким чином, щоб контур їх замикання був якомога ближче до джерела їх виникнення; тим самим досягається їх шунтування в тяговій мережі і зменшується вплив на системи зовнішнього електропостачання. Ефективність застосування фільтруючих пристроїв знижується через використання сучасного електрорухомого складу з принципово іншими перетворювачами, що генерують невідомий раніше спектр гармонік, та через виникнення несиметрії первинної напруги, що в свою чергу, викликає появу неканонічних складових.

### **Методика та результати дослідження**

Вважаючи активні та реактивні складові комплексних величин струмів тягового навантаження випадковими двовимірними розподіленими величинами, окремо на прикладі системи постійного та змінного струму визначимо характер та окремі точки, довкола яких орієнтуються ймовірності зміни режимів роботи системи електропостачання.

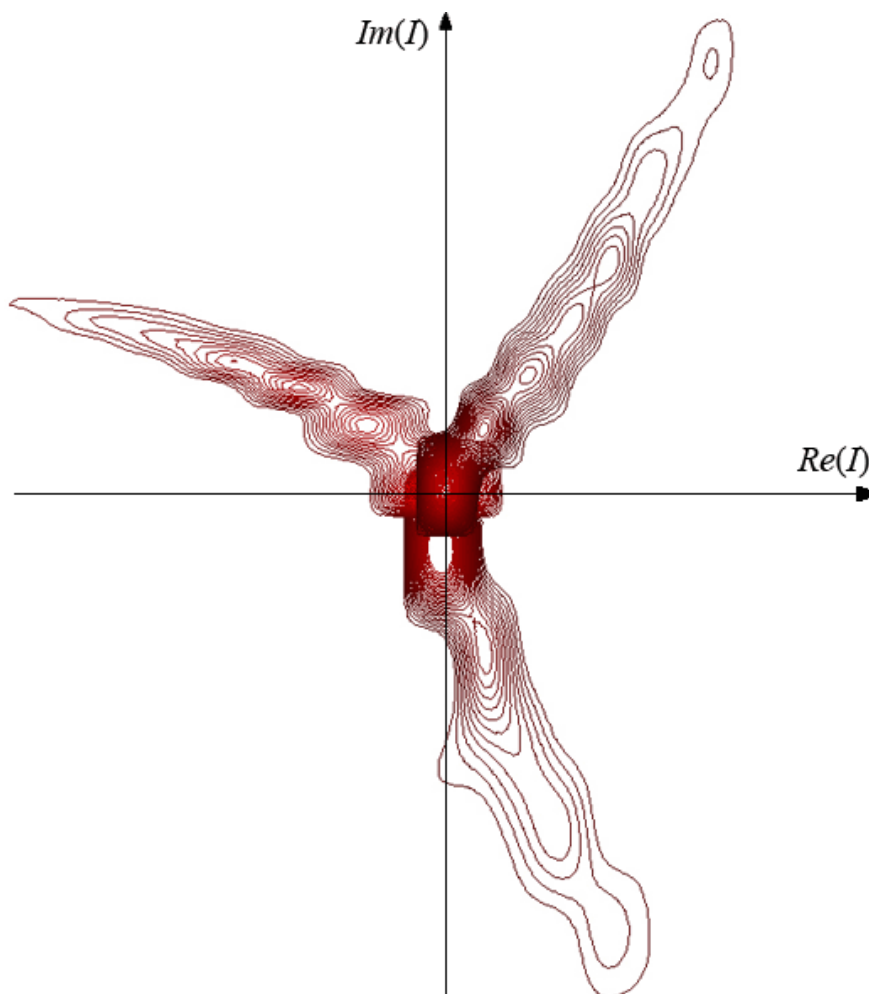
Шляхом узагальнення одновимірного розподілу, наприклад, до двовимірного нормального закону, загальна формула щільності ймовірностей

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\sigma_{12}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\sigma_{12}^2)}\left(\frac{(x_1-a_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\sigma_{12}(x_1-a_1)(x_2-a_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-a_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right], \quad (1)$$

де  $a_1, \sigma_1$  – математичне очікування та стандартне відхилення змінної  $x_1$ ;  $a_2, \sigma_2$  – те саме, змінної  $x_2$ ;  $\sigma_{12}$  – парна кореляція між змінними  $x_1$  та  $x_2$ ,  $\sigma_{12} = \text{cov}(x_1, x_2)/(\sigma_1\sigma_2)$ .

На підставі досвіду проведених експериментальних вимірювань [5] встановлено, що між активними та реактивними складовими струмів навантаження наявна додатна нелінійна кореляція, при чому вона характерна лише системам електричної тяги постійного струму. Це пояснюється тим, що безпосередньо електрорухомих склад постійного струму та його режими роботи не впливають на природу виникнення реактивної потужності [7]. Що не можна сказати про систему змінного струму, де кореляція в загальному випадку відсутня через прямий вплив додаткових факторів, що дозволяє вважати активні та реактивні складові тягових струмів незалежними величинами стосовно системи електропостачання. Якщо ж узяти окремо режим роботи одного електровозу, то простежується нелінійний кореляційний зв'язок між цими складовими [6].

Згідно з описаним на рис. 1 представлена щільність ймовірностей двовимірної випадкової величини трифазного струму навантаження тягової підстанції постійного струму, на рис. 2 – те саме, тільки для змінного струму. Концентрація ліній рівня навколо характерних точок вказує на найбільш вірогідні точки режимів та їх відповідну кількість. Так, у системі постійного струму спостерігається 3 стійких точки режиму електропостачання, причому в контексті загалом симетричної роботи кожної фази.



**Рис. 1. Лінії рівня струму тягової підстанції постійного струму як двовимірної випадкової величини**

У системі ж змінного струму режим електроспоживання у двох робочих фазах суттєво відрізняється від третьої (недозавантаженої) [8]. У порівнянні з системою постійного струму можна констатувати більшу степінь невизначеності та розкиду активної і реактивної складових струму [9].

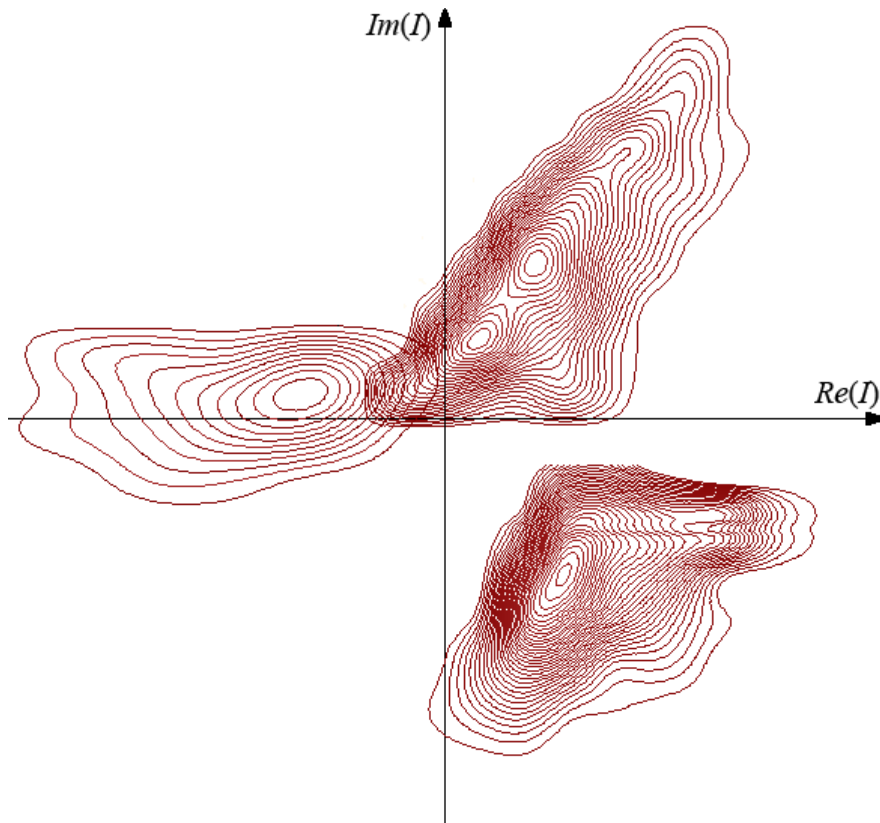


Рис. 2. Лінії рівня струму тягової підстанції змінного струму як двовимірної випадкової величини

Кількісно гармонійний вплив систем тягового електропостачання можна оцінити спрощеними моделями некерованих випрямлячів [4]. Так, для системи змінного струму гармонійний склад струму електровозу може бути визначений аналітичним розкладанням кусково-заданої функції пульсуючого струму для мостового однофазного випрямляча, а саме

$$i(t) = \begin{cases} -I_{dc}, & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4}; \\ +I_{dc}, & t < \frac{T}{4}; t > \frac{3T}{4}; \end{cases} \quad (2)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 1, 5, 9, 13, \dots \\ -\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 3, 7, 11, 15, \dots \\ 0, & h = 0, 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Для системи постійного струму, на прикладі 6-пульсового випрямляча, струм в одній фазі визначається

$$i_A(t) = \begin{cases} +I_{dc}, & 0 < t < \frac{T}{6}, \frac{5T}{6} < t < T; \\ 0, & \frac{T}{6} < t < \frac{2T}{6}, \frac{4T}{6} < t < \frac{5T}{6}; \\ -I_{dc}, & \frac{2T}{6} < t < \frac{4T}{6}. \end{cases} \quad (4)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 1, 7, 13, 19, \dots \\ -\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 5, 11, 17, 23, \dots \\ 0, & h = 2, 4, 6, 8, \dots \\ 0, & h = 3, 9, 15, 21, \dots \end{cases} \quad (5)$$

За допомогою розглянутих аналітичних моделей досить просто визначити емісію вищих гармонійних складових з боку тягового навантаження. Отримані відносні спектри струмів (рис. 3), також дозволяють визначити очікуване значення коефіцієнта нелінійних спотворень (THD) струму для систем постійного і змінного струму. Для першої системи змінного струму значення THD складає 42,6 %, для постійного струму і 6-пульсної схеми – 28,5 %, для 12-пульсної – 13,7 %.

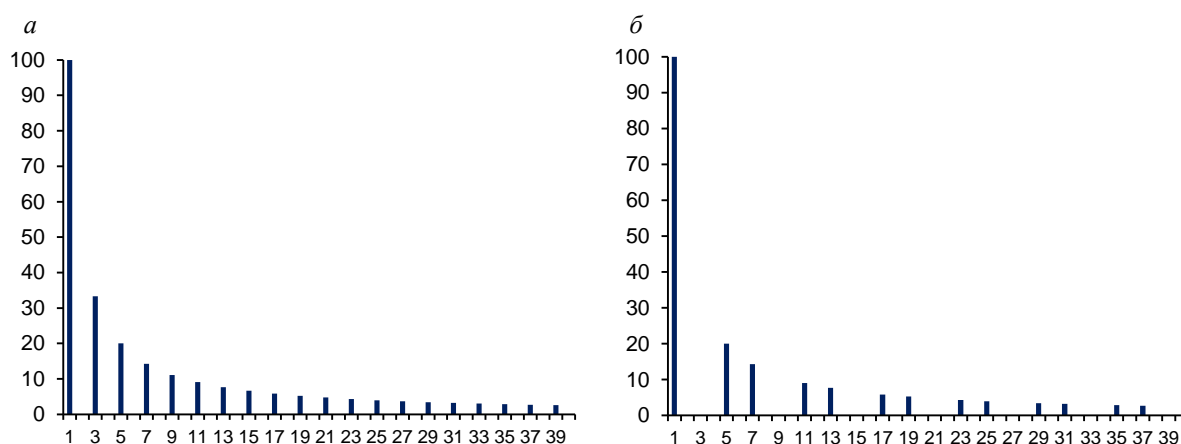


Рис. 3. Відносні спектри гармонік для електричної тяги змінного (а) та постійного струму (б)

Також за допомогою розглянутих моделей можна оцінити залежності зміни емісії струмів вищих гармонійних складових від споживаної потужності (рис. 4). Як бачимо, для однієї споживаної потужності найбільшою та найменшою емісією володіє система 3,3 кВ з 6-пульсною та 12-пульсною схемами випрямлення відповідно. Система змінного струму 27,5 кВ займає проміжне положення.

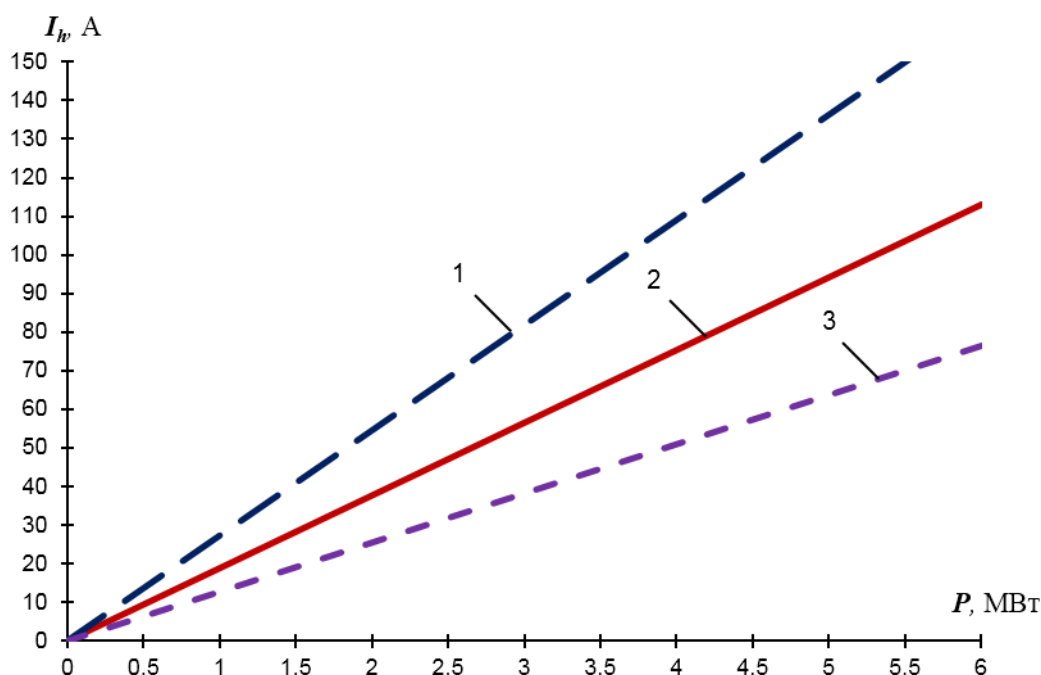


Рис. 4. Залежності емісії вищих гармонік струму від споживаної потужності для систем електричної тяги: 1 – 3,3 кВ (6-пульсна схема); 2 – 27,5 кВ; 3 – 3,3 кВ (12-пульсна схема)

### **Висновки**

Процеси взаємодії між системами тягового і зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи електроустаткування, що містяться у великій кількості складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою.

Додатна нелінійна кореляція між активними та реактивними складовими струмів тягового навантаження характерна лише системам електричної тяги постійного струму, а це вказує на те, що електрорухомий склад постійного струму не впливає на природу виникнення реактивної потужності.

У системі електричної тяги змінного струму через вплив різних факторів відсутня кореляція між ортогональними складовими струмів, що дозволяє досліджувати їх як незалежні випадкові величини.

Емісія струмів вищих гармонійних складових при однаковій споживаній потужності та інших рівних умовах найбільша в системі постійного струму 3,3 кВ з 6-пульсними схемами випрямлення, найменша – для цієї ж системи але з 12-пульсними схемами. Система змінного струму 27,5 кВ, незважаючи на емісію вищих гармонік, займає проміжне положення.

### **Список літератури**

1. Крюков А.В. Влияние тяговой нагрузки на режим сети внешнего электроснабжения / А.В. Крюков, Е.В. Турков, В.А. Ушаков // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т. – 2003. – Т. 2. – С. 159–165.
2. Мамошин Р.Р. Выбор режима напряжения в тяговой сети переменного тока / Р.Р. Мамошин // Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: сб. трудов. – М.: МИИТ. – 2000. – С. 18–22.
3. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками / А.И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
4. Bollen M. H. J. Signal Processing of Power Quality Disturbances / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. – Piscataway, NJ, IEEE Press, 2006. – 861 p.
5. Сиченко В.Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В.Г. Сиченко, В.А. Зубенко, Д.О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 58–63.
6. Скалозуб В. В. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости активной и реактивной электроэнергии / В.В. Скалозуб, В.Г. Кузнецов, Д.А. Босый, А.П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4. – С.111–114.
7. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д.О. Босий, Д.Р. Земський // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 8(68). – С. 52–57.
8. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саенко, Д.О. Босий. – Д.: Стандарт-Сервіс, 2015. – 340 с.
9. Bosiy D.O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D.O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 30–37.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.*

УДК 621.331

**Д.С. Белухин, канд. техн. наук**

*(Україна, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)*

## **ВАРИАНТ МОДЕРНИЗАЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

*Анотація. Розглянуто один із можливих варіантів модернізації системи живлення допоміжних приводів електровозів змінного струму з використанням типової схеми автономного інвертора напруги.*

*Ключові слова: електровоз, розчеплювач фаз, автономний інвертор.*

*Аннотация. Рассмотрен один из возможных вариантов модернизации системы питания вспомогательных приводов электровозов переменного тока с использованием типовой схемы автономного инвертора напряжения.*

*Ключевые слова: электровоз, расцепитель фаз, автономный инвертор.*

**Abstract.** *One of the possible variants of modernization of electric power auxiliary drives an alternating current using a template autonomous voltage inverter.*

**Keywords:** *electrical locomotive, phase splitter, autonomi inverter.*

**Введение.** На сегодняшний день экономичное использование энергоресурсов одно из приоритетных направлений в экономической политике Украины. В современных условиях интенсификации работы объектов железнодорожного транспорта, когда основной объем перевозок осуществляется на электрифицированных участках железных дорог, приводит к повышению энергопотребления. Учитывая высокие тарифы на электроэнергию, отраслевая политика государственной администрации железнодорожного транспорта Украины предполагает переход к энергосберегающим технологиям и эффективному снижению потерь электроэнергии.

Существенную часть эксплуатируемого парка составляют электровозы переменного тока, которые выпущены во второй половине XX века. Для привода вспомогательных механизмов и агрегатов этих электровозов используются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Массовое применение вспомогательных асинхронных машин было начато на электровозах переменного тока Н60 (ВЛ60) в 60-е годы XX века. Основной сложностью, с которой пришлось столкнуться при использовании на подвижном составе асинхронных машин, стало получение трехфазного напряжения из однофазного. Для этого были разработаны устройства – фазорасщепители.

Несмотря на простую и, казалось бы, весьма надежную систему вспомогательных машин опыт эксплуатации показывает достаточно низкую надежность системы питания вспомогательных электроприводов. В некоторых депо, где эксплуатируются электровозы переменного тока, происходит ежемесячно по 20–30 отказов вспомогательных машин. Кроме того, применение существующей системы питания асинхронных приводов вспомогательных машин не позволяет обеспечить их работу в экономных режимах. Расчеты, сделанные для потока грузонасыщенных дорог, показали, что вспомогательные машины потребляют примерно 10% энергии, затрачиваемой на тягу поездов [1]. В связи с этим на современном этапе сложных рыночных взаимоотношений энергетические показатели системы вспомогательных машин должны быть достаточно высокими и обеспечивать определенную экономию электроэнергии, которая, в свою очередь, затрачивается локомотивом на собственные нужды (мотор–вентиляторы, мотор–компрессоры, питание цепей управления, мотор–насос и обогрев кабин).

На современном электроподвижном составе применяются асинхронные приводы вспомогательных механизмов, которые получают питание от преобразователей частоты и напряжения. В связи с этим рассмотрим возможность применения такого типа преобразователей на электровозах серии ВЛ80(К, С, Т), которые в Украине имеются в достаточном количестве.

**Результаты исследований.** Исходя из условия безопасности движения поездов и безотказной работы силового оборудования (тяговый трансформатор, тяговые двигатели, тормозное оборудование, пневматическое оборудование цепей управления) система вспомогательных машин является важным звеном в общем комплексе оборудования подвижного состава. Надежность привода вспомогательных машин и механизмов имеет большое значение и необходима для обеспечения нормальной работы основных узлов электровоза.

Стандартный алгоритм работы системы питания вспомогательных машин на электровозах серии ВЛ80 достаточно прост [2, 3]. Запуск расщепителя фаз осуществляется с помощью пускового резистора  $R_{пуск}$  (рис. 1) контактором  $КМ_{пуск}$ . После разгона фазорасщепителя до скорости 1300 об/мин срабатывает панель расщепителя фаз и отключает контактор  $КМ_{пуск}$ . Дальнейший разгон расщепителя фаз осуществляется без резистора  $R_{пуск}$ . Асинхронные двигатели вспомогательных приводов подключаются к источнику трехфазного напряжения по мере необходимости. В качестве основных механизмов применяются мотор–вентиляторы, мотор–компрессоры, мотор–насосы (АД1...АДn, см. рис. 1). Основной фазорасщепитель – машина типа НБ-455А.

Рассмотрим факторы, влияющие на нормальное энергообеспечение вспомогательных приводов указанных электровозов.

Тяговые сети электрических железных дорог характеризуются большими колебаниями напряжения. Это существенно влияет на работу вспомогательных машин, тем более, что напряжение обмотки собственных нужд зависит не только от напряжения в контактной сети, но и от нагрузки тяговых двигателей – силовой цепи трансформатора. Напряжение питания вспомогательных машин меняется в пределах 300...500 В при номинальном напряжении  $380В \pm 10\%$  [1, 4].



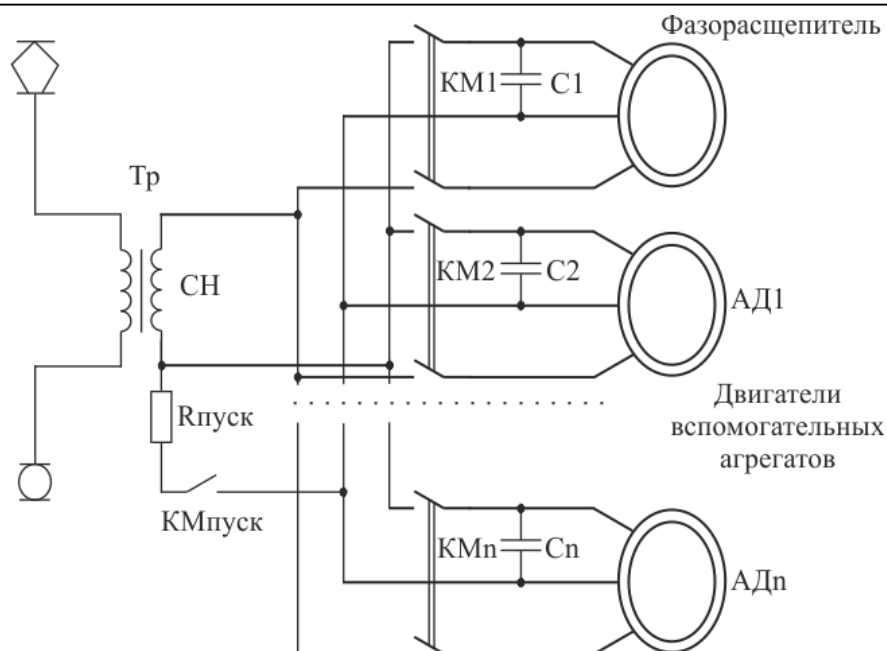


Рис. 1 Схема питания вспомогательных машин с вращающимся фазорасщепителем

Вторым фактором, существенно влияющим на нормальную работу приводов, является коэффициент несимметрии напряжения, который достигает значения до 11 % в зависимости от числа одновременно подключенных двигателей и отклонения напряжения контактной сети от номинального значения [1, 4]. Несимметрия напряжения приводит к дополнительному нагреву двигателя и снижению момента, так как токи обратной последовательности создают момент сопротивления. Для снижения этого влияния в цепь двигателей включаются симметрирующие конденсаторы [1–3]. Максимальный эффект от включения конденсаторов достигается при всех задействованных и номинальном напряжении контактной сети. В случае отклонения величины напряжения контактной сети от номинальной эффект снижается. Дополнительно с целью улучшения показателей работы приводов применяется подключение фазорасщепителя к разным выводам обмоток собственных нужд трансформатора ОДЦЭ-5000/25АМ. При напряжении  $\approx 19$  кВ система подключается к отпайке 641 В, при напряжении  $\approx 29$  кВ – 231 В.

В связи с перечисленными факторами мощность асинхронных двигателей выбирается исходя из условий обеспечения требуемых моментов в наихудших условиях питания и приблизительно в 2 раза выше требуемой, если бы двигатель работал при питании от номинального симметричного трехфазного напряжения 380 В [1].

Третьим фактором, который в настоящее время становится ощутимым, является потребление энергии в режиме холостого хода. Так, расщепитель фаз НБ-455А в режиме холостого хода потребляет ток величиной 58...78 А в зависимости от уровня напряжения контактной сети. Готовность трехфазной системы к работе должна присутствовать всегда, так как может поступить команда на включение мотор-компрессора.

Для частичного решения проблемы была проведена модернизация электровозов серии ВЛ80 путем применения непосредственного преобразователя частоты и изменения числа фаз [5]. Преобразователь обеспечивает две частоты вращения асинхронных приводов. Первая частота достигается при питании приводов от обмотки собственных нужд трансформатора частотой 50 Гц. Симметрирование и пуск обеспечивается включением конденсаторов. Невысокая частота вращения приводов обеспечивается включением в работу преобразователя частоты на основе тиристоров с выходной частотой 16,66 Гц. Система обеспечивает экономию энергии за счет исключения холостого хода и двухскоростного режима вращения вентиляторов. Влияние несимметрии и изменение номинального значения напряжения сохраняется.

Наибольший эффект от применения асинхронных приводов вспомогательных механизмов получен на современных электровозах, где используются частотно-регулируемые электроприводы [6]. Однако такие приводы должны проектироваться изначально при создании электровоза. Рассмотрим возможность применения частотно-регулируемого привода для электровозов ВЛ80(К, С, Т).

На рис. 2 изображена предлагаемая схема преобразователя частоты асинхронных приводов вспомогательных механизмов электровозов ВЛ80(К, С, Т). В схеме применяем классический трехфазный автономный инвертор напряжения на базе транзисторов VT1–6 с Г-образным входным фильтром LфСФ и однофазный полупроводниковый выпрямитель на основе тиристоров VS1,2 и диодов VD1,2. Подключается выпрямитель к тем же выводам обмотки собственных нужд трансформатора электровоза. Применение полупроводникового выпрямителя в данном случае оправдано рядом известных преимуществ [7].

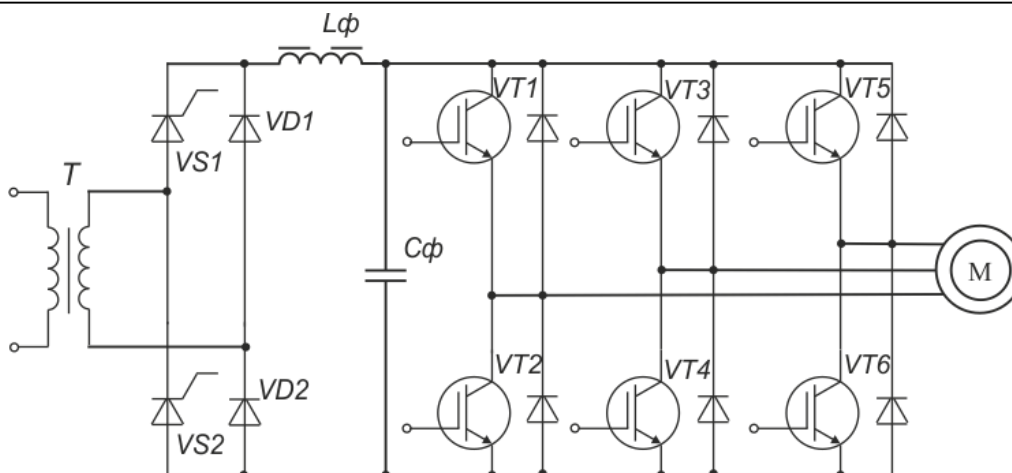


Рис. 2. Предлагаемая схема преобразователя асинхронных приводов вспомогательных механизмов

За базовый алгоритм управления ключами автономного инвертора принимаем коммутацию с длительностью открытого состояния 180 эл. град. Такой алгоритм рекомендуется при формировании напряжения на клеммах асинхронных двигателей, поскольку исключает спектр гармоник, кратных трем [7, 8].

В качестве исходных данных, необходимых для расчета параметров автономного инвертора и управляемого выпрямителя принимаем номинальные параметры управляемого двигателя АЭ92-402.

Средний ток на входе автономного инвертора напряжения в номинальном режиме

$$I_{dном} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{1ф} \cos \phi_n, \quad (1)$$

где  $I_{1ф}$  – номинальный фазный ток,  $I_{1ф}^{ном} = 90$  А;  $\cos \phi_n$  – номинальный коэффициент мощности, равный 0,79.

Среднее значение напряжения на входе инвертора

$$U_d^{ном} = \frac{3U_{1ф} I_{1ф} \cos \phi_n}{I_{dном}}, \quad (2)$$

где  $U_{1ф}$  – номинальное фазное напряжение, равное 220 В.

В результате расчетов по формулам (1) и (2) получаем требуемые параметры на входе автономного инвертора в номинальном режиме:  $U_d^{ном} = 488$  В,  $I_{dном} = 96$  А.

Необходимое действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора в номинальном режиме при условии применения мостового неуправляемого выпрямителя

$$U_{2ном} = \frac{U_d^{ном}}{0,9}, \quad (3)$$

т. е. для обеспечения нормальной работы автономного инвертора напряжения по предлагаемой схеме при условии мостового неуправляемого выпрямителя необходимо иметь действующее напряжение 542 В. Трансформатор ОДЦЭ-5000/25АМ имеет три вывода с номинальным напряжением 231, 410, 641 В каждый. Следовательно, управляемый выпрямитель следует подключать к выводу 641 В.

Однако указанное еще не является решением проблемы получения стабильного питания автономного инвертора, так как расчеты выполнены для номинального напряжения контактной сети. Минимальное и максимальное значения напряжения выбранной вторичной обмотки трансформатора следующие:

$$U_{2min} = U_{2ном}^T \frac{U_{1min}}{U_{1ном}}, \quad (4)$$

$$U_{2max} = U_{2ном}^T \frac{U_{1max}}{U_{1ном}}, \quad (5)$$

где  $U_{1ном}$  – номинальное напряжение контактной сети, равное 25 кВ;  $U_{2ном}^T$  – номинальное напряжение выбранной обмотки трансформатора, равное 641 В;  $U_{1min}$ ,  $U_{1max}$  – минимальное и максимальное напряжения контактной сети, равные 19 и 25 кВ соответственно.

Таким образом, при минимальном напряжении контактной сети на входе выпрямителя напряжение составит 487 В, что неудовлетворительно, а при максимальном напряжении – 743 В, что будет недостаточно для нормальной работы управляемого выпрямителя в целях стабилизации заданного значения 488 В на входе автономного инвертора.

Определим напряжение контактной сети, при котором система еще работоспособна. Принимаем минимальный угол управления тиристорами  $\alpha_{min} = 5$  град. эл. Напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{2U_d^{ном}}{0,9(1 + \cos \alpha_{min})}, \quad (6)$$

а напряжение контактной сети

$$U_{1min} = U_{1ном} \frac{U_2}{U_{2ном}}. \quad (7)$$

В результате получаем, что минимальное необходимое действующее значение напряжения на входе управляемого выпрямителя может быть получено при напряжении контактной сети  $U_{1min} = 21,2$  кВ.

**Вывод.** Предлагаемая схема для модернизации системы питания асинхронных приводов вспомогательных механизмов электровозов ВЛ80(К, С, Т) с применением автономного инвертора напряжения и управляемого выпрямителя позволяет исключить следующие проблемы: потребление электроэнергии при отключенных приводах, питание симметричной системой трехфазных напряжений, плавное регулирование частоты вращения вентиляторов при дополнении схем необходимыми датчиками. Диапазон работы системы ограничен в случае снижения напряжения контактной сети ниже 21,2 кВ. Но так как асинхронные двигатели для указанных электровозов выбраны с существенным запасом по мощности, то этот недостаток можно исключить. Еще одним вариантом полного устранения такого недостатка может быть применение неуправляемого выпрямителя с широтно-импульсным регулированием, который позволяет повысить напряжение на выходе. Однако такие выпрямители требуют более сложной элементной базы, систем управления и для электровозов, которым осталось служить 5–10 лет, могут оказаться нерентабельными.

#### Список литературы

1. Некрасов, О.А. Вспомогательные машины электровозов переменного тока [Текст] / О.А. Некрасов, А.М. Рутштейн. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
2. Электровоз ВЛ80К. Руководство по эксплуатации [Текст]. – М.: Транспорт, 1978. – 432 с.
3. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации [Текст]. – М.: Транспорт, 1982. – 622 с.
4. Козорезов, М.А. Расцепители фаз электровозов переменного тока [Текст]. – М.: Всесоюз. изд.-полиграф. об-ние М-ва путей сообщения, 1961. – 34 с.
5. Патент 2309521С1 России, МПК Н02М5/27 (2006.01). Преобразователь частоты и числа фаз. / Беляев А.В., Никонов Л.В., Рутштейн А.М. – Заявка: 2006106332/09, 28.02.2006; начала отсчета срока действия патента: 28.02.2006.
6. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 [Текст] / под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
7. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп [Текст] / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
8. Казачковський, М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти. [Текст] / М. М. Казачковський. – Д.: НГА України, 2000. – 196 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.*

**О.О. Матусевич, канд. техн. наук**

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

## БЕЗПЕРЕРВНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Анотація.** Підвищення ефективності організації процесу експлуатації силового електрообладнання тягових підстанцій може бути досягнуто при підтримці оптимального технічного стану обладнання по відношенню до початкового та забезпеченні надійності на заданому рівні.

Розглянуто підходи вирішення проблеми підвищення якості і ефективності системи технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць в процесі експлуатації. Запропоновано методiku безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання протягом всього життєвого циклу. Згідно з даною методикою проведено розрахунок критичності порушення операцій підпроцесу поточного ремонту силового трансформатора, а також критичність підпроцесів технічного обслуговування силового електрообладнання тягової підстанції.

**Ключові слова:** тягова підстанція, метод FMEA, електрообладнання, технічне обслуговування і ремонт, система, життєвий цикл, технічний стан

**Аннотация.** Повышение эффективности организации процесса эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций может быть достигнуто при поддержании оптимального технического состояния оборудования по отношению к исходному и обеспечении надежности на заданном уровне.

Рассмотрены подходы решения проблемы повышения качества и эффективности системы технического обслуживания и ремонта оборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в процессе их эксплуатации. Предложена методика непрерывного совершенствования процесса технического обслуживания и ремонта электрооборудования в течение всего жизненного цикла. Согласно данной методике проведен расчет критичности нарушения операций подпроцесса текущего ремонта силового трансформатора, а также критичности подпроцессов технического обслуживания силового электрооборудования тяговой подстанции.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, метод FMEA, электрооборудование, техническое обслуживание и ремонт, система, жизненный цикл, техническое состояние

**Abstract.** Improving the efficiency of the organization of operation of power electric equipment of traction substations can be achieved while maintaining the optimal technical condition of the equipment in relation to the initial, and ensuring the reliability of a given level. In this regard, the article considers approaches to solve the problem to improve the quality and efficiency of the maintenance and repair of traction substations of electrified railways in operation. The technique of continuous improvement of the process of maintenance and repair of electrical equipment throughout the whole life cycle is proposed. Calculation of critical violations operations a subprocess routine repairs of the power transformer and the criticality of the of subprocesses maintenance power electric equipment of traction substation is carried out by this method.

**Keywords:** traction substation, method FMEA, electrical equipment, maintenance and repair, system, life cycle, technical condition

### Вступ

Підвищення ефективності організації процесу експлуатації силового електрообладнання тягових підстанцій (ТП) може бути досягнуто при отриманні оптимального технічного стану обладнання відносно до початкового і забезпеченні надійності обладнання на заданому рівні. Нині організація процесу експлуатації електрообладнання ТП дистанцій електропостачання залізниць України виконується згідно з відомчими нормативними документами. Згідно основних положень цих документів підтримка необхідного рівня надійності електрообладнання в процесі експлуатації забезпечується, з одного боку, за рахунок значного коефіцієнта запасу ресурсу обладнання, закладеного при його створенні, а з іншого боку, системою технічного обслуговування і ремонтів (ТО і Р). Ця система базується на проведенні планових профілактичних робіт (ППР) після напрацювання певного часу (система планово-запобіжних ремонтів) [1]. Проте, іноді таке обслуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки реальний технічний стан електрообладнання ТП у момент проведення робіт може і не вимагати технічного обслуговування, а замінені деталі ще не досягли критичної міри зносу. Окрім цього, нині практично відсутнє необхідне

фінансово-технічне забезпечення проведення ППР у повному об'ємі, а поступове старіння парку устаткування ТП і зниження запасу міцності гостро ставлять питання щодо оцінки рівня ризику його експлуатації за межами встановленого терміну служби (наприклад, на залізницях України 82,9 % ТП і основного устаткування працюють більше 30 років) [2].

Виходячи з існуючих умов експлуатації ТП, основною метою вдосконалення системи ТО і Р силового електрообладнання ТП на сьогодні є: забезпечення необхідного рівня надійності, безпека й ефективність функціонування електрообладнання при мінімальних витратах на експлуатацію. Вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту стосується в основному методів контролю параметрів у процесі обстеження технічного стану і методів розрахунку ресурсу обладнання та наявності моделей, які визначають напрацювання на відмову електрообладнання ТП з урахуванням його індивідуальних особливостей.

Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств виявив [3-4], що вирішення проблеми вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту технологічного обладнання може здійснюватися також на основі досягнень науки сучасного менеджменту.

### **Мета роботи**

Розробка моделі безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій та теоретичних принципів розрахунку ризиків операцій і підпроцесів обслуговування обладнання.

### **Результати дослідження**

Підвищення вимог до надійності і безпеки залізничних перевезень зумовило застосування нових методів системного аналізу технічного стану об'єктів системи тягового електропостачання. Як один із таких методів можна запропонувати аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу - (Failure Mode and Effects Analysis), далі метод FMEA а також його різновид FMESA (аналіз причин, наслідків і критичності порушення процесу), що розширює можливості методу за рахунок ранжирування тяжкості наслідків порушення процесу (відмов) і відповідно встановити пріоритетність застережливих дій. У світі накопичений майже 25-річний досвід розробки і успішного застосування FMEA - методики. Так, в США було здійснено перше формалізоване нововведення FMEA (програма Apollo). Головним завданням FMEA/FMESA для системи ТО і Р ТП, є менеджмент якості процесів системи й безперервне вдосконалення при забезпеченні виявлення потенційних невідповідностей (дефектів) та запобігання їх появі на всіх стадіях життєвого циклу електрообладнання ТП. Нині не менше 80 % розробок технічних виробів і технологій здійснюється із застосуванням аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей (FMEA - методики) [5-8].

Аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей широко застосовується багатьма світовими компаніями як для розробки нових конструкцій і технологій, так і для аналізу і планування якості виробничих процесів і продукції. Методологія FMEA дозволяє оцінити ризики і можливий збиток, викликаний потенційними невідповідностями конструкції і технологічних процесів на самій ранній стадії проектування і створення готового обладнання або його комплектуючих а також в процесі експлуатації.

Метою цього аналізу є виявлення і оцінка потенційних дефектів (відмов) обладнання або процесу, визначення дій, які можуть усунути або зменшити вірогідність виникнення потенційних відмов та документування усіх цих заходів для досягнення надійної, ефективної експлуатації обладнання.

На етапі доопрацювання, наприклад, технологічного процесу системи ТО і Р ТП або при його поліпшенні запропонованим методом необхідно вирішити такі завдання:

- виявлення критичних місць технологічних процесів системи ТО і Р ТП і застосування заходів щодо їх усунення при плануванні виробничих процесів дистанції електропостачання;
- ухвалення рішень про придатність запропонованих і альтернативних процесів ТО і Р при розробці технологічних процесів системи обслуговування;
- створення ранжируваного списку видів і причин невідповідностей системи ТО і Р для планування запобіжних та коригуючих дій;
- визначення дій для коригування системи ТО і Р, які спроможні були б знизити вірогідність виникнення критичних процесів (невідповідностей);
- доопрацювання технологічного процесу до найбільш прийнятної з різних точок зору, а саме: надійності, безпеки для персоналу, виявлення потенційно дефектних технологічних операцій і т. д.;
- документування даних за результатами аналізу для накопичення в базі знань.

Для визначення області оперативного втручання в процес ТО і Р силового електрообладнання ТП приймемо методику аналізу процесу обслуговування на рівні основних підпроцесів [1], а це: планування робіт по технічному обслуговуванню, профілактична перевірка (огляд), поточний ремонт, міжремонтні випробування, капітальний ремонт устаткування, фінансування робіт по технічному обслуговуванню.

## Електропостачання та електроустаткування

Згідно із запропонованою методикою, для кожного елемента операції вибраного рівня ризику необхідно скласти перелік потенційних порушень, після чого вивчити вплив кожного порушення на функціонування підпроцесу і процесу ТО і Р в цілому, а також технічного стану електрообладнання ТП.

Для встановлення критичних операцій процесу ТО і Р проведено аналіз можливих небезпек, причин порушення та потенційних наслідків порушень при організації технічного обслуговування силового електроустаткування ТП ЭЧ- 2. Результати аналізу (*фрагмент*) [2, 9, 10] підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП постійного струму наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Підпроцес поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1**

№ п/п	Назва операції підпроцесу	Критичне порушення	Потенційна причина	Потенційні наслідки
1	Підготовчі роботи і допуск до роботи	Порушення термінів подачі інформації	Людський чинник	Зрив термінів ПР
		Погана підготовка інструменту	Людський чинник	Збільшення часу ПР, низька якість робіт
		Низька якість ремонтних матеріалів (чи відсутність)	Відсутність аналізу і контролю поточних запасів	Скорочення терміну служби устаткування (Зрив термінів ремонту)
		Неякісний облік робіт	Людський чинник	Неякісне планування термінів ПР
2	Зовнішній огляд трансформатора	Не підтягнуті болтові кріплення заземлення	Не виконання технологічної карти	Погіршення контактного з'єднання
3	Перевірка опору обмоток ізоляції	Низька якість перевірки	Відсутність сучасної апаратури виміру	Зменшення терміну експлуатації
4	Аналіз масла з бака трансформатора	Незадовільна якість аналізу	Відсутність сучасної апаратури діагностування	Зменшення терміну експлуатації, відмова трансформатора
5	Перевірка газового захисту	Незадовільна якість перевірки	Погано навчений виконавець робіт	Відсутність сигналізації (вірогідність не відключення трансформатора)
N	Тощо	.....	.....	.....

Сутність методики полягає в ідентифікації усіх потенційно можливих помилок або відмов системи (процесу або устаткування)[8, 11, 12].

Для будь-якого потенційного порушення процесу ТО і Р, дефекту або відмови роботи устаткування згідно з методикою FMEA визначаються три показники за трьома критеріями (шкала від 1 до 10):

- *коефіцієнт тяжкості порушення*  $K_S$ , враховує значення наслідків цього порушення *i* -ої операції ТО і Р (тяжкість наслідків прояву причин порушення (відмов)). Ймовірність  $P_S$  того, що вийде з ладу обладнання ТП (малоймовірно, дорівнює 1; майже напевно, дорівнює 10);

- *коефіцієнт частоти порушення операції*  $K_O$ , оцінка частоти (вірогідність  $P_O$  відмови) порушення *i* -ої операції ТО і Р. Небезпека порушення (вплив незначний, дорівнює 1; надзвичайний вплив, дорівнює 10);

- *коефіцієнт*  $K_D$ , *враховує вірогідність*, оцінка вірогідності не виявлення порушення *i* -ої операції ТЕ і Р до прояву його наслідків (на ранніх стадіях). Можливість виявлення порушення (виявлення ймовірне, дорівнює 1; виявлення малоймовірно, дорівнює 10).

Для перших двох критеріїв ця шкала зростає, тобто чим вище значущість або частота появи порушення, тим вище відповідні оцінки. Для третього критерію шкала убуває - чим вище можливість виявлення цього порушення, тим нижче відповідна оцінка.

Для розрахунку критичності порушення операції ТО і Р можна використовувати інтегральну оцінку критичності цього порушення  $K_R$ , так зване (*Risk Priority Number - RPN*) - пріоритетне число ризику (ПЧР), яке обчислюється як множення розглянутих вище коефіцієнтів:

$$K_R(RPN) = K_S \cdot K_O \cdot K_D, \quad (1)$$

Критичність *i* - ої операції підраховується на основі критичності *i* -го порушення операції з урахуванням її значущості (ваги) :

$$RPN_j = \sum_{i=1}^m RPN_i \cdot K_i, \quad (2)$$

де  $RPN_j$  - критичність  $i$  - ої операції,  $K_i$  - ваговий коефіцієнт значущості порушень  $i$  - ої операції. Ваговий коефіцієнт визначається експертним шляхом, причому  $\sum K_i = 1$ .

Критичність  $q$ -го підпроцесу розраховується на основі критичності операції з обліком з урахуванням її значущості:

$$RPN_q = \sum_{j=1}^n RPN_j \cdot K_j, \quad (3)$$

де  $K_j$  - ваговий коефіцієнт значущості порушень  $j$  - ої операції, причому  $\sum K_j = 1$ .

Величина  $RPN$  може мати значення від 1 до 1000 та бути оцінкою рівня ризику цієї відмови. Одне з основних завдань проведення FMEA - виявлення відмов з максимальними  $RPN$  та їх послідовне зниження. Заздалегідь встановлене максимально прийнятне значення  $RPN$  відносно цієї потенційної відмови (як правило, не вище 100-125) є критичним значенням  $RPN$ .

Розглянемо приклад практичного застосування запропонованої методики для аналізу ризиків операцій процесу ТО і Р тягових підстанцій, з метою запобігання критичним ситуаціям і підвищення надійності тягового електропостачання.

На першому етапі, використовуючи результати аналізу підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП постійного струму (табл. 1) визначається коефіцієнт, що враховує тяжкість відмов -  $S$ .

На другому етапі проведення аналізу визначаються потенційні причини для кожної з можливих невідповідностей (табл. 1). Для зручності і повноти виявлення причин доцільне застосування діаграми Ісикави, дерева відмов, структурних, функціональних моделей і т. д.

Для кожної потенційної причини визначимо коефіцієнт, що враховує вірогідність виникнення дефекту -  $O$ . При цьому проводиться експертна оцінка частоти появи цієї причини - коефіцієнт частоти порушення операції  $K_o$ . Коефіцієнт змінюється від 1 (дуже рідкісні дефекти) до 10 (постійно виникаючі дефекти).

На третьому етапі для кожного дефекту і кожної окремої причини його появи визначимо коефіцієнт, для кожної операції підпроцесу поточного ремонту трансформатора, що враховує ймовірність виявлення відмови до появи його наслідків або ймовірність пропуску відмови -  $D$ . Кількісна оцінка коефіцієнта  $D$  визнається за шкалою оцінки вірогідності виявлення.

На четвертому етапі, використовуючи результати аналізу підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 ТП, розрахуємо критичності порушення операцій ТО і Р. Розрахунок проведемо за формулою (1). Отримані результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р підпроцесу поточного ремонту трансформатора за даними (табл. 1), запишемо в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р,  
для підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1**

Номер операції	Коефіцієнт $K_s$	Коефіцієнт $K_o$	Коефіцієнт $K_D$	Критичність порушення операції $K_R(RPN)$
1	6	6	3	108
2	7	3	3	63
3	8	7	8	448
4	7	8	5	280
5	9	7	3	189

На наступному етапі було проведено ранжирування критичних порушень і відмов, для яких критичність операції  $K_R(RPN)$  перевищує межу (100-125) і для яких розроблені дії для коригування та зниження коефіцієнтів ризику. З цією метою були розроблені організаційні і технічні рішення, які спрямовані на запобігання можливим відмовам, мінімізації ймовірності появи виявлених потенційних відмов, шляхом вдосконалення систем технічного обслуговування і ремонту, правил експлуатації, методів діагностики і контролю якості та введенню спеціальних заходів попередження, виявлення та усунення дефектів та ін.

Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 після прийнятих заходів вдосконалення системи ТО і Р та повторного аналізу можливих причин порушення і потенційних наслідків порушень, наведені в табл. 3.

Результати розрахунку критичності порушення операцій ТО і Р для підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1 (після усунення (зменшення) потенційних причин порушення)

Номер операції	Коефіцієнт $K_s$	Коефіцієнт $K_o$	Коефіцієнт $K_D$	Критичність порушення операції $K_R(RPN)$
1	4	4	3	48
2	5	2	3	30
3	8	5	7	280
4	7	6	5	210
5	7	5	3	105

За розрахованими даними критичності порушення операції  $RPN$  для підпроцесу поточного ремонту трансформатора до усунення потенційних причин порушення (табл. 2) і після усунення (табл. 3), побудуємо графік критичності операцій підпроцесу поточного ремонту трансформатора (рис. 1), де:  $RPN1$  - критичність порушення операцій (1, 2, 3, 4, 5) підпроцесу поточного ремонту трансформатора за результатами первинного аналізу;  $RPN2$  – те саме, тільки після усунення потенційних причин порушення операцій за рахунок вдосконалення системи технічного обслуговування.

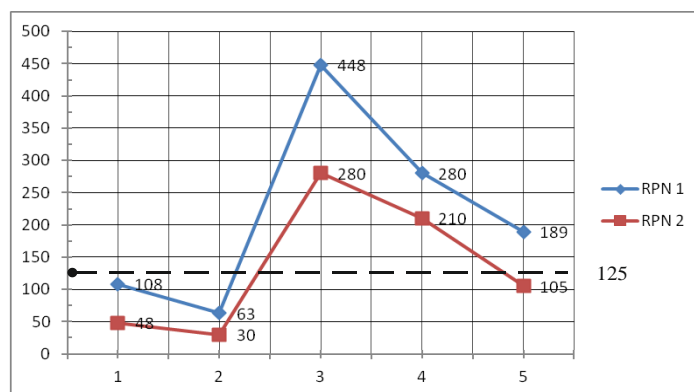


Рис. 1. Графік критичності операцій підпроцесу поточного ремонту трансформатора ТДТН- 25000/150-70 У1

Як бачимо, найбільш критичними операціями в підпроцесі поточного ремонту трансформатора є: операції 3 ( $RPN= 448 > 125$ ), 4 ( $RPN= 280 > 125$ ) і 5 ( $RPN= 189 > 125$ ) до вдосконалення системи і операції 3 ( $RPN= 280 > 125$ ), 4 ( $RPN= 210 > 125$ ) після вдосконалення системи технічного обслуговування.

Використовуючи результати аналізу можливих небезпек [4, 9], причин порушення і потенційних наслідків порушень при організації технічного обслуговування силового електрообладнання ТП ЕЧ- 2, а також вирази (1), (2), (3) проведемо розрахунок критичності підпроцесів: 1 - планування робіт по технічному обслуговуванню, 2 - профілактична перевірка (огляд), 3 - поточний ремонт, 4 - міжремонтні випробування, 5 - капітальний ремонт електрообладнання, 6 - фінансування робіт по технічному обслуговуванню. За розрахунковими даними критичності підпроцесів 1, 2, 3, 4, 5, 6 систем ТО і Р силового електрообладнання ТП побудуємо порівняльний графік критичності відносно встановленого експертами критичного значення  $RPN=125$  (рис. 2).

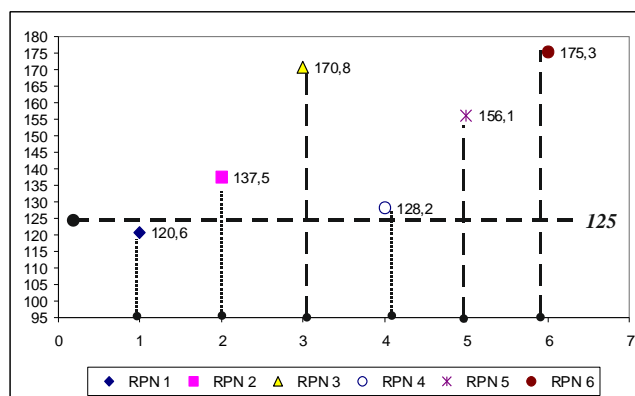


Рис. 2. Графік критичності підпроцесів ТО і Р силового електрообладнання ТП



Як видно з графіка (рис. 2), найбільш критичними підпроцесами є: 6 - фінансування робіт по технічному обслуговуванню ( $RPN_6 = 175,3 > 125$ ); 3 - поточний ремонт ( $RPN_3 = 170,8 > 125$ ); 5 - капітальний ремонт електрообладнання ( $RPN_5 = 156,1 > 125$ ). Для вирішення цієї проблеми необхідно продовжувати роботу з розробки заходів з метою поліпшення якості і безперервного вдосконалення системи ТО і Р силового електрообладнання ТП. Дані про проведені заходи мають бути зафіксовані в плані реалізації з прив'язкою за часом з урахуванням тривалості їх реалізації й очікуваної вартості.

Підпроцеси: 1 - планування робіт по технічному обслуговуванню ( $RPN_1 = 120,6$ ), 2 - профілактична перевірка ( $RPN_2 = 137,5$ ) і 4 - міжремонтні випробування ( $RPN_4 = 128,2$ ) знаходяться на межі критичності. Ці підпроцеси вимагають своєчасного втручання, що носить коригуючий характер організації і проведення технічного обслуговування устаткування.

### Висновок

До основних завдань безперервного вдосконалення процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій відносяться виявлення і попередження функціонально слабких і критичних відносно надійності і безвідмовності електрообладнання місць та створення нормативної технічної документації стосовно забезпечення ефективності обслуговування. Поліпшення ефективності ТО і Р вважається досягнутим, якщо нове пріоритетне число ризику  $RPN$  після удосконалення системи має менше значення ніж раніше.

Розроблена модель безперервного вдосконалення системи ТО і Р тягових підстанцій дозволяє здійснювати аналіз критичності операцій і підпроцесів системи, а також визначати область оперативного втручання в процес технічного обслуговування і ремонту електрообладнання при експлуатації впродовж життєвого циклу. За цією методикою проведений розрахунок критичності порушення операцій підпроцесу поточного ремонту силового трансформатора, а також критичності підпроцесів технічного обслуговування силового електрообладнання тягових підстанцій.

### Список літератури

1. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця, 2013. 27с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році. Київ: Видавництво ТОВ «Девалта». 2014. 251 с.
3. ISO/ IEC 31010:2009, Risk Management - Risk Assessment Techniques. Available at: <https://www.google.com.ua/search>.
4. Матусевич, О.О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. 295 с.
5. North American Aviation, Space and Information System Division, SID-62-203-R-1, Apollo reliability Program Plan, 15 May 1963. Available at: <https://www.google.com.ua/search?q=+North+American+Aviation>.
6. McDermott, Robin E.; Mikulak, Raymond J.; Beauregard Michael R. The Basics of FMEA. – Productivity Press, 1996. — 80 p. — ISBN 9780527763206.
7. National Aeronautics and Space Administration, NASA/SP-2000-6110, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). A Bibliography, July 2000. Available at: <https://www.google.com.ua/search+Aeronautics+and+Space+Administration>.
8. Розно, М.И. Как научиться смотреть вперед? Внедрение FMEA-методологии. Методы менеджмента качества, 2000, № 6, с.25-28. Available at: <https://www.google.com.ua/search%BE%2C+%D0%9C.%D0%98>.
9. Матусевич, О.О. & Міронов, Д.В. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2015. № 1(55). С. 62-77.
10. Долин, А. П. & Першина, Н. Ф. & Смекалов, В. В. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов. Электрические станции. 2000. № 6. С. 46-52.
11. Годлевский, В. Е. & Дмитриев, А. Я. & Юнак, Г. Л. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции. Самара: Перспектива. 2002. 160 с.
12. Качалов, В.А. Метод FMEA : Анализ видов потенциальных дефектов и их влияния. TQM-XXI. Проблемы, опыт, перспективы. Вып.2. Москва: ИздАТ. 1997. с.226 – 286. Received 23.11.2015; accepted in revised form 25.03.2015.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Сиченко В.Г.*

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.3:004.8:622.867

**В.В. Слесарев, д-р. техн. наук, А.В. Миргородский, В.С. Маргитич**

(Украина, г. Днепропетровск, Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”)

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА АВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТЫ

**Анотація.** У статті на підставі аналізу інформації про параметри значень концентрації окису вуглецю, вуглекислого газу, температури і метану на аварійній ділянці, а також визначаючи поточну ситуацію усередині системи, виявлено кількісні характеристики відносин між екземплярами і класами пожеж. Відповідно до запропонованої методикою формування онтологій прецедентів, проведено кластерний аналіз даних моніторингу характеристик пожеж. На підставі цього виділено групи проблемних ситуацій на шахтах і були сформульовані правила розпізнавання класів аварій.

**Ключові слова:** Кластерний аналіз, кластеризація, дескриптори, ієрархічний агломеративного алгоритм, аналіз методом К-середніх.

**Аннотация.** В статье на основании анализа информации о параметрах значений концентрации окиси углерода, углекислого газа, температуры и метана на аварийном участке, а также определяя текущую ситуацию внутри системы, выявлены количественные характеристики отношений между экземплярами и классами пожаров. В соответствии с предложенной методикой формирования онтологий прецедентов, проведён кластерный анализ данных мониторинга характеристик пожаров. На основании этого выделены группы проблемных ситуаций на шахтах и были сформулированы правила распознавания классов аварий.

**Ключевые слова:** Кластерный анализ, кластеризация, дескрипторы, иерархический агломерационный алгоритм, анализ методом k-средних.

**Abstract.** The article based on the analysis of information about the parameters of the concentrations of carbon monoxide, carbon dioxide, methane, and the temperature at the emergency site, as well as defining the current situation within the system revealed the quantitative characteristics of the relationship between instances and classes of fires. In accordance with the proposed method of forming the ontology of precedents, conducted a cluster analysis of the data monitoring of the fires. Based on this isolated group of problem situations in the mines and were formulated rules of recognition classes of accidents.

*Cluster analysis, clustering, descriptors, hierarchical agglomerative algorithm analysis of k-means.*

### Введение

Горное производство является сложной и опасной отраслью. В ходе ведения горных работ могут возникать различные опасности природного и технологического характера. Поэтому проблемы безопасности на объектах горного производства имеют особое значение. Анализ и оценка опасности возможных аварий являются одной из ключевых проблем промышленной безопасности. Для комплексного охвата состояния горного производства применяют системы контроля и управления, такие как УТАС [1-3]. Анализ производится на основании показаний датчиков, выдаваемых применяемой системой контроля, или устных по средствам оповещения от работников.

На данном этапе часто возникают затруднения. Автоматически измеряется лишь малое количество показателей, а доступная информация имеет высокую долю неоднозначности. В результате чего наблюдается отсутствие однозначных правил, критериев и методов оценки аварийных ситуаций. Особенно это проявляется в процессе уже ликвидации аварий, когда ограничен доступ в аварийную зону и в результате действия поражающих факторов разрушены датчики и системы контроля аварийных ситуаций. Все это приводит к ошибочным решениям, которые могут привести к тяжёлым последствиям. Чисто механического фиксирования показаний датчиков о состоянии среды зачастую недостаточно. Это создает сложности для точной и объективной классификации вида аварий и процессов их ликвидации. Таким образом, было установлено, что задача создания интеллектуальной системы для определения вида аварийной ситуации и способов ее устранения является актуальной для шахт и рудников.

### Формулировка цели и задачи исследования

Конечная цель данной работы – реализовать метод классификации аварийных ситуаций в процессе их определения и последующей ликвидации.

Для этого необходимо разработать методы и систему классификации данных ситуаций с использованием элементов нечёткой логики и искусственного интеллекта.

### Изложение основного материала исследований

Предложенная онтологическая модель процесса ликвидации аварий на шахтах позволила выявить основные категории базы знаний и связи между ними, которые описывают данную предметную область. Количественные характеристики эта модель выявить не может. Выявление и группирование значений характеристик позволит сформировать правила, определяющие состояние конкретной шахты в аварийных ситуациях и реализованных решений по ликвидации аварий. Под такими отношениями понимают данные, собранные при ликвидации всех известных успешно ликвидированных аварий на угольных шахтах (прецедентов). Исследование по взаимовлиянию друг на друга таких аварийных параметров, по данным автора, не проводилось. На самом же деле внутри этого процесса все аварийные показатели взаимодействуют друг с другом. Более того, каждая авария, и в частности пожар является уникальным событием. Поэтому выявление этих закономерностей позволит прогнозировать проблемные ситуации на основе анализа характеристик, поступающих с аварийного объекта в процессе ликвидации пожара. Кроме того, это позволит получить дополнительные данные об аварийных ситуациях, характерных для конкретного объекта управления.

Выявление классов проблемных ситуаций осуществляется одним из методов интеллектуального анализа данных – кластеризацией [4-6]. Цель кластерного анализа заключается в создании групп сходных (однородных) объектов. В то же время его действие состоит в привнесении структуры в анализируемые данные. Кластерный анализ является эвристической процедурой, не имеющей статистического обоснования, но даёт возможность произвести своеобразную разведку – изучить «структуру совокупности». Он применяется в случае, если нет априорных гипотез относительно классов на описательной стадии исследования. Разные кластерные методы могут порождать и порождают различные решения для одних и тех же данных.

В качестве дескрипторов ( $A''$ ) для кластерного анализа характеристик аварийного процесса выбраны следующие параметры: окись углерода, углекислый газ, температура, метан (рис. 1):

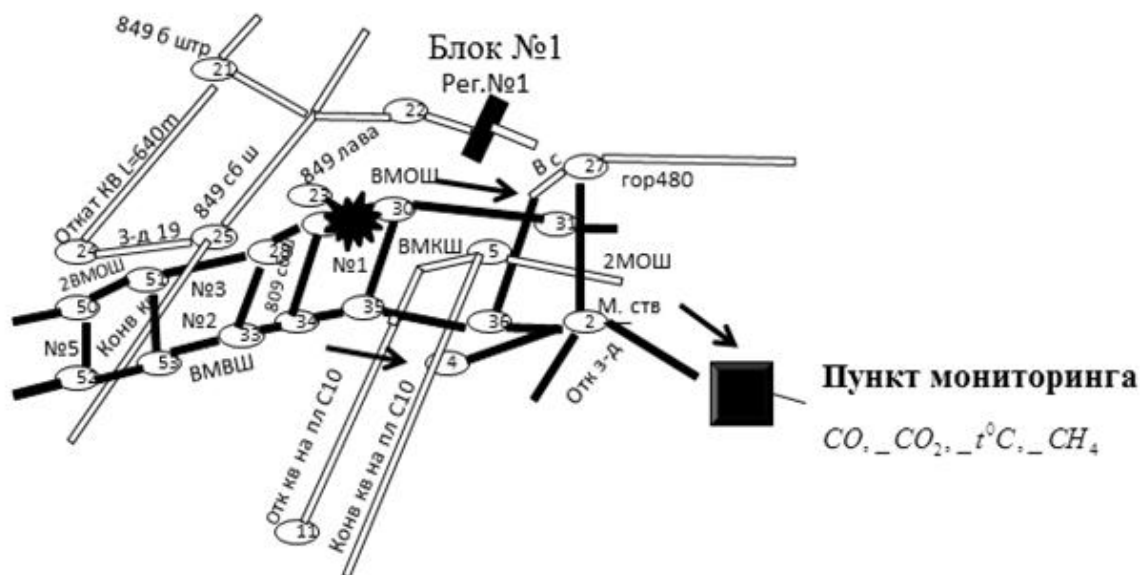


Рис. 1. Пункт мониторинга аварийных ситуаций на шахте

Для выявления непересекающихся подклассов и установления значений признаков необходимо решить задачу классификации прецедентов – пожаров, имевших место на угольных шахтах. Предположим, что можно разбить множество значений признаков, характеризующих проблемную ситуацию в реализованных решениях (управляющих воздействиях), обозначенное  $A''$ , на непересекающиеся подмножества, соответствующие классам проблемной ситуации ( $a_{i1}, \dots, a_{im}, Category_j$ ). То есть была подготовлена выборка данных из протоколов успешно ликвидированных аварий на шахтах в виде

$$\begin{aligned}
 A^n &= \{A_i, i = 1, \dots, n\}; \\
 A_i &= (a_{i1}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{im}); \\
 \psi &: A_i \rightarrow \text{Category}_k; \\
 \forall A_i \in A^n \exists \text{category}_k \in \text{Category} : \psi(A_i) &= \text{category}_k,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $A^n$  – множество данных протоколов ликвидации аварий;  $A_i$  – вектор значений данных;  $a_i$  – аварийный параметр;  $\text{Category}_k = (\text{category}_i, \text{category}_z, \dots, \text{category}_j)$  – множество классов аварийных ситуаций.

Распознавание аварийных ситуаций состоит в том, чтобы на основании мониторинга объекта и анализа вектора признаков  $a[i, j]$  данные в определённый момент времени отнести к определённому классу возможных аварийных ситуаций в случае, если производится оценка реализуемых решений (категорий)  $cat_j \in \text{Cat}$ , либо же уже наступившей аварийной ситуации (в случае если анализируются характеристики реализуемых решений). Далее полученный класс соотносится с характерным для него управляющим воздействием  $b[i, j]$  и выдаётся рекомендации руководителю аварийных работ.

Исследования проводились в соответствии с методологией кластерного анализа, включающей пять основных этапов[5]:

- 1) отбор выборки для кластеризации;
- 2) определение множества признаков, по которым будут оцениваться объекты в выборке, и способов их стандартизации;
- 3) определение той или иной меры сходства между объектами;
- 4) применение метода кластерного анализа для создания групп сходных объектов;
- 5) проверка достоверности результатов кластерного анализа.

Для реализации кластерного анализа данных использовался модифицированный пакет SPSS 11.5. На начальном этапе проведения кластерного анализа неизвестно количество классов в онтологии прецедентов оперативных планов ликвидации аварий (ОПЛА). Для определения количества кластеров (классов ОПЛА) применяется иерархический агломерационный алгоритм. Его смысл заключается в следующем. Перед началом кластеризации все объекты считаются отдельными кластерами, которые в ходе кластеризации объединяются (агломерация). Вначале выбирается пара ближайших кластеров, которые в ходе алгоритма объединяются в один кластер. В результате количество кластеров становится равным  $(N-1)$ . Процедура повторяется, пока все кластеры не объединятся. На любом этапе объединение можно прервать, получив нужное число кластеров. Таким образом, в результате работы алгоритма агрегирования определяются способы вычисления расстояния между объектами, а также близости между кластерами. Выбор метода образования кластеров, метода расчёта дистанционной меры и меры подобия определяется с экспертом и учётом того, что рассматриваемые признаки представляют собой интервальные значения. В работе - это метод называется «связь между группами» (*Between groups linkage*). Дистанция между кластерами равняется среднему значению дистанций между всеми возможными парами наблюдений. Информация, необходимая для расчёта расстояния, находится на основании всех возможных пар наблюдений. В качестве дистанционной меры выбран квадрат евклидова расстояния (squared Euclidean distance):  $dist = \sum_{i,j=1}^n (x_i - y_j)^2$ . Значения признаков стандартизуются модифицированными средствами

SPSS 11.5. Для определения того, какое количество кластеров следовало бы считать оптимальным, была проанализирована агломерационная матрица, построенная на основании дистанционной меры – квадрат евклидова расстояния, и стандартизованных значений признаков. Нам необходимо проверить, является ли верным предположение о разбиении исходного множества данных мониторинга шахтной атмосферы в зоне пожара после реализации очередного оперативного плана на 3 класса проблемных ситуаций. Для этого после определения кластеров был проведён анализ данных методом  $k$  – «средних», на основании предшествующих исследований. Первые наблюдения, содержащиеся в файле с данными, используются как первый кластер. Вычисляется расстояние между центрами кластеров и каждым объектом, и объект приписывается к тому кластеру, к которому он ближе всего. Завершив приписывание, согласно алгоритму вычисляются средние значения для каждого кластера. Этих средних будет столько, сколько используется переменных для проведения анализа: в данном случае три. Набор  $k$  – средних представляет собой координаты нового положения кластера. По алгоритму вновь вычисляем расстояние от каждого объекта до центра кластеров и приписываем объекты к ближайшему кластеру. Вновь вычисляются центры тяжести кластеров, и этот процесс повторяется до тех пор, пока центры тяжести не перестанут «мигрировать» в пространстве.

На рис. 2 приведены результаты кластерного анализа, а в таблице представлен фрагмент, состоящий из 15 наблюдений – данных мониторинга шахтной атмосферы в исходящей струе воздуха зоны пожара,

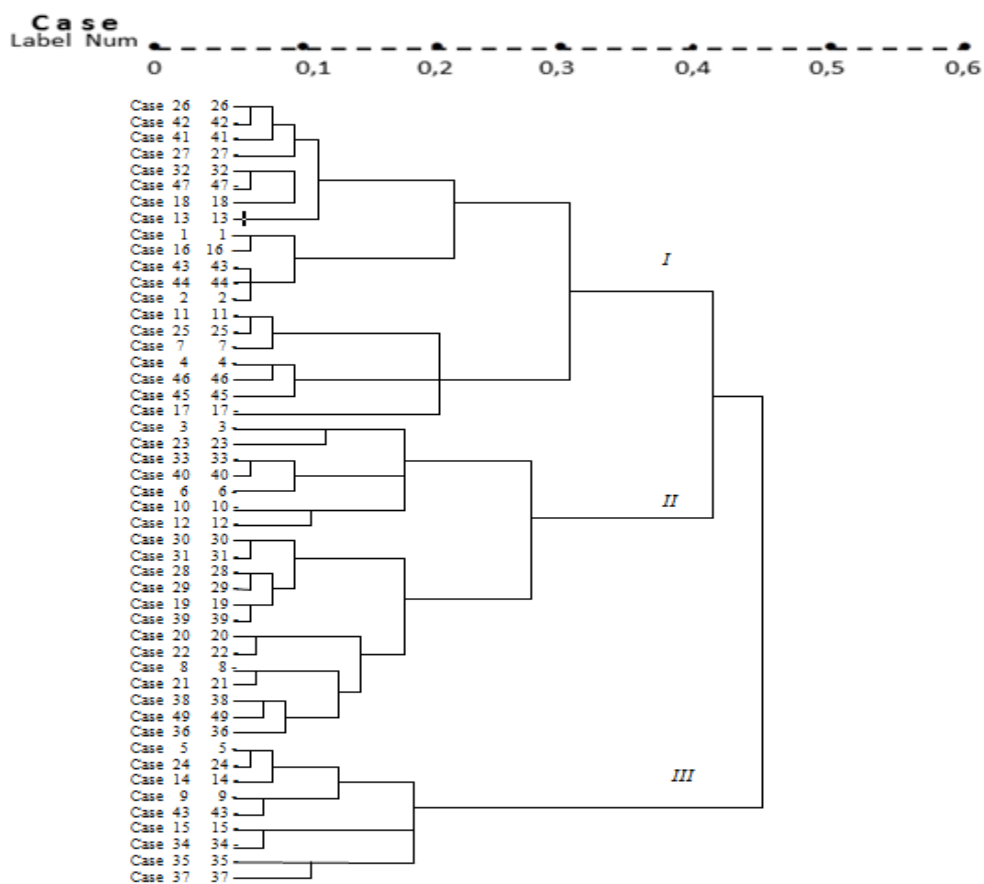
дается информация о том, к какому из трёх классов было отнесено конкретное наблюдение, а также расстояние до центра одного из трёх кластеров анализируемых наблюдений.

Таблица

Фрагмент анализируемых наблюдений и результатов кластерного анализа

Наблюдения	Окись углерода $CO$ , %	Температура, $t^{\circ}C$	Углекислый газ $CO_2$ , %	Метан, % $CH_4$	№ класса	Расстояние до центра кластера
1	2	3	4	5	6	7
1	0,0012	38,00	3,60	0,50	1	0,0300767
2	0,0011	35,00	3,25	1,10	1	0,0570733
3	0,0077	50,00	2,55	0,95	2	0,0356737
4	0,0030	20,00	2,25	0,10	2	0,0415996
5	0,0082	25,00	2,50	1,10	2	0,0420257
6	0,0076	15,00	4,25	0,95	2	0,0707088
7	0,0104	18,00	3,30	0,01	2	0,0505453
8	0,0117	20,00	3,85	0,09	2	0,0402976
9	0,0073	18,00	3,60	1,40	3	0,0334702
10	0,0080	20,00	4,05	0,95	3	0,0201597
11	0,0067	22,00	3,05	0,20	3	0,0451907
12	0,0032	14,00	4,25	0,50	3	0,0510968
13	0,0026	41,00	4,50	1,10	1	0,0593515
14	0,0033	18,00	2,55	1,50	2	0,0512553
15	0,0028	36,00	2,25	0,90	1	0,0026668

**HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS**  
Dendrogramma using Average Linkage (Between Groups)  
Rescaled Distance Cluster Combine



**Рис. 2. Совокупность результатов кластерного анализа**

На рис. 3 изображено распределение данных мониторинга трёх величин в исходящей струе аварийных зон: окиси углерода, углекислого газа, температуры, что подтверждает возможность классификации аварийных ситуаций на шахтах методом кластеризации.

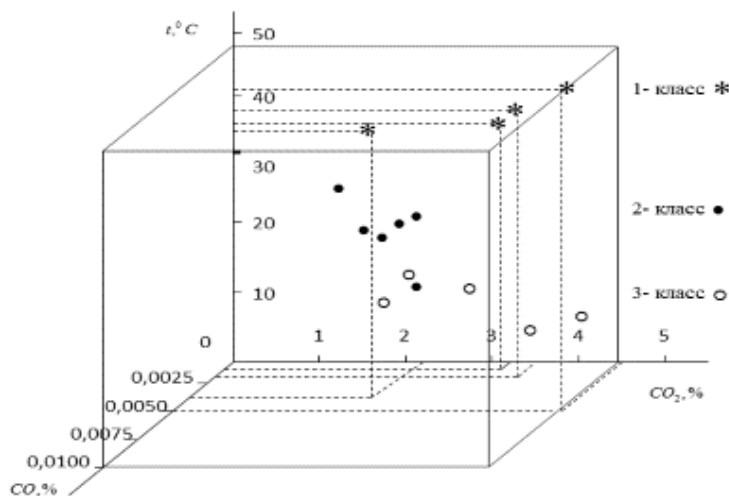


Рис. 3. Распределение данных мониторинга шахтной атмосферы в пространстве

Расстояние между центрами кластеров получилось достаточно большим по сравнению с расстоянием между результатами мониторинга и центрами соответствующих кластеров, что позволяет сделать вывод об успешном проведении кластерного анализа методом  $k$  – средних.

Окончательные значения кластеров были получены уже на третьей итерации. С помощью метода  $k$  – средних было подтверждено, что исходное множество данных мониторинга шахтной атмосферы в зоне пожара было верно разбито на три предопределённых класса, которые получились достаточно однородными и равноценными. Проанализировав результаты кластеризации: выявлены закономерности и были разработаны правила, позволяющие по значениям признаков отнести аварийную ситуацию к одному из трёх классов. Правила позволяют предсказать (на основании данных о поступающей аварийной ситуации) возможность возникновения аварийной ситуации, а также точнее определить границы возникновения аварийной ситуации для конкретного объекта управления.

### Выводы

Анализируя поступающую информацию о значениях окиси углерода, углекислого газа, температуры и метана на аварийном участке, а также определяя текущую ситуацию внутри системы, выявлены количественные характеристики и отношения между составляющими и классами аварий. В соответствии с предложенной методикой формирования онтологий прецедентов, проведён кластерный анализ данных мониторинга процессов ликвидации пожаров на шахтах. На основании выделенных групп с экспертами были сформулированы правила распознавания классов проблемной ситуации. С помощью этих правил представляется возможность руководителю аварийных работ установить класс возникшей аварийной ситуации на шахте, а также управлять процессом её ликвидации.

### Список литературы

1. Лекции по системе УТАС: структура, эксплуатация и обслуживание / Нормативный документ Министерства топлива и энергетики Украины. – Донецк: 2004. – 100 с;
2. Научные основы автоматизации в угольной промышленности: опыт и перспективы развития: монография / В.Г. Курносов, В.И. Силаев; Международный институт независимых педагогических исследований МИНПИ – ЮНЕСКО, ОАО «АВТОМАТГОРМАШ им. В.А. Антипова». – Донецк: изд. «Вебер» (Донецкое отделение), - 2009. – 422
3. Курносов В.Г. Основные направления развития работ по созданию автоматизированных систем оперативно-диспетчерского управления горным предприятием // В.Г. Курносов, д.т.н., В.И. Силаев, д.т.н., В.В. Синенко, к.т.н., А.А. Винарик, д.т.н., // Донецк: «Вебер» (Донецкое отделение), - 2009. – 227 с.
4. Maximov V.N., Bulgakov N.G., Levich A.P. Quantitative methods of ecological control: Diagnostics, Standardization, and Prediction // Environmental indices: System Analysis Approach. London: EQLSS Publishers. – 1999. – pp.363-381.
5. Web Ontology Language (OWL)/ Edited by Miller E., 2004 // The World Wide Web Consortium (WWWC) // <http://www.w3.org/2004/OWL>.
6. Hrocks I., Patel-Schneider P.F., Bechhofer S. and Tsarkov D. OWL rules: A proposal and prototype implementation // Web Semantics: Seintics, Services and Agents on the World Wide Web, Vol. 3(1), 2005. – pp. 23-40.

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

Ю.Н. Харламова

(Украина, Днепрпетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИММЕТРИЧНОГО АЛГОРИТМА МЕТОДА ТЯЖЕЛОГО ШАРИКА ПРИ ПОИСКЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕСТОВЫХ ФУНКЦИЙ

**Анотація.** У роботі розглянуто алгоритм методу важкої кульки, заснований на принципі симетрії, для пошуку глобального екстремуму функції. Виконано комп'ютерне моделювання методу для трьох тестових функцій (Екклі, Гривонка та Швевеля). Наведено результати дослідження даного алгоритму на предмет працездатності. Результати математичного моделювання відображені на графіках, які описують процес зближення зображуючи точок до точки глобального оптимуму тестових функцій. Зроблено висновки відносно ефективності наведеного алгоритму стосовно завдань оптимізації.

**Ключові слова:** метод важкої кульки, принцип симетрії, екстремум функції.

**Аннотация.** В работе рассмотрен алгоритм метода тяжелого шарика, основанный на принципе симметрии, для поиска глобального экстремума функции. Выполнено компьютерное моделирование метода для трех тестовых функций (Экклес, Гривонка и Швевель). Приведены результаты исследования данного алгоритма на предмет работоспособности. Результаты математического моделирования отображены на графиках, описывающих процесс схождения изображающих точек к точке глобального оптимума тестовых функций. Сделаны выводы, касающиеся эффективности описанного алгоритма применительно к задачам оптимизации.

**Ключевые слова:** метод тяжелого шарика, принцип симметрии, экстремум функции.

**Abstract.** The algorithm of the heavy ball method, based on the principle of symmetry, to find a global extremum is described. The computer simulation of the method for the three test functions (Eccles, Grivonk and Shvefel) is carried out. The results of the study of this algorithm for efficiency are given. The results of mathematical modeling in the graphs describing the process of convergence of representative points to the global optimum point of test functions are shown. Conclusions about the efficacy of the described algorithm applied to optimization problems are drawn.

**Keywords:** heavy ball method, the principle of symmetry, extremum of a function.

**Постановка проблемы.** Одним из основных факторов, который необходимо учитывать при решении задач синтеза современных систем адаптивной идентификации и информационно-измерительных систем, является инерционность объектов управления и средств измерительной техники. Создатели этих систем с целью обеспечения высокой эффективности принимаемых решений используют различные методы оптимизации.

В большинстве случаев поиск глобальных экстремумов многоэкстремальных целевых функций осуществляется в динамическом режиме с использованием метода тяжелого шарика. Но движущийся тяжелый шарик может обладать как недостатком кинетической энергии, так и ее избытком. В первом случае он может остановиться в одном из локальных экстремумов, не дойдя до глобального экстремума, а во втором случае - его проскочить.

В сложившейся ситуации актуальной является организация подпитки движущегося к глобальному экстремуму шарика дополнительной кинетической энергией или съем ее избытка.

**Анализ литературных источников.** На сегодняшний день разработаны алгоритмы глобальной оптимизации, как для решения отдельного класса задач [1], так и более универсальные. При рассмотрении динамических задач оптимизации часто применяют метод установления [2,3], реализация которого осуществляется с помощью нестационарных процессов, которые описываются векторным дифференциальным уравнением вида

$$m \cdot x^{(2)}(t) + r \cdot x^{(1)}(t) + \text{grad}f(x) = 0, \quad m > 0, \quad r > 0. \quad (1)$$

Эти процессы со временем устанавливаются к решению поставленной задачи.

Уравнение (1) описывает метод тяжелого шарика, который (при соответствующем выборе параметров  $m$  и  $r$ ) относят к методам поиска глобального экстремума.

Известно, что вытянутость поверхности целевой функции вдоль одного из направлений резко ухудшает эффективность данного метода. Метод тяжелого шарика при решении задач поиска глобально-

го экстремума, с увеличением амплитуды колебаний не дает положительно результата, и процесс движения изображающей точки заканчивается в первом локальном экстремуме.

**Цель статьи** – построение алгоритмов поиска глобального экстремума тестовых функций, основанных на принципе симметрии взаимодействия двух тяжелых шариков.

**Основная часть.** Проблему поиска минимума многоэкстремальной функции можно решить, если использовать концепцию симметрии, которая хорошо себя зарекомендовала в таких методах одномерной оптимизации, как методы дихотомии, Фибоначчи и золотого сечения. В этих методах к экстремуму функции, симметрично существенно уменьшая интервал неопределенности (локализации), двигаются по две изображающие точки. Рассмотрим процесс усовершенствования многомерных методов поиска экстремума функции, применив концепцию симметрии [4,5].

Представим выражение выпуклой вниз функции  $f(x)$  ( $x$  – векторный аргумент), экстремум которой ищем, в виде

$$f(x) = 0.5((x-x)^T Q(x-x) + f(x) + f(x)), \quad (2)$$

где  $Q$  – положительно определенная симметричная матрица.

Затем, заменив в выражении (2) один из векторов  $x$  вектором  $y$ , а другой –  $z$ , получим вспомогательную функцию

$$F(y, z) = 0.5[(y-z)^T Q(y-z) + f(y) + f(z)], \quad (3)$$

экстремум которой будет иметь место при условии, что  $y=z=x^*$ , где  $x^*$  – значение векторного аргумента, при котором функция  $f(x)$  принимает экстремальное значение.

Движение к минимуму вспомогательной функции  $F(y, z)$  обеспечивается в результате одновременно сбалансированного изменения векторных аргументов  $y$  и  $z$  любым из известных алгоритмов поиска экстремума.

Алгоритм (1) метода тяжелого шарика [6,7] при работе со вспомогательной функцией  $F(y, z)$  будет таким

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} + r \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F(y, z)}{\partial y} &= 0, \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} + r \frac{dz}{dt} + \frac{\partial F(y, z)}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Следует отметить, что для поиска экстремума вспомогательной функции (4) могут быть задействованы как непрерывные, так и дискретные алгоритмы нескольких сближающихся точек. Это позволяет им преодолевать локальные экстремумы.

Рассмотрим сущность метода тяжелого шарика, основанного на принципе симметрии, на примере трех стандартных тестовых функций: Эккли, Гривонка и Швифеля.

Функция Эккли (рис. 1,а) имеет множество локальных экстремумов вблизи глобального оптимума. На интервале  $[-7; 3]$  функция принимает минимальное значение в точке 0, где  $x=0$  и соответствует следующему описанию

$$f(x) = 20 + e - 20 \cdot \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)). \quad (5)$$

Тогда вспомогательная симметрическая функция  $F(y, z)$  согласно выражению (3), для функции Эккли (5) будет иметь следующий вид:

$$F(y, z) = 0.5(2(20 + e) - 20 \exp(-0.2 y^2) - \exp(\cos(2\pi y)) - 20 \exp(-0.2 z^2) - \exp(\cos(2\pi z)) + 0.5 q(y-z)^2) \quad (6)$$

а соответствующий алгоритм (4) для функции (6)



$$\begin{cases} y_1'(t) = y_2; \\ y_2'(t) = -\frac{r}{m} y_2 - \frac{1}{m} \left[ q(y_1 - z_1) + 2y_1 \sqrt{y_1^2} \exp(-0.2\sqrt{y_1^2}) + \pi \sin(2\pi y_1) \exp(\cos(2\pi y_1)) \right], \\ z_1'(t) = z_2; \\ z_2'(t) = -\frac{r}{m} z_2 - \frac{1}{m} \left[ q(z_1 - y_1) + 2z_1 \sqrt{z_1^2} \exp(-0.2\sqrt{z_1^2}) + \pi \sin(2\pi z_1) \exp(\cos(2\pi z_1)) \right], \end{cases} \quad (7)$$

где  $y_1 = y$ ,  $z_1 = z$ .

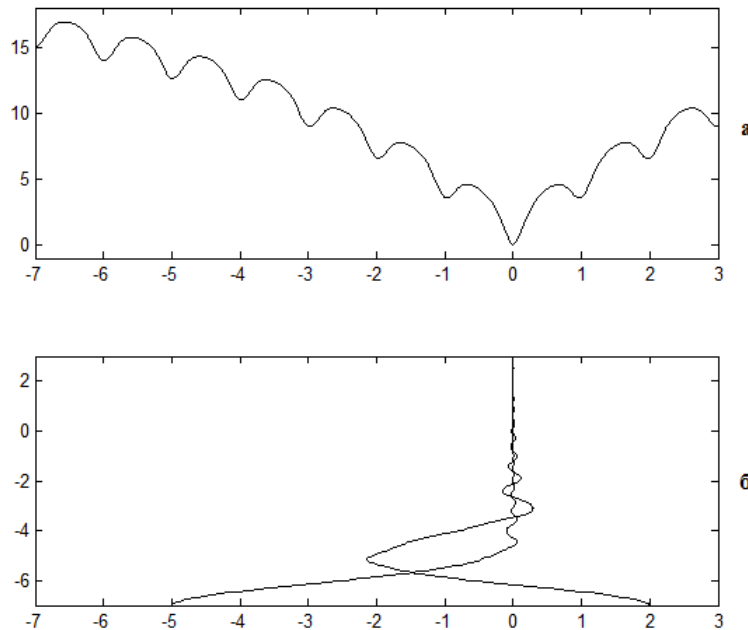


Рис.1. Графики, иллюстрирующие процесс поиска глобального экстремума функции с применением концепции симметрии: а – вид тестовой функции Экли; б - решение системы (7)

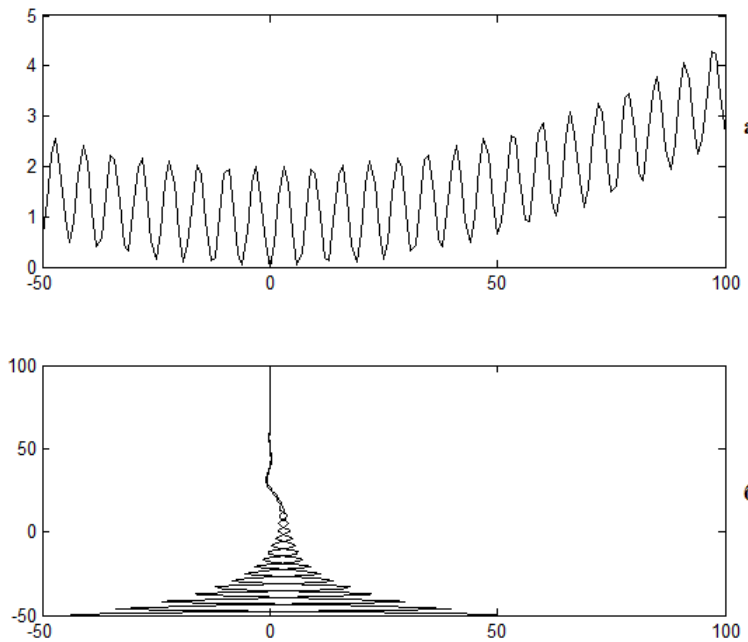


Рис. 2. Графики, иллюстрирующие процесс поиска глобального экстремума функции с применением концепции симметрии: а - вид тестовой функции Гривонка; б - решение системы (10)

Для решения системы (7) были заданы начальные условия:  $y_1(0) = -5$ ,  $z_1(0) = 2$  и выбраны следующие параметры: масса тяжелого шарика  $m=1.5$ , коэффициент демпфирования  $r=2$  и  $q=2$ . На рис.1,б приведен

результат решения системы (7), который описывает процесс схождения изображающих точек к точке глобального оптимума ( $x^*=0$ ). Получены следующие значения:  $y_f=0.000002$  и  $z_f=-0.001472$ . Решение задачи (5) обычным методом тяжелого шарика согласно выражению (1), при неизменных значениях параметров  $m$  и  $r$  дало следующие результаты:  $x=-4.9862$  (из начальной точки  $x(0)=-5$ ) и  $x=1.9745$  (из точки  $x(0)=2$ ).

Функция Гривонка (рис. 2,а) имеет множество локальных минимумов. На интервале  $[-50; 100]$  функция принимает минимальное значение в точке 0, где  $x=0$  и имеет такое описание

$$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right). \quad (8)$$

Тогда вспомогательная симметрическая функция  $F(y,z)$  для функции Гривонка (8) запишется так

$$F(y, z) = 0.5\left(2 + \frac{y^2}{4000} - \cos(y) + \frac{z^2}{4000} - \cos(z)\right) + 0.5q(y-z)^2, \quad (9)$$

а соответствующий алгоритм (4) для функции (9)

$$\begin{cases} y_1'(t) = y_2; \\ y_2'(t) = -\frac{r}{m}y_2 - \frac{1}{m}\left[q(y_1 - z_1) + \frac{y_1}{4000} + 0.5\sin(y_1)\right], \\ z_1'(t) = z_2; \\ z_2'(t) = -\frac{r}{m}z_2 - \frac{1}{m}\left[q(z_1 - y_1) + \frac{z_1}{4000} + 0.5\sin(z_1)\right]. \end{cases} \quad (10)$$

Для решения системы (10) были заданы начальные условия:  $y_f(0)=-47$ ,  $z_f(0)=53$  и выбраны следующие параметры: масса тяжелого шарика  $m=7$ , коэффициент демпфирования  $r=1$  и  $q=2$ . На рис. 2,б приведен результат решения системы (10), который описывает процесс схождения изображающих точек к точке глобального оптимума ( $x^*=0$ ). Расчетные значения составили:  $y_f=-0.000254$  и  $z_f=-0.000862$ . Решение задачи (8) обычным методом тяжелого шарика согласно выражению (1) дало следующие результаты:  $x=-43.9603$  (из начальной точки  $x(0)=-47$ ) и  $x=50.2403$  (из точки  $x(0)=53$ ).

Функция Швевеля (рис. 3,а) так же, как и две вышеприведенные функции, имеет локальные минимумы вблизи глобального оптимума. На интервале  $[-500; 500]$  функция принимает минимальное значение в точке 0, где  $x=420$  и соответствует следующему описанию

$$f(x) = 418.9829 \cdot n + \sum_{i=1}^n (-x_i \cdot \sin(\sqrt{|x_i|})). \quad (11)$$

Для функции Швевеля (11) вспомогательная симметрическая функция  $F(y,z)$  будет такой

$$F(y, z) = 0.5(2 \cdot 418.9829 - y \sin(\sqrt{|y|}) - z \sin(\sqrt{|z|})) + 0.5q(y-z)^2, \quad (12)$$

а соответствующий алгоритм (4) для функции (12)

$$\begin{cases} y_1'(t) = y_2; \\ y_2'(t) = -\frac{r}{m}y_2 - \frac{1}{m}\left[q(y_1 - z_1) - 0.5\sin(\sqrt{|y_1|}) - \frac{y_1 \cos(\sqrt{|y_1|}) \cdot \text{sign}(y_1)}{4\sqrt{|y_1|}}\right], \\ z_1'(t) = z_2; \\ z_2'(t) = -\frac{r}{m}z_2 - \frac{1}{m}\left[q(z_1 - y_1) - 0.5\sin(\sqrt{|z_1|}) - \frac{z_1 \cos(\sqrt{|z_1|}) \cdot \text{sign}(z_1)}{4\sqrt{|z_1|}}\right]. \end{cases} \quad (13)$$

Для решения системы (13) были заданы начальные условия:  $y_I(0) = -200$ ,  $z_I(0) = 480$  и выбраны следующие параметры: масса тяжелого шарика  $m = 57.8$ , коэффициент демпфирования  $r = 0.67$  и  $q = 2$ . На рис.3,б приведен результат решения системы (13), который описывает процесс схождения изображающих точек к точке глобального оптимума  $x^* = 420$ . Получены такие значения:  $y_I = 420.0194$  и  $z_I = 420.0862$ . Решение данной задачи (11) методом тяжелого шарика согласно выражению (1) из начальной точки  $x(0) = -4.5$  не дало положительного результата, изображающая точка закончила свое движение при  $x = -124.8345$ , из точки  $x(0) = 3.75$  точка глобального оптимума найдена с низкой точностью  $x = 420.8741$ .

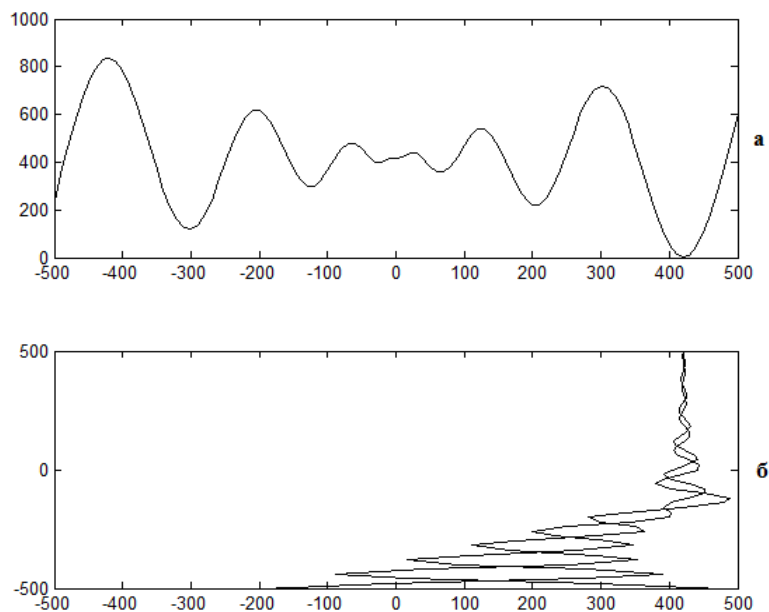


Рис. 3. Графики, иллюстрирующие процесс поиска глобального экстремума функции с применением концепции симметрии: а - вид тестовой функции Швевеля; б - решение системы (13)

**Выводы и перспективы дальнейшего исследования.** В статье исследована работа алгоритма модифицированного метода тяжелого шарика, основанного на принципе симметрии. Результаты исследования показали, что для тестовых функций Эккли, Гривонка и Швевеля поиск глобального экстремума функции с помощью обычного метода тяжелого шарика не дает положительного результата. Однако применение концепции симметрии к алгоритму метода тяжелого шарика дало нужный результат: с течением времени алгоритмы сходятся к глобальному минимуму многоэкстремальных функций. Кроме того, рассматриваемые алгоритмы обладают хорошей работоспособностью и достаточно высокой точностью. Таким образом, распараллеливание процесса поиска экстремума функции на основе использования концепции симметрии применительно к задачам оптимизации в дальнейшем позволит получить целый ряд позитивных результатов для оценки неизвестных параметров объектов при решении задач метрологии динамических измерений и синтезе адаптивных систем идентификации.

#### Список литературы

1. Стоян Б.Г. Решение некоторых многоэкстремальных задач методом сужающихся окрестностей / Б.Г. Стоян, В.З. Соколовский. – К.: Наук. думка, 1980. – 208 с.
2. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 632 с.
3. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
4. Корсун В.И. Использование симметрии для распараллеливания процесса поиска экстремума целевой функции в задачах оптимального проектирования и адаптивной идентификации / В.И. Корсун // Математические модели и современные информационные технологии: сб. науч. тр. НАН Украины, Ин-т математики. – К.: 1998. – С.66-68.
5. Корсун В.И. Методы и системы адаптивной идентификации и управления, использующие принципы симметрии / В.И. Корсун – Д.: ДВНП «Системные технологии», 1997. – 130 с.
6. Корсун В.И. Исследование алгоритма поиска экстремума целевой функции, основанного на применении концепции симметрии и параллельного пространства / В.И. Корсун, М.А. Демиденко // Науковий вісник НГА України. – 2000 – №2. – С.101-104.
7. Корсун В.И. Расширение возможностей методов установления при поиске глобального экстремума функции на основе концепции симметрии / В.И. Корсун, Ю.В. Жихарев, В.Л. Галюта // Матеріали міжнародної конференції «Математичні проблеми технічної механіки». – Д.: ДНВП «Системні технології», – 2005. – С.160.

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

М.А. Доронина

(Украина, г. Днепрпетровск, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВХОДНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ И ВХОДНОГО СИГНАЛА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

**Анотація.** Запропоновано новий підхід до розв'язання оберненої задачі динаміки: визначення оцінки величини постійного сигналу і його зсуву у часі на вході засобу вимірювання. Для досягнення поставленої мети використовується теорія збурень хвильової структури. Останнє реалізується за допомогою представлення невідомого сигналу, що діє на вході приладу, у вигляді суми двох складових детермінованої і випадкової, що мають хвильову структуру. За допомогою ідентифікатора Люенбергера знаходиться оцінка випадкової складової. Об'єднання знайденої оцінки і детермінованої складової дозволяє оцінити величину входного сигналу і час його затримки.

**Ключові слова:** обернена задача динаміки, збурення хвильової структури, ідентифікатор Люенбергера

**Аннотация.** Предложен новый подход к решению обратной задачи динамики: определению оценки величины постоянного сигнала и его сдвига во времени на входе средства измерения. Для достижения поставленной цели используется теория возмущений волновой структуры. Последнее реализуется посредством представления неизвестного сигнала, действующего на входе прибора, в виде суммы двух составляющих детерминированного и случайного, имеющих волновую структуру. С помощью идентификатора Люенбергера находится оценка случайной составляющей. Объединение найденной оценки и детерминированной составляющей позволяет оценить величину входного сигнала и время его задержки.

**Ключевые слова:** обратная задача динамики, возмущения волновой структуры, идентификатор Люенбергера.

**Abstract.** New approach to solving the inverse problem of dynamics - the measurement of constant value signal and his shift time at the entrance of measurement tool is proposed. The problem is solved using the perturbation theory of wave structure. This is realized through the provision of an unknown signal, acting on the input of the instrument, as the sum of two components of deterministic and random, having a wave structure.. Using ID Lyenberhera author found evaluation of the random component. Combining assessment found and deterministic component evaluates the value of the input signal and timing delays.

**Key words:** the inverse problem of dynamics, perturbation of wave structure, ID Lyenberhera

**Введение.** На данный момент достаточно остро стоит проблема повышения точности результатов динамических измерений [1,2], которые имеют место в современном производстве. Она может быть решена с помощью использования новых подходов, которые формируются на основополагающих принципах и законах естествознания.

Следует отметить, что среди многих концепций, на основе которых строятся научные теории, особое место занимает концепция дуализма [3].

В результате реализации динамических измерений на выходе датчика часто получают сигнал с погрешностью. Это может привести к тому, что на основе полученной информации будет принято ошибочное решение.

Оценка реальных входных сигналов датчиков связана с решением обратных задач динамики, методы решения которых описаны в работах [4, 5, 6], а значит и со сложными процессами регуляризации.

**Цель статьи** – описание методологии определения оценок величин постоянного сигнала и его сдвига во времени на входе средства измерения.

**Основная часть.** Если входной  $f[kT]$  и выходной  $x[kT]$  сигналы дискретной модели объекта связаны оператором  $W[z, kT]$ , т.е.

$$x[kT] = W[z, kT]f[kT], \quad (1)$$

где  $z$  — оператор опережения на время  $T$ , то изменение переменной  $x[kT]$  может быть получено путем преобразования как  $f[kT]$ , так и  $W[z, kT]$ . Таким образом, одинаковый сигнал можно получить в различных ситуациях [7,8]:

$$x[kT] = F[z, kT]u[kT], \quad (2)$$

где  $F[z, kT] \neq W[z, kT]$  и  $u[kT] \neq f[kT]$ .

При этом будет справедливо выражение

$$W[z, kT]f[kT] = F[z, kT]u[kT], \quad (3)$$

которое устанавливает динамическую эквивалентность двух моделей систем (1) и (2), имеющих разную структуру и параметры. В данном случае в модель (2), путем организации соответствующего входного воздействия  $u[kT]$ , вводятся недостающие элементы модели (1). Для преобразования модели объекта с целью ее упрощения представим сигнал  $u[kT]$  следующим образом:

$$u[kT] = f[kT] + \xi[kT], \quad (4)$$

где  $\xi[kT] = (F^{-1}[z, kT]W[z, kT] - 1)f[kT]$  будем рассматривать в качестве сигнала возмущения волновой структуры [9].

С вычислительной точки зрения получение точных значений параметра  $\xi[kT]$  связано с большими трудностями и практически невозможно. Однако оценки  $\bar{\xi}[kT]$  могут быть довольно легко получены, например, с помощью асимптотических идентификаторов состояния [10].

При этом возмущение  $\xi[kT]$  может быть представлено выходным сигналом свободной линейной динамической системы

$$\begin{aligned} z[(k+1)T] &= Hz[kT]; \\ \xi[kT] &= Gz[kT], \end{aligned} \quad (5)$$

где матрицы  $H$  и  $G$  заданы, а вектор  $z[kT]$  является «вектором состояния» сигнала возмущения. Начальные условия неизвестны и меняются скачкообразно, случайным образом с изменением  $k$ .

Преобразуя структурные элементы модели динамического объекта во входные сигнальные возмущения волновой структуры и осуществляя дальнейшую оценку значений этих возмущений асимптотическими идентификаторами состояния, можно существенно упростить первоначальную модель (1).

В качестве примера практического применения изложенного выше материала рассмотрим процедуру получения и оценки возмущения, действующего на входе объекта,

$$\begin{aligned} x[(k+1)T] &= Ax[kT] + Bu[(k-d)T], \\ y[kT] &= Cx[kT]. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражении (6) запаздывания реализуется совокупностью  $d$  элементарных задержек длительностью  $T$ .

При рассмотрении  $u[(k-d)T]$  в пространстве состояний переменные, которые соответствуют элементарным задержкам продолжительностью  $T$ , включаются в расширенный вектор состояния [10]. Последнее приводит к существенному увеличению его размерности. Модель (6) будет описываться уравнениями вида

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x[(k+1)T] \\ \dots \\ z[(k+1)T] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & \vdots & BQ \\ \dots & \cdot & \dots \\ 0 & \vdots & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[kT] \\ \dots \\ z[kT] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ P \end{bmatrix} u[kT], \\ y[kT] &= [C \quad \vdots \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x[kT] \\ \dots \\ z[kT] \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad Q = [1 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$z[kT] = [u[(k-d)T] \ u[(k-d+1)T] \ \dots \ u[(k-2)T] \ u[(k-1)T]]^T.$$

Более простое чем уравнение (7), представление модели (6) можно получить [7,8], если воспользоваться описанной выше процедурой реализации возмущения волновой структуры как сигнала на выходе свободной динамической системы (5) с начальными условиями, которые меняются скачкообразно случайным образом.

Пусть в выражение (6) входной сигнал равен  $u[kT] = 1[kT]$ . Тогда эта модель может быть записана следующим образом:

$$x[(k+1)T] = Ax[kT] + B \cdot 1[kT] + B\xi[kT],$$

$$y[kT] = Cx[kT], \tag{8}$$

где  $\xi[kT] = -(1[kT] - 1[(k-d)T])$ .

Поскольку возмущения  $\xi[kT]$  в уравнении состояния модели (8) представляют собой импульс длительностью  $d \cdot T$ , каждая из  $d$  дискрет которого равна 1, то его можно рассматривать как выходной сигнал свободной динамической системы

$$\begin{aligned} z[(k+1)T] &= z[kT], \\ \xi[kT] &= z[kT], \end{aligned} \tag{9}$$

с начальным условием, которое меняется скачкообразно и принимает случайные значения.

Объединив выражения (8) и (9), получим модель в переменных состояния, которая эквивалентна модели (7), т.е.

$$\begin{bmatrix} x[(k+1)T] \\ \dots \\ z[(k+1)T] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[kT] \\ \dots \\ z[kT] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 1[kT], \tag{10}$$

$$y[kT] = [C \ \vdots \ 0] \begin{bmatrix} x[kT] \\ \dots \\ z[kT] \end{bmatrix}^T.$$

Если матрица восстанавливаемости модели (10) имеет ранг, который равен  $n+1$ , то составляющие расширенного вектора состояния  $[x[kT] \ \vdots \ z[kT]]^T$  могут быть оценены любым из известных способов.

В частности, если одномерную модель измерительного средства, которая описывается разностным уравнением

$$y[(k+1)T] = ay[kT] + b \cdot 1[(k-3)T], \quad y[0] = y_0 \tag{11}$$

записать в переменных состояния, то в соответствии с формулой (7) она будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} x_1[(k+1)T] \\ x_2[(k+1)T] \\ x_3[(k+1)T] \\ x_4[(k+1)T] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1[kT] \\ x_2[kT] \\ x_3[kT] \\ x_4[kT] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot 1[kT], \quad \begin{bmatrix} x_1[0] \\ x_2[0] \\ x_3[0] \\ x_4[0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y[kT] = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot [x_1[kT] \ x_2[kT] \ x_3[kT] \ x_4[kT]]^T. \tag{12}$$

В данном случае матрица восстанавливаемости дискретной модели переменных состояний (12) будет иметь вид

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & b & 0 & 0 \\ a^2 & ab & b & 0 \\ a^3 & ab^2 & ab & b \end{bmatrix}$$

Учитывая что  $\text{rang}Q = 4 = n$ , где  $n$  — порядок модели (12), можно сделать вывод о возможности восстанавливаемости модели переменных состояний  $x_i[kT]$ ,  $i = 1 \dots 4$ .

Для эквивалентной модели переменных состояния (10) разностное уравнение можно записать таким образом:

$$\begin{bmatrix} x[(k+1)T] \\ z[(k+1)T] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[kT] \\ z[kT] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 1[kT], \quad \begin{bmatrix} x[0] \\ z[0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$y[kT] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x[kT] \\ z[kT] \end{bmatrix},$$

где  $\alpha$  — неизвестное случайное число.

Сравнивая модели (12) и (13), видим, что модель (13) является более простой, чем (12). Матрица восстанавливаемости для модели (13) имеет ранг, равный двум (т.е. порядку самой модели):

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ a & b \end{bmatrix}$$

Таким образом, как для переменной  $x[kT]$ , так и для возмущения  $\xi[kT] = z[kT]$  могут быть получены соответствующие оценки. Апериодический идентификатор состояния, который оценивает возмущение  $\xi[kT]$ , описывается уравнениями вида

$$\begin{aligned} z[(k+1)T] &= -(a/b)y[kT] - 1[kT], \quad z[0] = 0, \\ \hat{\xi}[kT] &= z[kT] + (1/b)y[kT]. \end{aligned} \quad (14)$$

На выходе этого идентификатора будет иметь место последовательность дискрет

$$\hat{\xi}[0] = \frac{a}{b}, \quad \hat{\xi}[T] = \hat{\xi}[2T] = \hat{\xi}[3T] = -1, \quad \hat{\xi}[4T] = \hat{\xi}[5T] = \dots = 0.$$

Что же касается возмущения, то оно реализуется через последовательность вида

$$\xi[0] = \xi[T] = \xi[2T] = -1, \quad \xi[3T] = \xi[4T] = \dots = 0.$$

Учитывая тот факт, что апериодический идентификатор Люенбергера (14) первого порядка дает оценку неизвестного сигнала с задержкой, равной  $T$ , то можем скорректировать найденную оценку  $\hat{\xi}[kT]$  таким образом:

$$\hat{\xi}[0] = -1; \quad \hat{\xi}[T] = -1, \quad \hat{\xi}[2T] = -1; \quad \hat{\xi}[3T] = 0; \quad \hat{\xi}[4T] = 0, \dots;$$

Т. е., осуществив перемещение найденных идентификатором Люенбергера оценок  $\hat{\xi}[kT]$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  на время  $T$  назад, получим что  $\hat{\xi}[kT] = \xi[kT]$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Теперь рассмотрим ситуацию, когда постоянный входной сигнал имеет не только неизвестную задержку во времени, но и неизвестную величину [10]. Воспроизведение неизвестного входного сигнала, который действует на объект с неизвестной входной задержкой, рассмотрим на следующем примере. Относительно объекта известно, что он описывается уравнением вида

$$y[(k+1)T] = ay[kT] + bu[(k-3)T], \quad y[0] = y_0. \quad (15)$$

Пусть  $u[kT] = 1[kT]$ , но так как это значение нам неизвестно, будем считать, что точное значение  $u[kT] = 0,8 \cdot 1[kT]$ . Тогда математическая модель (15) после ее преобразования с использованием возмущений волновой структуры может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} y[(k+1)T] &= ay[kT] + 0,8 \cdot b \cdot 1[kT] + b \cdot \xi[kT]; & y[0] &= y_0, \\ \xi[(k+1)T] &= \xi[kT]; \\ \xi[0] &= 0,2. \end{aligned} \quad (16)$$

Для оценки воздействия волновой структуры  $\xi[kT]$  снова применим аperiodический идентификатор Льюенбергера, который в данном случае будет описываться уравнениями вида

$$\begin{aligned} z[(k+1)T] &= -\frac{a}{b} \cdot z[kT] - 0,8 \cdot 1[kT]; & z[0] &= 0, \\ \hat{\xi}[kT] &= z[kT] + \frac{1}{b} y[kT]. \end{aligned} \quad (17)$$

Применяя в модели идентификатора состояния (17) в качестве  $y[kT]$  решение уравнения (15), получим, что

$$\hat{\xi}[0] = \frac{1}{b} y_0; \quad \hat{\xi}[T] = -0,8; \quad \hat{\xi}[2T] = -0,8; \quad \hat{\xi}[3T] = -0,8; \quad \hat{\xi}[4T] = \hat{\xi}[5T] = \hat{\xi}[6T] = \dots = 0,2.$$

Количество значений  $-0,8$  дает информацию о времени запаздывания, которое составляет  $3T$ , а сумма  $0,8+0,2=1$  — оценку величины постоянного входного сигнала объекта (15). Эта оценка равна истинному значению данного сигнала.

**Вывод.** Таким образом, описанная выше процедура преобразования на базе концепции дуализма структурных и параметрических изменений модели измерительного средства в входные возмущения волновой структуры, позволяет существенно упростить косвенную оценку времени запаздывания сигнала и его величины на входе средства измерения. Описанный подход может быть с успехом применен и в других случаях.

#### Список литературы

1. Layer E. Signal Transforms in Dynamic Measurements. / E. Layer, K. Tomczyk. — London.: Springer, 2015. — 216p.
2. Rossi G.B. Measurement and Probability. A Probabilistic Theory of Measurement with Applications. / G.B. Rossi. — London.: Springer, 2014. — 286p.
3. Пронкин Н.С. Основы метрологии динамических измерений: учеб. пособие для вузов / Н.С. Пронкин. — М.: Логос, 2003. — 256 с.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов / П.Д. Крутько. — М.: Машиностроение, 2004. — 576 с.
5. Полярус О.В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення: монографія / О.В. Полярус, С.О. Поляков. — Х: Лідер, 2014. — 120с.
6. Корсун В.И. Применение принципа обобщенного входа для идентификации объекта управления с запаздыванием / В.И. Корсун // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.—Д., 2001. — Вип.66.—С.69—71.
7. Корсун В.И. Использование концепции симметрии для оценки времени задержки сигнала на входе измерительного средства / В.И. Корсун, С.Т. Пацера, В.Т. Белан // Наук. праці V Міжнарод. наук.-техн. конфер. «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-2006). В 2-х т., —Х., 2006.—Т2.—С.380—382.
8. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980. — 408с.
9. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. — М.: Мир, 1980. — 541с.
10. Дороніна М.А. Використання збурень хвильової структури для підвищення точності відтворення вхідного сигналу засобу вимірювання / М.А. Дороніна, В.І. Корсун // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. —Х., 2015. — Вип.6. —С.47—49.

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



*А.И. Швачка, Е.В. Титова, О.Ю. Олейник, канд-ты техн. наук*

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»)

## РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ АСУТП ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МНОЖЕСТВЕННОГО ВЫБОРА

**Анотація.** Енергетичні проблеми української промисловості вимагають розвитку не тільки енергозберігаючої техніки, а й розвитку системи управління на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Це змінює саму постановку завдань планування і управління, які доцільно розглядати як багатокритеріальні. Вивчено методи аналізу компромісних рішень цих завдань. Розглянуто актуальні двукритеріальні задачі зниження енергоємності виробництва. Розроблено критерій прийняття рішення з урахуванням бази даних компромісних рішень в площині розглянутих параметрів на базі енергетичної характеристики і введення глобального критерію управління.

**Ключові слова:** гірничо-металургійний комплекс; двукритеріальні задачі; енергоємність виробництва; глобальний критерій управління.

**Аннотация.** Энергетические проблемы украинской промышленности требуют развития не только энергосберегающей техники, но и системы управления на предприятиях горно-металлургического комплекса. Это изменяет саму постановку задач планирования и управления, которые целесообразно рассматривать как многокритериальные. Изучены методы анализа компромиссных решений данных задач. Рассмотрены актуальные двукритериальные задачи снижения энергоёмкости производства. Разработан критерий принятия решения с учетом базы данных компромиссных решений в плоскости рассматриваемых параметров на основании энергетической характеристики и введения глобального критерия управления.

**Ключевые слова:** горно-металлургический комплекс; двукритериальные задачи; энергоёмкость производства; глобальный критерий управления.

**Abstract.** Energy problems of Ukrainian industry require not only the development of energy-saving technology, and the development of management systems at the enterprises of mining and metallurgical complex. This changes the very formulation of the planning and management tasks, which is appropriate to consider, as a multi-criteria. We studied the methods of analysis of trade-offs of these tasks. Showing expired two-criterion task of reducing energy intensity of production. A criterion for making a decision with regard to the plane of the considered parameters database compromises the data on the basis of the energy performance and the introduction of global governance criteria.

**Keywords:** mining and metallurgical complex; two-criteria problem; energy intensity of production; global governance criteria.

### Введение

В современной науке и технике все более актуальной является проблема повышение оперативности управления в условиях нестабильности топливно-энергетической базы, а также увеличение числа величин, определяющих критерий управления. Этот вопрос касается не только горной отрасли, но и многих других, в которых повышение требований к качеству продукции, ужесточение экологических и экономических требований диктует необходимость дальнейшего повышения эффективности производства. Это имеет достаточно серьезные основания, так как удовлетворение других (неэкономических) требований практически всегда связано с дополнительными затратами. Экономический критерий выступает, поэтому как обобщающий, позволяющий сопоставлять варианты решений при обеспечении требуемых уровней соблюдения остальных критериев. Основные трудности представляют при этом задание минимально необходимых уровней других критериев и определение требующихся для их удовлетворения экономических затрат. Учет свойства многокритериальности при управлении отражается на применяемых математических моделях и общей методологии управления.

Академик Моисеев Н.Н. отмечает [1], что работы в области методов принятия решений требуют создания не только специального математического обеспечения, но и развития знаний, позволяющих выявить истинную структуру интересов и целей субъектов. Возможность выбора взаимоприемлемого коллективного решения нельзя постулировать заранее, поскольку оно должно удовлетворять целому ряду очевидных требований. Прежде всего, они должны быть паретовскими.

Методы многокритериальной оптимизации предполагают активное участие людей в решении задач [2]. Наличие нескольких критериев создает неопределенность целей управления. Раскрытие этой неопределенности возможно только с участием человека. Конкретно это могут быть экспертные оценки при со-

измерении критериев разной природы (экономических, экологических), оценки допустимости компромиссов и т.п. Многокритериальность и противоречивость интересов должны учитываться при согласовании целей управления подсистем и при комплексной постановке задачи управления.

### Цель исследования

Обоснование методики оценки экономической целесообразности снижения затрат энергоресурсов при одновременном повышении производительности технологической установки, которая требует: формирование базы данных компромиссных решений в плоскости рассматриваемых параметров и разработки критерия принимаемого решения на основании показателя тепловой работы.

### Литературный обзор

Большинство агрегатов горно-металлургического комплекса не имеют обоснованных норм энергопотребления. Использование энергетических характеристик производства позволяет выразить зависимость между расходом энергии и выпуском продукции за данный период времени при одновременном учете основных факторов, влияющих на энергоиспользование [3].

Состав факторов, определяющих изменение расхода энергии, многообразен. По мере перехода от элементов производства к комплексам (от агрегата к цеху, от цеха – к заводу) состав факторов пополняется количественно и качественно новыми, что требует их переоценки. Так, если при построении характеристики отдельной технологической операции приходится сосредоточить внимание на анализе и учете технологических и энергетических факторов, то при построении характеристики процесса (цеха, завода) необходимо уделять главное внимание организационно-производственным факторам. К их числу относятся: тип производства, ассортимент продукции, размер брака и незавершенного производства, производственный режим, сезонные и метеорологические факторы.

Факторы процесса, с точки зрения энергетической характеристики, можно разбить на группы [4]:

- 1) приближенно неизменные в течение длительного времени, главным образом конструктивные показатели энергопотребляющего агрегата;
- 2) режимные показатели, отдельные показатели качества сырья, топлива и конечных продуктов, заведомо значимо влияющие на расход энергии, но которые не удалось включить в число рассматриваемых вследствие тех или иных недостатков или неполноты оперативного учета;
- 3) режимные показатели, качество сырья, топлива и конечных продуктов, которые принимаются по данным оперативного учета и которые оказались существенными;
- 4) аналогичные предыдущей группе, но которые после ранжирования факторов, а также факторов взаимодействия оказались несущественными;
- 5) случайные факторы, обусловленные различного рода неопределенностями (конструктивными – степень износа; технологическими – состав продукта, количество аварий; измерительными – состав и время отбора проб, организационными – частота ремонта, интенсивность эксплуатации).

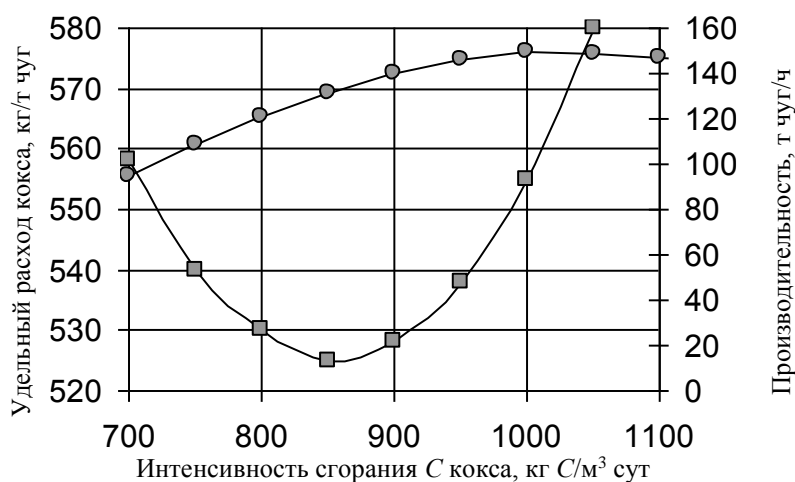
Факторы вида 1 можно считать постоянными для некоторого довольно длительного периода времени. Факторы вида 2, 3, 4, 5 представляют собой шумовое поле, на фоне которого действуют значимые факторы.

Расход энергии ( $\mathcal{E}$ ) за определенный отрезок времени как для отдельных процессов и агрегатов, так и для промышленных предприятий в целом можно представить в виде функциональной зависимости от объема производства ( $\Pi$ ) [3]:

$$\mathcal{E} = f(\Pi) .$$

Энергетическая характеристика определяет точку оптимального режима операции – оптимальную величину нагрузки оборудования по мощности и соответствующий ей расход энергии (рис. 1), а также отражает количественную связь между энергетикой и технологией и представляет, таким образом, математическое описание уровня энергопотребления [4]. Она позволяет: выявить резервы экономии энергии на предприятии; установить оптимальные энергетические режимы работы оборудования; нормировать энергопотребление от операции до предприятия в целом; проанализировать энергоиспользование и разработать энергодобавочный баланс предприятия.

Энергетические характеристики могут быть построены на основе замеров, обработки производственных данных или расчетным путем. Влияние каждого из объективно действующих факторов на расход энергии может быть установлено в виде аналитической зависимости и на основе энергетических балансов доменной плавки. Используя энергетическую характеристику, можно оценить и влияние интенсивности плавки на тепловые потери рабочего пространства печи и на эффективность использования восстановительной энергии газа.



**Рис. 1. Вид энергетической характеристики доменной печи №3 объемом 2000м³ ПАО «Северсталь»:**  
 ○ – производительность, т чугуна/ч;  
 □ – удельный расход кокса, кг/т чугуна

Перейдем к вопросу многокритериальности в аспекте рассматриваемой проблемы. В отличие от задач обоснования решений по скалярному критерию, результатом которых является оптимальная (с точностью до предпосылок и допущений модели) стратегия, в задачах с векторным критерием оказывается невозможно с абсолютной уверенностью утверждать, что то или иное решение действительно (объективно) оптимально. Одно из решений может превосходить другое по одним критериям и уступать ему по другим. Сказать, какое из двух решений в указанных условиях объективно лучше другого, не представляется возможным. Вильфредо Парето обосновал принцип согласованного оптимума, ориентируясь на конфликтную ситуацию между несколькими субъектами с пересекающимися интересами (1870). Согласованный оптимум означает преобразование конфликтной ситуации в такую, в которой ни один из участников конфликта не может улучшить свое состояние, не причинив своими действиями вреда партнерам [5].

Одна из проблем в задачах многокритериального выбора – это поиск наилучшего решения внутри множества Парето. Как правило, выбор среди парето-оптимального решения возможен лишь за счет привлечения дополнительной информации о предпочтении лица, принимающего решение. Одним из наиболее распространенных видов дополнительной информации является информация об относительной важности критериев. Смысл данной информации состоит в том, что критериям приписывают некоторые коэффициенты (веса), определяющие их важность [6]. Как правило, эти методы являются эвристическими, и это обстоятельство приводит к тому, что результаты задачи зависят от выбора той или иной процедуры.

Результаты работ [7, 8] опираются на методологию, в которой удалось избежать указанных выше проблем. При этом оптимальные решения следует искать внутри множества Парето и дается четкое определение количественной информации об относительной важности критериев. Суть данного подхода состоит в построении оценки сверху с использованием понятия «конуса» для множества выбираемых решений за счет последовательного сужения множества Парето.

### Основная часть

Для выполнения исследования выбрана печь шахтного типа. Таким объектом в горно-металлургической промышленности является доменная печь (ДП). Рассматриваемый период работы оборудования относится базовому режиму, определяемому оперативно-календарным планированием на месяц и более длительным сроком, которое выполняет производственный отдел по объему заказов с учетом состояния оборудования, определяемым техническим отделом. Его переменная составляющая связана с колебанием параметров сырья, ресурсом работы оборудования. Основные показатели плавки определены многофакторными нелинейными характеристиками, представленными полиномами второй степени [9]:

$$P, K, T_{\text{усл}} = f(t_{\text{дм}}, O_2, m, n),$$

где  $t_{\text{дм}}$  – температура дутья, °C;  $O_2$  – содержание кислорода в дутье, %;  $m$  ( $n$ ) – доля углерода природного газа (пылеугольного топлива) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах, д.е.;  $K$  – удельный расход кокса кг/т чугуна;  $P$  – производительность, т чугуна/ч;  $T_{\text{усл}}$  – уд. расход условного топлива, кг/т чугуна.

Решение предложенной задачи топливоиспользования, когда в качестве целевой функции выступает один из указанных показателей, а остальные входят в состав ограничений, методами однокритериальной оптимизации обеспечивает учет переменных условий в базовых режимах плавки, текущих дутьевых параметров. В металлургическом же производстве основные технико-экономические показатели работы доменной печи должны быть на уровне, близком к оптимальному. Таким образом, рациональные реше-

ния, полученные относительно отдельного показателя необходимо скомбинировать в компромиссные. Причем, потери относительно каждого показателя должны быть минимальными.

В условиях изменения конъюнктуры рынка металлопродукции и постоянного роста стоимости энергоресурсов предложены ряд задач, требующих поиска компромисса между двумя параметрами:

1) превышение стоимости кокса, стоимости природного газа определяет необходимость решения задачи в пространстве  $T_{усл\ min} - P_{max}$  (минимум удельного расхода условного топлива, обеспечивающий максимум производства);

2) переход на пылеугольное топливо (ПУТ) определяет целесообразность рассмотрения задачи векторной оптимизации в пространстве  $K_{min} - P_{max}$  (минимум удельного расхода кокса, обеспечивающий максимум производительности);

3) при отсутствии спроса на чугун целесообразно решение задачи в пространстве  $T_{усл\ min} - K_{min}$  (минимум использования сырья и энергии).

В соответствии с разработанной моделью топливоиспользования [9] в задаче векторной оптимизации принят второй вариант критерия эффективности:

$$(K, (-P)) \rightarrow \min.$$

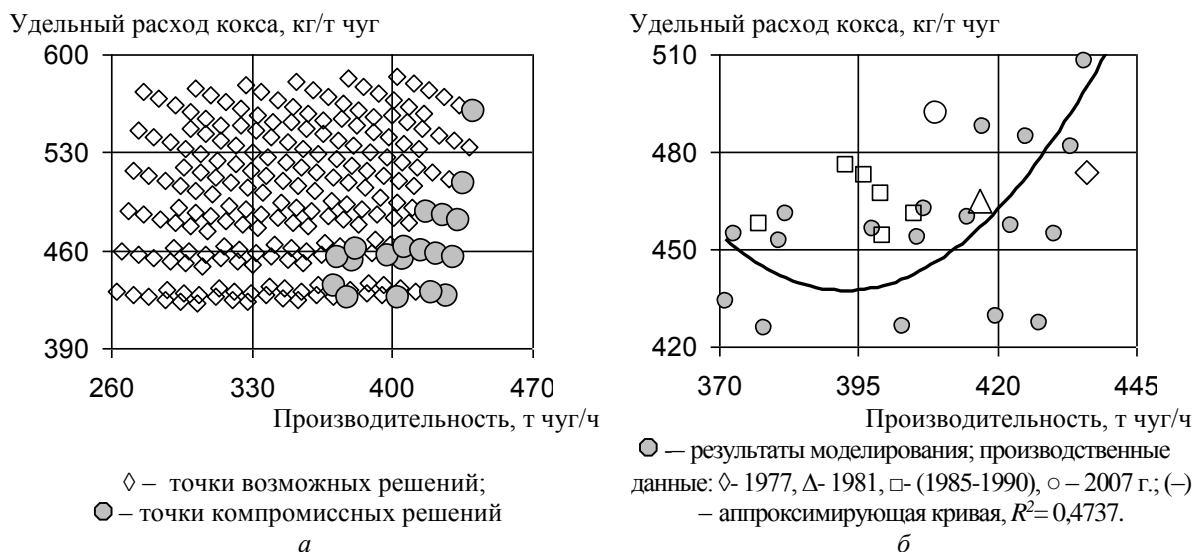
Получены компромиссные решения показателей работы печи модели топливоиспользования в области «производительность – удельный расход кокса» (рис. 2, а). Выполнена оценка адекватности вариантов решений согласно предложенному алгоритму (понятие «конуса») в результате сопоставления с отчетными данными функционирования объекта и особенностей сырьевых условий (рис. 2, б).

С точки зрения технологии, в полученных точках решения (рис. 2, б), требует уточнения варианта, который принят для конкретных условий производства. Для этого следует выделить глобальный критерий оптимизации, который может быть сформулирован так:

1) определить возможность наращивания объемов производства при дополнительных издержках на расход топливно-энергетических ресурсов в стабильных экономических условиях;

2) оценить варианты экономии сырья и энергии при необходимости сохранения объемов производства на необходимом уровне для переходной экономики.

Энергетическая характеристика, построенная по результатам моделирования, представлена на рис. 2, б в виде аппроксимирующей кривой. Основная ее тенденция характеризуется первоначально снижением затрат энергии при повышении производительности; в дальнейшем тенденция изменяется и повышение производительности будет сопровождаться увеличением расхода энергии. Согласно энергетической характеристике локально оптимальным вариантом решения является нижняя точка характеристики, а для дальнейшего повышения производительности необходимо сопоставить его оценку с возможными затратами энергии. Для этого рассмотрена энергетическая характеристика вариантов решений с указанием затраченных энергетических ресурсов (рис. 3).



**Рис. 2. Характеристики задачи поиска компромиссных решений в области «удельный расход кокса – производительность» для ДП №9 ПАО «АМКР»**



Рис. 3. Характеристика дутьевого режима решения задачи векторной оптимизации в области «удельный расход кокса - производительность» для ДП №9 ПАО «АМКР» при отсутствии вдувания природного газа (ПГ) и изменении расхода пылеугольного топлива (ПУТ) (числовые значения возле точек, кг/т чуг) и температуре дутья, содержанию кислорода:

о- (1200 °C; 27%); о- (1200 °C; 29%);  
 Δ- (1080 °C; 31%); Δ- (1140 °C; 31%);  
 □- (1200 °C; 31%)

В результате анализа характеристики (рис. 3) выявлены определенные тенденции, которые объединены в тренды. Причем каждый из них соответствует постоянной характеристике по температуре дутья и содержанию кислорода в нем. Миграция указанных трендов слева направо на характеристике связана с повышением значений характеристик дутья: температуры – до 1200 °C, кислорода – до 31%; что соответствует верхним ограничениям на варьируемые переменные оптимизационной задачи.

Для реализации в системе принят технологический режим, соответствующий потреблению угольной пыли на уровне 136 кг/т чуг, что обеспечивает производительность 403 т чуг/ч, при издержках по коксу на уровне 426 кг/т чуг. Целесообразность такого решения может быть оценена путем сравнения с точками, характеризующимися приблизительно таким же уровнем потребления кокса. Это могут быть точки 135, 137 (кг/т чуг) в окрестности и перспективная точка 109 (рис. 3). Результаты проведенного анализа сведены в таблице. Показатели производства относительно рассматриваемой «базовой точки» отличаются приблизительно на одну и ту же величину (6,5%), а по величине затрат ресурсов – различные значения. Характерно, что производительность на уровне 428-430 т чуг/ч может быть достигнута различными технологическими путями.

На данном этапе необходимо привлечение концепции о формировании глобального максимума с учетом наличия и объемов энергетической базы предприятия.

Следует отметить перспективность и целесообразность данного направления исследования в условиях энергетического кризиса, что позволит повысить оперативность и маневренность управления объектами горно-металлургического комплекса.

Таблица

Результаты анализа решения задачи векторной оптимизации в области «удельный расход кокса – производительность» на ДП №9 ПАО «АМКР»

Режим вдувания ПУТ, м <sup>3</sup> /т чуг	Показатели ДП		Приращения, %		
	К, кг/т чуг	Р, т чуг/ч	Δ <sub>ПУТ</sub>	Δ <sub>К</sub>	Δ <sub>Р</sub>
136 (1200, 29)*	426	403	Базовый режим		
135 (1200, 27)	426	378	-0,7	0	-6,2
137 (1200, 31)	427	428	+0,7	+0,2	+6,2
109 (1200, 31)	455	430	+19,9	+6,8	+6,7

\* Температура дутья, °C; содержание кислорода в дутье, %

### Выводы и перспектива дальнейших исследований

1. Предложен метод анализа компромиссных решений для объектов горно-металлургического комплекса, позволяющий расширить информационно-аналитическую базу принятия научно обоснованных решений в составе АСУ ТП в условиях нескольких критериев эффективности, а также оценить экономическую целесообразности перераспределения видов энергетических ресурсов на основании энергетической характеристики.

2. Варианты компромиссных решений базового режима технологического оборудования существенно конкурируют между собой, поскольку одни показатели производства могут быть обеспечены с учетом различных затрат по виду и объемам энергетических ресурсов. В такой ситуации авторами предложено применение глобального критерия управления.

3. Результаты исследования направлены на усовершенствование системы использования информации по математическим моделям, которые применяются при управлении как технологическими процес-

сами, так и производством в целом, при решении проблем энергосбережения, повышения качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке. Перспективность данного направления не вызывает сомнения и требует дальнейшей теоретической проработки и практической реализации с учетом специфики объектов горно-металлургического комплекса.

### **Список литературы**

1. Моисеев Н. Н. Междисциплинарные исследования глобальных проблем // Публицистика и общественные проблемы : изб. тр. в 2-х томах / Н. Н. Моисеев – М. : Тайдекс Ко, 2003. - т. 2. 264с.
2. Подиновский, В. В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский// Многокритериальные задачи принятия решений. - 1978. - С. 48 - 82.
3. Гофман И. В. Энергетические характеристики промышленного производства // Известия академии наук СССР. Отделение технических наук. №12, 1948- с. 1803- 1818.
4. Виленский Н. М. Нормы энергопотребления в промышленности. / Н. М. Виленский, Ю. Б. Клюев, Р. С. Резникова. - Свердловск : Академия наук СССР. Уральский филиал. Отдел экономических исследований. 1968. - 58 с.
5. Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: Словарь соврем. экон. науки / Л. И. Лопатников; Под ред. Г. Б. Клейнера; Акад. нар. хоз-ва при Правительстве РФ. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2003. – 519 с.: ил. – ISBN 5-7749-0275-7.
6. Бородулин А.В. Домна в энергетическом измерении/ А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, Г.И. Орел.- Кривой Рог- 2006, 436с.
7. Швачка А.И. Поиск компромиссных решений по управлению при нескольких критериях качества / А.И. Швачка, Е.В. Лещенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. –Вип. 89. – С. 66 – 71.
8. Швачка А.И. Развитие информационной базы принятия управляющих решений по ведению доменной плавки / А. И. Швачка, А. Л. Чайка, Зайцев В.Г. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – Вып. 26. – С. 52–61.
9. Бородулин А. В. О путях оптимизации параметров комбинированного дутья при выплавке чугуна/ А. В. Бородулин, О. В. Дубина, И. А. Лукьяненко В. И., Романенко А. Л. Чайка, А. И. Швачка // Тр. межд. науч. – техн. конфер. «Пылевидное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна Д. : УНИТЕХ, 2006. – С. 193 – 207.

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

# ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621-926

*В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.А. Боровик, Е.В. Котлярова  
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

## ДЕМПФИРОВАНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ СРЕДСТВАМИ СИНХРОННОГО ПРИВОДА

***Анотація.** Обґрунтовано вибір факторів впливу на параметри системи синхронного приводу і розроблено метод компенсації ударних навантажень електричними та механічними засобами. Запропонована функція мети і підхід до вибору інтервалів обмеження задачі оптимізації при визначенні параметрів електромеханічної системи. Отримано підтвердження принципової можливості компенсації ударних навантажень на прикладі конкретного приводу.*

***Ключові слова:** потужні гірничо-металургійні механізми, ударне навантаження, синхронний електропривод, метод компенсації ударних навантажень, обґрунтування та оптимізація параметрів.*

***Аннотация.** Обоснован выбор факторов влияния на параметры системы синхронного привода и разработан метод компенсации ударных нагрузок электрическими и механическими средствами. Предложена функция цели и подход к выбору интервалов ограниченной задачи оптимизации при определении параметров электромеханической системы. Получено подтверждение принципиальной возможности демпфирования ударных нагрузок на примере конкретного привода.*

***Ключевые слова:** мощные горно-металлургические механизмы, ударная нагрузка, синхронный электропривод, метод демпфирования ударных нагрузок, обоснование и оптимизация параметров.*

***Abstract.** The objective of the study is the justification of choice of influence factors for the system parameters of synchronous electric drive and development of the method for impact load compensation by electrical and mechanical means. The objective function and the approach to the choice of interval constraints for the optimization problem in the parameters of electromechanical system determining were proposed. The evidences for possibility in principle of impact load compensation for the specific drive were obtained.*

***Keywords:** high-capacity mining and smelting mechanisms, impact load, synchronous electric drive, method for impact load compensation, parameters justification and optimization.*

Известно, что в горно-металлургической промышленности используются уникальные механизмы, мощности которых могут колебаться от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт. Среди них следует выделить щековые, конусные и валковые дробилки крупного дробления и оборудование механизмов прокатных валков, где особенно проявляются ударные нагрузки.

Традиционно перечисленное оборудование комплектовалось асинхронным приводом с большим скольжением и маховиковым накопителем кинетической энергии. Несмотря на достаточно эффективную технологическую работу асинхронной системы электропривода, его энергетические характеристики сегодня не отвечают современным требованиям. Принимая во внимание постоянный рост стоимости электроэнергии и то, что доля эксплуатационных расходов данного оборудования достигает 60% от общего объема потребления, вопрос энергосбережения, безусловно, является весьма актуальным.

Альтернативой асинхронному приводу механизмов с ударной нагрузкой может стать синхронный привод. Такие преимущества, как высокая надежность, из-за большого воздушного зазора, возможность компенсации реактивной мощности, высокий КПД, значительная жесткость механической характеристики и, наконец, применение тихоходных двигателей, допускающих исключить редукторы из состава кинематических схем, делают этот тип двигателей вне конкуренции. Однако помимо преимуществ ему присущи и недостатки. При технологически правильной эксплуатации синхронного привода прокатных валков стана цельнотянутых труб в нем возникают аварийные ситуации, вызванные механическим износом изоляции лобовых частей индукторной обмотки в зоне выхода активных проводников из магнито-

провода. Авторами работы [1] установлено, что причиной аварийных ситуаций являются значительные динамические броски тока индуктора, которые сопровождаются механическим дребезгом лобовых частей обмотки. Обычно действие таких динамических ударов компенсируют механическими или электрическими способами. К ним следует отнести наличие маховикового механизма, регулирование жесткости упругих муфт и использование автоматической системы возбуждения с возможностью форсировки напряжения.

Высокая жесткость механической характеристики синхронного двигателя не позволяет применять в качестве демпфера ударного приложения нагрузки маховиковых механизмов. Так, опыт, полученный в результате применения маховика в составе синхронного привода, показал его нецелесообразность ввиду неспособности отдавать накопленную энергию из-за низкого проседания скорости двигателя.

Еще один способ компенсации ударных нагрузок – введение в кинематическую схему упругих муфт. Следует отметить, что случай применения абсолютно жесткой связи выявил неработоспособность системы по причине значительного роста ее колебательности [1]. Таким образом, при исследованиях необходимо определить такой уровень жесткости упругих связей, который позволил бы при одновременном получении положительного эффекта демпфирования обеспечить удовлетворительную работоспособность привода.

Помимо механических подходов решения проблемы работы синхронного электропривода, не следует забывать о применении автоматической системы управления возбуждением. Однако в этом случае необходимо сформулировать закон регулирования или определить фиксированные параметры настройки системы. Как показано в публикации [1], в начальный момент приложения ударной нагрузки электродвигатель работает с ослабленным полем, что может стать причиной значительных бросков индукторного тока. Поэтому для его снижения, возможно, следует осуществлять заблаговременное форсирование напряжения возбуждения заранее известного уровня.

Из анализа возникновения аварий видно, что для реализации мероприятий компенсации ударных нагрузок может быть задействовано два метода. Это метод регулирования жесткости упругих элементов в пределах, не вызывающих значительных механических колебаний, и метод заблаговременной форсировки возбуждения заданного уровня. Для решения этой проблемы следует сформулировать оптимизационную задачу, которая позволит определить параметры системы при обозначенных условиях работы привода.

Путем математического моделирования определим параметры системы привода с двигателем СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 при набросе номинальной нагрузки из состояния холостого хода. Экспериментальным путем установлены пределы регулирования факторов оптимизации:

- кратность форсировки возбуждения 1...1,75 номинального, ограниченная возможностью возбудителя;
- пределы кратности жесткости муфты 1...4, лимитируемой максимумом колебательности системы;
- возможный интервал времени заблаговременного включения форсировки 0...3 секунды до начала нагружения, определяемого пятью постоянными времени обмотки возбуждения. В качестве функции цели предложено использовать минимум среднеквадратического отклонения от установившегося значения тока статора при набросе номинальной нагрузки [2].

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(I_i - I_{уст})^2}{n - 1}},$$

где  $I_i, I_{уст}$  – мгновенное и установившееся значение тока индуктора,  $n$  – число дискрет. Решение задачи предлагается выполнить с помощью встроенной функции Minimize пакета MathCAD, где используют градиентный способ поиска оптимального решения.

Традиционно динамику пуска синхронного привода оценивают с учетом электромагнитных переходных процессов. При моделировании двигателя использованы уравнения Парка – Горева [3]:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_d}{dt} = U_d + \psi_q \omega_\delta - r_a i_d; \quad \frac{d\psi_q}{dt} = U_q - \psi_d \omega_\delta - r_a i_q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f; \\ \frac{d\psi_{kd}}{dt} = -r_{kd} i_{kd}; \quad \frac{d\psi_{kq}}{dt} = -r_{kq} i_{kq}; \\ \frac{d\omega_\delta}{dt} = \frac{M_\delta - \beta(\omega_\delta - \omega_m) - C_o \frac{(\phi_\delta - \phi_m)}{p}}{T_{M_\delta}}; \quad \frac{d\phi_\delta}{dt} = \omega_\delta; \quad \frac{d\theta}{dt} = 1 - \phi_\delta, \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\beta(\omega_\delta - \omega_m) + C_o \frac{(\phi_\delta - \phi_m)}{p} - M_m}{T_{M_m}}; \\ \frac{d\phi_m}{dt} = \omega_m \end{array} \right.$$

Мгновенные значения токов и момента определены с учетом сверхпереходных параметров синхронного двигателя:

$$\begin{aligned} x_d'' &= \frac{D}{x_f x_{kd} - x_{ad}^2}; & x_q'' &= \frac{x_q x_{kq} - x_{ad}^2}{x_{kq}}; & x_f'' &= \frac{D}{x_d x_{kd} - x_{ad}^2}; \\ x_{kd}'' &= \frac{D}{x_f x_d - x_{ad}^2}; & x_{dkd}'' &= \frac{D}{x_f x_{ad} - x_{ad}^2}; & x_{fkd}'' &= \frac{D}{x_d x_{ad} - x_{ad}^2}; \\ x_{fd}'' &= \frac{D}{x_{kd} x_{ad} - x_{ad}^2}; & x_{qkq}'' &= \frac{x_q x_{kq} - x_{aq}^2}{x_{ad}}, \end{aligned}$$

где  $D = x_d x_f x_{kd} - x_{ad}^2 (x_d + x_f + x_{kd}) + 2x_{ad}^3$ .

Решение приведенной системы дифференциальных уравнений выполняется с учетом выражений для определения токов и электромагнитного момента:

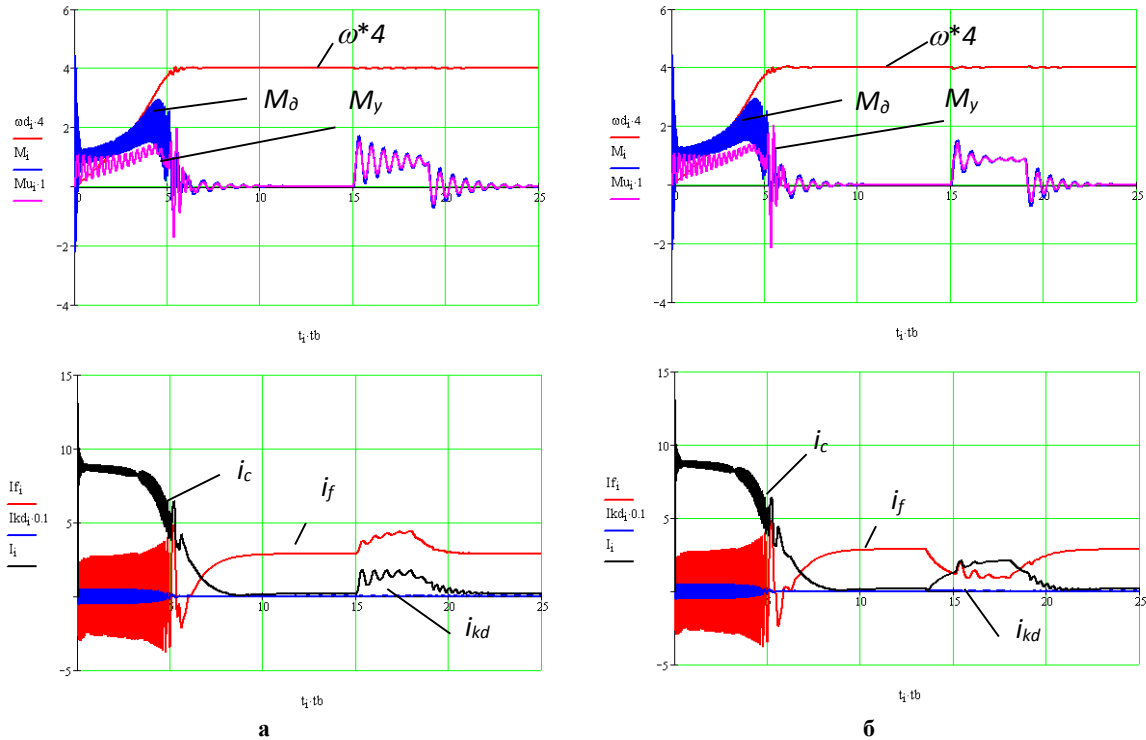
$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\psi_d}{x_d''} - \frac{\psi_f}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{dkd}''}; & i_q &= \frac{\psi_q}{x_q''} - \frac{\psi_{kq}}{x_{qkq}''}; & i_f &= \frac{\psi_f}{x_f''} - \frac{\psi_d}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{fkd}''}; \\ i_{kd} &= \frac{\psi_{kd}}{x_{kd}''} - \frac{\psi_f}{x_{fkd}''} - \frac{\psi_d}{x_{dkd}''}; & i_{kq} &= \frac{\psi_{kq}}{x_{kq}''} - \frac{\psi_q}{x_{qkq}''}; \end{aligned}$$

$$M_\delta = (\psi_d i_q - \psi_q i_d); \quad i_c = \sqrt{i_d^2 + i_q^2},$$

где  $i_c$  – ток индуктора, о.е.

Результат моделирования показан на рисунке, где  $i_c, i_f, i_{kd}$  – токи индуктора, возбуждения и демпферной обмотки, о.е.;  $M_\delta, M_u$  – электромагнитный и упругий момент, о.е.;  $\omega$  – угловая скорость вращения двигателя; о.е.

Размер показателя среднеквадратического отклонения  $\sigma = 0,002707$ , кратность форсировки и жесткости соответственно 0,178012 и 1,436994 при времени заблаговременного включения напряжения возбуждения 1,5 секунды. Колебательность системы особенно увеличилась для участка синхронизации. Однако в целом качество переходных процессов улучшилось. При ограничении нижнего предела кратности возбуждения на уровне 1 оптимизационная задача также имеет решение. К тому же в этом случае форсировка и время заблаговременного включения возбуждения становятся больше, нежели чем на рисунке, а качество переходных процессов хуже. Критерием принятия решения выбора нижнего предела форсировки больше или меньше 1 должен быть минимум, выделяемой в индукторной обмотке мощности, которая определяется площадью под кривой тока индуктора участка наброса нагрузки, а это как раз характерно для случая показанного на рисунке, б. Если сравнивать мощность потерь управления для классической системы возбуждения (рисунок, а) и оптимизированной (рисунок, б), то можно наблюдать, что площадь под кривой тока индуктора увеличилась незначительно. Этот факт подтверждает возможность сбережения теплового нагружения электрической машины на уровне, который приближенно равен паспортному.



Ілюстрація к решению оптимизационной задачи с использованием стандартных (а) и оптимизированных (б) параметров

Выполненный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы:

- для синхронного привода без маховика компенсация ударных нагрузок возможна при регулировании жесткости упругих связей и кратности форсировки возбуждения;
- задачу оптимизации целесообразно решать с использованием градиентного метода и функции цели минимума среднеквадратического отклонение мгновенного тока статора от его установившегося значения при набросе нагрузки;
- ограничение факторов оптимизации определяется технической возможностью возбудителя, допустимой амплитудой колебаний системы и постоянной времени обмотки возбуждения;
- получено принципиальное подтверждение возможности компенсации ударных нагрузок средствами синхронного привода. Впервые на примере привода СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 установлено, что исключить аварийные ситуации на приводах такого типа возможно снижением кратности напряжения возбуждения до уровня 0,18, при этом время начала его уменьшения составляет 1,5 сек., а кратность жесткости упругой муфты следует выдерживать равной 1,44;
- параметры оптимизации обеспечивают значительное снижение динамических бросков токов обмоток двигателя с одновременным улучшением качества переходных процессов;
- параметры настройки системы создают условия для незначительного роста мощности потерь управления, при которых сохраняются допустимые тепловые режимы синхронного двигателя.

#### Список литературы

1. Разработка рекомендаций по эксплуатации синхронного двигателя главного привода автомат-стана прокатки труб ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ»: Отчет о НИР (заключ.) / Государственный ВУЗ «НГУ»; Научно-исследовательская работа выполнена согласно договору №1120/030383 от 04.12.2012 г. - Днепропетровск, 2013. — 34 с. ил.
2. Бородай В.А. Метод та критерій оптимізації пускових характеристик синхронних двигунів з важкими умовами пуску / В.А. Бородай, М.О. Несторенко. – Дніпр-ськ: Гірнича електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – Вип. 85. – 2010 – С. 180 – 183.
3. Павлюк Д.П. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей / Д.П. Павлюк, С. Биднарник – Москва: Энергия, 1971. – 271 с.
4. Півняк, Г.Г. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко: Монографія. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
5. Пивняк, Г.Г. Повышение надежности и экономичности мощных синхронных приводов с тяжелым пуском. [Текст.] / Г.Г. Пивняк, В.В. Кириченко, В.А. Бородай // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2007 – С. 553–555.

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

С.С. Багдасарян, О.Ю. Колларов, канд-ты техн. наук, Д.О. Кардаш  
(Україна, Красноармійськ, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»)

## АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПОВІД КАРЕТКИ ЛІТАЛЬНОЇ ПИЛКИ З АДАПТИВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОЛОЖЕННЯ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ

**Анотація.** Розглянуто реалізацію електроповіду каретки літальної пилки із застосуванням загальнопромислового частотно-керованого асинхронного електроповіда. Для вирішення поставленого завдання застосовано адаптивний регулятор положення зі змінною структурою. Зміна структури і передавальної функції регулятора відбувається у моменти переходу електроповіда з одного режиму роботи в інший. Система керування реалізована на базі мікроконтролера. Для налаштування параметрів регуляторів застосовано метод фізичного моделювання з подальшою обробкою даних на комп'ютері через спеціально розроблену програму. Реалізація системи керування положенням каретки літальної пилки забезпечила бажані параметри роботи повіду щодо швидкодії та точності позиціонування.

**Ключові слова:** літальна пилка, електроповід каретки, регулятор положення.

**Аннотация.** Рассмотрена реализация электропривода каретки летающей пилы с применением общепромышленного частотно-управляемого асинхронного электропривода. Для решения поставленной задачи применен адаптивный регулятор положения с переменной структурой. Изменение структуры и передаточной функции регулятора происходит в моменты перехода электропривода из одного режима работы в другой. Система управления реализована на базе микроконтроллера. Для настройки параметров регуляторов применен метод физического моделирования с последующей обработкой данных на компьютере посредством специально разработанной программы. Реализация системы управления положением каретки летающей пилы обеспечила желаемые параметры работы привода по быстродействию и точности позиционирования.

**Ключевые слова:** летающая пила, электропривод каретки, регулятор положения.

**Abstract.** Realization of flying saw electric drive using the frequency-controlled induction motor drive considered. To solve this problem applies adaptive position regulator with variable structure. Restructuring and change of regulator transfer function are happen in moments of transition from one operating mode to another. The control system implemented on a microcontroller. To configure regulators applied the method of physical modeling with further data processing computer through a specially designed program. Implementation of the flying saws management system provided the desired performance and position's accuracy.

**Keywords:** flying saw, carriage drive, position regulator.

**Постановка завдання.** Літальна пилка є одним із найскладніших агрегатів трубопрокатного стану. Швидкість руху труби лежить у межах 0,5 – 1 м/с, необхідна точність різання по довжині близька 5 мм. Мінімальна довжина відрізуваних труб – 6 м, що обмежує час усього циклу 6-ма с. При цьому час різання труби становить близько 3 с (для пристроїв з пилами холодного різання), що відповідає 3 м довжини ходу каретки на час процесу різання. До того ж частина шляху і часу витрачається на прискорення каретки на початку циклу різання до швидкості руху труби, а також на гальмування в процесі повернення каретки після закінчення процесу різання. Загальний хід каретки таким чином становить близько 4 м і на повернення у вихідне положення залишається близько 2 с. Звідси впливають вельми високі вимоги до електроповіду переміщення каретки, зокрема висока швидкодія з одночасним забезпеченням заданої точності позиціонування.

**Вирішення завдання.** Як правило, в таких установках використовують комплектний сервоповід. У розглянутому прикладі таке рішення виходить досить вартісним, адже маса каретки становить близько 750 кг, а потужність повіду 11 кВт. Крім того, процес обслуговування та ремонту сервоповіду є вельми вартісним, особливо у разі виходу з ладу двигуна. Виходячи з цього для каретки було розроблено та реалізовано електроповід з загальнопромисловим асинхронним двигуном, перетворювачем частоти та керуючим контролером.

Структурна схема електроповіду каретки має вигляд наведений на рис. 1.

Силова частина виконана на загальнопромисловому асинхронному двигуні і перетворювачі частоти Altivar 71, система керування – на контролері I-8041 зі спеціалізованими модулями вводу-виводу: I-8040/8041 – увід/вивід дискретних сигналів, I-8090 – модуль інтерфейсу енкодерів (3 канали), модуль I-8024 – аналоговий вихід  $\pm 10$  В. Як панель оператора використана панель МТ-6050і, що має сенсорний екран і достатні ресурси для вирішення даного завдання.

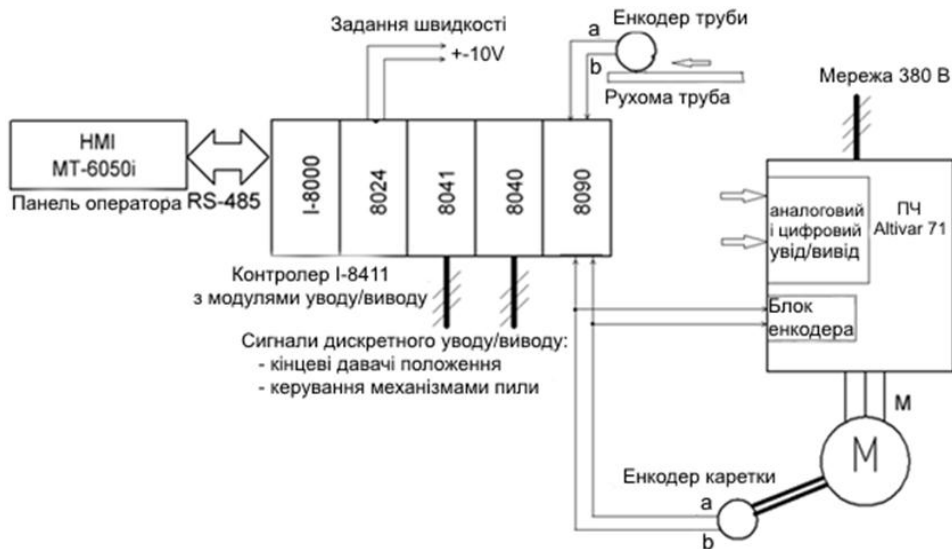


Рис. 1. Структурна схема асинхронного електропіводу каретки літальної пилки

У ході виконання циклу різання можна виділити наступні режими роботи електропіводу каретки (дивись таблицю). Описані у таблиці вимоги до налаштування електропіводу носять суперечливий характер залежно від режиму роботи. Так, основним і визначальним режимом якісної роботи пилки є режим розганяння каретки і зачіплювання труби у заданій точці. Тут потрібні висока точність та одночасно висока швидкодія. Враховуючи великий момент інерції механізму ( $J_{дв} = 0,032 \text{ кгм}^2$ ,  $J_{мех.пов.} = 0,067 \text{ кгм}^2$ ,  $J_{сум} = 0,099 \text{ кгм}^2$ ), доцільно застосувати ПІД-регулятор з налаштуванням, близьким до симетричного оптимуму (диференційна складова – мала).

Перелік режимів роботи електропіводу каретки літальної пилки

Режим	Опис	Вимоги
Очікування початку циклу.	Тримання каретки у позиції нульової координати.	Відсутність коливань, що виникають через силу тертя при русі труби.
Розганяння до швидкості труби.	Розганяння з максимальним прискоренням до збігу координати каретки з координатою точки початку різання.	Максимальна швидкодія та точність позиціонування; коливальність не має особливого значення, через затискання труби при досягненні збігу координат.
Рух зі швидкістю труби в процесі різання.	Рух разом із затиснутою трубою.	Підтримання швидкості, що дорівнює швидкості руху труби з обмеженням коливального моменту для уникнення проковзування труби в затискачах.
Реверс і повернення у початкове положення.	Гальмування після відпускання затискачів, реверс і повернення у початкове положення.	Максимальна швидкодія та позиціонування в нульову координату без перерегулювання або з невеликим перерегулюванням.

Порівняно велике перерегулювання, при такому налаштуванні, усувається механічною фіксацією каретки в заданому положенні затискачем труби. У той самий час, інші режими не вимагають високої точності, проте у режимі повернення каретки необхідна достатня швидкодія, а в режимі очікування – відсутність значної коливальності, через те що є можливим сходження каретки з напрямних. Для вирішення даного завдання запропоновано і реалізовано метод керування з адаптивним регулятором положення зі змінною структурою.

Спрощена структурна схема системи автоматичного керування (САК) електропіводом каретки наведена на рис. 2.

Структура регулятора положення складається з трьох складових: ПІД-регулятора режиму розганяння і зачіплювання труби та двох П-регуляторів режимів повернення каретки й утримання каретки у вихідному положенні. Вибір типу регулятора здійснює блок логіки керування структурою (як і інші вузли системи керування це – програмний модуль). Зовнішніми сигналами для роботи цього блока є сигнали від блока керування, на який приходять сигнали давача положення труби, а також інших механізмів пилки, зокрема від механізму різання. Сигнал заданого положення каретки формує відповідний модуль, що обчислює координати у функції заданої довжини розрізу, фактичного положення тру-

би і заданих параметрів прискорень/уповільнень. Вихідний сигнал регулятора положення надходить через логічний перемикач на вхід контура швидкості повіду. Цей перемикач відключає регулятор положення на час руху каретки разом із затиснутою трубою в процесі різання труби. Контур швидкості утворений вбудованим в ПЧ Altivar 71 ПІ-регулятором швидкості та контуром керування коливальними моментом (реалізований у векторній системі)

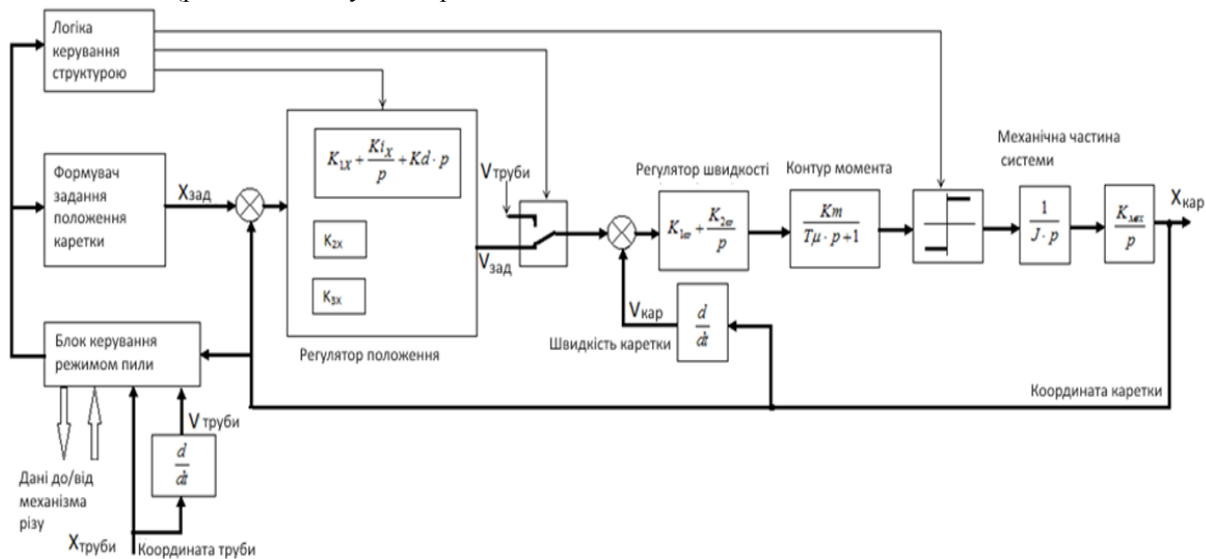


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування положенням каретки літальної пилки

Оскільки електроповід розроблявся для існуючої установки, основна складність якої полягає у змінності структури [2], то застосовувалося фізичне моделювання для налаштування регуляторів та оптимізації перехідних процесів. З цією метою була написана спеціальна підпрограма моделювання руху труби, а також отримання та передавання усіх необхідних величин у режимі реального часу через інтерфейс RS-485 керуючого контролера I-8041 на зовнішній ПК. Далі отриманий масив даних імпортувався до Excel, де й апроксимувались криві перехідних процесів. Швидкість передачі даних з контролера дуже висока (приблизно 100 значень за секунду), що дозволило отримати майже безперервні осцилограми параметрів повіду. В результаті моделювання отримані такі дані для налаштування параметрів регуляторів на різні режими:

- режим розганяння каретки та зачіплювання труби (ПІД-структура):  $K1x = 8$ ,  $Kix = 30$ ,  $Kd = 4$  (налаштування аналогічне симетричному оптимуму, відсутність статичної помилки, значне перерегулювання за максимальної швидкодії);
- режим реверсу і повернення (ПІ-структура 2):  $K2x = 5$  (налаштування на нормальну швидкодію з помилкою регулювання, невеликою коливальністю);
- режим утримання каретки в початковому стані при невеликому збуренні через силу тертя при русі труби (ПІ-структура 3):  $K3x = 3$  (налаштування на низьку швидкодію з помилкою регулювання, аперіодична характеристика).

На рис. 3 наведена осцилограма циклу різання зі швидкістю труби близько 40 м/хв. На рисунку наведено осцилограми: сигналу заданого положення каретки (довгий пунктир), фактичної координати каретки, сигналу завдання швидкості (вихід регулятора положення), а також сигналу помилки за положенням (короткий пунктир). Усі осцилограми масштабовані у відліках АЦП контролера (максимум – 8000 відліків). Як видно з осцилограм, на ділянці розганяння (до затискання труби) досягається максимальне прискорення (близько  $3 \text{ м/с}^2$ ), причому до моменту затискання помилка регулювання практично дорівнює нулю. Це підтверджується точністю довжини відрізанних труб: відхилення не перевищує 2 – 5 мм на довжині 6 м (не більше 0,08%). При цьому коливання сигналу завдання практично ідентичні коливанням фактичної швидкості.

Далі каретка рухається разом із трубою з постійною швидкістю до закінчення циклу різання і відпускання затискачів. У цій точці структура керування перемикається на ПІ-регулятор режиму повернення, який відпрацьовує гальмування та реверс каретки з порівняно великим динамічним розгодженням, яке поступово зменшується і при досягненні сигналом завдання нульового значення, структура перемикається ще раз на ПІ-регулятор режиму утримання. Це перемикання характеризується стрибком сигналу завдання швидкості. Останній регулятор «приводить» каретку в нульову позицію з невеликою помилкою, пропорційною силі тертя. Завдяки налаштуванню останнього регулятора коливання каретки у цьому положенні демпфуються. На точність розрізу така помилка не впливає, оскільки нульова координата оновлюється кожного разу при ініціалізації повіду.

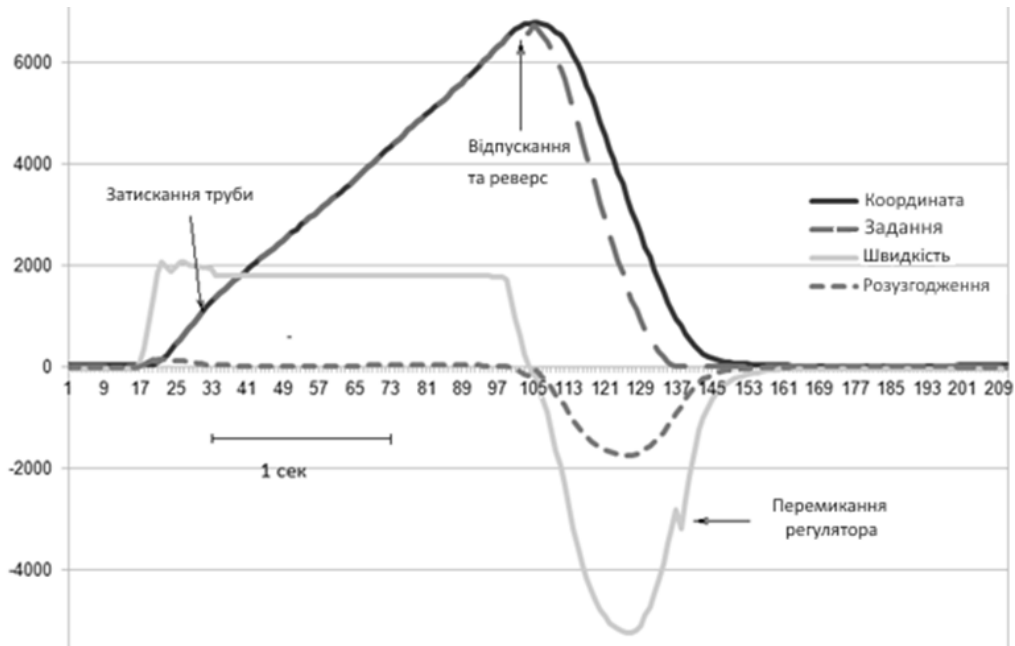


Рис. 3. Осцилограми роботи електроповіду каретки в циклі розрізу труби

**Висновки.** Реалізація електроповіду каретки літальної пилки на базі загальнопромислового частотно-керованого асинхронного електродвигуна значно скорочує сукупну вартість пристрою, спрощує технічне обслуговування установки, зменшує собівартість продукції при фактичному збереженні її якості.

#### Список використаних джерел

1. Паньч А.А. Алгоритм формування закону руху несущого органу летучей пилы / А.А. Паньч, В.Д. Червяков // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: 2005. – № 4 (33). – С. 123-129.
2. Червяков В.Д. Аналіз законів руху електропривода несущого органу летучей пилы методом комп'ютерного моделювання / В.Д. Червяков, А.А. Паньч // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Дніпродзержинськ: 2007. – С. 289-291.
3. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер – М.: Энергоиздат: 1981. – 576 с.

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

УДК 62-83:621-313.333

*В.А. Бородай, канд. техн. наук, А.Р. Ковалев  
(Україна, Днепропетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")*

## ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ РЕГУЛЯТОР С КООРДИНАТНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ СКВАЖНОСТИ

Известно, что работа регулируемых электроустановок обеспечивается управляемыми источниками электрической энергии. Это, прежде всего, обусловлено возможностью работы электротехнических систем в режиме ресурсосбережения при одновременном регулировании технологического параметра. Очевидно, что внедрение регулируемых электроустановок является перспективной научной и практической задачей.

В современных преобразовательных устройствах широко применяются методы управления напряжением с помощью фазовых либо широтно-импульсных систем. По сути, эти методы определяются формой кривой выпрямленного либо действующего напряжения на выходе преобразователя, т.е. используется функциональная зависимость уровня результирующего выходного напряжения от величины площади под его кривой.

Метод широтно-импульсного управления традиционно применяется в электроприводах постоянного тока. Хотя в последнее время разработчики все чаще используют такой метод регулирования напряжения как вторую зону в частотных преобразователях при скалярном или векторном управлении. Причем этот метод может быть использован также в устройствах плавного пуска или в любых других устройствах с импульсным регулированием.

Промышленностью налажен массовый выпуск специализированных интегральных схем широтно-импульсного регулирования. К сожалению, эти схемы не всегда могут быть использованы для работы в автоматизированных электроприводах либо в других устройствах. Проблемы сопряжения по входному и выходному напряжению требуют разработки иных схемных решений для использования в современном электроприводе. Помимо этого появились новые серии цифровых схем счетчиков, дающие разработчикам большие возможности. Принимая во внимание сказанное выше, авторами предлагается новое схемное решение регулятора, функциональная структура которого приведена на рис. 1. В состав конструкции входит аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 1, широтно-импульсный регулятор с фазным регулированием скважности 2 и силовой модуль 3. Основую АЦП является преобразователь напряжение-частота (НПЧ) со счетчиком подсчета импульсов (СЧИ) и преобразованием кода в функции импульсов синхронизирующего генератора (СГИ).

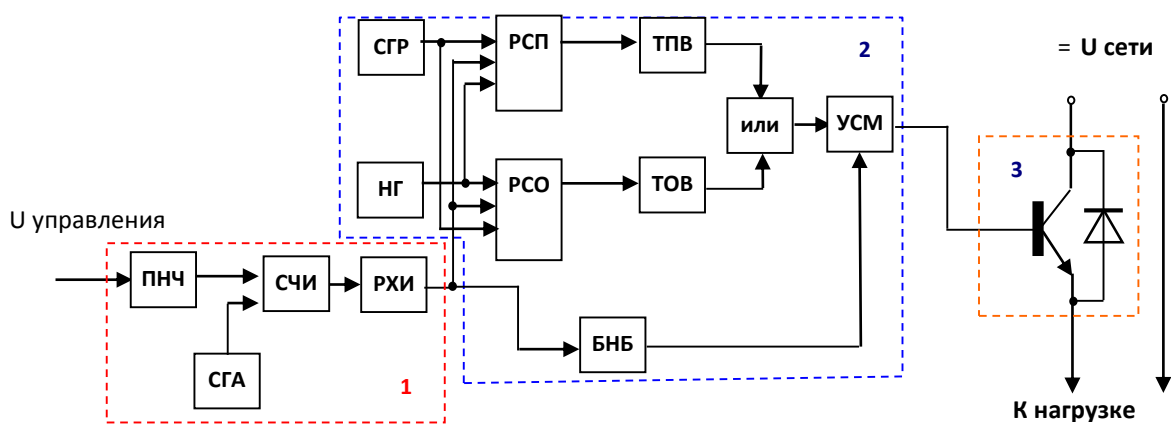


Рис. 1. Структурная схема регулятора с ШИМ и координатно-фазовым управлением импульсов отпирания

Для хранения оцифрованного аналогового сигнала, измеренного на предыдущем шаге, применяется регистр хранения импульсов (РХИ). Широтно-импульсный регулятор предполагает периодическую загрузку кода реверсивных счетчиков положительной (РПС) или отрицательной (РСО) волны фазового сдвига импульсов открывания. Их загрузка происходит по сигналу логической единицы на выходе синхрогенератора (СГР), а фиксация заданного интервала времени, соответствующего загруженному коду, выполняется при подаче импульсов с генератора несущей частоты (НГ). При достижении «нуля» в результате инкрементирования исходного загруженного кода на выходе счетчиков РСП или РСО появляется импульс открывания силового блока 3. Поскольку каждый счетчик работает на своей отведенной части периода кривой с генератора СГР, то в это время импульс открывания фиксируется в своем триггере: отрицательной волны (ТОВ) или положительной (ТПВ). Одновременно при подготовке к срабатыванию ТОВ происходит автоматический сброс ТПВ и наоборот. Результирующий сигнал управления суммируется в логическом блоке «ИЛИ». Особенностью схемы является отсчет интервалов фазового сдвига импульсов управления с момента ее включения. Код «нуль» при включении соответствует максимальному напряжению на нагрузке. Это происходит до момента первого замера сигнала управления на входе АЦП. Для блокировки открывания силового блока до первого замера АЦП используется блок начальной блокировки (БНБ). Для согласования мощностей сигналов открывания из системы управления и силового блока применен усилитель согласования мощности (УСМ). Таким образом, сигнал, усиленный УСМ, попадает на базу регулирующего транзистора, включенного согласно схеме с общей базой и шунтированием перехода эмиттер-коллектор обратным диодом для работы на активно-индуктивную нагрузку.

По предложенной структуре разработана и построена Multisim-модель (рис. 2). Расчет ее составных элементов проводится по известным методикам. Что касается максимальных частот для преобразователя напряжение-частота, генераторов синхронизации и генератора несущей частоты, то они могут быть определены по предложенному методу. Расчет следует начинать с выбора исходных данных, к которым относят: максимально измеренное напряжение на входе АЦП  $U_{\text{вх}}$ , В; чувствительность АЦП  $u_{\text{ч}}$ , В/1кода;

время быстрого действия АЦП  $t$ , с. Для принятых исходных данных определяется число импульсов максимального измерения и частота синхронизации АЦП, т.е.

$$N = \frac{U_{\text{BX}}}{u_{\text{ч}}}, \text{ код}; \quad f_c = \frac{1}{t}, \text{ Гц.}$$

Тогда максимальная чистота преобразователя напряжение-частота

$$f_p = \frac{2 \cdot N}{t}, \text{ Гц.}$$

При расчете частоты синхронизации (скважности выходного сигнала) счетчиков фазового сдвига следует выдержать соотношение  $\frac{f_p}{f_c} = \text{const}$ , с учетом которого

$$f_{pp} = \frac{f_p}{f_c} f_p, \text{ Гц.}$$

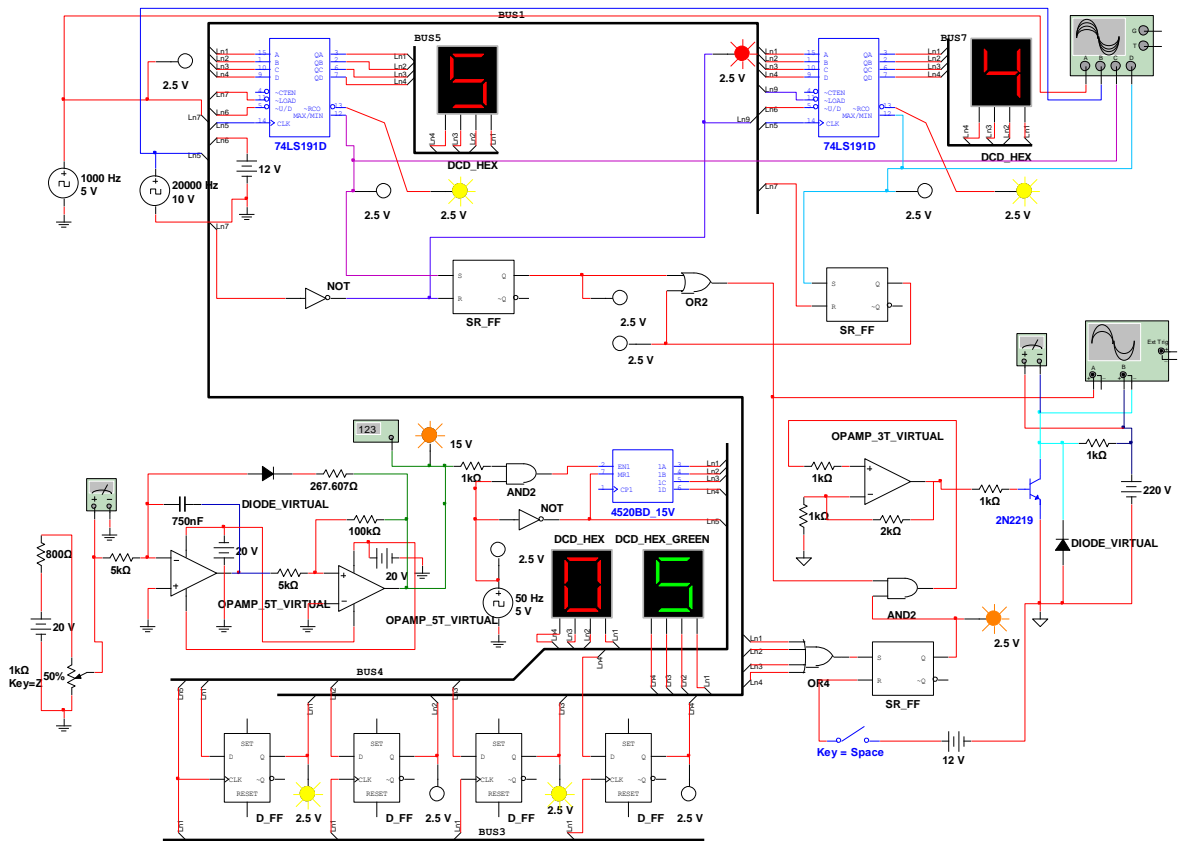


Рис. 2. Модель регулятора с ШИМ.

Несущую частоту следует определять в соответствии с выражением

$$f_{cc} = \frac{f_{pp}}{2 \cdot N}, \text{ Гц.}$$

На рис. 2 приведена модель регулятора с ШИМ и построена регулировочная характеристика (рис. 3) для исходных данных:  $U_{\text{ax}}=10$  В, чувствительности АЦП  $u_{\text{ч}}=1$  В/1 кода и быстрого действия АЦП –  $t=0,02$  с.



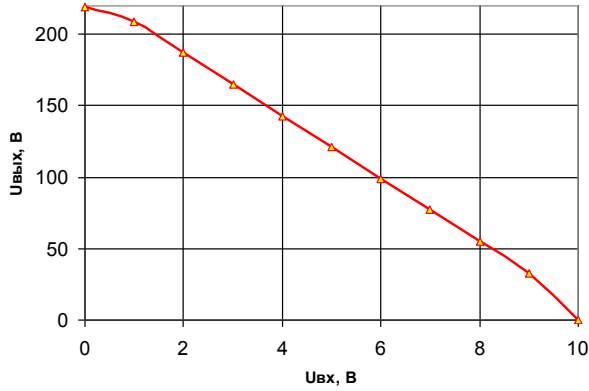


Рис. 3. Регулировочная характеристика регулятора с ШИМ

Точность измерений и регулирования, как известно, зависят от разрядности АЦП и характеристик реверсивных счетчиков фазового сдвига импульсов управления. Предложенная схема (рис. 2) имеет четыре активных разряда, что является недостаточным. Поэтому в работе предлагаются варианты схемного решения суммирующих счетчиков АЦП или их каскадирования (рис. 4). Увеличение разрядности АЦП соответственно влечет за собой увеличение разрядности реверсивных таймеров (рис. 5).

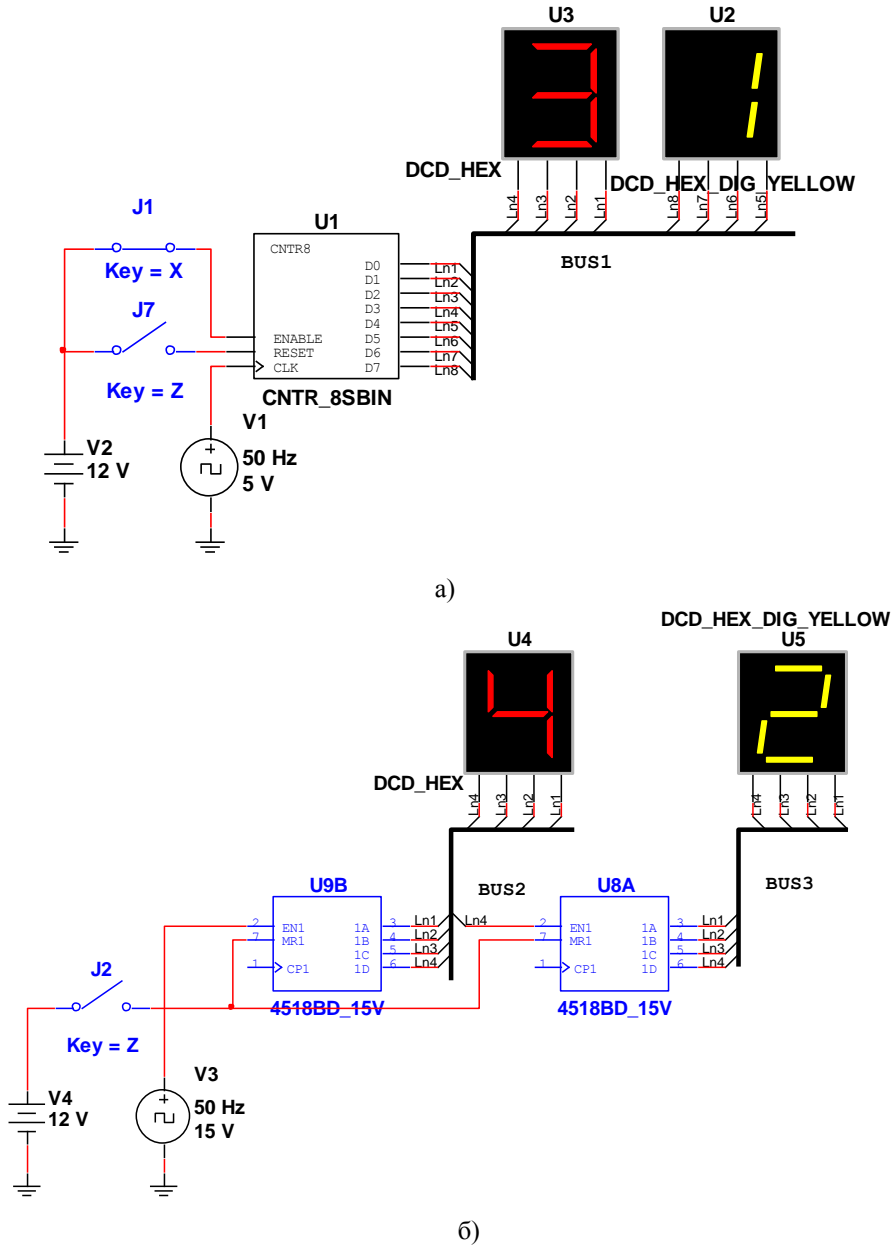


Рис. 4. Схемы 8 - разрядных суммирующих некаскадированного (а) и каскадированного (б) счетчиков

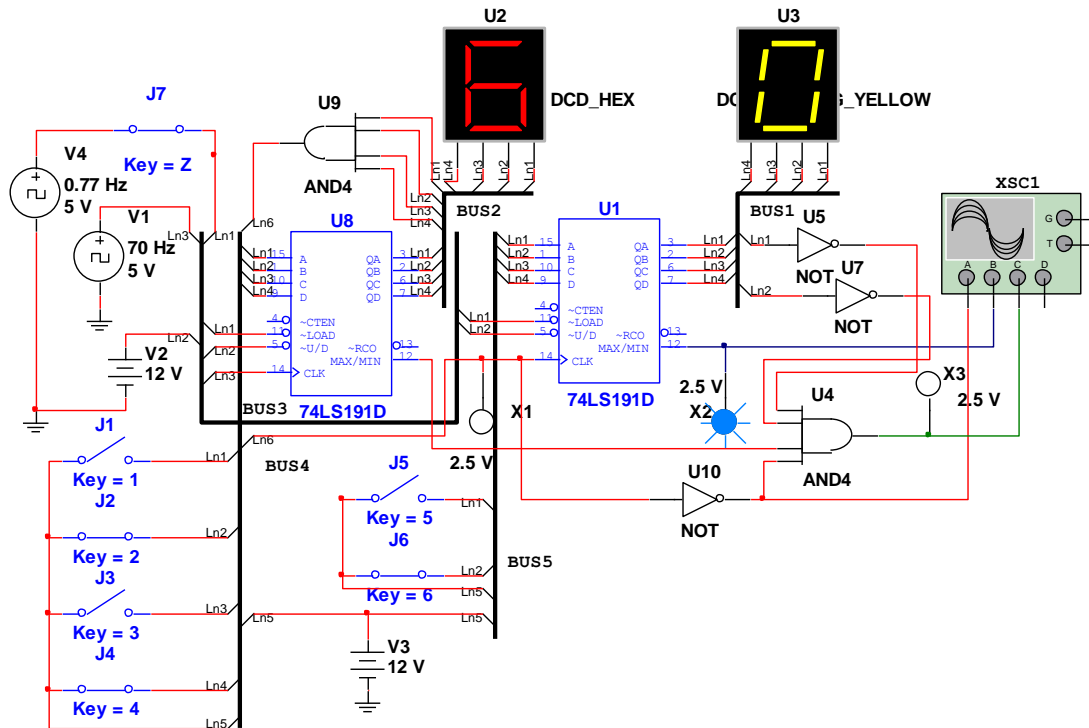


Рис. 5. Схема каскадирования 4-разрядного вычитающего счетчика

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- вопрос энерго- и ресурсосбережения остается по-прежнему актуальным;
- промышленные регуляторы с широтно-импульсной модуляцией не всегда могут применяться в объектах автоматизации из-за сложности сопряжения входных и выходных напряжений;
- для новых схем регуляторов с ШИМ возможно применение координатно-фазового регулирования управляющих импульсов;
- для предложенного регулятора с ШИМ и координатно-фазовым управлением разработан метод определения частот синхро- и несущих генераторов;
- установлено, что для предложенного схемного решения регулятора характер регулировочной характеристики в основном линейный, с присутствием некоторой нелинейности в зоне минимального и максимального значений напряжения;
- повышение чувствительности и точности работы регулятора обеспечивается большей разрядностью, которую предлагается реализовывать за счет схем каскадирования счетчиков.

#### Список литературы

1. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники: Учеб. для вузов./ В.С.Руденко, В.И.Сенько, И.М.Чиженко – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1980. – 424 с.
2. Полупроводниковые выпрямители / под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Мостковой – изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.; ил.
3. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі / М.М. Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. Академія. – Д.: НГА, 1999. – 228 с.
4. Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посіб. / М.М.Казачковський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. академія. – Д.: НГА України, 2000. – 197 с.
5. Бородай В.А. Моделирование систем импульсно-фазового управления преобразовательных устройств / В.А.Бородай, А.Р.Ковалев // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – Вип. 94. – С. 64 – 69.

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

**В.І. Панченко, Д.В. Ципленков канд. техн. наук, О.Ю. Скрипник**  
(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

## МАСОГАБАРИТНІ ПОКАЗНИКИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

**Анотація.** В статті наведено формули для розрахунку маси активних матеріалів синхронних індукторного генератора і генератора зі збудженням від постійних магнітів та надані рекомендації по вибору деяких геометричних співвідношень вказаних генераторів. Отримано аналітичні залежності маси активних матеріалів генераторів від розміру співвідношення активної довжини машини до діаметру розточки статора і визначено діапазон значень цього відношення, в якому маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами значно менша ніж в індукторному генераторі. Також запропоновано використання у вітроенергетичних установках синхронних генераторів з комбінованим збудженням на основі конструкції індукторного одноіменнопольного генератора.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка; постійні магніти; синхронний генератор з комбінованим збудженням; синхронний індукторний генератор; генератор зі збудженням від постійних магнітів; статор.

**Аннотация.** В статье приведены формулы для расчета массы активных материалов синхронных индукторного генератора и генератора с возбуждением от постоянных магнитов и даны рекомендации по выбору некоторых геометрических соотношений указанных генераторов. Получены аналитические зависимости массы активных материалов генераторов от размера соотношения активной длины машины к диаметру расточки статора и определен диапазон значений этого отношения, в котором масса активных материалов генератора с постоянными магнитами значительно меньше, чем в индукторной генераторе. Также предложено использование в ветроэнергетических установках синхронных генераторов с комбинированным возбуждением на основе конструкции индукторного одноименнопольного генератора.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка; постоянные магниты; синхронный генератор с комбинированным возбуждением; синхронный индукторный генератор; генератор с возбуждением от постоянных магнитов; статор.

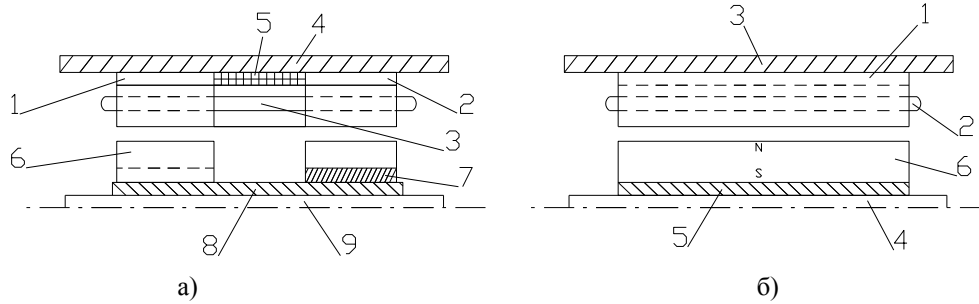
**Annotation.** The article describes the formula to calculate the mass of active material of synchronous generator and inductor generator with permanent magnet excitation and recommendations on the choice of some of the geometric relationships of these generators. The analytical dependence of the mass of active material of generators on the size ratio of the active machine length to diameter of the stator bore and defined range of values of the ratio in which the mass of the active material of the generator with permanent magnets is considerably less than in the inductor generator. Also provided is the use in wind turbines with synchronous generators excited by a combined design inductor homopolar generator.

**Keywords:** Wind power plant; Permanent magnets; Synchronous generator with a combined excitation; Synchronous inductor generator; Generator with permanent magnet excitation; Stator.

**Вступ.** У вітроенергетичних установках знаходять широке застосування синхронні генератори як зі збудженням від постійних магнітів так і з електромагнітним збудженням. До таких генераторів пред'являються наступні вимоги: вони мають бути багатопольними, мати мінімальні габарити та масу, бути безконтактними але керованими, при роботі на систему електропостачання забезпечувати максимально можливу вихідну напругу.

**Постановка завдання.** Багатопольність та безконтактність порівняно просто реалізуються у синхронних генераторах зі збудженням від постійних магнітів та в синхронних індукторних генераторах з електромагнітним збудженням, причому в перших, як недолік – відсутня можливість керувати вихідною напругою, у других – малий (до 0,4) коефіцієнт використання магнітного потоку збудження.

**Стан питання.** На рис. 1 схематично представлено конструкції вказаних синхронних генераторів. Індукторний генератор (рис. 1, а) в даному випадку є одноіменнополюсним у складі двох кільцевих пакетів статора 1 і 2, набраних з пластин електротехнічної сталі, з пазами та зубцями на внутрішніх поверхнях пакетів. В пази, які співпадають в осьовому напрямку, вкрито трифазну обмотку змінного струму 3. Пакети статора вмонтовано у цільний циліндричний корпус 4 із магнітом'якого заліза. Між пакетами 1, 2 і впритул до корпусу розміщено обмотку збудження 5, яку живлять постійним струмом. Ротор генератора зроблено з двох шихтованих кільцевих зубчастих пакетів 6 і 7, посаджених на цільну магнітом'яку втулку 8, яку закріплено на валу 9.



**Рис. 1. Конструкції синхронних генераторів:**  
**а) індукторного; б) зі збудженням від постійних магнітів**

Генератор зі збудженням від постійних магнітів (рис. 1, б) має статор, циліндричний магнітопровід 1 якого зроблено з пластин електротехнічної сталі з пазами та зубцями на його внутрішній поверхні. В пазах розміщено трифазну обмотку 2. Магнітопровід статора закріплено у циліндричному корпусі 3. На валу 4 машини розміщено втулку 5 із магнітом'якого заліза, на зовнішній поверхні якої закріплено постійні магніти 6, намагнічені у радіальному напрямку з почерговою, взаємно протилежною орієнтацією вектора намагніченості.

**Викладення основного матеріалу.** Визначемо відносну масу активних матеріалів елементів конструкції за формулою:

$$g = \frac{G}{S},$$

де  $G$  – маса активних матеріалів окремого елемента або їх сумарна маса, кг;  $S$  – розрахункова потужність генератора, кВА.

Для визначення розрахункової потужності індукторного генератора в [2] наведено таке співвідношення

$$S = 0,165K_\phi K_{ob} K_\epsilon B_\delta AD^2 \ln, \text{ ВА}, \tag{1}$$

де  $K_\phi$  – коефіцієнт форми кривої магнітної індукції у повітряному проміжку ( $K_\phi \approx 1,11$ );  $K_{ob}$  – обмотковий коефіцієнт;  $K_\epsilon$  – коефіцієнт використання магнітного потоку збудження  $K_\epsilon = 0,37 \dots 0,4$ ;  $B_\delta$  – магнітна індукція у повітряному проміжку між зубцями статора і ротора ( $B_\delta = 1,2 \dots 1,4$ , Тл);  $A$  – лінійне навантаження,  $\frac{\text{А}}{\text{м}}$ ;  $D, l$  – внутрішній діаметр магнітопроводу статора та його активна довжина, м;  $n$  – частота обертання ротора,  $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$ .

Масу електротехнічної сталі зубців статора визначають за формулою

$$G_{z1} = \pi \gamma_c D l h_{z1} \frac{b_{z1}}{t_{z1}}, \text{ кг}, \tag{2}$$

де  $\gamma_c = 7,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина електротехнічної сталі;  $t_{z1}, b_{z1}, h_{z1}$  – відповідно, зубцева поділлка, ширина та висота зубця, м.

Маса електротехнічної сталі ярма (спинки) статора

$$G_{j1} = \pi \gamma_c D l \left( 1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) h_{j1}, \text{ кг}, \quad (3)$$

де  $h_{j1}$  – товщина ярма.

Відносна маса електротехнічної сталі статора в цілому

$$g_{cm1} = \frac{G_{z1} + G_{j1}}{S} = C_1 \left[ \frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{t_{z1}} + \left( 1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) \frac{h_{j1}}{D} \right], \quad (4)$$

де  $C_1 = 19\gamma_c / K_\phi K_{ob} K_\delta B_\delta A n$  – співмножник, що залежить від електромагнітних параметрів генератора та частоти обертання ротора; співмножник формули квадратних дужках характеризує геометричні розміри елементів конструкції генератора.

У виразі (4) розмір відношення  $\frac{b_{z1}}{t_{z1}} = 0,55 \div 0,6$ .

Висоту зубця статора орієнтовано визначають за формулою, м:

$$h_{z1} = \frac{A}{j_1 \left( 1 - \frac{b_{z1}}{t_{z1}} \right) K_{zm1}} = \frac{A^2}{A j_1 \left( 1 - \frac{b_{z1}}{t_{z1}} \right) K_{zm1}},$$

де  $j_1$  – густина струму в обмотці статора,  $\frac{A}{\text{м}^2}$ ;  $A j_1$  – показник допустимого теплового навантаження обмотки (довідкова величина);  $K_{zm1} = 0,52 \div 0,6$  – коефіцієнт заповнення паза статора міддю.

Висоту ярма статора  $h_{j1}$ , роблять не меншою товщини котушки обмотки збудження. Площа, яку займає ця котушка,  $\text{м}^2$ :

$$S_{z\delta} = \frac{2K_\gamma K_\mu K_p \delta B_\delta}{\mu_0 j_2 K_{zm2}},$$

де  $K_\gamma = 1,1 \div 1,15$  – коефіцієнт запасу по збудженню;  $K_\mu = 1,3 \div 1,4$  – коефіцієнт, що враховує насичення складових магнітного кола;  $K_p = 2,1 \div 2,4$  – коефіцієнт впливу реакції якоря на магнітний потік збудження;  $\delta$  – повітряний проміжок, м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ;  $j_2 = 3,5 \div 4,0 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{м}^2}$  – густина струму в обмотці збудження;  $K_{zm2} = 0,75 \div 0,8$  – коефіцієнт заповнення площі поперечного перерізу котушки міддю.

Товщина котушки обмотки збудження

$$h_{z\delta} = \frac{S_{z\delta}}{l_{z\delta}},$$

де  $l_{3\sigma}$  – ширина обмотки. Позначимо:  $\frac{h_{3\sigma}}{l_{3\sigma}} = K_{3\sigma}$ . Тоді  $h_{3\sigma} = \sqrt{K_{3\sigma} \cdot S_{3\sigma}}$ . Звичайно  $K_{3\sigma} = 0,3 \div 0,4$ .

Відносну масу електротехнічної сталі ротора генератора визначають за формулою

$$g_{cm2} = \frac{G_{z2} + G_{j2}}{S} = C_2 \left[ \frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{D} + \left( 1 - \frac{2h_{z2}}{D} - \frac{h_{j2}}{D} \right) \frac{h_{j2}}{D} \right], \quad (5)$$

де  $G_{z2}, G_{j2}$  – маса зубців та ярма ротора, відповідно;  $C_2 = C_1$ ;  $b_{z2}, h_{z2}, t_{z2}$  і  $h_{j2}$  – відповідно, ширина та висота зубця, зубцева поділка та товщина ярма ротора.

У виразі (5) значення відношення  $\frac{b_{z2}}{t_{z2}} = 0,36 \div 0,44$ . Висота зубця

$$h_{z2} = 30 \div 50 \delta K_{\delta}$$

де  $K_{\delta}$  – коефіцієнт Картера. У випадку, коли кількість зубців статора  $z_1$ , вибрано за формулою:  $z_1 = 2z_2 + K$ , де  $z_2$  – кількість зубців ротора;  $K = 1, 2, 3, \dots$ , то приймають  $K_{\delta} \cong 1,0$ . Товщину ярма ротора роблять виходячи з конструктивних міркувань такою  $h_{j2} = 20 \div 35$  мм.

Визначимо витрати провідникового матеріалу на виготовлення обмоток. Маса міді обмотки статора

$$G_{m1} = \gamma_m \pi D d l \left( 1 + \frac{n_k l_{3\sigma}}{l} + \frac{2l_a}{l} \right), \text{ кг,}$$

де  $\gamma_m$  – густина міді;  $d = \frac{A}{j_1}$  – еквівалентна товщина провідникового шару обмотки;  $l_a$  – довжина однієї лобової частини обмотки. Для «зубцевої» обмотки  $l_a \approx 1,2 t_{z1}$ ;  $n_k$  – кількість котушок обмотки збудження.

Відносна маса міді обмотки

$$g_{m1} = \frac{G_{m1}}{S} = C_4 \left( 1 + \frac{\frac{n_k l_{3\sigma}}{l} + \frac{2,4 t_{z1}}{l}}{D} \right), \quad (6)$$

де  $C_4 = 19 \gamma_m / K_{\phi} K_{o\sigma} K_{\delta} B_{\delta} j_1 n$  – співмножник виразу (6). Густина струму  $j_1$ , визначають так:

$$j_1 = \frac{A j_1 \delta}{A}.$$

Масу міді обмотки збудження розраховують за формулою

$$G_{m2} = \gamma_m n_k h_{z1} l_{3\sigma} K_{3\sigma} \pi D \left( 1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{3\sigma}}{D} \right)$$

Відносна маса міді обмотки

$$g_{M2} = \frac{G_{M1}}{S} = C_5 \left[ \frac{h_{3\phi}}{D} \cdot \frac{l_{3\phi}}{l} \left( 1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{3\phi}}{D} \right) n_k K_{3M} \right], \quad (7)$$

де  $C_5 = 19\gamma_M / K_\phi K_{o\phi} K_\epsilon B_\delta A n$  – співмножник виразу (7).

Масу втулки ротора розраховують за формулою

$$G_{em} = \frac{\pi\gamma_3 D B_\delta b_{z2} l l + n_k l_{3\phi}}{K_m B_{em} t_{z2}}, \quad (8)$$

де  $\gamma_3 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина заліза;  $K_m = 0,79 \div 0,82$  – коефіцієнт [3];  $B_{em} \approx 1,6 \text{ Тл}$  – допустиме значення магнітної індукції у втулці.

Відносна маса втулки

$$g_{em} = C_6 \frac{b_{z2}}{t_{z2}} \left( 1 + \frac{n l_{3\phi}}{l} \right) \lambda \quad (9)$$

де  $C_6 = 19\gamma_3 / K_m K_\phi K_{o\phi} K_\epsilon B_{em} A n$  – співмножник виразу (9);  $\lambda = l/D$  – відносна активна довжина генератора.

Масу корпусу генератора визначають за формулою

$$G_k = \frac{\pi D \gamma_3 B_\delta b_{z2} l K_\sigma}{K_m B_k t_{z2}} l + n_k l_{3\phi} + 2l_g, \quad (10)$$

де  $K_\sigma \cong 1,05$  – коефіцієнт, що враховує магнітний потік розсіювання обмотки збудження;  $B_k \approx 1,6 \text{ Тл}$  – допустиме значення магнітної індукції у корпусі;  $l_g$  – виліт лобової частини обмотки статора в осьовому напрямку (у випадку «зубцевої» обмотки  $l_g = 0,6t_{z1}$ ). Порівнюючи вирази (8) і (10), запишемо

$$G_k = G_{em} K_\partial \left( 1 + \frac{1,2t_{z1}}{l + n l_{3\phi}} \right) \approx 1,25 \div 1,3 G_{em}.$$

Відносна маса корпусу

$$g_k = \frac{G_k}{S} = 1,25 \div 1,3 g_{em}$$

За наведеними формулами виконано розрахунки відносних мас електротехнічної сталі статора і ротора  $g_{cm} = g_{cm1} + g_{cm2}$ , втулки ротора та корпусу  $g_3 = g_{em1} + g_k$ , міді обмоток статора та збудження  $g_M = g_{M1} + g_M$  та сумарної відносної маси активних матеріалів  $g_c = \frac{G_c}{S}$  трифазного індукторного генератора з розрахунковою потужністю  $S = 1000 \text{ кВА}$  і частотою обертання  $n = 250 \text{ об/хв}$  для різних можливих діаметрів розточки. Кількість зубців ротора при частоті вихідної напруги 50 Гц прийнято рівною 12, тобто  $z_2 = p = 12$ . Кількість зубців статора розраховано за формулою

$$z_1 = 2z_2 + K = 2 \cdot 12 + 3 = 27,$$

де  $K = 3$ .

Передбачено використання «зубцевої» обмотки статора, тобто на кожному зубці статора розміщується одна котушка обмотки. Прийнято:  $B_\delta = 1,2Tл$ ;  $K_g = 0,38$ ;  $K_{oo} = 0,92$ . Генератор чотирипакетний з двома котушками обмотки збудження. Розмір повітряного проміжку  $\delta$  між зубцями статора і ротора вибрано за емпіричною формулою

$$\delta = 1,8\sqrt{D},$$

де  $\delta$  в мм,  $D$  в метрах. Результати розрахунків приведені в табл. 1. На основі даних таблиці побудовані графіки відповідних залежностей (рис.2). Активна довжина статора (табл.1) розрахована за формулою

$$l = \frac{S}{0,165K_\phi K_{oo} K_g B_\delta A D^2 n}.$$

Таблиця 1

Результати розрахунків абсолютних та відносних мас активних матеріалів елементів конструкції індукторного генератора

$D$ , мм	$l$ , мм	$l/D$	$G_{ст}$ , кг	$g_{ст}$ , кг/кВА	$G_з$ , кг	$g_з$ , кг/кВА	$G_{м1}$ , кг	$g_{м1}$ , кг/кВА	$G_{м2}$ , кг	$g_{м2}$ , кг/кВА	$g_{м2}$ , кг/кВА	$G_м$ , кг	$g_м$ , кг/кВА	$G_c$ , кг	$g_c$ , кг/кВА
800	2280	2,81	3684	3,68	17547	17,5	601	0,6	150	0,15	751	0,75	21982	21,9	800
1200	976	0,813	2349	2,35	5185	5,18	510	0,51	231	0,23	741	0,74	8275	8,28	1200
1600	527	0,33	1747	1,7	2484	2,48	503	0,5	310	0,31	813	0,81	5044	5,04	1600
2000	331	0,165	1418	1,4	1378	1,38	490	0,49	389	0,39	879	0,88	3675	3,68	2000
2400	225	0,093	1223	1,2	899	0,899	515	0,52	470	0,47	985	0,99	3107	3,11	2400

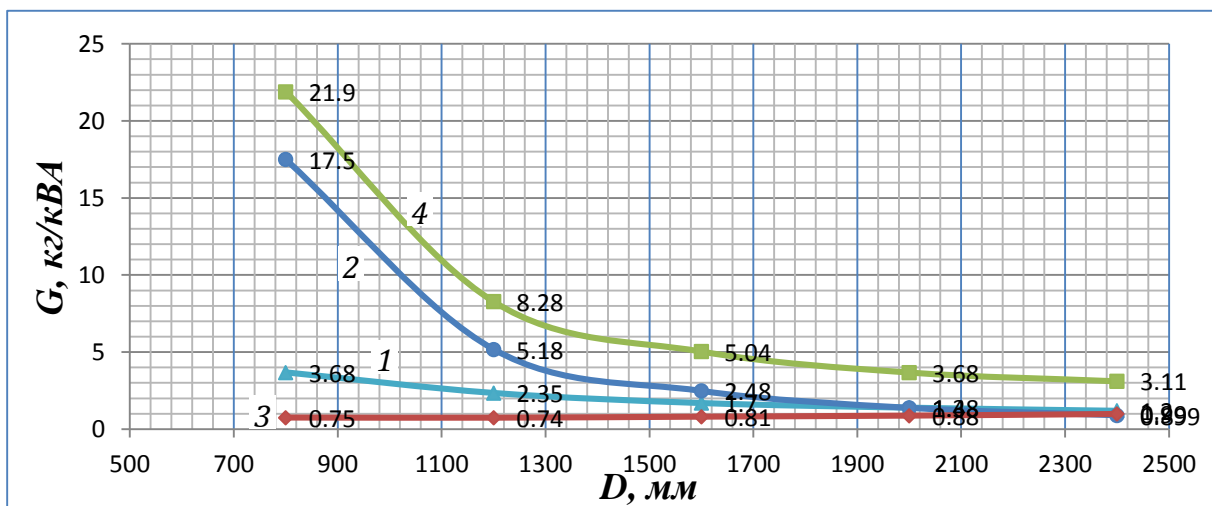


Рис. 2. Залежність відносних мас активних матеріалів елементів конструкції індукторного генератора від діаметра розтки:

- 1 –стали; 2 –втулки ротора та корпусу; 3 –міди обмоток статора та збудження;
- 4 – сумарної маси активних матеріалів

Наведемо формули для розрахунку відносних мас активних матеріалів елементів конструкції синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів. Розрахункова потужність такого генератора, ВА:



$$S = 0,165\alpha_i K_\phi K_{\sigma\delta} B_\delta A D^2 \ln ,$$

де  $\alpha_i = 0,75 - 0,8$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття.

Відносна маса постійних магнітів [4]:

$$g_{nm} = \frac{G}{S} = \frac{2\gamma_{nm} K_d K_3}{\pi^2 f K_u B_r H_c K_n} ,$$

де  $K_d$  – коефіцієнт зведення поздовжньої реакції якоря до розміру магніторушійної сили (МРС) магніту

( $K_d \approx 0,85$ );  $K_3 = 1,2$  – коефіцієнт запасу;  $K_u = u \left( \sqrt{1 - u \cos \varphi} - u \sin \varphi \right)$  – коефіцієнт;  $u = \frac{U}{E_0}$ ;  $U$  –

вихідна напруга і електрорушійна сила (ЕРС) генератора (прийнятне значення  $\frac{U}{E_0} = 0,8$ );  $\cos \varphi$  –

коефіцієнт потужності;  $B_r, H_c$  – залишкова магнітна індукція та коерцитивна сила магніту;  $f$  – частота

ЕРС;  $K_n$  – коефіцієнт використання магніту (для магнітів з прямолінійною характеристикою розмагнічування  $K_n < 0,25$ .)

Відносну масу електротехнічної сталі статора (зубців та ярма) можна розрахувати за формулою, подібної до (4):

$$g_{cm1} = \frac{G_{z1} + G_{j1}}{S} = \Pi_1 \left[ \frac{h_{z1}}{D} \cdot \frac{b_{z1}}{t_{z1}} + \left( 1 + \frac{2h_{z1}}{D} + \frac{h_{j1}}{D} \right) \frac{h_{j1}}{D} \right] , \quad (11)$$

де  $\Pi_1 = 19\gamma_c / \alpha_i K_\phi K_{\sigma\delta} B_\delta A n$  – співмножник формули (11). Слід зазначити, що у виразі для  $\Pi_1$  значення  $B_\delta = 0,75 \div 0,9$  Тл. Висоту зубця статора  $h_{z1}$  орієнтовно визначають за формулою, що приведена

для індукторного генератора. Товщина ярма статора  $h_{j1} = \frac{\alpha_i \tau B_\delta}{2K_{zc} B_{j1}}$ , де  $\tau$  – полюсна поділка;

$K_{zc} = 0,94 \div 0,95$  – коефіцієнт заповнення поздовжнього перерізу ярма сталлю;  $B_{j1} \approx 1,5$  Тл – допустиме значення магнітної індукції в ярмі.

Постійні магніти кріплять на втулці (циліндрі із маловуглецевої сталі), масу якої визначають за формулою:

$$G_{em} = \pi \gamma_3 D l h_{em} \left( 1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{h_{em}}{D} \right) .$$

Відносна маса втулки

$$g_{em} = \frac{G_{em}}{S} = \Pi_1 \frac{h_{em}}{D} \left( 1 - \frac{2h_m}{D} - \frac{h_{em}}{D} \right) ,$$

де  $h_{em}, h_m$  – відповідно, товщина втулки і радіальна висота магніту, які в свою чергу розраховують так:

$$h_{em} = \frac{\alpha_i \tau B_\delta}{2B_{em}}; \quad h_m = \frac{K_n \mu_m}{\left( \frac{B_r}{B_\delta} - K_{\sigma m} \right)} \delta,$$

де  $B_{em} \approx 1,6 \text{ Тл}$ ;  $K_n \approx 1,3$  – коефіцієнт, що враховує магнітне насичення магнітопроводу і вплив реакції якоря;  $K_{\sigma m} = 1,1 \div 1,2$  – коефіцієнт розсіювання магнітного потоку магнітів;  $\mu_m = \frac{B_r}{\mu_0 H_c}$  – відносна магнітна проникність магнітів;  $\delta$  – розмір повітряного проміжку. Формула для розрахунку  $h_m$  справедлива для магнітів з прямолінійною характеристикою розмагнічування. Орієнтовно  $h_m = 5 \div 6 \delta$ .

Відносну масу міді обмотки статора визначають за формулою, подібною до (6):

$$g_{m1} = \frac{G_{m1}}{S} = \Pi_2 \frac{\left( 1 + \frac{2l_x}{l} \right)}{D}$$

де  $\Pi_2 = 19 \gamma_m / \alpha_i K_\phi K_{\sigma\phi} B_\delta j_1 n$ .

За наведеними формулами для трифазного генератора з постійними магнітами з розрахунковою потужністю  $S = 895 \text{ кВА}$  виконано розрахунки абсолютних і відносних мас активних матеріалів елементів конструкції та сумарної їх маси для різних можливих значень діаметра розточки. Частота обертання ротора  $n = 250 \text{ об/хв}$ ; кількість магнітів ротора  $2\rho = 24$  (магніти системи  $N_d - Fe - B$  з  $B_r = 1,08 \text{ Тл}$ ,  $H_c = 812 \text{ кА/м}$ ); кількість зубців статора  $z_1 = 27$ ; обмотка статора «зубцева» за конструкцією. Прийнято:  $B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$ ;  $\alpha_i = 0,75$ ;  $K_{\sigma\phi} = 0,92$ ;  $K_n = 0,2$ . Результати розрахунків представлені в табл. 2, а також графіками на рис. 3. Відносні маси міді та електротехнічної сталі генератора, як це видно із графіків, помітно зменшуються зі зростанням діаметра розточки, відносна маса ротора ( $g_{nm} + g_{em}$ ) залишається при цьому практично незмінною.

**Таблиця 2**

**Результати розрахунків абсолютних та відносних мас активних матеріалів елементів конструкції генератора з постійними магнітами**

$D, \text{ мм}$	$l, \text{ мм}$	$l/D$	$G_{nm}, \text{ кг}$	$g_{nm}, \text{ кг/кВА}$	$G_{em1}, \text{ кг}$	$g_{em1}, \text{ кг/кВА}$	$G_{em}, \text{ кг}$	$g_{em}, \text{ кг/кВА}$	$G_m, \text{ кг}$	$g_m, \text{ кг/кВА}$	$G_c, \text{ кг}$	$g_c, \text{ кг/кВА}$
800	1430	1,78	698	0,78	1522	1,7	520	0,581	1369	1,53	4069	4,55
1200	608	0,507	698	0,78	1122	1,25	523	0,585	680	0,76	3073	3,43
1600	335	0,209	698	0,78	1010	1,13	525	0,587	483	0,54	2716	3,03
2000	210	0,105	698	0,78	907	1,01	522	0,583	413	0,46	2540	2,84
2400	150	0,0625	698	0,78	831	0,93	515	0,576	389	0,43	2433	2,72

За даними, наведеними в табл. 1 і 2, побудовано залежності (рис. 4) сумарних відносних мас активних матеріалів аналізованих конструкцій генераторів від розміру відношення  $\lambda = \frac{l}{D}$ . Ці залежності в діапазоні значень  $0,1 \leq \lambda \leq 0,9$  практично лінійні і можуть бути представлені (для частоти обертання  $250 \text{ об/хв}$ ) такими формулами:

а) індукторний генератор:  $g_c = 2,4 + 7,3 \frac{l}{D}, \text{ кг/кВА};$

б) генератор з постійними магнітами:  $g_c = 2,8 + 1,2 \frac{l}{D}, \text{ кг/кВА}.$

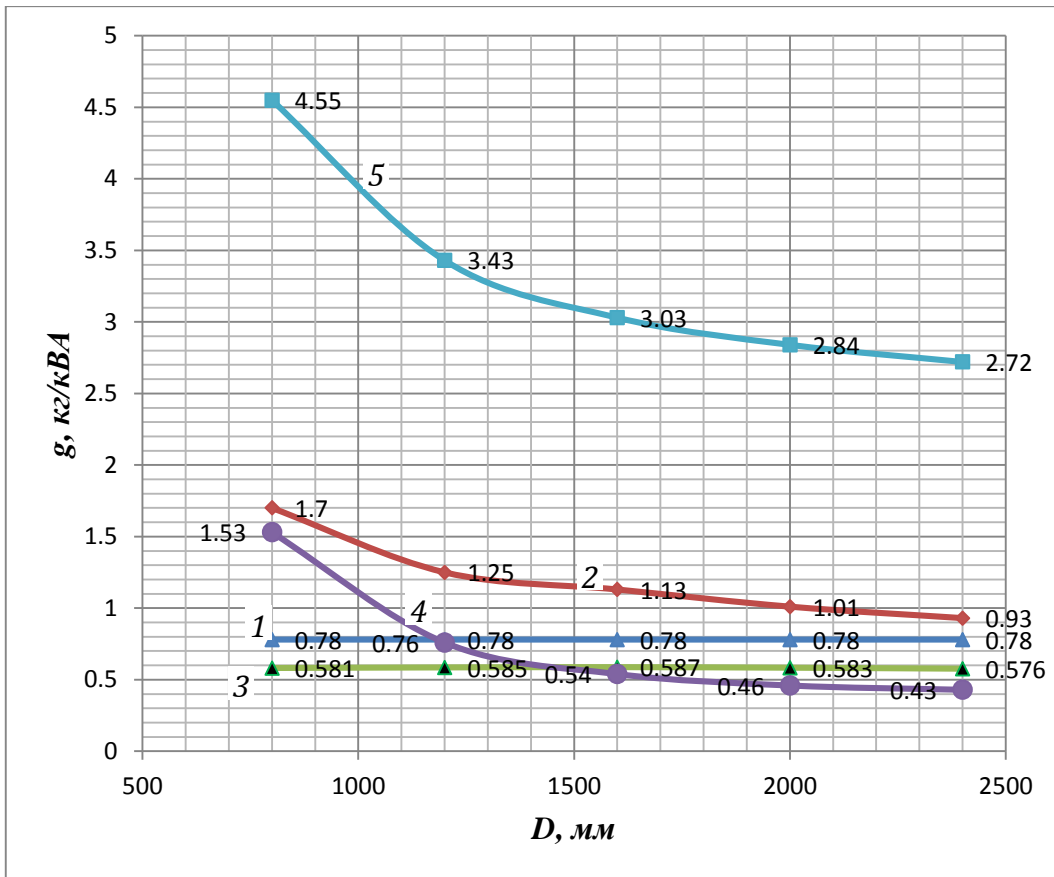


Рис. 3 Залежність відносних мас активних матеріалів елементів конструкції генератора з постійними магнітами від діаметра розточки  
 1 – постійних магнітів; 2 – електротехнічної сталі статора; 3 – втулки; 4 – міді обмотки статора; 5 – сумарна

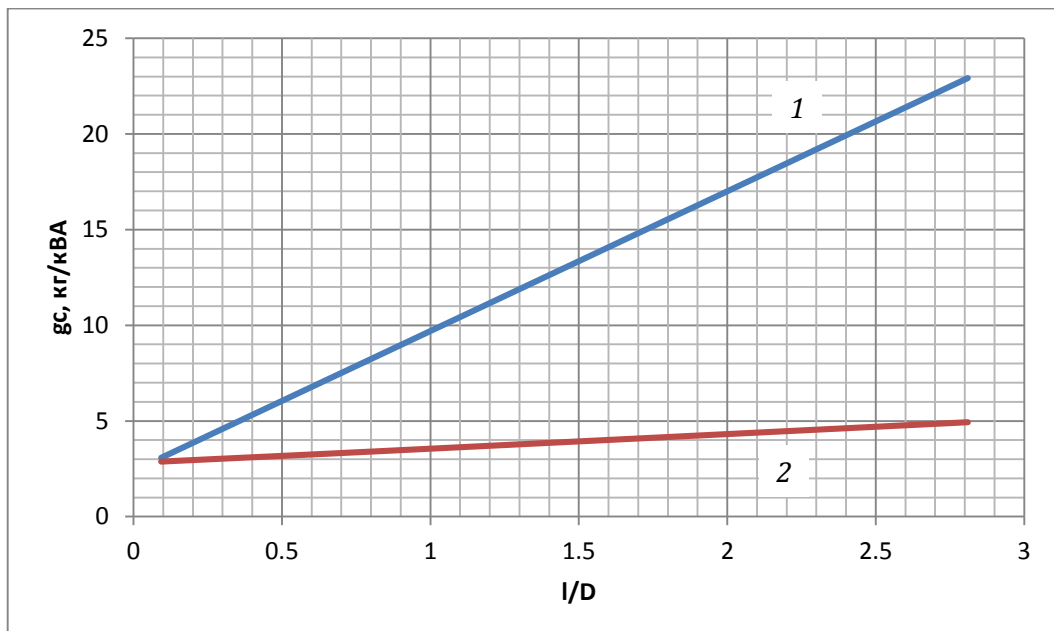


Рис. 4 Залежність відносних мас активних матеріалів генераторів від розміру відношення  $l/D$   
 (1 – індукторний генератор; 2 – генератор з постійними магнітами)

Для довільної частоти обертання  $n_o$ , об/хв одержані з останніх формул значення  $g_c$  необхідно до-множити на відношення  $250/n_o$ . Із аналізу графіка (рис. 4) слідує, що відносна маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами менша такої ж індукторного генератора аж до значень  $\lambda \leq 0,06$ .

Стосовно генераторів з постійними магнітами треба зазначити значні витрати останніх і, як наслідок, значна вартість таких генераторів при використанні в них сучасних високоенергетичних магнітів. З іншого боку, вказані генератори не дозволяють регулювати розмір їх вихідної напруги. Вирішити вказані проблеми, на нашу думку, дозволить застосування у вітроенергетичних установках індукторних генераторів з комбінованим збудженням, наприклад, коли в пазах пакетів ротора закріплено постійні магніти і їх магнітний потік протилежний за напрямом потоку обмотки збудження. При цьому маса ротора в індукторному генераторі збільшиться за рахунок магнітів приблизно на величину маси його зубців; маса міді обмотки статора зменшиться приблизно у два рази, і на такий же розмір збільшиться коефіцієнт використання магнітного потоку збудження. Маса постійних магнітів зменшиться у два рази порівняно з витратами їх у генераторі з постійними магнітами, а генератор завдяки наявності обмотки збудження забезпечить регулювання розміру вихідної напруги.

### Висновки

1. Наведено формули для розрахунку маси активних матеріалів синхронних індукторного генератора і генератора зі збудженням від постійних магнітів та надані рекомендації по вибору деяких геометричних співвідношень вказаних генераторів.

2. Отримано аналітичні залежності маси активних матеріалів генераторів від розміру відношення  $l/D$  ( $l$  – активна довжина машини;  $D$  – діаметр розточки) і визначено діапазон значень цього відношення, в якому маса активних матеріалів генератора з постійними магнітами значно менша такої в індукторному генераторі.

3. Запропоновано використання у вітроенергетичних установках синхронних генераторів з комбінованим збудженням на основі конструкції індукторного одноімпульсного генератора.

### Список літератури

1. Патент UA № 49970. Вітродвигун / М.С. Голубенко, О.Л. Кадацький, В.С. Легеза та ін. // Бюл. № 10, 2002 р.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров. – М.: Высшая школа, 1982.
3. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы / Н.Я. Альпер, А.А. Терзян. – М.: Энергия, 1970.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины / Д.А. Бут. – М.: Высшая школа, 1990.

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

УДК 622.67

*С.В. Самуся, канд. техн. наук<sup>1</sup>, Ю.А. Комисаров<sup>2</sup>, Д.А. Федоряченко<sup>2</sup>, А.В. Виниченко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> (Україна, Дніпропетровськ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)

<sup>2</sup> (Україна, Дніпропетровськ, ГВУЗ «Національний горний університет»)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МОБИЛЬНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

**Анотація.** У статті представлена математична модель динамічних процесів в струні і отвісі канату мобільної підйомної установки в режимах гальмування і реалізовано програмне рішення системи диференціальних рівнянь за допомогою адаптованого чисельного методу Рунге-Кутта. У розробленому програмному модулі проведені чисельні експерименти для реальних параметрів підйомної установки і характеристики гальмівного зусилля, результатом яких є залежності відносних поперечних переміщень струни каната, вертикальних переміщень підйомної посудини і кінематики барабана. Встановлено, що динамічні зусилля в канаті, отримані при використанні дискретного аналога, перевищують зусилля для континуальної системи на 5 ... 7%, що забезпечує запас надійності.

**Ключові слова:** мобільна підйомна установка; гальмівне зусилля; барабан; динамічні процеси; канат.

**Аннотация.** В статье представлена математическая модель динамических процессов в струне и отвесе каната мобильной подъемной установки в режимах торможения и реализовано программное решение системы дифференциальных уравнений с помощью адаптированного численного метода Рунге-Кутты. В разработанном программном модуле проведены численные эксперименты для реальных параметров подъемной установки и характеристики тормозного усилия, результатом которых являются зависимости относительных поперечных перемещений струны каната, вертикальных перемещений подъемного сосуда и кинематики барабана. Установлено, что динамические усилия в канате, полученные при использовании дискретного аналога, превышают усилия для непрерывной системы на 5...7%, что обеспечивает запас по безопасности.

**Ключевые слова:** мобильная подъемная установка; тормозное усилие; барабан; динамические процессы; канат.

**Abstract.** The paper presents a mathematical model of the dynamic processes in the string and plumb rope of mobile hoisting machine in the braking modes and implemented a software solution of differential equations with the help of adapted numerical method of Runge-Kutta. The developed software allows obtaining the real parameters of the hoisting machine and the characteristics of braking force, which result depending on the relative lateral movement of the rope string vertical movement of the lifting vessel and the drum kinematics. It is found, that the dynamic force in the rope is obtained by using discrete analog and calculated 5 ... 7% additional safety factor

**Keywords:** mobile lifting installation; braking force; drum; Dynamic processes; rope.

**Актуальность темы.** В настоящее время на шахтах угольной промышленности Украины эксплуатируется около 410 вертикальных стволов, по которым проводится спуск-подъем людей. Вследствие изношенности парка шахтных подъемных машин остается актуальной проблема обеспечения надежной и безопасной эксплуатации подъемных установок, что обусловлено увеличением количества аварий на людских подъемах и в шахтных стволах. При этом, как правило, невозможно обеспечить оперативную эвакуацию шахтного персонала при общешахтном отключении электроэнергии, неисправностях стационарных подъемных машин и стволового оборудования, которые трудно устранить за короткое время.

При зависании подъемных сосудов в стволах, где отсутствует второй независимый способ передвижения, в соответствии с требованиями п.4.7.6 «Правил безопасности в угольных шахтах» [1] предусмотрено применение горно-спасательной службой мобильных подъемных установок. Планами ликвидации аварий на угольных шахтах с целью эвакуации людей из зависших подъемных сосудов за время, не превышающее 10 часов, предусматривается использование мобильных подъемных установок.

Значительная неуравновешенность одноконцевой мобильной подъемной установки с малыми маховыми массами обуславливает необходимость исследования динамических процессов в канатной системе подъемной установки. При срабатывании предохранительного тормоза во всей подъемной системе возникают экстремальные динамические режимы, которые сопровождаются интенсивными продольными и поперечными колебаниями вертикального отвеса каната и его струны. При временном размещении мобильной машины в условиях шахтных дворов с имеющимися зданиями не всегда возможно обеспечить параметры струны каната (длину и угол наклона) в тех же регламентируемых пределах, что и для стационарных подъемных установок. Поэтому параметры динамических отклонений струны каната при торможении могут достигать значений, которые приводят к ее ударам по элементам надшахтных сооружений. Кроме того, предохранительное торможение в режиме подъема груза может привести к набеганию сосуда на канат и возникновению аварийных ситуаций.

Вышесказанное подтверждает необходимость разработки обоснованной комплексной математической модели динамики мобильной подъемной установки, которая учитывает взаимодействие разных ее составных частей. Результаты исследования динамических процессов позволяют разработать соответствующие рекомендации по применению мобильных подъемных установок и усовершенствованию режимов торможения, что повысит безопасность эксплуатации подъемных комплексов горных предприятий.

Поэтому установление закономерностей формирования динамических процессов в канатной системе подъемной установки с учетом взаимовлияния колебаний в струне и отвесе каната для обоснования рациональных эксплуатационных параметров мобильных подъемных установок для обеспечения их эффективного и безопасного использования при аварийно-спасательных работах в шахтных стволах является актуальной научной задачей.

Функцией основного программного модуля является моделирование динамических процессов в канатной системе мобильной подъемной установки в режиме предохранительного торможения. Он позволяет задавать основные технические параметры системы: приведенную массу вращающихся частей подъемной машины, линейную массу и жесткость каната, массу концевой груза, длины отвеса и струны каната, угол наклона струны, начальную скорость барабана и направление движения сосуда в стволе. В качестве параметров тормозной системы задаются время холостого хода, постоянная времени тормоза и кратность тормозного усилия по отношению к максимальному статическому усилию.

В модуле при помощи адаптированного численного метода Рунге-Кутты реализовано решение системы дифференциальных уравнений (1), описывающей динамические процессы в системе «барабан – струна – отвес каната – сосуд» для заданного промежутка времени [100].

$$\begin{cases} m_{cmp} \ddot{y} = -4 \left( Cx_{\delta} + m_{zp} j + \frac{2C}{l_k} y^2 \right) \frac{y}{l_k} - 4 \left( C\mu \dot{x}_{\delta} + 4 \frac{C\mu}{l_k} y \dot{y} \right) \frac{y}{l_k} - m_{cmp} g \cdot \cos \alpha; \\ m_{zp} \ddot{x}_{\delta} = - \left( Cx_{\delta} + \frac{2C}{l_k} y^2 \right) - \left( C\mu \dot{x}_{\delta} + 4 \frac{C\mu}{l_k} y \dot{y} \right) + m_{zp} j(t); \\ m_R \cdot j(t) = -F_{cm} \gamma_m \left( \exp\left(-\frac{t-t_{xx}}{T_m}\right) \sigma_0(t-t_{xx}) \right) + g(Q + \rho l_k) + C \left( x_{\delta} + \frac{2y^2}{l_k} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Начальными условиями системы (1) являются условия равновесия струны и отвеса каната, которые получаются, если принять, что при  $t = 0$  скорости и ускорения центра струны каната, концевой груза и барабана нулевые:  $\dot{x} = 0, \dot{y} = 0, \ddot{x} = 0, \ddot{y} = 0, j = 0$ . Тогда исходная система примет вид:

$$\begin{cases} 0 = -4 \left( Cx + \frac{2C}{l_k} y^2 \right) \frac{y}{l_k} - m_{cmp} g \cdot \cos \alpha; \\ 0 = - \left( Cx + \frac{2C}{l_k} y^2 \right), \end{cases} \quad (2)$$

из решения которой получим начальные значения для  $x$  и  $y$ :

$$x_0 = \frac{l_k m_{cmp}^2 \cos(\alpha)}{8m_{oms}^2}, \quad y_0 = \frac{l_k m_{cmp} \cos(\alpha)}{4m_{oms}}. \quad (3)$$

Для проведения серии численных экспериментов в программном модуле были задавались следующие параметры системы, соответствующие реальным условиям применения мобильной подъемной установки АСПУ-6,3 при проведении экспериментальных исследований на шахте им. М.И. Калинина ДП «Донецкуголь»:  $\rho = 2.438$  кг/м,  $\mu = 0.015$  с,  $Q = 2880$  кг,  $m_r = 58180$  кг,  $EF = 3.2 \cdot 10^7$  Н,  $l_{cmp} = 36$  м,  $\gamma_m = 3$ ,  $T = 0.6$  с,  $t_{xx} = 0.3$  с,  $l_{max} = 1200$  м.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений являются зависимости относительных поперечных перемещений центра струны каната  $y(t)$ , вертикальных перемещений подъемного сосуда  $x(t)$  и замедления барабана  $j(t)$ , вычисленные для моделируемого промежутка времени.

Для анализа кинематики подъемной установки в режиме торможения строятся зависимости изменения линейной скорости и ускорения барабана при торможении, а также кратности тормозного усилия. На рис. 1 приведены соответствующие графики для процесса предохранительного торможения при спуске и подъеме расчетного груза.

В процессе решения системы вычисляется текущая линейная скорость барабана с учетом характеристики прилагаемого тормозного усилия и колебаний, вызванных динамическими процессами в канате. При снижении скорости барабана до нуля решаемая модель «размыкается» – скорость и ускорение барабана, входящие в решаемую систему уравнений, становятся равными нулю. Это приводит к резкому изменению значений перемещений и усилий в момент времени  $t = 1,95$  с для режима спуска груза и  $t = 1,20$  с – для режима подъема груза.

Для этих параметров подъемной установки при длине отвеса каната  $l_{oms} = 96$  м построены зависимости относительных вертикальных перемещений подъемного сосуда, центра струны каната, а также динамических усилий в канате, приведенные для режима торможения на рис.2 при спуске груза и рис. 3 при подъеме груза.

Как видно из графиков, при заданных параметрах системы имеет место соотношение частот собственных продольных и поперечных колебаний в канате близкое к единице, в результате чего возникает модуляция, приводящая к увеличению амплитуд соответствующих перемещений центра струны и подъемного сосуда.

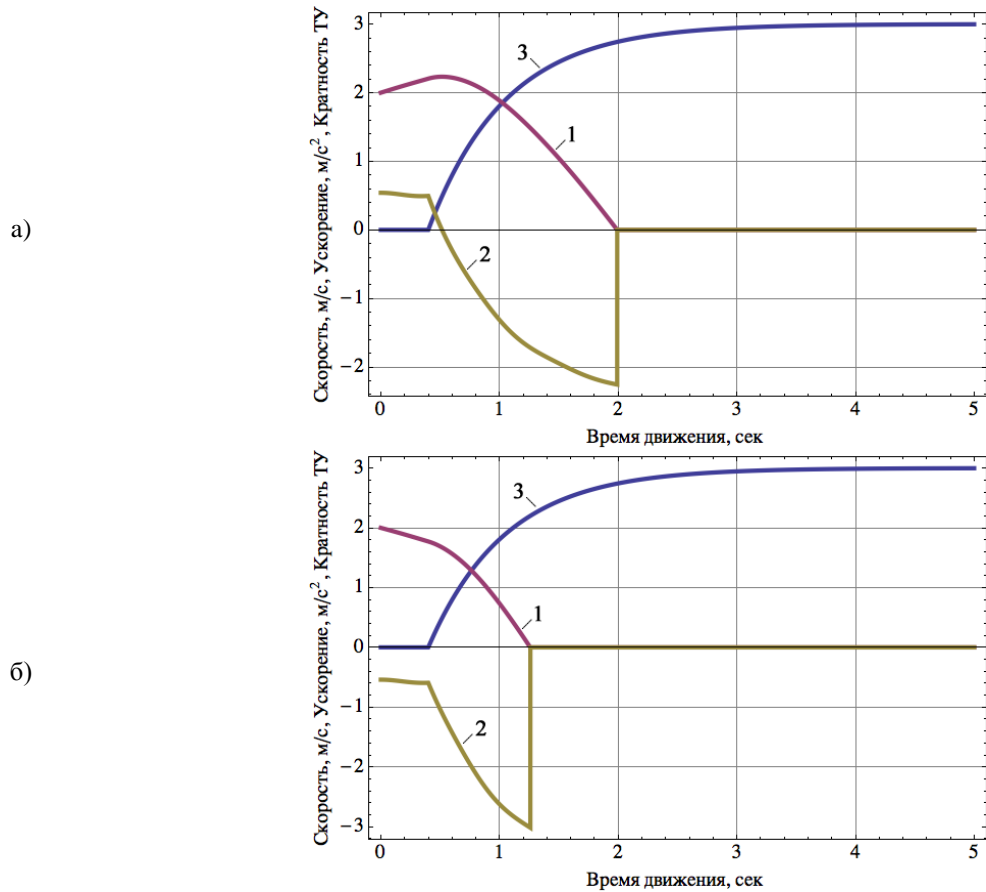


Рис. 1. Графики скорости (1) и ускорения (2) барабана, кратности тормозного усилия (3) для спуска (а) и подъема (б) расчетного груза

Полученные на основе решения системы динамические усилия в канате вычисляются по формуле

$$T(t) = Cx(t) + \frac{2C}{l_{cnp}} y^2(t). \quad (4)$$

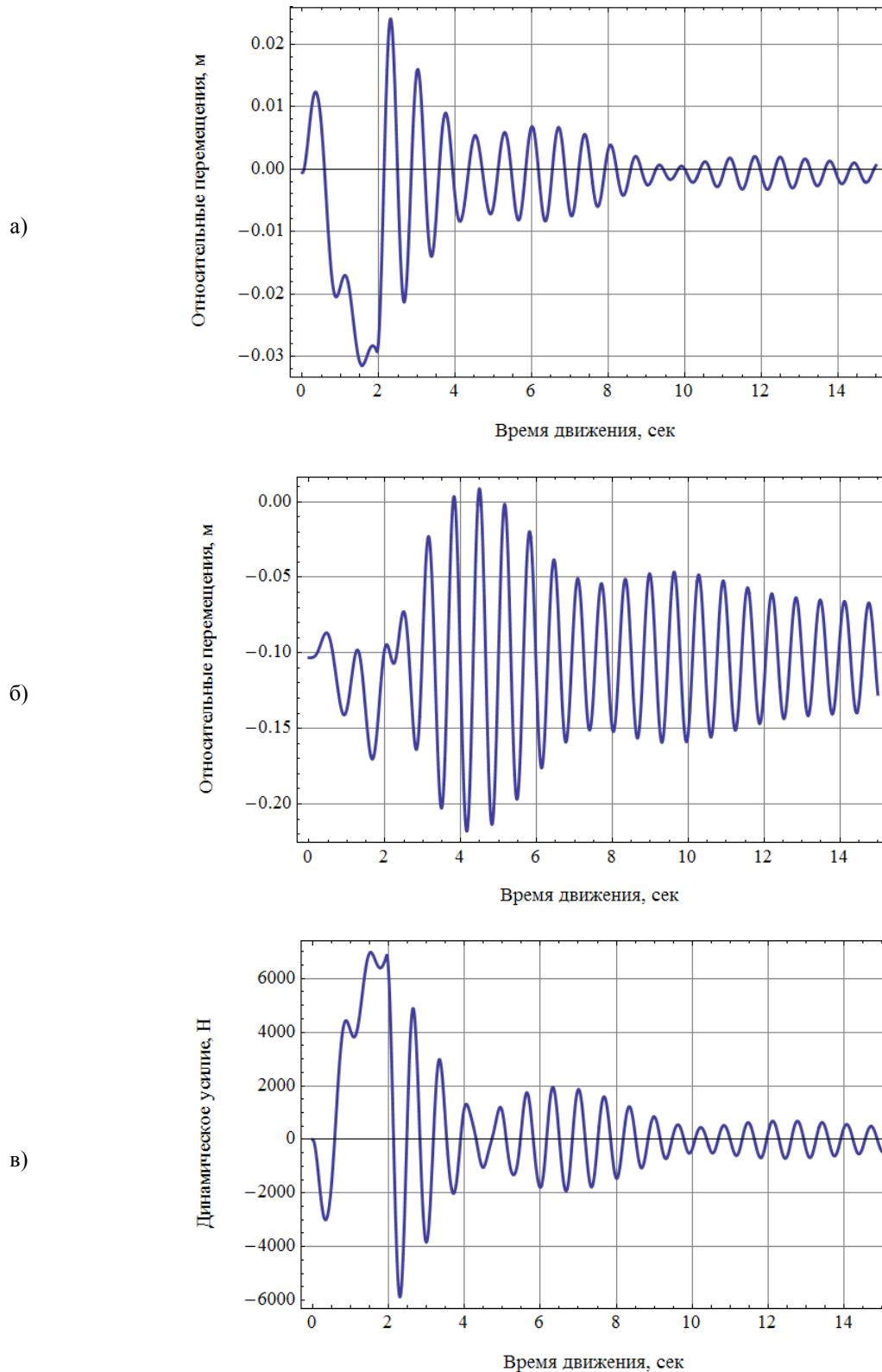
Помимо режима вычислений с учетом влияния струны на динамические процессы в канате подъемной установки, в разработанном программном модуле присутствует упрощенный режим - без такого учета, предназначенный для оценки адекватности математической модели дискретного аналога. В этом режиме вычисления производятся по аналогичной схеме, а в решаемой системе уравнений (4.1) положено, что  $y(t) = 0$ .

Система при этом принимает вид:

$$\begin{cases} m_{sp} \ddot{x}_o = -Cx - C\mu\dot{x} + m_{sp}j(t); \\ m_R \cdot j(t) = -F_{cm} \gamma_m (\exp(-\frac{t-t_{xx}}{T_m}) \sigma_0(t-t_{xx})) + Cx. \end{cases} \quad (5)$$

Для сравнения используем непрерывную математическую модель, описывающую динамику торможения одноконцевой подъемной установки [2, 3]. Модель сведена к решению системы дифференциальных уравнений в усилиях:

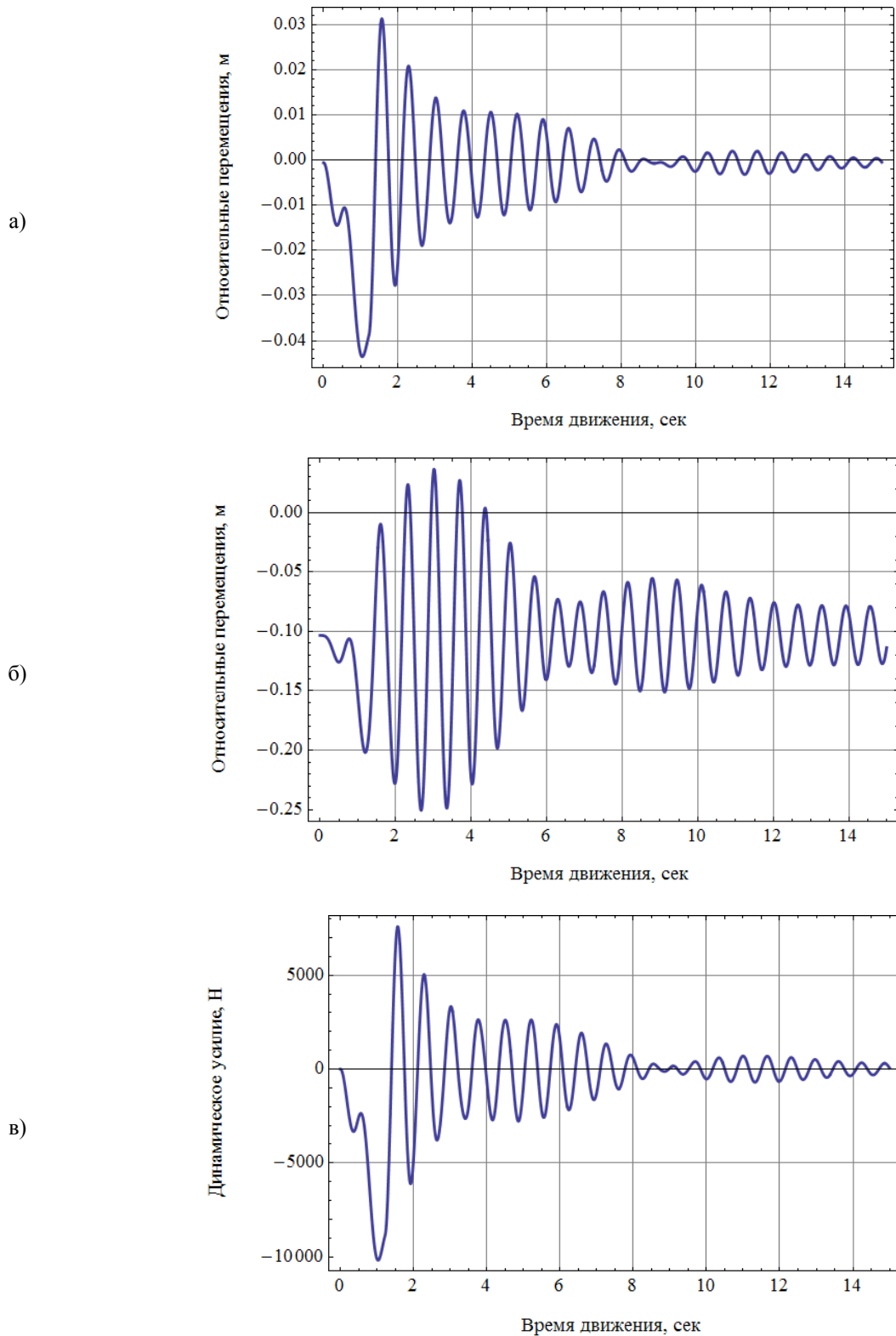
$$\begin{cases} \ddot{T}_i + a_i \dot{T}_i + b_i T_i = c_i j \\ j = -\frac{1}{m_R} \left( F_{cm} \gamma_m (\exp(-\frac{t-t_{xx}}{T_m}) \sigma_0(t-t_{xx})) + T_n \right), \end{cases} \quad (6)$$



**Рис. 2. Зависимости относительных вертикальных перемещений подъемного сосуда (а), центра струны каната (б) и динамических усилий в канате (в) для режима спуска груза**

где  $T_i$  -  $i$ -й тон колебаний,  $a_i, b_i, c_i$  - численные константы, соответствующие этому тону, а  $T_n = T_{cm} + T_d$  - полное усилие в канате.





**Рис. 3.** Зависимости относительных вертикальных перемещений подъемного сосуда (а), центра струны каната (б) и динамических усилий в канате (в) для режима подъема груза

Динамическое усилие в нижнем сечении каната согласно модели вычисляется по формуле

$$T_0(x) = \sum_i T_i + \mu \dot{T}_i \cos \frac{\lambda_i}{l_k} x \quad (7)$$

и представляет собой сумму  $i$ -ых тонов динамических усилий в канате.

Учитывая, что собственные числа модели  $\lambda_i$  отстоят друг от друга на величину близкую к  $\pi$ , множитель  $\cos \frac{\lambda_i}{l_k} x$  при  $x = l_k$  имеет знакопеременный характер. Поэтому можно предположить, что учет 2-х и более тонов колебаний при вычислении динамического усилия в нижнем сечении каната для континуальной модели лишь уменьшает его абсолютную величину.

Это подтверждается численным экспериментом по определению динамических усилий, результаты которого приведены на рис. 4.

Наименьшее по модулю значение имеет динамическое усилие, полученное, как сумма ряда (4.4) в силу его знакопеременного характера (кривая 1). Динамическое усилие, представляющее собой лишь первый тон колебаний (кривая 2), превышает его на 3...5%. Решение дискретного аналога (кривая 3) превышает решение континуальной системы на 5...7%, что объясняется принятыми допущениями и обеспечивает запас по безопасности при исследовании условий для возникновения экстремальных режимов торможения. Полученные результаты подтверждают правомочность допущений, принятых при разработке математической модели дискретного аналога.

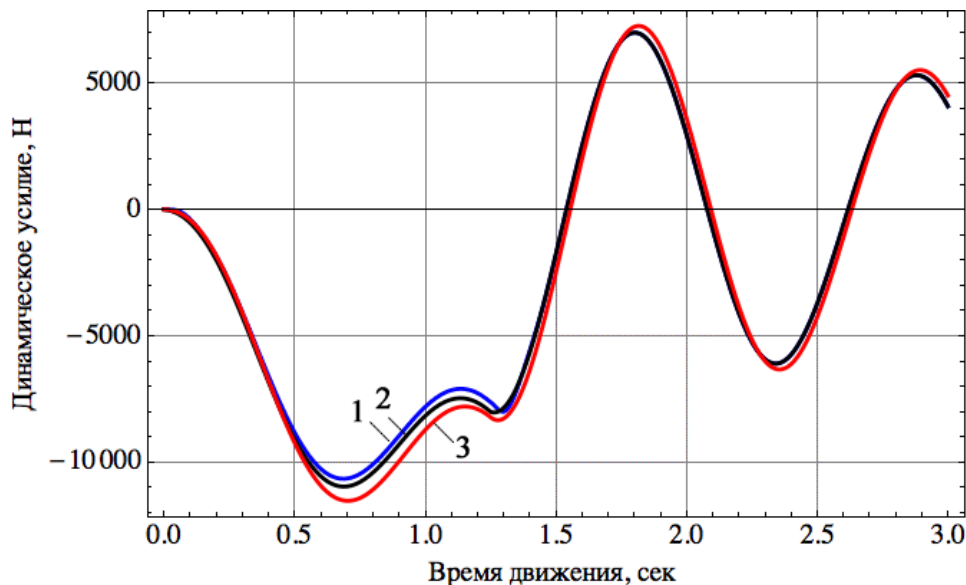


Рис. 4. Динамические усилия в нижнем сечении каната при торможении в режиме подъема груза:  
1 – с учетом 5-ти тонов для континуальной модели; 2 – с учетом первого тона для континуальной модели;  
3 – для дискретного аналога

Следовательно, критические параметры системы дискретного аналога, определенные из условия недопущения набегания подъемного сосуда на канат, обеспечивают запас по безопасности по сравнению с параметрами, полученными при использовании континуальной модели подъемной установки, что, в свою очередь, уменьшает вероятность возникновения аварийной ситуации при торможении подъемной установки.

### Выводы

1. Для разработанной математической модели динамических процессов в струне и отвесе каната мобильной подъемной установки в режимах торможения реализовано программное решение системы дифференциальных уравнений с помощью адаптированного численного метода Рунге-Кутты.

2. В разработанном программном модуле проведены численные эксперименты для реальных параметров подъемной установки и характеристики тормозного усилия, результатом которых являются зависимости относительных поперечных перемещений струны каната, вертикальных перемещений подъемного сосуда и кинематики барабана.

3. Установлено, что при определенных параметрах механической системы подъемной установки имеет место соотношение частот собственных продольных и поперечных колебаний в канате близкое к единице, в результате чего возникает модуляция, приводящая к увеличению амплитуд соответствующих перемещений центра струны и подъемного сосуда.

4. Динамические усилия в канате, полученные при использовании дискретного аналога, превышают усилия для континуальной системы на 5...7%, что обеспечивает запас по безопасности при исследовании условий для возникновения экстремальных режимов торможения и подтверждает правомочность допущений, принятых при разработке математической модели дискретного аналога.

**Список литературы**

1. Правила безпеки в вугільних шахтах (НПАОП 10.0 –1.01–05). – К.: Відлуння, 2005. – 398 с.
2. Динамика шахтных подъемных установок / В.И. Белобров, В.А. Дзензерский, В.И. Самуся, С.Р. Ильин. – Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. ун-та, 2000. – 384 с.
3. Ильин С.Р. Применение мобильных подъемных установок при аварийно-спасательных работах в шахтных стволах / С.Р. Ильин, С.В. Самуся // Материалы научн.-техн. конф. “Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок”. – Донецк: НИИГМ им. М.М. Федорова. – 2009. – С. 81–83.
4. Аварийно-спасательная передвижная подъемная установка / С.Н. Смоланов, О.А. Колесов, В.И. Бондаренко, В.И. Самуся, А.В. Москаленко // Уголь Украины. – 2003. – №1. – С. 43–45.
5. Пат. 51948 Україна, МПК E21F 11/00. Аварійно-рятувальна пересувна підіймальна машина / Самуся В.І., Смоланов С.М., Колесов О.А., Хіценко В.В., Москаленко О.В., Вігдергауз Л.П.; замовник та правовласник ДНКЦ НДІ ОМШБ. Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доц. Зіборовим К.А.*

# ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

УДК 621.1

**Ф.М.Алпатов**

(Украина, Киев, Национальный технический университет Украины «КПИ»)

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА: ПРОБЛЕМЫ, РЕСУРСЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ.

**Анотація.** Стаття є оглядом автономних нетрадиційних джерел енергії. Представлені відомості про можливості і потенціал енергії Сонця. Розглянуті фотоелектричні системи перетворення сонячної енергії, паливні елементи, хімічні джерела струму. Проаналізовані особливості і масштаби їх використання.

**Ключові слова:** джерело, енергія, система, перетворення, можливості, показники

**Аннотация.** Статья представляет собой обзор автономных нетрадиционных источников энергии. Представлены сведения о возможностях и потенциале энергии Солнца. Рассмотрены фотоэлектрические системы преобразования солнечной энергии, топливные элементы, химические источники тока. Проанализированы особенности и масштабы их использования.

**Ключевые слова:** источник, энергия, система, преобразование, возможности, показатели

**Abstract.** The article is a review of the stand-alone non-traditional sources energii. Present information about the capabilities and potential of solar energy. Considers photovoltaic systems convert solar energy, fuel cells, chemical sources of electricity. The analysis of their use are described features of their use.

**Keywords:** source, energy, system, transformation, indicators, potentialities

**Вступлення.** Технологія джерелів відновлюваної енергії – область науки, промисловості і техніки, охоплююча виробництво, передачу, накоплення і споживання електричної, теплової і механічної енергії, отриманої за рахунок використання нетрадиційних відновлюваних джерелів енергії – сонця, вітру, тепла Землі, біомаси, малих річок, морів і океанів, низькопотенціального тепла, а також нових і альтернативних екологічно чистих видів енергії. Ефективне використання всіх без виключення видів енергії неможливо без застосування наукоємких і нестандартних технологій і відповідного обладнання. Існують різні оцінки принципової можливості рішення енергетичної проблеми з допомогою джерелів відновлюваної енергії, в тому числі енергії Сонця. Обґрунтована оцінка цієї проблеми належить академіку П.Л. Капице [1]. Всі енергетичні процеси зводяться до трансформації одного виду енергії в інший. Трансформація енергії зазвичай відбувається в певному об'ємі, в який через поверхню поступає один вид енергії, а виходить інший. Математично густина потоку енергії описується вектором Умова-Пойнтинга

$$\mathbf{U} = v\mathbf{F},$$

де  $v$  - швидкість поширення процесу,  $\mathbf{F}$  – об'ємна густина енергії.

Густина енергії, що поступає в об'єм, обмежена швидкістю  $v$ , яка визначається властивостями провідної середовища. Аналіз показує, що обмеження густоти потоку енергії змушує відмовитися від застосування дуже ефективних способів перетворення енергії в енергетику великих потужностей. Так, в паливних елементах, в яких відбувається пряме перетворення хімічної енергії окислення водню в електричну енергію, цей процес здійснюється з коефіцієнтом корисної дії близько 70%. Але застосування паливних елементів в енергетику великих потужностей обмежується малою швидкістю дифузійних процесів в електролітах, внаслідок чого густина потоку енергії дуже мала, і з квадратного метра електрода можна зняти тільки 200 Вт. Для потужності 100 МВт необхідна площа становить  $5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ , і капітальні витрати на побудову такої станції не виправдаються виробленою нею енергією.

Прямое превращение также связано с ограниченной плотностью потока энергии. Если считать, что снимаемая с одного квадратного метра солнечной батареи мощность равна 100 Вт, то для генерирования мощности 100 МВт необходима площадь в один квадратный километр. Капитальные затраты на строительство такой энергостанции не всегда оправдаются производимой ею энергией.

**Особенности использования.** Энергия, которая используется людьми, делится на две неравные части. Первая – это так называемая бытовая энергия, энергия малых мощностей, непосредственно обеспечивающая культурный образ жизни. Эта энергия используется для отопления, освещения и питания многочисленных бытовых приборов. Используемая в быту энергия исчисляется киловаттами. Второй вид энергии – это промышленная энергия, энергия больших мощностей, используемая в металлургии, на транспорте, в машиностроении, в сельском хозяйстве и т.д. Эта энергия значительно больше бытовой, мощность ее исчисляется в мегаваттах.

Из анализа, основанного на понятии плотности потока энергии, следует, что рентабельное использование возобновляемых источников возможно только при малых мощностях этих источников. Отсюда вытекает необходимость разработки автономных источников возобновляемой энергии.

Возобновляемые источники энергии не ведут к дополнительному насыщению планеты теплом. Их вредное воздействие на окружающую среду, загрязнение атмосферы, почвы и воды в целом гораздо ниже, чем у традиционных тепловых и атомных электростанций или гидроэлектростанций. При внедрении 1 МВт мощности на солнечных, ветровых или геотермальных энергоустановках при выработке около 2 млн. кВт·ч в год может быть предотвращен выброс почти двух тысяч тонн двуокиси углерода, пятнадцати тонн сернистого газа и двух тонн окислов азота.

При рациональном использовании энергии для создания комфортных по современным понятиям условий жизни требуется в среднем 2 кВт на человека. С одного квадратного метра земной поверхности за счет всех источников возобновляемой энергии можно получить около 500 Вт мощности. Даже если эффективность преобразования этой энергии в удобную для потребления форму равна всего лишь 4%, для мощности 2 кВт требуется площадь 100 м<sup>2</sup>. Средняя плотность населения в городах составляет приблизительно 500 человек на 1 км<sup>2</sup>. Для обеспечения их энергией из расчета 2 кВт на человека необходимо с 1 км<sup>2</sup> снимать 1000 кВт. Таким образом, для обеспечения населения электроэнергией достаточно использовать всего 5% занимаемой этим населением площади. Возобновляемые источники энергии в принципе могут обеспечить удовлетворительное качество жизни населения Земли. По прогнозу к 2020 г. эти источники заменят около 2,5 млрд. т топлива, их доля в производстве электроэнергии и теплоты составит 8%. В табл. 1 приведены данные о возобновляемых источниках энергии.

**Таблица 1. Возобновляемые источники энергии**

Первичный вид энергии	Источник энергии	Мировые ресурсы, 10 <sup>15</sup> кВт·ч/год
Механическая	Сток рек	0,028
	Волны	0,005-0,05
	Приливы и отливы	0,09
	Ветер	0,5-5,2
Тепловая	Градиент температур: воды морей и океанов	0,1-1,0
	воздуха	0,001-0,01
	недр земли (вулканов)	0,05-0,2
Лучистая	Солнечное излучение на поверхность Земли	200-280
	Полная энергия	1570
Химическая	Растения и торф	10

По данным международного энергетического агентства [3] в конце двадцатого столетия производство электроэнергии за счёт нетрадиционных возобновляемых источников энергии составило более в 200 млрд. кВт или около 2,0% от общего производства. В настоящее время доля этой энергии по различным оценкам возросла до 10 – 13 %. Потенциальные мощности возобновляемых источников энергии составляют (тонн условного топлива в год): энергии Солнца – 2300 млрд.; энергии ветра – 26,7 млрд.; энергии биомассы -- 10 млрд. Эти источники энергии создают перспективы для решения энергетических проблем без отрицательных экологических последствий. В настоящее время освоено производство широкой номенклатуры оборудования и установок нетрадиционной и малой энергетики, которые могут найти применение и уже используются на практике. В их числе:

- ветроэлектрические установки широкого ряда мощностей - от 100 Вт до 1 МВт;
- фотопреобразователи и модули солнечных батарей со сроком службы от 5 до 20 лет, а также их системы с аккумуляторами и инверторами;
- тепловые коллекторы, использующие современные материалы для коррозионно-стойких панелей и оптических покрытий;
- агрегаты малых и микро-ГЭС различных типоразмеров и мощностей от 5 кВт до 3 МВт,
- геотермальные тепловые станции блочно-модульного типа тепловой мощностью от 6 до 20 МВт и геотермальные электростанции электрической мощностью от 0,5 до 23 МВт;
- биогазовые установки для экологически чистой безотходной переработки различных органических отходов (навоз крупного рогатого скота, помёт птицы, пищевые и твёрдые бытовые отходы), с получением топлива – биогаза (с производительностью единичных агрегатов до 450 м<sup>3</sup> в сутки) и экологически чистых органических удобрений;
- различные серии тепловых насосов теплопроизводительностью от 100 кВт до 4 МВт с высоким отношением (от 3 до 7) получаемой теплоты к электроэнергии, затрачиваемой на привод компрессора.

Источники возобновляемой энергии имеют как положительные, так и отрицательные свойства.

Положительные свойства – это повсеместная распространенность большинства их видов и экологическая чистота. Эксплуатационные затраты по использованию нетрадиционных источников не содержат затрат на топливо, так что в этом отношении энергия этих источников как бы бесплатна. Однако фактор бесплатности нивелируется значительными расходами на изготовление и приобретение необходимого оборудования.

Экологическая чистота источников возобновляемой энергии также становится относительной, если учесть загрязнение окружающей среды в процессе их производства.

Использование новых видов энергии порождает новые экологические последствия. Возведение солнечных электростанций связано с добычей и переработкой и другого сырья, производством металлов, стекла и т.д., которые влекут за собой загрязнение окружающей среды. Поглощение солнечной радиации большими полями фотоэлектрических преобразователей может привести к снижению температуры земной поверхности, изменению локального теплового баланса между Землей и атмосферой, и, как следствие, к возникновению неестественных атмосферных явлений. Ветроустановки создают шумовое загрязнение окружающей среды, производимое лопастями пропеллеров. Конструкции ветроустановок создают помехи распространению радиоволн. Отбор энергии ветра ослабляет воздушные потоки, что может ослабить проветривание промышленных районов и оказать влияние на погодные условия. Отрицательные качества, имеющие принципиальное значение – это малая плотность потока энергии и изменчивость его во времени.

Первое обстоятельство заставляет создавать относительно большие площади энергоустановок (приемные поверхности солнечных установок, площадь ветроколеса и т.п.). Это приводит к большой материалоемкости (на единицу мощности) подобных устройств и к увеличению удельных капиталовложений по сравнению с традиционными энергоустановками.

Второе обстоятельство также существенно. Изменчивы во времени солнечное излучение, ветер, тепло окружающей среды. Например, поток солнечной энергии, в среднем закономерный, содержит значительную случайную составляющую, связанную с погодными условиями. Еще более изменчива и непредсказуема энергия ветра.

Электрическая энергия представляет собой весьма специфический вид продукции, который может быть потреблен в тот же момент, что и произведен. Однако изменчивость поступления и потребления электрической энергии порождает фундаментальную научно-техническую проблему аккумулирования электрической энергии. Применительно к большим количествам энергии эта проблема не решена, и нет оснований полагать, что она будет решена в обозримом будущем. Однако решение этой проблемы применительно к автономным источникам небольшой мощности не представляет принципиальных затруднений, что говорит в пользу развития этого направления энергетики. Существует устойчивая во времени тенденция снижения стоимости нетрадиционных возобновляемых источников энергии, обусловленная научными достижениями в совершенствовании методов их использования, и тенденция повышения стоимости традиционных ископаемых источников энергии, вызванная их истощением и усложнением технологии добычи. В первую очередь это относится к преобразованию солнечной энергии в электрическую или тепловую. Солнечная радиация является практически неисчерпаемым источником энергии. Земли достигает лишь незначительная часть излучаемой Солнцем энергии. Около 95% солнечной энергии имеет вид коротковолнового излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,4 мкм.

Солнце имеет диаметр 1392 тыс. км. Его масса равна 2·10<sup>30</sup> кг. Химический состав Солнца: 81,76% водорода, 18,14% гелия и 0,1% азота. Средняя плотность вещества Солнца равна 1400 кг/м<sup>3</sup>, а в его центре она достигает 76000 кг/м<sup>3</sup>. Мощность потока солнечного излучения составляет 4·10<sup>23</sup> кВт. Температура фотосферы на поверхности Солнца – около 5900 К. Верхней границы атмосферы Земли за год достигает количество солнечной энергии, равное 5,6·10<sup>24</sup> Дж. Атмосфера Земли отражает 35% этой

энергии ( $1,9 \cdot 10^{24}$  Дж) Остальная энергия расходуется на нагрев земной поверхности (около  $2,4 \cdot 10^{24}$  Дж), испарительно-осадочный цикл (около  $1,3 \cdot 10^{24}$  Дж), образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра (около  $1,2 \cdot 10^{22}$  Дж). Мощность потока солнечного излучения у верхней границы атмосферы Земли равна  $1,78 \cdot 10^{17}$  Вт, а на поверхности Земли  $1,2 \cdot 10^{17}$  Вт. Плотность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы через поверхность, расположенную нормально к направлению солнечных лучей, равна  $1353 \text{ Вт/м}^2$ . Эта величина называется солнечной постоянной. Среднее количество энергии, поступающей за 1 час на  $1 \text{ м}^2$  этой поверхности, равно  $4871 \text{ кДж}$ . Движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите приводит к изменению расстояния между Землей и Солнцем. В течение года оно изменяется в пределах 150 млн. км. Вследствие этого количество солнечной энергии, поступающей на  $1 \text{ м}^2$  нормальной поверхности, изменяется в течение года менее чем на 7%.

Количество солнечной энергии, поступающей на Землю в течение года, составляет  $1,05 \cdot 10^{18}$  кВт·ч. На поверхность суши приходится только 20% этой энергии, то есть  $2 \cdot 10^{17}$  кВт·ч. Часть энергии проявляется в виде ветра:  $1,58 \cdot 10^{16}$  кВт·ч в год. Без ущерба для природы можно использовать до 1,5% всей попадающей на Землю солнечной энергии, то есть около  $1,62 \cdot 10^{16}$  кВт·ч в год. Это эквивалентно  $2 \cdot 10^{12}$  т условного топлива.

Распределение потока солнечной радиации на поверхности земного шара крайне неравномерно. Количество солнечной энергии, поступающей за год на  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли, изменяется, в зависимости от географической зоны, приблизительно от  $3000 \text{ МДж/м}^2$  до  $8000 \text{ МДж/м}^2$ . Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за 1 день на  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли, в зависимости от географической зоны, колеблется от  $7,2 \text{ МДж/м}^2$  до  $21,4 \text{ МДж/м}^2$  табл. 2 [3]. Пиковая плотность потока солнечной энергии достигает  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Солнечное излучение у верхней границы земной атмосферы приблизительно соответствует излучению абсолютно чёрного тела с температурой  $5900 \text{ К}$ . Спектр излучения включает в себя ультрафиолетовое излучение с длиной волны от  $0,2$  до  $0,4 \text{ мкм}$ , видимый свет с длиной волны от  $0,4$  до  $0,78 \text{ мкм}$  и инфракрасное излучение с более длинными волнами. Максимум интенсивности солнечного излучения приходится на длину волны  $0,5 \text{ мкм}$ . В процессе прохождения солнечных лучей сквозь атмосферу Земли часть солнечного излучения рассеивается и поглощается молекулами озона, воздуха, водяного пара и частицами пыли. В результате прямое солнечное излучение ослабляется и появляется диффузное, рассеянное излучение. Часть энергии, поглощенной и рассеянной в атмосфере, излучается в космическое пространство. Основной поток солнечной энергии достигает поверхности Земли в виде рассеянного, диффузного излучения. Доля диффузного излучения в общем потоке поступающей солнечной радиации зависит от географических и климатологических факторов и изменяется в течение года.

**Преобразование энергии Солнца.** Преобразование энергии в фотоэлектрических преобразователях происходит за счет фотовольтаического эффекта, имеющего место в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Кремниевые солнечные элементы – нелинейные устройства. Их действие нельзя описать линейной зависимостью типа закона Ома. Для этой цели используются вольтамперные характеристики. Эффективность преобразования зависит от температуры. При нагреве элемента на один градус свыше  $25^\circ\text{C}$  вырабатываемое им напряжение снижается на  $0,002 \text{ В}$ . При интенсивном солнечном освещении элементы нагреваются до  $60-70^\circ\text{C}$ , при этом напряжение на каждом из них падает на  $0,07-0,09 \text{ В}$ . Это основная причина снижения коэффициента полезного действия солнечных элементов, который колеблется в пределах  $10-16 \%$ . Общепринятые стандартные условия для паспортизации элементов следующие: освещенность –  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ; температура  $-25^\circ\text{C}$ ; спектр АМ 1,5 (солнечный спектр на широте  $45^\circ$ ). Технические и связанные с ними экономические характеристики фотоэлектрической станции в основном определяются солнечными батареями: материалами, из которых они изготовлены и технологией изготовления. В себестоимости фотоэлектрической станции доля себестоимости батарей достигает  $60\%$  и более. Основные структурные компоненты солнечной батареи – солнечные элементы. По двум признакам – материалу и технологии изготовления – они делятся на кремниевые (объемные, тонкопленочные) солнечные элементы и солнечные элементы на основе соединений  $\text{A}_2\text{B}_2$ ,  $\text{CdS/CdTe}$ ,  $\text{A}_3\text{B}_5$  и др. В зависимости от вида структуры применяемого материала солнечные элементы подразделяют на кристаллические, поликристаллические и аморфные. Наибольшее применение в настоящее время получили солнечные элементы на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено наличием хорошо отработанной технологии получения кремния и выращивания  $p-n$  переходов, высоким коэффициентом полезного действия, повышенной стабильностью и надежностью. Основные характеристики преобразователей описываются аналитическими зависимостями. Величина установившейся фотоЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольтамперной характеристики [4]:

$$U = (kT / q) \ln(1 + (I_p - I) / I_s)$$

## Энергобережения та энергоефективність

где:  $I$  – ток на нагрузке,  $I_p$  – фототок,  $I_s$  – ток насыщения,  $T$  – температура Кельвина,  $q$  – элементарный заряд,  $k$  – постоянная Больцмана.

Фототок описывается равенством

$$I_p = SN_0Q,$$

где  $S$  – площадь фотоэлемента,  $N_0$  – количество созданных светом электронно-дырочных пар,  $Q < 1$  – коэффициент, показывающий, какая доля этих пар собирается  $p$ - $n$ - переходом.

Уравнение вольтамперной характеристики справедливо при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава. Изменение спектра отражается изменением значения фототока. Максимальная мощность, снимаемая с 1 см<sup>2</sup> фотоэлектрического преобразователя равна

$$P = I_p U,$$

или

$$P = \chi I_c U_{xx},$$

где  $\chi$  – коэффициент формы вольтамперной характеристики,  $I_c$  – ток короткого замыкания,  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода.

Коэффициент полезного действия элементов на основе  $c$ -Si достигает 26%. Коммерческие образцы солнечных элементов на основе  $c$ -Si имеют эффективность 14-17%, а на поликристаллической основе – 12-14%. В сфере тонкопленочных солнечных элементов наибольшее развитие получили технологии аморфного кремния; CdS/CdTe; CIS (CuInSe<sub>2</sub>). Аморфный гидрогенизированный кремний ( $a$ -Si:H) – один из основных материалов солнечной энергетики[5]. Солнечные батареи из  $a$ -Si:H обладают рядом преимуществ: большим значением напряжения холостого хода, возможностью нанесения на большие площади, возможностью использования в качестве подложек различных материалов (стекла, нержавеющей стали, полиамида), низкой стоимостью. Наивысшая эффективность солнечных элементов на основе  $a$ -Si:H (13%) получена на элементе с тройным  $p$ - $i$ - $n$ . Основные задачи в области технологии  $a$ -Si:H – это повышение стабильности параметров при создании многопереходных солнечных элементов и повышение их эффективности, табл.3 [6].

**Таблица 2. Техничко-экономические характеристики солнечных элементов**

Материал	1995		2000		2010	
	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена
Монокристаллический кремний	15	2,40	18	2,00	22	1,50
Поликристаллический кремний	14	2,25	16	1,95	20	1,45
Аморфный кремний	7 - 9	2,00	10	1,20	14	0.75

Выпускаются солнечные батареи на основе CdS/CdTe, имеющие коэффициент полезного действия, равный 8% и обладающие высокой стабильностью. Эффективность отдельных экспериментальных образцов достигает 15-16%.

**Заключение.** Возобновляемые источники энергии являются актуальным и перспективным направлением исследования. Активно развиваются преобразователи солнечной энергии в направлении повышения эффективности преобразования энергии излучения Солнца и снижения удельной стоимости. Актуальным является использование комбинированных источников, например ветроустановок и солнечных батарей. Основной проблемой, которая сдерживает развитие солнечной энергетики, является низкая плотность энергии излучения Солнца. Один из путей преодоления этой проблемы – использование концентраторов солнечной энергии.

### Список использованных источников

1. Капица П.Л. Глобальные проблемы и энергия. Лекция, прочитанная в Стокгольском университете. // П.Л. Капица. Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит. , 1981. – С. 430-445.



2. Капица П.Л. Энергия и физика. Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии Наук СССР. // П.Л. Капица. Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит. , 1981. – С. 97-109..
3. Марк Томас. Развитие возобновляемой энергетики в Европейском Союзе. [http://intersolar.ru/home\\_r.shtml](http://intersolar.ru/home_r.shtml)
4. Карабинов С.М Основные направления развития технологической базы фотовольтаических энергетических систем [http://www.transgasindustry.com/ren\\_e\\_s/solar\\_e/2/solar1.shtml](http://www.transgasindustry.com/ren_e_s/solar_e/2/solar1.shtml)
5. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
6. Maycock. International Photovoltaic Markets, Developments and Trends Forecast to 2010. - 1st WCPEC, Hawaii, 1994.

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

УДК 621.333:629.424

*В.Г. Кузнецов, д-р техн. наук, О.И. Саблин, канд. техн. наук, П.В. Губский, Е.Г. Кольхаев  
(Украина, г. Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)*

## **АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ПОЕЗДАХ ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА**

**Анотація. Мета.** Теоретична і експериментальна оцінка резервів енергозбереження при використанні режиму рекуперації енергії в умовах Дніпропетровського метрополітену. **Методи досліджень.** Оцінка резервів енергозбереження виконана експериментально за рівнем генерованої енергії у режимі реостатного гальмування по відношенню до витрати енергії на тягу. **Результати.** В умовах Дніпропетровського метрополітену існує резерв енергозбереження при використанні рекуперації електроенергії, що становить відповідно 14...34 % в прямому (на еквівалентному підйомі 8 ‰) і 38...52 % у зворотному (на відповідному узвозі) напрямках. **Наукова новизна і практична цінність.** Встановлені кількісні та якісні показники режимів рекуперації енергії поїздів метрополітену можуть бути використані при виборі раціональних заходів щодо ефективного використання енергії гальмування поїздів.

**Ключові слова:** метрополітен, тягове навантаження, електроспоживання, рекуперація, резерв енергозбереження.

**Аннотация. Цель.** Теоретическая и экспериментальная оценка резервов энергосбережения при использовании режима рекуперации энергии в условиях Днепропетровского метрополитена. **Методы исследований.** Оценка резервов энергосбережения выполнена экспериментально по уровню генерированной энергии в режиме реостатного торможения по отношению к расходу энергии на тягу. **Результаты.** В условиях Днепропетровского метрополитена существует резерв энергосбережения при использовании рекуперации электроэнергии, составляющий соответственно 14...34 % в прямом (на эквивалентном подъеме 8 ‰) и 38...52 % в обратном (на соответствующем спуске) направлениях. **Научная новизна и практическая ценность.** Установленные количественные и качественные показатели режимов рекуперации энергии поездов метрополитена могут быть использованы при выборе рациональных мероприятий по эффективному использованию энергии торможения поездов.

**Ключові слова:** метрополітен, тягове навантаження, електроспоживання, рекуперація, резерв енергозбереження.

**Abstract. Goal.** Theoretical and experimental evaluation of reserves of energy saving when using energy recovery in terms of Dnipropetrovsk metro. **Research methods.** Evaluation of reserves of energy saving is carried out experimentally on the level of energy generated in the dynamic braking mode to the energy consumption for traction. **Results.** In terms of the Dnipropetrovsk metro, there is a reserve of energy saving when using the regeneration energy gap of, respectively, 14...34 % direct (in equivalent t-EME 8 ‰) and 38...52 % return (in the appropriate descending) directions. **Scientific novelty and practical value.** Established quantitative and qualitative indicators of energy recovery of metro trains can be used for selecting rational actions on the efficient use of braking energy of trains.

**Keywords:** underground, railway traction load, power consumption, heat recovery, the reserve of energy saving.

**Введение**

Расход электроэнергии на движение поездов метрополитена сегодня составляет около 75...85 % от общего энергопотребления данного вида транспорта, что является значительной составляющей себестоимости пассажирских перевозок. Учитывая, что режимы движения электропоездов метрополитена связаны с частыми ускорениями и торможениями, одним из основных резервов снижения энергоемкости метрополитена является использование рекуперации электроэнергии, которая при рациональных режимах движения позволяет на 30...50 % уменьшить потребление энергии на тягу.

**Обзор литературы**

Первым этапом решения задачи выбора энергосберегающих мероприятий является определение технического потенциала энергосбережения, который можно рассматривать как для отдельного  $i$ -го энергосберегающего мероприятия на  $k$ -м ( $k = k \in K$ ) элементе (объекте) энергетической системы, так и для различных множеств таких мероприятий  $i$ ,  $i \in I$  [1]. Этот потенциал может рассчитываться как в абсолютном выражении (1), так и в относительных единицах (2):

$$\Pi_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[ K_j W_{k_i}^B - W_{k_i}^P T_{k_i} \right], \tag{1}$$

$$\Pi_{KI}^O = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[ K_j W_{k_i}^B - W_{k_i}^P T_{k_i} \right]}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} K_j W_{k_i}^B T_{k_i}}. \tag{2}$$

где  $\Pi_{KI}^A$ ,  $\Pi_{KI}^O$  – соответственно абсолютный и относительный потенциалы энергосбережения;  $W_{k_i}^B$ ,  $W_{k_i}^P$  – потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) соответственно до и после реализации энергосберегающего мероприятия в условных единицах измерения (если рассматривается экономия более одного вида ТЭР). Если рассматривается только один вид ТЭР, то в этом случае потенциал может рассчитываться в натуральных единицах;  $j$  – индекс вида ТЭР,  $j \in J$ ;  $K_j$  – коэффициент перевода натуральных единиц измерения в условные;  $T_{k_i}$  – период времени, для которого рассчитывается снижение расходов ТЭР для соответствующего энергосберегающего мероприятия.

Специфическим для существующих систем тягового электроснабжения является наличие системного эффекта [1]. Внедрение энергосберегающих мероприятий на низших классах напряжения вызывает дополнительное снижение потерь электроэнергии на более высоких классах напряжения в питающих линиях электропередач и трансформаторах. Величина этого дополнительного эффекта будет определяться характеристиками элементов, входящих в системы электроснабжения, а также всеми связями между ними. При этом потенциал энергосбережения системы электроснабжения представляет собой совокупность потенциалов энергосбережения составных элементов и может быть рассчитан как сумма значений потенциалов отдельных элементов.

Рассмотрим вопрос о реализации потенциала энергосбережения при использовании энергии рекуперации в условиях Днепропетровского метрополитена. В настоящее время эксплуатация современного энергосберегающего подвижного состава с плавным регулированием мощности открывает широкие возможности для использования режима рекуперации энергии практически до остановки транспортного средства. Решение вопроса относительно эффективности применения рекуперативного торможения, оптимального распределения, накопления или инвертирования рекуперативной энергии в метрополитенах связано с анализом режимов работы электропоездов, системы тягового электроснабжения и организации движения, что необходимо для обеспечения передачи энергии поездам, находящимся в режиме тяги.

До настоящего времени в метрополитенах Украины эксплуатируемый парк электропоездов преимущественно состоит из вагонов серии 81-717(714).5M с контактным регулированием мощности и реостатным торможением [2]. Отсутствие системы рекуперативного торможения на эксплуатируемых вагонах метрополитенов приводит к существенному увеличению общего количества потребляемой энергии на тягу за счет значительных потерь энергии в пуско-тормозных реостатах. Перспектива закупки новых вагонов для метрополитенов Украины и модернизация существующих системой рекуперации требует предварительной теоретической и экспериментальной оценки потенциала энергосбережения при использовании режимов рекуперации.

Теоретическая оценка резерва энергосбережения при использовании рекуперации энергии в системе электрической тяги осуществляется путем выполнения тяговых расчетов с решением тормозной задачи, где при известных параметрах участков, скорости начала торможения и массы поезда определяется максимальная энергия рекуперации поездов, которая может быть реализована в конкретных условиях эксплуатации. В таком случае максимальное количество энергии, которое может быть сгенерировано электропоездом при торможении для остановки, снижения или стабилизации скорости определяется уменьшением его кинетической и потенциальной энергий [3], т.е.

$$\max W_{\text{рек}} = 0,01073(1 + \gamma)Q(v_n^2 - v_k^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{экв}})S \eta_{\text{рек}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – вес поезда;  $(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся масс поезда;  $v_n, v_k$  – скорость соответственно в начале и конце торможения;  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению поезда при средней скорости на участке торможения;  $i_{\text{экв}}$  – эквивалентный уклон на участке торможения;  $S$  – длина тормозного пути;  $\eta_{\text{рек}}$  – КПД электропоезда в режиме рекуперации.

Исследования резервов снижения электропотребления на тягу при использовании на поездах рекуперативного торможения для условий Киевского метрополитена в [4], позволили определить предельные значения энергии рекуперации при торможениях. Авторами установлено, что на умеренно прямых участках возврат энергии в сеть при остановочных торможениях может достигать 60 % от затраченной энергии на тягу, а на участках со спусками возврат может в 2...3 раза превышать потребленную на разгон поезда энергию.

Однако в условиях реальной эксплуатации потенциал энергосбережения кроме параметров, входящих в выражение (3), существенно зависит от режимов тягового электропотребления в зоне рекуперации, что является случайным процессом и зависит от множества эксплуатационных и технических факторов. Вследствие этого, как правило, при торможениях реализуется энергия  $W_{\text{рек}} \leq \max W_{\text{рек}}$  равная

$$W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} k_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где  $k_{\text{исп}}$  – коэффициент использования энергии рекуперации.

При отсутствии на тяговых подстанциях (ТП) устройств приема избыточной энергии рекуперации (накопителей или инверторов) величина  $k_{\text{исп}}$  находится в диапазоне 0...1 и непосредственно определяется режимом напряжения на токоприемнике  $U_{\text{т}}(t)$  рекуперирующего поезда

$$k_{\text{исп}} U_{\text{т}}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{\text{т}}(t) < U_{\text{т}}^{\text{max}}, \\ 0, & \text{при } U_{\text{т}}(t) \geq U_{\text{т}}^{\text{max}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $U_{\text{т}}^{\text{max}}$  – предельно допустимое напряжение на токоприемнике и в контактной сети метрополитена [5].

Промежуточные значения величины  $k_{\text{исп}}$  в указанном диапазоне соответствуют случаю с ограниченным тяговым электропотреблением в зоне рекуперации, при котором имеет место избыточная (нереализованная) энергия рекуперации

$$\Delta W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} - W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} (1 - k_{\text{исп}}), \quad (6)$$

которая при отсутствии на ТП метрополитена устройств приема избыточной энергии рекуперации утилизируется в тормозных реостатах поездов, чем существенно снижается эффективность энергосбережения от рекуперации. При малых размерах и неблагоприятных графиках движения поездов (по условиям рекуперации) энергия  $\Delta W_{\text{рек}}$  может достигать 30...100 % от величины  $\max W_{\text{рек}}$  [6-9].

При отсутствии интеллектуальных принципов управления режимом движения поездов регулирование лишь их положений (графика движения) на участке не может гарантированно обеспечить на участ-

ках одновременного совпадения во времени процессов рекуперации и электропотребления. В таком случае даже при наличии систем рекуперации на всем парке вагонов метрополитена показатель возобновления энергии при существующих размерах и режимах движения поездов не превышает 15...20 % от значения, полученного по формуле (3) [6]. Поэтому для объективной оценки существующего потенциала рекуперации энергии метрополитенов должны применяться нечеткие или статистические методы, учитывающие их реальную структуру, размеры движения и графики электропотребления электропоездов, режимы напряжения в тяговой сети.

Частичное или полное разделение во времени процессов рекуперации и электропотребления может быть достигнуто за счет использования сверхмощных накопителей [7, 8], позволяющих полностью решить проблему использования избыточной энергии рекуперации. Кроме этого, внедрение накопителей в тяговом электроснабжении поездов позволит значительно стабилизировать тяговую нагрузку относительно системы внешнего электроснабжения и улучшить энергетические показатели электрической тяги на присоединениях к питающим сетям. При этом надо отметить, что задача оптимального расположения накопительного элемента в системе неавтономного электротранспорта на сегодня является нерешенной.

Возврат избыточной рекуперативной энергии через ТП метрополитена в питающую сеть 6 (10) кВ требует использования на ТП инверторов, а эффективность данного мероприятия существенно зависит от режимов нагрузок данной сети в точках подключения ТП. Учитывая, что энергия рекуперации электропоездов носит кратковременный характер, ее непосредственная передача в первичную энергосистему может вносить в нее значительные искажения и ухудшать работу нетяговых потребителей [9, 10].

Таким образом, потенциал энергосбережения в метрополитенах при использовании рекуперации электроэнергии зависит от многих, в том числе случайных, факторов, среди которых можно выделить [11]:

- степень комплектации парка вагонов метрополитена системой рекуперации;
- уклоны участков обращения и степень неоднородности расстояний между остановками;
- графики движения поездов;
- управление режимом движения поездов;
- режим напряжения на вводах ТП;
- наличие в системе тягового электроснабжения накопителей или инверторов электроэнергии.

### Цель работы

Теоретическая и экспериментальная оценка резервов энергосбережения от использования рекуперации электроэнергии в условиях Днепропетровского метрополитена.

### Основной материал

Оценка потенциала энергосбережения в метрополитене при использовании режима рекуперации энергии на базе Днепропетровского метрополитена была выполнена экспериментально, для чего были определены показатели расхода и генерации энергии соответственно в режимах тяги и электрического торможения. В связи с тем, что эксплуатируемый парк вагонов метрополитена 81-717(714).5М не оборудован системой рекуперации, оценка потенциала энергосбережения была выполнена по генерируемой энергии поездами при реостатном торможении по отношению ее к расходу на тягу.

На действующем участке метрополитена общей протяженностью 7,8 км с 6 станциями и средним уклоном 8 ‰ был выполнен ряд экспериментальных поездок в штатном режиме, согласно разработанным режимным картам движения электропоездов и в ускоренном режиме, соответствующем увеличенным размерам движения в перспективе. В штатном режиме время движения и средняя скорость между конечными пунктами составляли соответственно 11 мин. и 43 км/ч, а в ускоренном режиме 8 мин и 60 км/ч.

С помощью измерительного комплекса cDAQ-9174 National Instruments были измерены с частотой дискретизации 2 кГц напряжение на токоприемнике  $U(t)$  и ток вагона в режиме тяги  $I(t)$ , напряжение на группе двигателей  $U_{дв}(t)$  и их генераторный ток  $I_r(t)$  в режиме реостатного торможения, а также скорость движения электропоезда  $v(t)$ , состоящего из 5 вагонов. Принципиальная схема подключения бесконтактных разъёмных датчиков напряжений и токов ЛЕМ к силовой цепи вагона приведена на рис. 1.

В связи с тем, что эксплуатируемый парк вагонов Днепропетровского метрополитена не оборудован системой рекуперативного торможения, оценка показателей эффективности рекуперации была выполнена по уровню генерации поездами энергии при реостатом торможении. Для режима реостатного торможения на электропоездах используется мостовая схема с самовозбуждением и перекрестной схеме питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей. Схема подсоединения датчиков ЛЕМ для измерения параметров генерации энергии в режиме реостатного торможения вагона приведена на рис. 2.

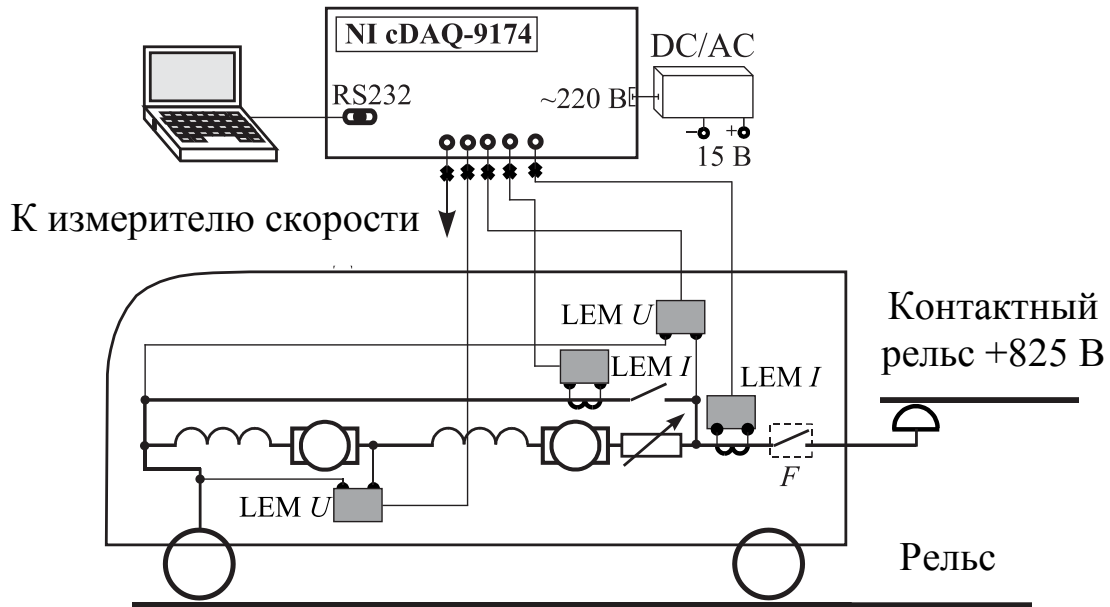


Рис. 1 Принципиальная схема подключения измерительных приборов к силовой цепи вагона электропоезда

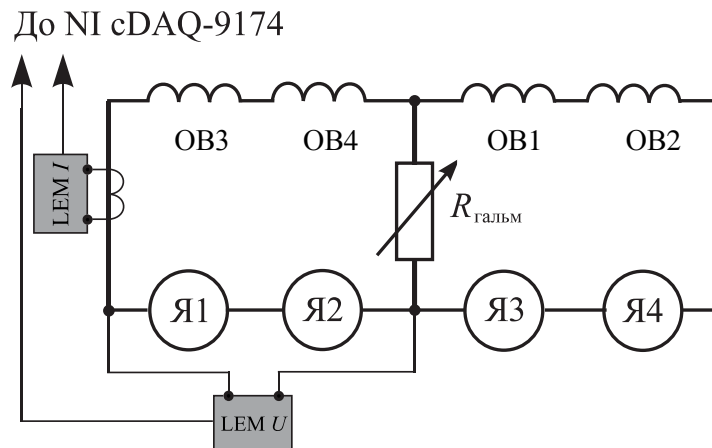


Рис. 2. Схема измерения параметров генерации энергии в цепи тяговых электродвигателей при реостатном торможении вагона

На рис. 3 и 4 представлены временные диаграммы, полученные при синхронизированных измерениях параметров потребления и генерации энергии вагоном электропоезда 81-717(714).5М в ускоренном режиме движения и согласно режимной карте в направлении ст. «Вокзальная» (средний спуск участка 8 ‰).

Поскольку на вагонах 81-717(714).5М отсутствуют счетчики электроэнергии (учет энергии на тягу поездов производится только по вводам ТП) то расход и потенциал рекуперации энергии были определены по результатам полученных осциллограмм в режиме тяги и электрического (реостатного) торможения поезда за время электропотребления (рекуперации)  $T$  по выражениям

$$W_{\text{тяги}} = m \int_0^T U(t)I(t)dt, \quad W_{\text{рек}} = m \sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{ни}}}^{t_{\text{ки}}} 2U_{\text{дв}}(t)I_{\text{г}}(t)dt, \quad (7)$$

где  $m$  – число вагонов в электропоезде;  $t_{\text{ни}}$ ,  $t_{\text{ки}}$  – соответственно моменты начала и окончания электрического торможения;  $n$  – количество остановок.

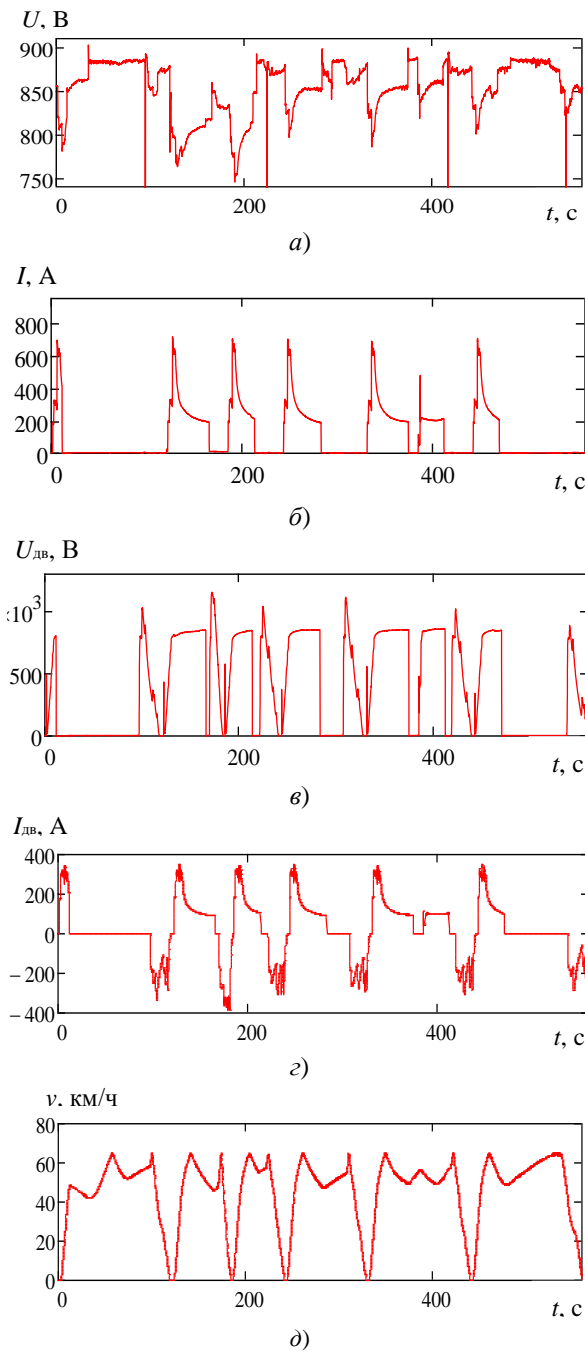


Рис. 3 – Параметры электропотребления, генерации и движения поезда в ускоренном режиме

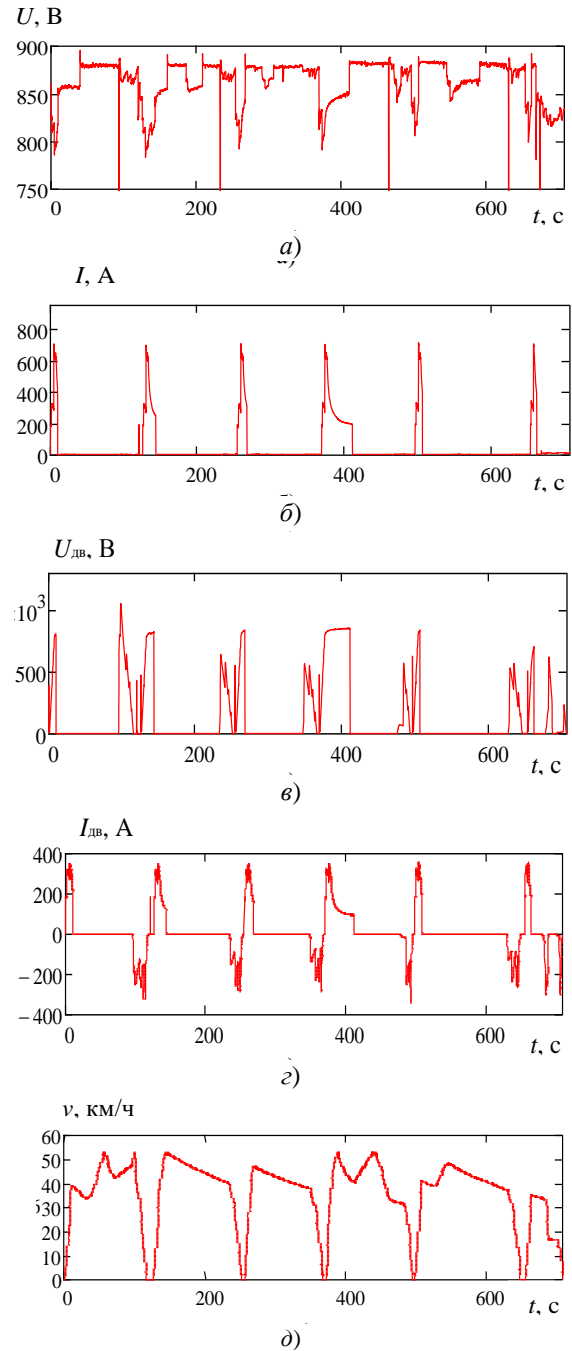


Рис. 4 – Параметры электропотребления, генерации и движения поезда по режимной карте

*a* – напряжение на токоприемнике  $U(t)$ , *б* – тяговый ток  $I(t)$ , *в* – напряжение группы двигателей  $U_{дв}(t)$ , *г* – ток группы двигателей  $I_{дв}(t)$ , *д* – скорость движения поезда  $v(t)$

В качестве показателя потенциала рекуперации электроэнергии электропоездов был принят коэффициент рекуперации, равный отношению генерируемой при электрическом торможении энергии к ее общему расходу, т.е.

$$k_{рек} = W_{рек} / W_{тяг} \quad (8)$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

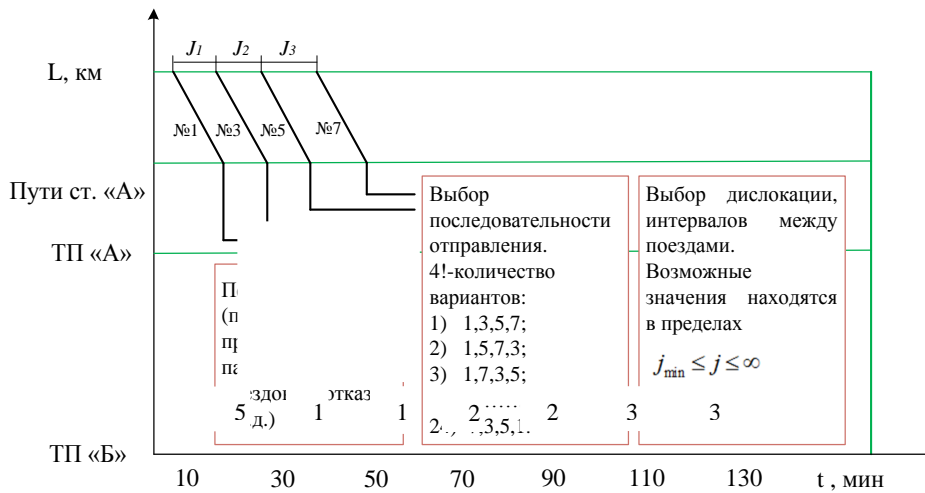
Направление	Режим движения поезда							
	Согласно режимной карте				Ускоренный			
	$W_{\text{тяг}},$ кВт·ч	$W_{\text{рек}},$ кВт·ч	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}},$ км/ч	$W_{\text{тяг}},$ кВт·ч	$W_{\text{рек}},$ кВт·ч	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}},$ км/ч
Вокзальная- Коммунарковская	36,52	5,25	0,144	40	56,12	18,95	0,338	46
Коммунарковская- Вокзальная	26,44	10,15	0,384	36	43,15	22,27	0,516	45

Необходимо отметить, что хотя и в ускоренном режиме потенциал рекуперации электроэнергии превышает потенциал при движении согласно режимной карты, однако удельное электропотребление на тягу в ускоренном режиме на 19,24 % в направлении ст. «Коммунарковская» и на 36,46 % в направлении ст. «Вокзальная» превышает удельное электропотребление при движении согласно режимной карты. Это объясняется тем, что средняя скорость в ускоренном режиме на 30 % выше и на соответствующий процент время хода по участку меньше.

На сегодня в Днепропетровском метрополитене размеры движения в зависимости от рабочего времени составляют 1-2,5 пары поездов, что почти исключает совпадение во времени режимов их электропотребления и электрического торможения на участках. При таких размерах и организации движения поездов энергия торможения поездов практически не может быть повторно использована на тягу даже при наличии современной системы рекуперации на эксплуатируемых вагонах.

Одним из решений задачи повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети является разработка такого графика движения поездов (ГДП), при котором осуществляется пропуск заданных размеров движения с наибольшим показателем  $k_{\text{исп}}$ , т.е. обеспечение напряжения на токоприемниках поездов при рекуперации в области допустимых значений.

Для выбора рационального расположения тяговых нагрузок на ГДП по использованию энергии рекуперации в тяговой сети следует рассмотреть ряд реально возможных вариантов графиков. Варианты графиков рассматриваются между смежными тяговыми подстанциями (ТП) в пределах периода следования расчетного поезда. Принцип повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети метрополитенов путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок представлен на рис. 5.



**Рис. 5. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок**

Одним из вариантов повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети метрополитенов за счет оптимизации ГДП может быть выбор рациональных интервалов между поездами [12]. Для постановки данной задачи необходимо ввести обозначения на ГДП в общем виде (рис. 6).

Время пропуска пакета  $T$  в общем виде определяется выражением

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + t_4 - t_3, \quad (9)$$

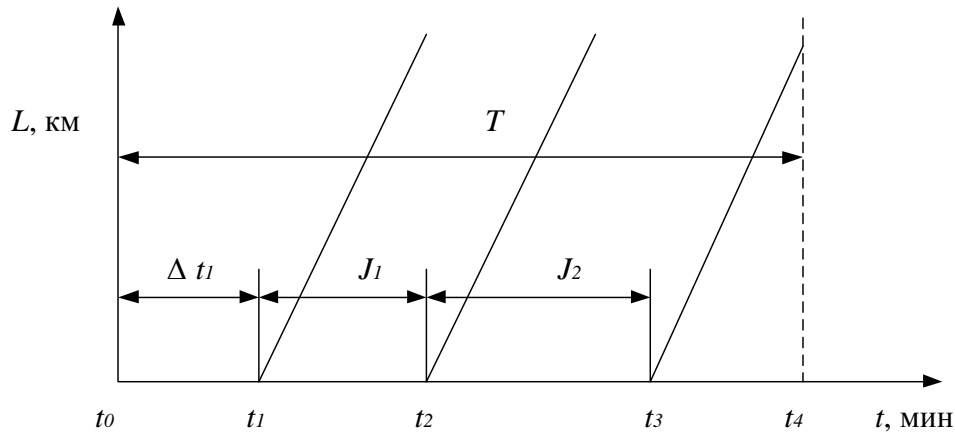


Рис. 6. Расчетная схема параметров графика движения поездов

где  $\Delta t_1$  — задержка времени отправления первого поезда в пакете, мин;  $J_1, J_2$  — межпоездные интервалы, мин;  $t_4 - t_3$  — время хода последнего поезда в пакете, мин.

Учитывая принятое ограничение, получаем уравнение, определяющее независимые параметры ГДП:

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - t_4 - t_3 = \text{const}. \quad (10)$$

Для обеспечения адекватного режима моделирования влияния параметров транспортного потока в метрополитене на эффективность использования энергии рекуперации поездов необходимо поддерживать сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях постоянной, что практически невозможно при данных размерах движения на действующем участке.

Таким образом, при внедрении системы рекуперативного торможения на подвижном составе Днепропетровского метрополитена, повышение эффективности использования энергии рекуперации при существующих низких размерах движения поездов может быть эффективно реализовано за счет оптимизации ГДП по рассмотренным критериям. В таком случае необходимо использование на ТП метрополитена инверторов или накопителей энергии, что требует соответствующего технико-экономического обоснования.

### Выводы.

В условиях Днепропетровского метрополитена существует значительный резерв энергосбережения от применения рекуперации энергии, который составляет соответственно 14...34 % в прямом (на подъеме 8 %) и 38...52 % в обратном (на соответствующем спуске) направлениях, т.е. в среднем 26...43 % от электропотребления на тягу поездов. На сегодня этот резерв не может быть реализован в связи с отсутствием систем рекуперативного торможения на эксплуатируемом парке подвижного состава метрополитена и технических средств эффективного хранения (распределения) рекуперативной энергии при малых размерах движения поездов (1-2,5 пары поездов).

### Список литературы

1. Кузнецов В. Г., Костюковский Б. А. Оценка потенциала энергосбережения систем тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». — 2012. — № 26. — С. 109-116.
2. Руководство по эксплуатации вагонов метрополитенов моделей 81.714.5 и 81.717.5 / Акционерное общество «Метровагонмаш». — М.: Транспорт, 1993. — 447 с.
3. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. — М.: Транспорт, 1983. — 447 с.
4. Сулим А.А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А.А. Сулим. — Научно-производственный журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». — Кременчуг.: КНУ им. М. Остроградского, 2013. Вып. № 2/2013 (22), ч. 2. — С. 282-285.
5. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 — [Действует с 1977-01-01] — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 3 с.



6. Сопов В.И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – URL:<http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
7. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.В. Шевлюгин; МГУПС. – Москва, 2014. – 49 с.
8. Сулим А.А., Сичев С.Д., Распопин В.Р. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сичев, В.Р. Распопин. – Материалы X междунаучной конференции молодых ученых и специалистов «Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации». КНУ им. М. Остроградского. – Кременчуг, 2012. – С. 344.
9. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2013. – Вып. 38. – С. 186-189.
10. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
11. Szelağ A., Maciołek T., Drajek Z., Patoka M. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. № 3, 2011. P.34-42.
12. Кузнецов В. Г., Калашников К.А. Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 104-109.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Мухомою А.М.*

УДК 541.136

**Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, О.И. Ширман**

*(Украина, г.Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАРЯДНОГО ТОКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ В СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ**

***Анотація.** Представлено результати дослідження впливу постійного магнітного поля певної структури на параметри електрохімічного процесу у свинцево-кислотних акумуляторах. Показано можливість використання виникаючих в акумуляторі магнітогідродинамічних явищ для підвищення ефективності використання зарядного струму електрохімічними накопичувачами енергії на основі свинцево-кислотних акумуляторних батарей.*

***Ключові слова:** свинцево-кислотна акумуляторна батарея, електрохімічний процес, поляризаційний опір, магнітне поле, магнітофорез, сила Лоренца.*

***Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния постоянного магнитного поля определенной структуры на параметры электрохимического процесса в свинцево-кислотных аккумуляторах. Показана возможность использования возникающих в аккумуляторе магнитогидродинамических явлений для повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии на основе свинцево-кислотных аккумуляторных батарей.*

***Ключевые слова:** свинцево-кислотная аккумуляторная батарея, электрохимический процесс, поляризационное сопротивление, магнитное поле, магнитофорез, сила Лоренца.*

***Abstract.** The investigation results on the influence of constant magnetic field with the specific structure on the lead-acid batteries electrochemical processes are presented. It's shown the possibility for using the MHD phenomena which occurs in the lead-acid battery for more effective charge current using by electrochemical energy storage on the base of these batteries.*

***Keywords:** lead-acid battery, electrochemical process, polarization resistance, magnetic field, magnetophoresis, Lorentz force.*

### **Введение.**

Возобновляемые источники энергии все более широко используются в благоприятных для этого регионах, как в сетевой, так и в автономной энергетике, что позволяет снизить зависимость от органических источников энергии и повысить надежность энергоснабжения особо важных и отдаленных объектов.

Особенностью использования солнечной энергии являются суточные и сезонные неравномерности генерации электроэнергии, поэтому энергоустановки на базе фотоэлектрических преобразователей должны снабжаться системами аккумулирования энергии при высоком уровне солнечной радиации с отдачей её потребителю при недостаточном уровне радиации.

В настоящее время наряду с использованием аккумулирующих систем с применением электрохимических накопителей на основе литий-ионных и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АБ) ведутся работы по созданию новых накопителей энергии на основе водородного цикла, проточных ванадиевых редокс-батарей, топливных элементов и др. Авторы работы [1] провели расчетно-аналитическую оценку различных типов накопителей электроэнергии, а также сравнение различных технологий её аккумулирования. Приведенные в [1] результаты оценок показали, что для длительного хранения в установках на базе возобновляемых источников наиболее перспективными являются две системы: проточные редокс-батарей и водородный цикл. Вместе с тем обе эти системы имеют серьезные недостатки, затрудняющие практическую реализацию этих технологий – низкая эффективность использования первичной энергии для водородного цикла и низкие массогабаритные показатели для проточных накопителей.

В связи с этим актуальной является задача совершенствования существующих технологий аккумулирования энергии с использованием электрохимических накопителей на основе литий-ионных и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для их практического применения в ближайшей перспективе. При этом должное внимание необходимо уделить накопителям на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, которые существенно выигрывают по сравнению с литий-ионными по ценовым показателям и хорошо отработанной унифицированной технологией производства.

Накопители на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей могут успешно применяться в стационарных электроустановках на базе фотоэлектрических преобразователей, в которых нет ограничения на массогабаритные показатели, однако следует отметить, что наряду с указанными преимуществами свинцово-кислотные аккумуляторные батареи имеют существенный недостаток, заключающийся в длительном времени зарядки, составляющем около 16 – 20 часов.

По данным авторов работы [2] для зарядки свинцово-кислотной аккумуляторной батареи до уровня 80 % заряженности требуется около 3-х часов, а для достижения 100 % уровня заряженности необходимо еще около 17 часов. Такая продолжительность зарядки на второй стадии, т.е. от 80 % до 100 % уровня, объясняется спецификой поведения электрохимической системы, которая характеризуется снижением коэффициента использования зарядного тока, вследствие повышения поляризационного сопротивления.

Указанная особенность свинцово-кислотных аккумуляторов не позволяет в полной мере использовать энергию солнечной батареи при их зарядке. Особенно остро встает вопрос эффективного использования энергии солнечной батареи при неблагоприятных условиях ее работы.

**Цель работы** – исследование возможности повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии путем воздействия на них магнитным полем.

### Экспериментальные результаты и их краткое теоретическое обоснование.

Химический источник тока представляет собой сложную электрохимическую систему, в которой протекают электрохимические реакции, в совокупности представляющие электрохимический процесс.

Скорость протекания электрохимических реакций в общем случае определяется изменением концентрации реагирующих веществ во времени

$$v = -\frac{dC}{dt} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

где  $C$ ,  $N$ ,  $V$  – концентрация, количество реагирующих частиц и объем соответственно.

Физической мерой скорости реакции является плотность электрического тока.

Скорость электрохимического процесса определяется прохождением трех стадий: - перенос ионов или электронов к поверхности электрода; - электрохимические реакции; - удаление от поверхности электрода в электролит продуктов электрохимических реакций.

Первую и третью стадии называют диффузионной стадией процесса, которая определяет суммарную скорость электрохимической реакции. Ускорению диффузионной стадии способствует энергичное перемешивание электролита, за счет чего снижается диффузионное сопротивление электрохимической системы. В отсутствие принудительного перемешивания концентрация электролита изменяется естественной конвекцией, вызванной неравномерным распределением теплоты реакции.

Следовательно, одним из параметров электрохимического процесса, посредством которого можно управлять плотностью зарядного тока, является скорость протекания электрохимических реакций.

Основными факторами электрохимической природы, ограничивающими скорость зарядки АБ и влияющими на энергозатраты, являются:

- конечное значение плотности тока, ограниченное количеством реагирующих частиц и скоростью их диффузии, как это следует из (1);
- наличие на границе электрод-электролит двойного электрического слоя (ДЭС), представляющего собой ионный барьер для носителей заряда и требующего дополнительных энергозатрат на его преодоление;
- явление концентрационной поляризации, связанное с сопротивлением диффузионного слоя в приэлектродной области и вызвано неравномерностью распределения ионов в объеме электролита.

Ослабить влияние вышеперечисленных факторов на скорость протекания электрохимического процесса в АБ и, в конечном итоге, на скорость его зарядки можно путем воздействия на процесс внешними физическими факторами, в частности магнитным полем.

Нами проведены экспериментальные исследования эффектов воздействия постоянного магнитного поля на электрохимический процесс в свинцово-кислотных аккумуляторах и предложено теоретическое обоснование механизмов воздействия, основанное на физических представлениях об эффектах влияния магнитного поля на движущиеся электрические заряды [3], в нашем случае на ионы в объеме электролита, которое изложено ниже.

При совместном воздействии на ионы электрического и магнитного полей в объеме электролита возникают магнитогидродинамические явления, вызывающие эффекты магнитофореза и силу Лоренца  $F_L$ . При этом действующая на ионы результирующая сила описывается векторным уравнением

$$F_L = g \cdot (\bar{E} + [\bar{v} \times \bar{B}]), \quad (2)$$

где  $g$  – заряд иона,  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\bar{B}$  – вектор индукции магнитного поля,  $\bar{v}$  – вектор скорости движения иона.

Применительно к электрохимической системе скорость движения ионов в электролите определяется из соотношения

$$v = K \cdot g \cdot E,$$

где  $K$  – коэффициент затухания скорости движения ионов в жидкости, связанный с коэффициентом диффузии соотношением

$$K = \frac{D}{kT},$$

где  $D$  – коэффициент диффузии равен количеству вещества, проходящему через сечение в  $1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> в секунду при разности концентраций  $\Delta C$  равной единице,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

После соответствующих преобразований выражение для силы Лоренца (2), действующей на ионы в электролите, принимает вид

$$F_L = \frac{g^2}{k \cdot T \cdot c} \cdot D \cdot B \cdot E$$

где  $c$  – скорость света, откуда прослеживается прямая связь силы Лоренца с коэффициентом диффузии и скоростью электрохимической реакции в соответствии с (1).

Под действием силы Лоренца заряды совершают движение по винтовой траектории с радиусом окружности

$$R = \frac{v \cdot T}{2\pi} = \frac{m \cdot v_{\perp}}{[g \cdot B]} \quad (3)$$

и с шагом

$$h = v_{\parallel} \cdot T, \quad (4)$$

где  $m$  – масса заряда,  $T$  – период вращения,  $v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha$  – скорость заряда перпендикулярно направлению силы Лоренца,  $v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha$  – скорость заряда параллельно направлению силы Лоренца,  $\alpha$  – угол между вектором движения заряда и вектором индукции магнитного поля.

Основной вывод из теоретических обоснований можно сформулировать следующим образом. При воздействии магнитного поля на ионы в электролите аккумулятора возникает магнитофорез, вызывающий дрейф ионов в область повышенной индукции магнитного поля, вследствие чего происходит дополнительный, по отношению к естественному, массоперенос участников электрохимической реакции и конвективное движение ионов, то есть возникает явление магнетоконвекции без затрат дополнительной энергии внешнего источника тока, т.е. энергии солнечной батареи. Дрейф ионов нарушает структуру двойного электрического слоя на границе раздела электролит-электрод, облегчая его преодоление зарядами при включении зарядного тока, а также понижает внутреннее активное сопротивление и сопротивление электрохимической поляризации за счет дополнительного массо- и электропереноса в области протекания электрохимических реакций.

После включения зарядного тока явление магнетоконвекции усиливается силой Лоренца, воздействующей на движущиеся ионы при условии взаимно-перпендикулярной ориентации векторов скорости ионов, то есть направления электрического тока в аккумуляторе, и вектора магнитной индукции (2).

Под действием силы Лоренца траектория движения ионов изменяется с упорядоченно прямолинейной на винтовую с определенным радиусом (4) и шагом (5), что приводит к принудительному перемешиванию ионов и выравниванию их концентрации в порах активных масс электродов и в межэлектродном объеме, а также к увеличению общей площади реагирующей поверхности активных масс.

Ожидаемыми признаками проявления совокупного воздействия указанных эффектов на ионы в объеме электролита, выраженными через параметры электрохимического процесса, могут быть снижение активного внутреннего сопротивления аккумулятора вследствие облегчения преодоления ионами сопротивления двойного электрического слоя на границе раздела электрод-электролит за счет эффекта магнитофореза и снижения диффузионного сопротивления в результате выравнивания концентрации ионов в объеме электролита при их перемешивании под действием силы Лоренца, а также увеличение площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс в связи с изменением траектории движения ионов.

Приведенное теоретическое обоснование подтверждает возможность использования эффектов воздействия магнитного поля на ионы в объеме электролита в качестве механизмов управления электрохимическим процессом с целью повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Экспериментальные исследования проявления эффектов воздействия магнитного поля на протекание электрохимического процесса проводились с применением импульсного гальваностатического метода [4], реализованного в стенде для автоматизированного контроля состояния химических источников тока [5]. Для этих целей стенд дополнительно укомплектован магнитной системой (см. рис. 1).

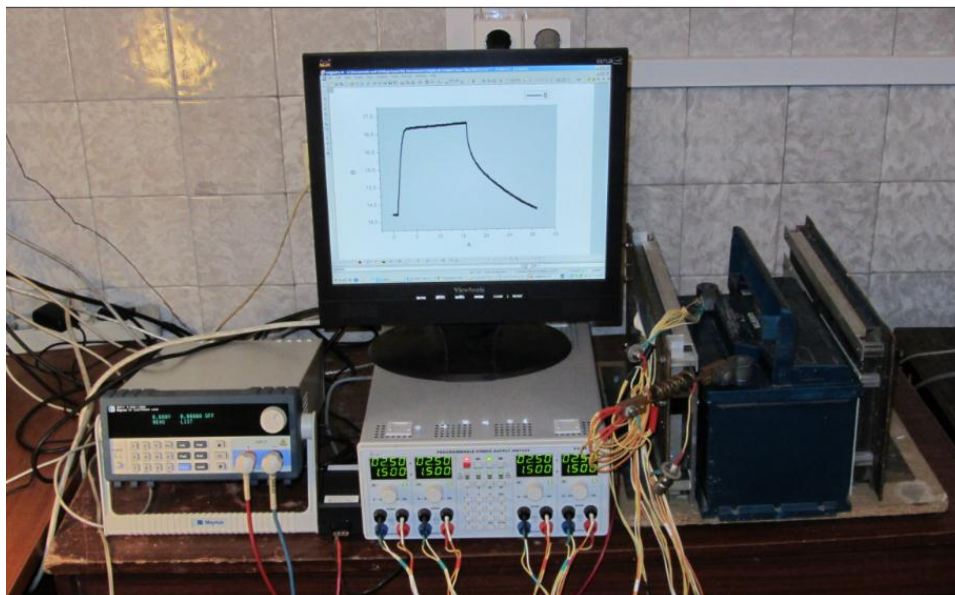


Рис. 1 Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния электрохимических накопителей энергии импульсным методом (магнитная система справа)

Основу магнитной системы составляют постоянные магниты прямоугольной формы, расположенные в определенной комбинации на ферромагнитных панелях. Расчет требуемой величины индукции магнитного поля проводился, исходя из сведений, что для получения эффекта активации водных сред

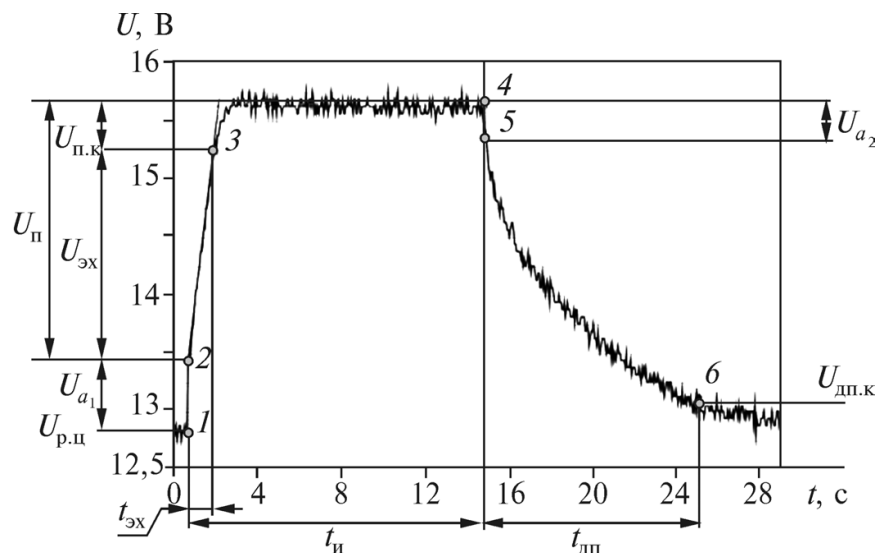
индукция воздействующего магнитного поля должна иметь величину не менее 20 мТл. Было определено минимальное значение величины магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов величиной 200 – 300 мТл, позволяющее получить величину магнитной индукции в центре пространства расположения АБ не менее 20 мТл.

Суть метода исследований заключается в подаче на АБ тестового зарядного импульса с заданными значениями амплитуды и длительности и регистрации сигнала отклика АБ на тестовый импульс в виде функциональной зависимости величины напряжения на его клеммах от времени. Разработанные методы обработки сигнала отклика [4] позволяют получить информацию о параметрах электрохимического процесса, а также о его кинетике, включающей отмеченную выше закономерную последовательность стадий протекания процесса и представленную в более подробном рассмотрении, а именно: падение напряжения на внутреннем активном сопротивлении источника в момент подачи на него импульса, стадию электрохимической поляризации, стадию концентрационной поляризации, падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении в момент снятия импульса и стадию деполяризации, или разряда псевдоемкости электрохимической системы после снятия импульса.

При этом падение напряжения на внутреннем активном сопротивлении носит название резистивной поляризации, электрохимическая поляризация вызвана преодолением зарядами сопротивления двойного электрического слоя и активизацией электрохимических реакций при подаче зарядного импульса, а концентрационная поляризация, вызванная диффузионным сопротивлением, возникает по причине торможения переноса продуктов реакции в приэлектродном диффузионном слое, в результате чего их концентрация в поровом пространстве активных масс электродов отличается от концентрации в межэлектродном объеме электролита.

Типичная форма сигнала отклика АБ на зарядный импульс приведена на рис.2, где обозначены параметры процесса:  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$  – падение напряжения на активном сопротивлении в момент подачи и снятия импульса соответственно,  $U_{эx}$  – напряжение электрохимической стадии поляризации,  $U_{к}$  – напряжение концентрационной стадии поляризации,  $U_{п}$  – суммарное напряжение поляризации,  $U_{дп.к}$  – напряжение деполяризации после снятия импульса,  $t_{эx}$  – время протекания электрохимической стадии поляризации, а цифрами обозначены участки сигнала отклика, соответствующие стадиям протекания электрохимического процесса.

Указанные параметры в совокупности дают достаточно полную информацию о динамике электрохимического процесса при воздействии на АБ внешними физическими факторами, в частности магнитным полем. Эффекты воздействия определялись путем сравнения значений параметров процесса при помещении АБ в магнитное поле и вне его.



**Рис. 2 Типичная форма сигнала отклика аккумуляторной батареи на зарядный импульс тока**

При сравнительной оценке значений параметров процесса во внимание принимались следующие признаки проявления ожидаемых эффектов воздействия магнитного поля на электрохимический процесс, которые находят физическое объяснение:

- изменения величины крутизны  $K$  электрохимической составляющей  $U_{эx}$  поляризации, которая характеризует скорость протекания электрохимических реакций при прохождении потока зарядов через

## Энергобережения та энергоефективність

двойной электрический слой в его плотной части и определяется как отношение величины падения напряжения  $U_{\text{эx}}$  к времени протекания  $t_{\text{эx}}$  электрохимической стадии:

$$K = \frac{U_{\text{эx}}}{t_{\text{эx}}}$$

- уменьшения активного сопротивления АБ, наблюдаемые соответствующими уменьшениями значений  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ , что вызвано увеличением площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс электродов за счет изменения траектории движения зарядов под действием силы Лоренца, а также за счет активизации процессов массо- и электропереноса в электролите, вызванной эффектом магнитофореза.

- понижение величины напряжения концентрационной составляющей поляризации  $U_K$  за счет перемешивания зарядов в электролите под действием силы Лоренца и выравнивания их концентрации в поровом пространстве активных масс электродов и в межэлектродном объеме электролита.

- площадь фигуры  $S$  под линией спада напряжения (деполяризации) после снятия зарядного импульса, величина которой пропорциональна части энергии, накопленной аккумулятором за время действия зарядного импульса и отображает скорость саморазряда аккумулятора

В качестве примера в таблице 1 приведены значения параметров процесса в опытных образцах аккумуляторных батарей без воздействия магнитного поля (а) и при воздействии (б), а в таблице 2 приведено их сравнение в процентном выражении, где отрицательные значения указывают на уменьшение величины соответствующего параметра в результате воздействия магнитного поля.

Таблица 1.

**Параметры электрохимического процесса опытных образцов АБ без воздействия магнитным полем (а) и с воздействием (б)**

Тип батареи (торговая марка)		$U_{a1}, (В)$	$U_{ex}, (В)$	$t_{ex}, (с)$	$K=U_{ex}/t_{ex},$ (В/с)	$U_K, (В)$	$U_{a2}, (В)$	$S$
6СТ-60 (Forse)	(а)	0,560	1,9375	1,300	1,490	0,313	0,313	10,488
	(б)	0,490	1,9275	1,250	1,542	0,288	0,293	10,738
6СТ-65 (Ве- ста)	(а)	0,660	1,4300	0,900	1,589	1,254	0,323	8,713
	(б)	0,563	1,4375	0,700	2,054	0,861	0,272	8,941
6СТ-55 (Fire ball)	(а)	0,595	0,869	1,078	0,806	0,273	0,327	4,863
	(б)	0,532	1,085	1,084	1,001	0,208	0,254	5,841

Таблица 2.

**Сравнительная оценка параметров опытных образцов АБ**

Тип батареи (торговая марка)	$\Delta U_{a1}, \%$	$\Delta K, \%$	$\Delta U_K, \%$	$\Delta U_{a2}, \%$	$\Delta S, \%$
6СТ-60 (Forse)	-12,500	3,463	-8,00	-6,400	2,384
6СТ-65 (Ве-ста)	-14,772	29,246	-31,34	-15,814	2,617
6СТ-55 (Fire ball)	-10,588	24,165	-23,81	-22,324	20,111

Данные таблицы 2 наглядно отражают признаки проявления эффектов воздействия магнитного поля на параметры электрохимического процесса, а именно:

- уменьшение величины падения напряжения  $\Delta U_{a1}$  и  $\Delta U_{a2}$ , соответствующие уменьшению активного сопротивления АБ, основной вклад в которое вносит сопротивление электролита;
- увеличение величины крутизны  $\Delta K$  электрохимической стадии поляризации  $U_{\text{эx}}$ ;
- уменьшение величины напряжения концентрационной поляризации  $\Delta U_K$ , соответствующее уменьшению диффузионного сопротивления;
- увеличение площади фигуры  $S$ .

Приведенные результаты сравнительной оценки являются доказательством возникновения в АБ магнитогидродинамических явлений, способствующих повышению эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии.

**Выводы.**

Таким образом, результаты экспериментальных исследований воздействия магнитного поля на свинцово-кислотные батареи подтвердили возникновение эффектов магнитофореза и силы Лоренца и их влияние на кинетику протекающего в аккумуляторной батарее электрохимического процесса, что позволяет использовать их в качестве механизмов повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическим накопителем энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в электроустановках на базе фотоэлектрических преобразователей, а также позволит ускорить процесс зарядки батарей.

**Список литературы**

1. Михайлин С.В. Решения для длительного хранения энергии, выработанной солнечными энергоустановками [Текст] / С.В. Михайлин, И.Т. Пар, О.С. Попель, А.Б. Усанов, А.Б. Тарасенко, В.Ф. Титов // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. – 2014. – №33. – С.36–45.
2. Каменев Ю.Б. Работа свинцово-кислотного аккумулятора в условиях постоянного недозаряда [Текст] / Ю.Б. Каменев, М.В. Лушина, И.А. Васина // Электрохимическая энергетика. – 2008. – Т.8, №3, – С. 146 – 151.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество [Текст] / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
4. Дзензерский В.А. Контроль состояния химических источников тока [Текст] / В.А. Дзензерский, С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман. – К.: Наукова думка, 2014. – 132 с.
5. Плаксин, С.В. Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом [Текст] / С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман // Горная электромеханика и автоматика. – 2012. – №89, – С. 58–63.

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

### *Відомості про авторів*

Алпатов Федір Михайлович	Студент групи ФФ52 Національного технічного університету України «КПІ», Фізико-технічний інститут, м. Київ	76
Багдасарян Сергій Саркісович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електрична інженерія» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ	51
Білухін Дмитро Сергійович	Канд. техн. наук, доцент, кафедри "Електрорухомий склад залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна	15
Боровик Роман Олександрович	Асистент кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	47
Бородай Валерій Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	47; 54
Босий Дмитро Олексійович	Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	3; 9
Вініченко Антон Віталійович	Інженер, м. Дніпропетровськ	68
Губський Петро В'ячеславович	Аспірант кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	81
Дороніна Марина Анатоліївна	Асистент кафедри "Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	36
Житник Микола Явтухович	Науковий співробітник відділу систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг»	89
Кардаш Дмитро Олександрович	Студент групи ЕАПУМ-14 ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ	51
Ковальов Олександр Робертович	С.н.с., старший викладач кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	54
Колларов Олександр Юрійович	Канд. техн. наук, завідувач кафедри «Електрична інженерія» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Красноармійськ,	51
Колихаєв Євген Геннадійович	Аспірант кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	81
Комісаров Юрій Олексійович	Старший викладач кафедри "Гірнична механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	68
Котлярова Євгенія Володимирівна	Інженер-конструктор Державного підприємства КБ "Південне", м. Дніпропетровськ	47



### Відомості про авторів

Кузнєцов Віталій Вадимович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електротехніка та електропривод" Національної металургійної академії України, м. Дніпропетровськ	3
Кузнєцов Валерій Геннадійович	Д-р техн. наук, професор кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	81
Маргітич Віктор Сергійович	Магістр гр. СА-15м, Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	26
Матусевич Олександр Олександрович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	20
Міргородський Олександр Володимирович	Аспірант кафедри "Системний аналіз та управління" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	26
Олійник Ольга Юрїївна	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегровані технології і метрології» ДВНЗ «Український державного хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ	41
Панченко Віктор Іванович	Доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	59
Плаксін Сергій Вікторович	Д-р ф. -м. наук, с.н.с., зав. відділом систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг»	89
Саблін Олег Ігорович	Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	81
Самуся Сергій Володимирович	Канд. техн. наук, науковий співробітник відділу гірничої термоаеродинаміки та автоматизованих систем Інституту геотехнічної механіки НАН України ім. М.С. Полякова, м. Дніпропетровськ	68
Сиченко Віктор Григорович	Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна	3
Скрипник Альона Юрїївна	Студентка електротехнічного факультету Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	59
Слесарєв Володимир Вікторович	Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Системний аналіз та управління" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	26
Титова Олена Василівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегровані технології і метрології» ДВНЗ «Український державного хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ	41
Федоряченко Дар'я Олександрівна	Аспірантка кафедри "Гірнична механіка" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	68

### *Відомості про авторів*

---

Харламова Юлія Миколаївна	Аспірантка кафедри "Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	31
Ципленков Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ	59
Швачка Олександр Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегровані технології і метрології» ДВНЗ «Український державного хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ	41
Ширман Оксана Ігорівна	Інженер I кат. відділу систем керування Інституту транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг»	89

## 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>	<b>Длина, м</b>
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 %.**
- 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)**
- Материалы принимаются только при наличии **экспертного заключения, рецензии и заявления на публикацию статьи.**
- Решение об опубликовании статьи принимает редакционная коллегия.
- Принятые в печать материалы авторам **не возвращаются.**
- 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>В.Г. Сиченко, Д.О. Босий, В.В. Кузнецов.</b> Якість електричної енергії в мережах нетягових споживачів електрифікованих залізниць . . . . .	3
<b>Д.О. Босий.</b> Взаємодія систем тягового з системами зовнішнього електропостачання. . . . .	9
<b>Д.С. Белухин.</b> Вариант модернизации вспомогательных электроприводов электровозов переменного тока. . . . .	15
<b>О.О. Матусевич.</b> Безперервне вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій залізниць. . . . .	20

### **ЧАСТИНА II. АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

<b>В.В. Слесарев, А.В. Миргородский, В.С. Маргитич.</b> Интеллектуальный анализ данных мониторинга аварийного состояния шахты. . . . .	26
<b>Ю.Н. Харламова.</b> Оценка эффективности симметричного алгоритма метода тяжелого шарика при поиске глобальных экстремумов тестовых функций. . . . .	31
<b>М.А. Доронина.</b> Использование возмущений волновой структуры для повышения точности восстановления входного запаздывания и входного сигнала средства измерения. . . . .	36
<b>А.И. Швачка, Е.В. Титова, О.Ю. Олейник.</b> Развитие информационной базы асупт принятия решения в условиях множественного выбора. . . . .	41

### **ЧАСТИНА III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

<b>В.А. Бородай, Р.А. Боровик, Е.В. Котлярова.</b> Демпфирование ударных нагрузок горно-металлургических механизмов средствами синхронного привода. . . . .	47
<b>С.С. Багдасарян, О.Ю. Колларов, Д.О. Кардаш</b> Асинхронний електроповід каретки літальної пилки з адаптивним регулятором положення змінної структури. . . . .	51
<b>В.А. Бородай, А.Р. Ковалев.</b> Широотно-импульсный регулятор с координатно-фазовым управлением скважности. . . . .	54
<b>В.І.Панченко, Д.В.Ципленков, О.Ю. Скрипник</b> Генераторів вітроенергетичних установок. . . . .	59
<b>С.В. Самуся, Ю.А. Комисаров, Д.А. Федоряченко, А.В. Виниченко.</b> Моделирование динамических процессов мобильной аварийно-спасательной подъемной установки. . . . .	68

### **ЧАСТИНА IV. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

<b>Ф.М.Алпатов.</b> Возобновляемые источники энергии и излучение солнца: проблемы, ресурсы, перспективы. . . . .	76
<b>В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев.</b> Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах днепропетровского метрополитена. . . . .	81
<b>Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, О.И. Ширман.</b> Повышение эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии в солнечных энергоустановках. . . . .	89

<b>Відомості про авторів</b>	96
------------------------------	----

<b>Требования к публикациям</b>	99
---------------------------------	----

Науково-технічний збірник  
**Гірнича електромеханіка та автоматика**

Випуск 95

Технічний редактор  
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 28.12.15. Формат 30x42/4. Папір Captain.  
Ризографія. Ум. друк. арк. 6,3. Обл.-вид. арк.6,1.  
Тираж 300 прим. Зам. №

ISSN 0201-7814

Надруковано з готових оригінал–макетів  
у редакційно–видавничому комплексі  
Національного гірничого університету

49005, м. Дніпропетровськ, просп. Д. Яворницького, 19.

**Електротехнічний факультет**  
*Державного ВНЗ „Національний гірничий університет”*  
запрошує у 2016р. на навчання за спеціальностями:

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (підготовка бакалаврів, спеціалістів, магістрів)

Спеціалізації:

- електротехнічні системи електроспоживання промислових підприємств – професійна сфера діяльності пов'язана із технічними системами виробництва, транспортування, розподілу та обліку електричної енергії;

- енергетичний менеджмент – додатково навчаються методам раціонального використання і збереження будь-яких матеріальних та енергетичних ресурсів;

- нетрадиційні та відновлювані джерела енергії – додатково пропонується оволодіння навичками проектування, впровадження та експлуатації альтернативних джерел, які базуються на використанні енергії сонця, повітря, землі та т.і.;

- електромеханічні системи автоматизації та електропривод загально промислових установок – сфера професійної діяльності пов'язана із технічними системами механізації та автоматизації промислових підприємств із використанням автоматизованого електропривода, до складу якого входять силові перетворювачі, аналогова та дискретна електроніка керована локальними програмними засобами;

- електромеханічні системи геотехнічних виробництв, де додатково передбачається освоєння специфіки геотехнічного виробництва та надається право працевлаштування на підприємствах гірничої промисловості.

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (підготовка бакалаврів, спеціалістів, магістрів) – професійна сфера діяльності пов'язана із технічними засобами виміру, контролю, реєстрації інформаційних потоків, питаннями стандартизації і сертифікації в будь-яких сферах життєдіяльності людини.

035 Філологія (переклад) (підготовка бакалаврів, спеціалістів, магістрів) – сфера професійної діяльності пов'язана із перекладом і редагуванням технічних текстів, усним та письмовим перекладом і в подальшому отримання права на викладацьку діяльність.

Електротехнічний факультет має більш ніж 100-річний досвід наукової та навчальної діяльності. Лабораторії кафедр укомплектовано сучасним обладнанням вітчизняних та закордонних компаній. Факультет пропонує студентам навчання англійською мовою і проходження практики та стажування у європейських вузах зокрема Польщі та Німеччини.

**Адресата університету:** ДВНЗ “НГУ”, пр. К.Марса 19, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005.

**Приймальна комісія:** (056) 745-05-60, (0562) 47-24-57, e-mail: pk@nmu.org.ua;

**Консультаційні центри з питань вступу:**

кафедри систем електропостачання – 7 корпус, кімната 7/901; тел: (0562) 47-39-95;

кафедри відновлюваних джерел енергії – 1 корпус, кімната 1/32; тел: (066) 774-63-09;

кафедри електропривода – 1 корпус, кімната 1/45; тел: (0562) 47-25-00;

кафедри метрології та інформаційно-вимірювальних технологій – 1 корпус, кімната

1/98; тел: (056) 373-07-46;

кафедри перекладу – 4 корпус, кімната 4/78; тел: (0562) 47-16-54.



СПЕЦІАЛІЗАЦІЯ

# "НЕТРАДИЦІЙНІ ТА ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ"



Галузь знань: **14** – Електрична інженерія.

Спеціальність: **141** – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**Освітньо-кваліфікаційні рівні:**

**бакалавр (базова вища освіта) 4 роки, з можливістю подальшого отримання повної вищої освіти (магістр) – 1.5 роки навчання.**

**Кваліфікація фахівців:**

**бакалавр** – фахівець у галузі електротехніки;

**магістр** – професіонал у галузі електротехніки, дослідник.

**Сфера діяльності:** дослідження, розробка, виробництво та експлуатація систем енергопостачання з нетрадиційними та відновлюваними джерелами енергії; проектування, виготовлення, налагодження, експлуатація і ремонт електро-обладнання та мереж промислових та сільськогосподарських виробництв.



**Первинні посади випусників:** інженер-енергетик та інженер-електрик з виробництва, проектування, налагодження, експлуатації та ремонту енергообладнання, фахівець з використання нетрадиційних та вторинних джерел енергії промислових виробництв.

**Для вступників на основі повної загальної середньої освіти:**

**Сертифікати Українського центру оцінювання якості освіти (базові):**

- українська мова та література;
- математика (профільний);
- фізика, або іноземна мова, або географія (за вибором абітурієнта).

Прийом заяв та документів – згідно з правилами прийому (Сайт НГУ).

**Випускники технікумів та коледжів,**

які мають освітньо-кваліфікаційний рівень "молодший спеціаліст" та поступають до ВУЗів **в 2016 році** можуть навчатися за скороченим терміном підготовки бакалаврів - тривалість **3 роки**:

- **екзамен з фаху;**
- **українська мова за професійним спрямуванням.**

Прийом заяв та документів та вступні іспити – згідно з правилами прийому (Сайт НГУ).

Навчання за рахунок **ДЕРЖБЮДЖЕТУ** та за контрактом.

**Адреса університету:** Державний ВНЗ "Національний гірничий університет", пр. К. Маркса 19, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005

**Приймальна комісія:** (056) 745-05-60, (0562) 47-24-57; e-mail: [pk@nmu.org.ua](mailto:pk@nmu.org.ua)

**Кафедра ВДЕ (консультаційний пункт):** Головний корпус НГУ, кімн. 31, 32, 46  
Тел.: (066) 774-63-09, (056) 370-13-92

**E-mail:** [vdenmu@gmail.com](mailto:vdenmu@gmail.com)

**Twitter:** [vdenmu](https://twitter.com/vdenmu)

**Група Vkontakte:** [vk.com/vdenmu](https://vk.com/vdenmu)

**Web-сторінка кафедри:** [http://vde.nmu.org.ua/ua/](http://vde.nmu.org.ua/)

**Контакти:**