

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРО- МЕХАНІКА та АВТОМАТИКА

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЗБІРНИК**

Заснований у 1965 р.

100

**Дніпро
2018**

Засновник – Національний гірничий університет

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

(протокол № 15 від 11 грудня 2018 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Півняк Г.Г.	Головний редактор, академік НАН України, ректор ДВНЗ "НГУ"
Шкрабець Ф.П.	Заступник головного редактора, професор, ДВНЗ "НГУ"
Ципленков Д.В.	Відповідальний секретар, к.т.н., доцент, ДВНЗ "НГУ"

EDITORIAL BOARD

Pivniak G.G.	Chief Editor, Academician of NAS of Ukraine, Rector of NMU
Shkrabets F.P.	Deputy Editor, Professor, NMU
Tsyplenkov D.V.	Executive Managing Editor, PhD, Associate Professor, NMU

Члени редакційної колегії

Бешта О.С.	чл.-кор. НАН України, ДВНЗ "НГУ"
Блюсс Б.О.	професор, ІГТМ НАН України ім. Н.С. Полякова
Випанасенко С.І.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Заболотний К.С.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Іванов О.Б.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Колосов Д.Л.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Маліновський А.А.	професор, НТУ "Львівська політехніка"
Мілих В.І.	професор, НТУ "ХПІ"
Муха А.М.	професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна
Плешков П.Г.	професор, Кіровоградський НТУ
Розен В.П.	професор, НТУ "КПІ"
Самуся В.І.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Сивокобиленко В.Ф.	професор, ДонНТУ
Сиченко В.Г.	професор, ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна
Сінчук О.М.	професор, КНУ
Слесарєв В.В.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Ткачов В.В.	професор, ДВНЗ "НГУ"
Нойбергер Н.	професор, Есслінгенський університет прикладних наук, Німеччина
Рєбізант В.	професор, Вроцлавський технічний університет, Польща

The members of Editorial Board

Beshta O.S.	Corresponding Member of NAS of Ukraine, NMU
Bliuss B.O.	Professor, M.S. Polyakov IGTM of NAS of Ukraine
Vypanasenko S.I.	Professor, NMU
Zabolotniy K.S.	Professor, NMU
Ivanov O.B.	Professor, NMU
Kolosov D.L.	Professor, NMU
Malinovskiy A.A.	Professor, NTU "Lviv Polytechnic"
Milykh V.I.	Professor, NTU "KPI"
Mukha A.M.	Professor, Academician V. Lazaryan DNURT
Pleshkov P.G.	Professor, Kirovograd NTU
Rozen V.P.	Professor, NTU "KPI"
Samusia V.I.	Professor, NMU
Sivokobylenko V.F.	Professor, DonNTU
Sychenko V.G.	Professor, Academician V. Lazaryan DNURT
Sinchuk O.M.	Professor, KNU
Slesarev V.V.	Professor, NMU
Tkachev V.V.	Professor, NMU
Noiberger N.	Professor, Esslingen University of Applied Sciences, Germany
Rebizant V.	Professor, Wroclaw University of Technology, Poland

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

Адреса редакції

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

Editorial office adress

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

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

©ДВНЗ "НГУ", 2018

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.311

І.М. Луценко, канд. техн. наук., Є.В. Кошеленко, П.С. Циган, Д.О. Кузнецов

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

ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 6-10 КВ МІСТ

Анотація. Мета. Обґрунтування впливу взаємозв'язків технічних та економічних факторів на ефективність роботи розподільчих електричних мереж 6-10 кВ міст. **Наукова новизна** полягає у встановленні закономірностей між технічними та економічними факторами впливу параметрів режимів роботи кабельних ліній, комутаційного і захисного електрообладнання мереж на економічність їх спорудження та ефективність експлуатації. **Практична цінність** полягає у зниженні капітальних та експлуатаційних витрат в міські розподільчі електричні мережі за умови раціонального вибору параметрів основних елементів та врахуванні взаємовпливу їх характеристик. **Результати.** Аналіз факторів впливу на вибір провідникових елементів розподільчих електричних мереж показав, що прийняття раціонального перерізу кабелів та відповідна ефективність капіталовкладень в електричну мережу суттєво залежить від точності врахування особливостей параметрів навантаження та технічного стану мережі й функціональності комутаційно-захисного обладнання.

Ключові слова:

Аннотация. Цель. Обоснование влияния взаимосвязей технических и экономических факторов на эффективность работы распределительных электрических сетей 6-10 кВ городов. **Научная новизна** заключается в установлении закономерностей между техническими и экономическими факторами влияния параметров режимов работы кабельных линий, коммутационного и защитного электрооборудования сетей на экономичность их сооружения и эффективность эксплуатации. **Практическая ценность** заключается в снижении капитальных и эксплуатационных затрат в городские распределительные электрические сети при условии рационального выбора параметров основных элементов и учете взаимовлияния их характеристик. **Результаты.** Анализ факторов влияния на выбор проводниковых элементов распределительных электрических сетей показал, что принятие рационального сечения кабелей и соответствующая эффективность капиталовложений в электрическую сеть существенно зависят от точности учета особенностей параметров нагрузки, технического состояния сети и функциональности коммутационно-защитной оборудования.

Ключевые слова:

Abstract. Purpose. Substantiation of the of technical and economic factors influence on the distribution electric networks 6-10 kV efficiency of operation in conditions of urban areas. **The scientific originality** consists in establishing patterns between technical and economic factors influence of the cable lines', switching and protective electrical equipment operation modes parameters on the efficiency of their construction and exploitation. **The practical value** is to reduce capital and operating costs for the urban distribution electric networks, provided that the parameters of the main elements are rationally chosen and their characteristics interact with each other. **Findings.** Analysis of factors that influence on choice of conductor elements in electrical distribution networks showed that the adoption of the rational cable size and the corresponding efficiency of investments in the electrical network substantially depend on the accuracy of taking into account the characteristics of the load parameters, network technical state and the functionality of switching- protective equipment.

Keywords:

Загальні аспекти функціонування розподільчих електричних мереж 6-10 кВ міст

Забезпечення надійного та якісного електропостачання споживачів, контроль за електроспоживанням, забезпечення експлуатації енергетичного обладнання, проведення своєчасного і якісного його ремонту, технічне переозброєння і реконструкція енергетичних об'єктів, забезпечення працездатності електричних мереж, задоволення інтересів споживачів, економічних і соціальних потреб за рахунок передачі електроенергії споживачам регіону є основними пріоритетами для обслуговуючого персоналу міських еле-

ктромереж. Забезпечення належної надійності і гнучкості живлення кожного споживача досягається шляхом застосування досить простих, надійних і дешевих схем, як правило, магістральних петльових.

ТП окремих відповідальних споживачів, у яких навантаження електроприймачів першої категорії становить понад 100 кВт передбачаються двосекційними з підключенням до різних половин петльових мереж. Всі РП, як правило, укомплектовані камерами типу КСО заводського виконання.

Для живлення ланцюгів вимірювальних приладів і автоматики в основному на РП встановлені трансформатори напруги. На всіх РП передбачений АВР. Для споживачів 0,4 кВ першої категорії надійності електропостачання застосовується двопроточна схема живлення з АВР на стороні 0,4 кВ споживача.

Стосовно забезпечення надійності електропостачання споживачі міських районів відносяться в основному до II і III категорій, за винятком насосних станцій, що забезпечують водопостачання, що відносяться до I категорії по безперебійності електропостачання.

Характерні проблеми міських електричних мереж:

- обладнання підстанцій є застарілим і має наступні незадовільні показники;
- об'єкти мають підвищені експлуатаційні витрати;
- низька надійність комутаційної апаратури (рубильники, вимикачі навантаження, запобіжники);
- встановлені трансформатори з високими значеннями втрат потужності;
- широка номенклатура кабельно-провідникової продукції різних марок та типорозмірів, що часто виходять з ладу та потребують значних витрат на відновлення роботи.
- розвиток районів і зростання навантаження приєднаних споживачів;
- необґрунтовано завищені номінальні параметри захисного і комутаційного устаткування приєднань 0,4 кВ, що відходять;
- недостатня уніфікація обладнання;
- низька надійність електропостачання споживачів і підвищена ймовірність відмов обладнання.

У районах багатоповерхової забудови мережі виконані, як правило, кабелями, по петльовим схемами. Із загальної довжини мереж 6-10 кВ кабельні лінії становлять близько 80%. Центральне місце в структурі енергетичних об'єктів, що знаходяться на обслуговуванні мереж займають підстанції 10 / 0,4 кВ та 6 / 0,4 кВ та КЛ-6(10) кВ зв'язку між ними.

Порівняння експлуатаційних характеристик кабелів з різними видами ізоляції наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння експлуатаційних характеристик кабелів з різними видами ізоляції [1]

Найменування показника	Величина показника для кабелів		
	З ізоляцією зі зшитого поліетилену	З ізоляцією із поліетилену та полівінілхлоридного пластику	З паперовою пропитаною ізоляцією
Тривало допустима температура нагріву жил, (°C)	90	90	70
Тривало допустимі струмові навантаження *,(%), при прокладці:			
в повітрі	173	100	116
в землі	125	100	108
Допустимий нагрів жил в аварійному режимі (не більше 8 годин на добу і 1000 годин за термін служби), (°C)	130	80	100
Максимально допустима температура при токах короткого замикання, (°C)	250	130...160	200
Мінімальна температура при прокладці без попереднього підігріву, (°C)	+15...-15	+15...-15	0
Різниця рівнів на трасі прокладки, (м)	Не обмежено	Не обмежено	15

Постановка задач дослідження

При розгляді економічно обґрунтованих перспективних принципів побудови електричних мереж важливе значення має питання уніфікації вибору основних параметрів мереж (наприклад, перетин проводів і жил кабелів).

При цьому можуть бути відзначені два основних типи науково-технічних напрацювань:

- а) впорядкування шкал основних параметрів (наприклад, перетин проводів і жил кабелів);
- б) уніфікація застосовуваних параметрів або характеристик мережевих споруд.

Видається обґрунтованим розуміти під уніфікацією параметрів електричних мереж застосування (використання) обмеженої кількості основних параметрів електрообладнання (зі складу наявних в стандартній шкалі) при досить широкому діапазоні зміни вихідної інформації.

Природно, при розробці методик і конкретних рекомендацій по уніфікації параметрів електричних мереж слід мати на увазі економічно доцільні або, в ідеальному випадку, оптимальні рішення.

У зв'язку з економічною значимістю та актуальністю проблеми розробки методик уніфікації параметрів електричних мереж представляється необхідним розглядати «широку», «глибоку» і в певних завданнях - «комплексну» уніфікацію. Глибока уніфікація передбачає застосування досить обмеженої кількості параметрів зі складу наявних в стандартизованої шкалою (наприклад, 1-3 перетинів жил кабелів 0,38-10 кВ з числа 8-10 перетинів, зазвичай використовуваних при проектуванні) [2];

Глибока уніфікація параметрів характерних РЕМ є основним перспективним і економічно виправданим принципом виконання і розвитку міських електричних мереж. Практичне застосування такого методу формування мереж дозволяє найбільшою мірою підвищити ефективність виробничих процесів, електромонтажних робіт по експлуатації міських мереж, що, в кінцевому підсумку, веде і до підвищення надійності електропостачання.

Задача дослідження полягає у обґрунтуванні та врахуванні факторів впливу на ефективність режимів роботи й структури електричної мережі для підвищення точності вибору параметрів кабельних ліній з позицій їх уніфікації та ефективності використання в умовах міських електричних мереж 6-10 кВ м. Дніпра.

Номенклатурний ряд КЛ-6,10 кВ міських електричних мереж представлений переважно типорозмірами 95, 120, 150, 185, 240 мм². Уніфікація кабельних ліній полягає у зменшенні номенклатури складського резерву кабелів та в обґрунтуванні доцільних й ефективних типорозмірів КЛ до застосування.

Тип застосованого кабелю залежить від таких параметрів:

- щільність навантаження;
- відстань від фідерів підстанцій до трансформаторних підстанцій міських електричних мереж;
- можливі режими роботи міських електричних мереж;
- умови термічної стійкості у аварійних режимах;
- умови за втратами напруги у міських електричних мережах у нормальних та післяаварійних режимах роботи мережі.

Особливості розрахунку електричних мереж 6-10 кВ

В процесі проектування та експлуатації електрична мережа повинна задовольняти вимогам економічності. Досягається це шляхом наближення вищої напруги до споживачів електроенергії, раціональною побудовою мережі, застосуванням уніфікованих або типових рішень для спрощення монтажних налагоджувальних робіт, мінімального утримання складського резерву тощо.

Поряд з критерієм економічності до електричних мереж пред'являються вимоги:

- надійність роботи;
- можливість зростання навантажень (запас пропускної та навантажувальної здатності електроустаткування).

Крім зазначених вимог до мережі при її проектуванні та монтажі, повинні враховуватися умови:

- навколишнього середовища (температура, агресивність, особливості прокладання трас повітряних і кабельних ліній);
- ступінь відповідальності установки;
- вимоги технічної естетики.

При проектуванні розподільної мережі міст здійснюють вибір окремих її елементів таким чином, щоб забезпечити економічність і надійність роботи мережі в нормальних і післяаварійних режимах. Одним з важливих питань при цьому є вибір переріз проводів і жил кабелів з урахуванням ряду технічних і економічних факторів. Серед технічних факторів, що впливають на вибір переріз, відзначимо такі:

- нагрівання від тривалого виділення теплоти розрахунковим струмом;
- нагрівання від короткочасного виділення теплоти струмом КЗ;
- втрати напруги в жилах кабелів або проводах повітряної лінії від струму навантаження (у нормальному і післяаварійному режимах);
- механічна міцність - стійкість до механічного навантаження.

Вплив і врахування цих факторів при проектуванні повітряних і кабельних ліній не однакові. Відповідно до ПУЕ [3] вибір економічно доцільного перерізу роблять за так званою економічною щільністю струму.

Технічні й економічні умови в процесі розрахунку дають різні перерізи для однієї і тієї ж лінії. Остаточоно вибирають переріз, що задовольняє всім вимогам, тобто обрані перерізи повинні забезпечувати допустимі відхилення напруги, стійкість до дії струмів коротких замикань.

Вибір перерізів проводів та жил кабелів напругою вище 1 кВ здійснюється:

- а) за економічною щільністю струму (j_e);
- б) за нагрівом максимальним струмом форсованого режиму.

Вибраний переріз провідника перевіряється за умовами:

- захисту від дії струмів коротких замикань;
- по втраті напруги в елементі мережі;

Щорічні експлуатаційні витрати складаються з відрахувань на амортизацію, поточний ремонт, обслуговування і вартості втрат електроенергії. Ці відрахування зростають зі збільшенням перерізу проводів і кабелів, тому що при цьому зростають капітальні вкладення. Сума зазначених складових річних приведених витрат матиме мінімум при так званому економічно доцільному перерізі $S_{ек}$. Економічна щільність струму нормується ПУЕ залежно від матеріалу провідника і конструкції лінії (кабельна або повітряна). Розрахунок перерізів проводів за j_e здійснюється залежно від річного числа годин використання максимального навантаження T_m електроустановок.

Економічно доцільний переріз визначають через розрахунковий струм лінії I_p і економічну щільність струму j_e за співвідношення:

$$S_{ек} = \frac{I_m}{j_{ек}},$$

де I_m – розрахунковий струм нормального режиму роботи електроустановки, А; j_e – нормоване значення економічної щільності струму, А/мм², для заданих умов роботи, вибране по табл. 1.3.36 ПУЕ.

Таблиця 1.3.36 [3]

Економічна щільність струму

Провідники	Економічна щільність струму, А/мм ² , при числі годин використання максимуму навантаження в год		
	більше 1000 до 3000	більше 3000 до 5000	більше 5000
Кабелі з паперовою і проводи з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією з жилами:			
мідними	3,0	2,5	2,0
алюмінієвими	1,6	1,4	1,2
Кабелі з гумовою і пластмасовою ізоляцією з жилами:			
мідними	3,5	3,1	2,7
алюмінієвими	1,9	1,7	1,6

Переріз, отриманий в результаті зазначеного розрахунку, округляється до найближчого стандартного перерізу. Розрахунковий струм приймається для нормального режиму роботи, тобто збільшення струму в післяаварійних і ремонтних режимах мережі не враховується.

Збільшення кількості ліній або ланцюгів за умовами надійності електропостачання з метою задоволення економічної щільності струму виконується на основі техніко-економічного розрахунку. При цьому, щоб уникнути збільшення кількості ліній або ланцюгів допускається двократне перевищення нормованих значень, наведених в табл. 1.3.36 [3].

Критичний аналіз переваг та недоліків методів вибору КЛ

Існує бачення, що вибір перерізів за економічною щільністю струму не відповідає мінімуму приведених витрат, тому що j_e нормується за рядом припущень:

- перерізи, обчислені за формулою, безперервні, у дійсності ж вони дискретні;
- економічна щільність струму нормується ПУЕ у вигляді дискретних значень, тому що вона встановлена для деякого діапазону числа годин використання максимуму, насправді ж ця щільність є безпервною функцією;
- коефіцієнти відрахувань від капітальних вкладень при нормуванні j_e приймалися однаковими для різних випадків, хоча в дійсності вони неоднозначні для виконання мереж, що відрізняються;

- вартість втрат електроенергії змінюється в часі, крім того, вона неоднакова для різних районів країни.

Уникнути зазначених недоліків формалізованого використання в розрахунках j_e можна шляхом знаходження оптимальних перерізів дротів і кабелів за уточненими показниками. При цьому користуються двома способами вибору перерізів:

- за приведеними витратами, обумовленими для кожного варіанта. В інженерній практиці для цього застосовують метод економічних інтервалів, що враховує всі фактори, в тому числі дискретність перерізів і нелінійність залежності $K_{л} = f(S)$ [4].

- за уточненим значенням економічної щільності струму, обумовленим розрахунком для конкретних умов. Такий підхід застосовується також при виборі перерізів струмопроводів на промислових підприємствах.

Досвід використання розглянутих методів вибору перерізів кабельних розподільних мереж 6-10 кВ дозволяє відзначити наступне: при виборі перерізів кабелів за нагріванням, термічною стійкістю і економічністю визначальним є переріз, обраний за умовою термічної стійкості до струмів КЗ. У зв'язку з цим вибір перерізів кабелів 6-10 кВ за економічними умовами не вимагає високої точності розрахунків і може здійснюватися за допомогою економічної щільності струму відповідно до ПУЕ.

Визначення факторів впливу на вибір перерізу кабельних ліній 6-10 кВ

Для аналізу факторів впливу виконаємо вибір перерізу кабельних ліній для двотрансформаторної підстанції з трансформаторами типу ТМ-630/6. Завантаження трансформаторів у нормальному режимі $\beta = 0,7$. Кабелі, що живлять міські ТП, мають бути підключені до різних шин ГЗП (РП) за вимогами резервування у післяаварійному режимі. Від ГЗП (РП) до міських ТП кабелі 6(10) кВ прокладаються, як правило, в траншеї (в землі).

Переріз кабелю 6(10) кВ вибирається за економічною густиною струму (див. табл. 1.3.36 [3]):

$$S_e = I_{н.р} / j_e ,$$

де $I_{н.р}$ – струм нормального режиму роботи, А; j_e – економічна густина струму, А/мм².

Фактор 1. Значення j_e залежить від річного числа годин використання максимуму навантаження, яке для міських електричних мереж може знаходитись в двох діапазонах: 3000-5000 год або більше 5000 год. Тобто, характеристика ГЕН споживачів впливає на вибір перерізу КЛ.

Так, наприклад при значенні T_m у діапазоні 3000-5000 год j_e становить 1,4 А/мм², а для $T_m > 5000$ год $j_e = 1,2$ А/мм² для кабелів з паперовою просоченою ізоляцією.

1. Визначаємо струм трансформатора в нормальному режимі роботи:

$$I_{н.р.т} = \frac{\beta_{н.р} S_{ум}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{0,7 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 6} = 42,4 \text{ А},$$

де $\beta_{н.р}$ – завантаження трансформатора в нормальному режимі роботи.

Тоді економічно доцільний переріз буде:

$$S_e = \frac{42,4}{1,4} = 30,3 \text{ мм}^2.$$

Найближчий стандартний переріз складає 35 мм². Приймаємо кабель з паперовою пропитаною ізоляцією марки ААШв-3×35, $I_{доп} = 110$ А.

2. Перевіряємо кабель по нагріву в післяаварійному режимі (при виході з ладу іншого кабелю і живлення навантаження по одному кабелю):

$$I_{ав} \leq I'_{доп} ,$$

де $I_{ав}$ – струм післяаварійного режиму, А; $I'_{доп}$ – допустимий струм, А.

$$I'_{доп} = k_1 k_2 k_3 I_{доп} ,$$

де $k_1 = 1$ – коефіцієнт, який враховує температуру навколишнього середовища (вважаємо, що температура ґрунту не відрізняється від нормальної=15°C); $k_2 = 0,92$ – коефіцієнт, який враховує число поруч прокладених у землі кабелів (прокладається, як правило 1-2 кабелі в одній траншеї); k_3 – коефіцієнт, який

враховує допустиме перевантаження у післяаварійному режимі. При початковому завантаженні $I_{pn}/I_{доп} = 42,4/110 = 0,4$ коефіцієнт $k_3 = 1,25$ (6 годин на добу протягом 5 діб) [3].

Таблиця 1.3.26 [3].

**Поправочний коефіцієнт на кількість працюючих кабелів, що лежать поруч у землі
(у трубах або без труб)**

Відстань між кабелями в світлі, мм	Коефіцієнт при кількості кабелів					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

$$I'_{доп} = 1 \cdot 0,92 \cdot 1,25 \cdot 110 = 126,5 \text{ A}$$

Струм в післяаварійному (форсованому) режимі дорівнює:

$$I_{ав} = 1,4 S_{нт} / (\sqrt{3} U_{вн}) = 1,4 \cdot 630 / (\sqrt{3} \cdot 6) = 85 \text{ A};$$

$$85 < 126,5 \text{ (A)} - \text{вірно}$$

Фактор 2. На вибір перерізу кабеля у нормальному режимі роботи і його перевірку за форсованим режимом роботи впливає початковий (попередній) режим роботи, який, згідно ПУЕ диференціюється завантаженням до $0,6 I_{ном}$ та $0,8 I_{ном}$. Таким чином, визначення та прийняття доцільного попереднього завантаження також має бути обгрунтованим.

3. Перевіряємо кабелі на термічну стійкість при протіканні струмів короткого замикання. Умова перевірки:

$$F_{\min} \leq F,$$

де $F_{\min}$ – мінімальний переріз провідника, що відповідає вимозі його термічної стійкості при короткому замиканні, мм^2 .

$$F_{\min} \leq \frac{I_{\infty} \sqrt{t_{відк} + T_a}}{C},$$

де I_{∞} – струм КЗ, А; $t_{відк}$ – час протікання струму КЗ, с; T_a – постійна часу затухання аперіодичної складової струму КЗ, рівна для розподільчих мереж напругою 6-10 кВ 0,01 с; C – постійна, що визначається в залежності від заданої ПУЕ кінцевої температури нагріву жил і напруги. Для кабелів з паперовою пропитаною ізоляцією при напрузі 6 (10) кВ $C = 98$ (100) $\text{A} \cdot \text{с}^{-1/2} / \text{мм}^2$.

Величину струму КЗ визначаємо по заданій потужності КЗ $S_{КЗ}$ на шинах джерела живлення (для прикладу прийнято $S_{КЗ} = 180 \text{ МВА}$):

$$I_{\infty} = \frac{S_{КЗ}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 6} \times 10^3 = 17320 \text{ A}$$

Згідно ПУЕ час дії струму КЗ складається з часу дії основного релейного захисту даного ланцюга t_{pz} і повного часу відключення вимикача $t_{відк.в.}$. Якщо прийняти, що кабелі підключено до РП ГЗП через вакуумні вимикачі типу ВР з ВМП з повним часом відключення вимикача $t_{відкл.в} = 0,055 \text{ с}$. Час дії релейного захисту приймаємо рівним $t_{pz} = 0,01 \text{ с}$ (мінімальний час спрацювання захисту), тоді:

$$t_{відк} = t_{pz} + t_{відк.в} = 0,01 + 0,055 = 0,065 \text{ с};$$

$$F_{\min} = \frac{17320 \cdot \sqrt{0,065 + 0,01}}{98} = 48,4 \text{ мм}^2;$$

$48,4 < 35 \text{ (мм}^2\text{)} - \text{умова не виконується.}$

В цьому випадку, остаточно слід приймати живлення кожного трансформатора ТП кабелями з перерізом 50 мм².

Якщо ж прийняти, що кабелі підключено до РП ГЗП через маломасляні вимикачі типу ВМП з повним часом відключення вимикача $t_{\text{відкл.в}} = 0,1$ с. Час дії релейного захисту приймаємо рівним $t_{\text{рз}} = 0,01$ с (мінімальний час спрацювання захисту), тоді:

$$t_{\text{відк}} = t_{\text{рз}} + t_{\text{відкл.в}} = 0,01 + 0,1 = 0,11 \text{ с};$$

$$F_{\text{min}} = \frac{17320 \cdot \sqrt{0,1 + 0,01}}{98} = 58,6 \text{ мм}^2;$$

$$58,6 < 35 \text{ (мм}^2\text{)} - \text{умова не виконується.}$$

Фактор 3. Таким чином, на вибір типорозміру КЛ впливає перевірка на термічну дію струму КЗ. Окрім значень потужності КЗ на шинах 6-10 кВ та відповідних розрахункових струмів суттєве значення має характеристика часу спрацювання застосованого комутаційного та захисного обладнання, його вимикаюча спроможність. З приведених розрахунків випливає, що за однакових параметрів режимів роботи мереж, застарілість обладнання викликає необхідність завищення параметрів їх основних елементів, а відповідно і вартості системи в цілому, неефективному використанні навантажувальної здатності елементів тощо.

Фактор 4. Перевірка мережі за втратою напруги в її елементах також є важливою в плані прийняття доцільного типорозміру КЛ.

Висновки

При виборі перерізів кабелів за нагріванням, термічною стійкістю і економічністю визначальним є переріз, обраний за умовою нагрівання допустимим струмом та термічною стійкістю до струмів КЗ. У зв'язку з цим вибір перерізів кабелів 6-10 кВ за економічними умовами не вимагає високої точності розрахунків і може здійснюватися за допомогою економічної щільності струму відповідно до ПУЕ.

Аналіз факторів впливу на вибір провідникових елементів розподільчих електричних мереж показав, що на прийняття раціонального перерізу кабелю суттєвий вплив має з однієї сторони режим роботи споживачів, а саме такий показник, як число годин використання максимального навантаження (T_m), який необхідно і доцільно враховувати, залежно від типу та сукупності характерних споживачів; з іншої сторони – сучасність та функціональність застосованого комутаційного та захисного електроустаткування. Тобто, ефективність капіталовкладень в кабельну мережу залежить від точності врахування особливостей параметрів навантаження та технічного стану мережі й функціональності комутаційно-захисного обладнання.

Встановлені фактори зумовлюють необхідність більш детального дослідження їх впливу на техніко-економічні показники роботи розподільчих електричних мереж з оцінкою потенціалу енерго-ресурсозбереження та врахуванням ефективності використання номінальних параметрів устаткування.

Список літератури

1. Справочник кабельно-проводниковой продукции. Режим доступа: <http://www.yuzhcable.info/>
2. Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики», в 2 томах. - Ташкент, ТашГТУ им. Беруни, 2011. Т1 - 246 с., Т2 – 241 с. 3. Анализ унификации параметров распределительных электрических сетей. Режим доступа: <http://www.alobuild.ru/sovremennoye-sostoyaniye-i-perspektivi-razvitiya-energetiki/analiz-unificacii.php>
3. Правила устройства электроустановок. – Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 704 с.
4. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, Г.А. Кігель, Н.С. Волотковська; За ред. акад. Г.Г. Півняка. – 3-тє вид., перероб. і доп.- Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 216 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.31

В.Д.Трифонов, Д.В.Трифонов, канд-ти техн. наук, О.Р.Ковальов, І.Б.Кольцов, В.В.Бердник
(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Анотація. Підвищення енергоефективності на вугільних шахтах можливо за рахунок удосконалення технологічних процесів, а також завдяки застосуванню спеціальних засобів, серед яких найбільш ефективним є зниження втрат електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності. З цією метою у споживачів електричної енергії встановлюють пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП). Коректний вибір та техніко-економічне обґрунтування раціонального розподілу ПКРП в РПП–6 кВ значно розвантажує усю електричну мережу. Запропонована економіко-математична модель визначення раціональних значень потужності ПКРП на підземних розподільчих пунктах 6 кВ з урахуванням однакових потужностей вибухобезпечних ПКРП.

Ключові слова: економіко-математична модель, компенсації реактивної потужності, підземні розподільчі пункти.

Аннотация. Повышение энергоэффективности угольных шахт возможно за счет усовершенствования технологических процессов, а также благодаря применению специальных мероприятий, среди которых наиболее эффективным является снижение потерь электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности. С этой целью у потребителей электрической энергии устанавливают устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ). Корректный выбор и технико-экономическое обоснование рационального распределения УКРМ в РПП–6 кВ существенно разгружает всю электрическую сеть. Предложена экономико-математическая модель определения рациональных значений мощности УКРМ на подземных распределительных пунктах 6 кВ с учетом одинаковых мощностей взрывобезопасных УКРМ.

Ключевые слова: экономико-математическая модель, компенсация реактивной мощности, подземные распределительные пункты.

Abstract: Energy efficiency optimization of coal mines, as a result of technological advance and of special measures being taken, among which the most effective is the reduction of power losses by compensating the reactive power, is considered. For this purpose, a reactive power compensation device (RPCD) is installed at the electrical energy consumer. The correct choice and feasibility study of rational distribution of RPCD in the 6 kV PDC significantly help un load the entire network. To determine the rational values of power RPCD at underground distribution centers of 6 kV, with respect to the identical power of explosion-proof RPCD, an economical and mathematical model is proposed.

Keywords: economical and mathematical model, reactive power compensation, underground distribution centers

Стан питання. Сучасні вугільні шахти – потужні високо механізовані гірничодобувні підприємства зі складним електротехнічним господарством. Вони характеризуються значним різноманіттям технологічних процесів, які істотно впливають на ефективність використання електроенергії. Підвищення енергоефективності на вугільних шахтах можливо за рахунок удосконалення технологічних процесів, а також завдяки застосування спеціальних засобів, серед яких найбільш ефективним є зниження втрат електроенергії шляхом компенсації реактивної потужності. З цією метою у споживачів електричної енергії встановлюють пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП). Це значно розвантажує усю електричну мережу від цієї складової. Однак такі пристрої мало використовуються за часом.

Для умов вугільних шахт підвищення ефективності підземних електричних мереж, якщо припустити їх коректний вибір, можливо тільки завдяки більш високого коефіцієнта використання за часом, який за ствердженнями багатьох науковців становить нині 0.6...0.75 [1]. Більш високий коефіцієнт використання мають ПКРП напругою 6 кВ, що підключають у розподільних пунктах 6 кВ (РПП – 6 кВ). Однак застосування рудникових вибухобезпечних високовольтних конденсаторних батарей у схемах електропостачання вугільних шахт з установленням їх в РПП – 6 кВ потребує техніко-економічного обґрунтування.

Мета статті. Техніко-економічне обґрунтування раціонального розподілу ПКРП в РПП–6 кВ з урахуванням їх однакових потужностей.

Основна частина. Відомо, що підвищення енергоефективності вугільних шахт можливо шляхом використання ПКРП у підземних електричних мережах. Але встановлення їх в РПП – 6 кВ буде економічно доцільне, якщо розрахунковий коефіцієнт ефективності E_p перевищує величину банківської кредитної ставки $N_{кр}$, %, і річний рівень інфляції $N_{інф}$, %, тобто

$$E_p \geq (N_{кр} + N_{інф}) = N/100, \quad (1)$$

де $N = N_{кр} + N_{інф}$.

З другого боку, коефіцієнт ефективності E_p можна визначити як

$$E_p = E_k / K, \quad (2)$$

де E_k – річна економія від встановлення ПКРП; K – капітальні вкладення при застосуванні ПКРП,

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{мн} + K_{пл}, \quad (3)$$

де $K_{об}$ – вартість обладнання без ПДВ;

$K_{тз}$ – транспортно-заготовельні витрати, $K_{тз} = a_{тр} K_{об}$;

$K_{мн}$ – витрати на монтаж і налагоджування обладнання, $K_{мн} = a_{мн} K_{об}$;

$K_{пл}$ – планові накопичення, $K_{пл} = a_{пл} K_{мн} = a_{пл} a_{мн} K_{об}$;

$a_{тр}$, $a_{мн}$, $a_{пл}$ – нормативні значення коефіцієнтів на транспортно-заготовлені витрати, на монтаж і налагодження обладнання та планові накопичення, тобто

$$K_{об} = K_{об} + a_{тр} K_{об} + a_{мн} K_{об} + K_{пл} + a_{пл} a_{мн} K_{об} = (1 + a_{тр} + a_{мн} + a_{пл} a_{мн}) K_{об} \quad (4)$$

За відомим методом [2] визначають потужність ПКРП за окремим розподільним пунктом. Величина, на яку зменшуються втрати активної потужності на одному РПП-6 кВ після компенсації записується так:

$$\Delta P_i = \frac{Q_i^2 - (Q_i - Q_{кі})^2}{U^2} \cdot R_i \cdot 10^{-3} = \frac{2Q_i Q_{кі} - Q_{кі}^2}{U^2} \cdot R_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (5)$$

Після перетворення відразу отримуємо

$$\Delta P_i = \frac{\left[(2K_{рм} P_i^2 - K_{рм}^2 P_i^2) tg\gamma_i^2 - K_{рм}^2 P_i^2 tg\gamma_p^2 + (2K_{рм}^2 P_i^2 tg\gamma_i^2 - 2K_{рм} P_i^2 tg\gamma_i) tg\gamma_p \right] L_i}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де γ – питомий опір шахтних мідних кабелів, $\gamma=50$ м/Ом мм²; $K_{рм}$ – коефіцієнт різномасової частки в максимумі навантаження підземних дільниць [2]; S – переріз кабельної лінії, мм²; L – довжина кабельної лінії, м; $tg\gamma_i$, $tg\gamma_p$ – коефіцієнт кабельної потужності до та після компенсації, відповідно; P_i – розрахункова потужність розподільчого пункту, кВт.

Річна економія на зменшенні втрат активної енергії

$$E_{рзвi} = \frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i}, \text{ грн.,} \quad (7)$$

де b – вартість 1 кВт·год. електроенергії, грн./кВт·год., T_p – річна кількість годин роботи підземних приймачів [1].

Вітчизняна промисловість виготовляє достатню кількість та різноманітність ПКРП напругою 6 кВ. Річні експлуатаційні витрати на РПП–6 кВ

$$C_i = (K_a + K_m) C_{обі} + 3_i (I + K_z), \quad (8)$$

де $K_a + K_m$ – коефіцієнт на амортизацію та витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання, мереж відповідно; K_z – коефіцієнт відрахувань на соціальні заходи; Z_i – заробітна плата обслуговуючого персоналу.

Вартість обладнання для i -го РПП – 6 кВ запишемо у вигляді виразу з двох змінних: відома кількість і тип прийнятих ПКРП та їх вартість. Тоді методом найменших квадратів отримуємо:

$$C_{обі} = a + b Q_{ki}, \quad (9)$$

де Q_{ki} – сумарна прийнята потужність ПКРП на РПП – 6 кВ.

Річна економія коштів при встановленні ПКРП в i -му розподільчому пункті

$$E_{pi} = E_{pзвi} - C_i. \quad (10)$$

Варіант буде прийнятний для однакових РПП – 6 кВ, якщо виконується умова

$$E_{pi} = \frac{\frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} - (K_a + K_t) \cdot K_{обі} - Z_i \cdot (1 + K_z)}{K_{обі}} \geq N / 100. \quad (11)$$

Для підземного навантаження шахти

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta P_i \cdot b \cdot T_p - (K_a + K_t) \cdot K_{обі} - Z_i \cdot (1 + K_z)}{U^2 \cdot \gamma \cdot S_i} \right]}{\sum_{i=1}^n K_{обі}} \geq N / 100. \quad (12)$$

Приклад розрахунку.

1. Визначають струм у кабелях, що живлять РПП – 6 кВ. Задають значення P_p почергово від 500 до 2500 кВт з кроком 500 кВт. Для цього значення P_p змінюють величину $\cos \varphi$ від 0,45 до 0,97 з кроком

0,2. Визначають струми в кабелях за формулою $I_p = \frac{0,85 P_p}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$ і приймають переріз згідно з умовами

таблиці.

Таблиця 1

Вибір перерізу кабелю	
Струм, А	Переріз, мм²
$I_p \leq 110$	35
$110 < I_p \leq 145$	50
$145 < I_p \leq 175$	70
$175 < I_p \leq 215$	95
$215 < I_p \leq 250$	120

2. Визначають потрібну реактивну потужність для вузла приєднання підземних споживачів всієї шахти

$$Q_k = 0,625 P_{pi} (\operatorname{tg} \varphi_i - 0,25)$$

у такій послідовності:

- задаються почергово P_{pi} від 6000 до 10000 кВт з кроком 1000 кВт;

- для заданого значення P_{pi} змінюють значення $\operatorname{tg} \varphi$ від 0,25 до 1,7320 з кроком 0,25.

3. Для конкретно прийнятого варіанта підземного навантаження шахти приймають відповідну кількість РПП – 6 кВ, потужність яких дорівнює сумі потужностей усіх підземних споживачів (умови п.1) з визначеним перерізом кабелю.

4. Розраховують оптимальну потужність ПКРП Q_{ki} для кожного РПП – 6 кВ за формулою

$$Q_{ki} = Q_i - \frac{(Q - Q_k) \cdot r_e}{r_i}$$

де r_i – опір живильної кабельної лінії РПП – 6 кВ, для якого визначають Q_{ki} ,

$$r_i = \frac{L_i (M)}{50S},$$

L_i – довжина лінії, яка змінюється від 1000 до 2500 м з кроком 500 м;

Q_i – реактивна потужність РПП – 6 кВ, для якого визначають Q_{ki} , тобто

$$Q_i = P_{pi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i$$

для значень $\operatorname{tg} \varphi$ від 0,25 до 1,7320;

$P_{pi} \Rightarrow 500 - 2500$ кВт з кроком 500 кВт;

r_e – еквівалентний опір ліній, що живлять усі РПП – 6 кВ

$$r_e = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}};$$

Q – загальна реактивна потужність підземних споживачів

$$Q = 0,625 P_{pi} \cdot \operatorname{tg} \phi$$

(використати значення P_{pi} п.2 за відрахуванням $Q_j = 500$ квар водовідливу та споживачів біля стовбурного двору).

Якщо

200 < $Q_{ki} \leq 250$,	то приймають $Q_{ki} = 250$ квар;
250 < $Q_{ki} \leq 300$,	то приймають $Q_{ki} = 300$ квар;
300 < $Q_{ki} \leq 350$,	то приймають $Q_{ki} = 350$ квар;
350 < $Q_{ki} \leq 400$,	то приймають $Q_{ki} = 400$ квар;
400 < $Q_{ki} \leq 450$,	то приймають $Q_{ki} = 450$ квар;
450 < $Q_{ki} \leq 500$,	то приймають $Q_{ki} = 500$ квар.

При $Q_{ki} < 200$ квар Q_{ki} приймають таким, що дорівнює нулю, тобто $Q_{ki} = 0$.

У даному випадку це вказує, що ПКРП не встановлюються в розрахунковому РПП – 6 кВ. Умова розподілу потужності для інших РПП – 6 кВ порушується. Необхідно змінити розрахункову сумарну реактивну потужність на потужність розрахованого РПП – 6 кВ Q_i , тобто $Q' = Q - Q_i$, і розрахунок повторити для інших РПП – 6 кВ без розглянутого. Опір цієї лінії також не враховується.

$$r'_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{r_i}}; \quad Q_{kj} = Q_j - \frac{(Q' - Q_k) r'_e}{r_j}.$$

Отримаємо оптимальний розподіл потужностей ПКРП на підземних розподільних пунктах 6 кВ (рис. 1).

З урахуванням рекомендацій роботи [1] будуємо економіко-математичну модель за такими припущеннями:

- значення коефіцієнтів реактивної потужності всіх РПП – 6 кВ однакові;
- якщо потрібна потужність ПКРП в i -му РПП – 6 кВ менша за 200 квар, то вона приймається такою, що дорівнює нулю.

Після оптимального розподілу реактивної потужності, що буде скомпенсована, формується економіко-математична модель, яка дозволяє визначити доцільність розміщення ПКРП на підземних РПП – 6 кВ за формулою

$$\frac{\sum_{i=1}^n 1.1441 P_{pi} H_i L_i 10^{-3}}{16138 + 5.0356 Q_{ki}} - 0.16 > 0.25,$$

де $H_i = 0,8594 \operatorname{tg}^2 \phi_i - 0,1171 \operatorname{tg} \phi_i - 0,0244$; $L_i = 1000 \dots 2500$ м через кожні 500 м;

$\operatorname{tg} \phi_i = 0,25 \dots 1,7320$ через кожні 0,25; $Q_{ki} = 200 \dots 500$ через кожні 50 квар; $P_{pi} = 500 \dots 2500$ кВт через 500 кВт; $N = 0,25$.

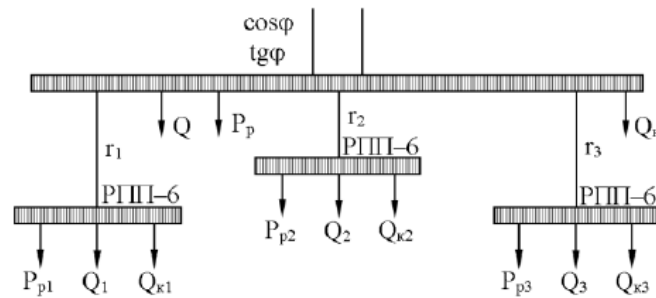


Рис.1- Схема розподілу потужностей ПКРП на підземних пунктах

Таким чином, отримана економіко-математична модель, яка дозволяє визначати доцільність розміщення ПКРП у РПП 6 кВ.

Висновок. Запропонована економіко-математична модель визначення раціональних значень потужності ПКРП на підземних розподільних пунктах 6 кВ з урахуванням однакових потужностей вибухобезпечних ПКРП, що застосовуються.

Список літератури

1. Трифонов Д.В. Підвищення ефективності використання електроенергії у виробничих системах / Трифонов Д.В., Ковальов О.Р.; Кумпін О.О. //; Наук.-техн. збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”. – Д.: РВК НГУ. – 2015. – № 94. – С. 135-139.
2. Півняк Г.Г. Електропостачання гірничих підприємств / Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. / Довідковий посібник. – Д: РВК ДНУ. – 2008. – 550 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.311

Д.В. Цыпленков, канд. техн. наук., А.А. Суворкин
(Украина, Днепр, ГВУЗ "Национальный горный университет")

А.Ю. Жеребцов,
(Украина, Днепр, ТОВ "Акта-сервис")

В.Б. Сприса, П.В. Руснак
(Национальный университет «Львовская политехника»)

Е.С. Шкаран, И.В. Назаренко
(Украина, Днепр, Национальная металлургическая академия Украины)

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Анотация. Необходимость использования интеллектуальных электрических систем с минимальными техническими затратами и влиянием на окружающее пространство является основой для систем с распределенной генерацией, которые могут предлагать такие преимущества как снижение ресурсов системы передачи и распределения, повышение надежности, улучшения качества электроэнергии и т.п. В зависимости от конфигурации системы и управления ею, эти преимущества могут быть достигнуты и негативным образом.

Ключові слова: розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, проблеми в енергомережах.

Аннотація. Необходимость использования интеллектуальных электрических систем с минимальными техническими потерями и влиянием на окружающую среду является толчок для систем с распределенной генерацией, которые могут предложить такие преимущества как снижение ресурсов системы передачи и распределения, повышения надежности, улучшения качества электроэнергии и т.п. В зависимости от конфигурации системы и управления ней, эти преимущества могут быть сказаться и негативным образом.

Ключевые слова: распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, проблемы в энергосетях.

Abstract. The need to use intelligent electrical systems with minimal technical losses and environmental impact is the impetus for systems with distributed generation, which can offer such advantages as reducing transmission and distribution system resources, increasing reliability, improving power quality, etc. Depending on the configuration of the system and its management, these advantages may also have a negative effect.

Keywords: distributed generation, renewable energy, problems in power grids.

Введение. Проблемы развития современного производства связаны со спросом на электроэнергию, который опережает прирост генерирующих мощностей. Электроэнергетика в 20-м веке развивалась главным образом путем повышения уровня централизации электроснабжения при создании все более мощных электроэнергетических объектов. Следствием этого явилось формирование территориально распределенных протяженных электроэнергетических систем (ЭЭС), что позволило достичь существенного экономического эффекта, повысить надежность электроснабжения и качество электроэнергии [1, 2].

В связи с этим как одно из важных средств решения энергетического обеспечения в мировой практике рассматривают распределенную генерацию (РГ) [1]. Под распределенной генерацией понимается совокупность модульных генерирующих объектов малой мощности, производящих электроэнергию в непосредственной близости к месту потребления. При этом параметр «близости» к месту потребления оценивается по классу напряжения распределительной сети, к которой подключается генерирующий объект.

Кроме электростанций небольшой мощности в концепции РГ немаловажная роль отводится возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) - это источники преобразования солнечной энергии, энергии ветра и водных потоков, а также органических отходов, связанных с жизнедеятельностью человека - промышленные, сельскохозяйственные, бытовые отходы [2].

В последнее время для многих регионов остро стоит вопрос энергетической безопасности, при которой потребитель имеет надежный доступ к необходимой ему энергии, а поставщик - к её потребителям при стабильных и приемлемых ценах [3].

Огромные размеры страны при низкой плотности населения в отдельных регионах приводят к недопустимым в современных условиях затратам на транспорт электроэнергии, обеспечение защиты от негативного влияния природно-климатических условий [4], повышение надёжности элементов протяженных электрических сетей [5].

С начала XX века технологии традиционных паротурбинных агрегатов тепловых и атомных электростанций развивались по пути использования все более высоких параметров пара, это требовало применения более совершенных материалов котлов и турбин, при этом имела место тенденция увеличения единичной мощности установок. Все отмеченное позволяло улучшать технико-экономические параметры установок - удельные капиталовложения и постоянные текущие издержки на единицу мощности и удельные расходы топлива на единицу вырабатываемой электроэнергии. Указанная тенденция укрупнения агрегатов наблюдалась и в гидроэнергетике, хотя и в меньшей мере.

В 1980-е годы эта тенденция принципиально изменилась вследствие появления высокоэффективных (до 55-60 % КПД) газотурбинных и парогазовых установок (ГТУ и ПГУ) широкого диапазона мощностей, в том числе малых - от единиц до одного-двух десятков МВт. Отличительной особенностью таких установок, особенно малых, является их высокая заводская готовность, что позволяет вводить их в эксплуатацию за период в пределах года [3-5]. Одновременно появился большой ассортимент мини- и микро- ГТУ (от долей кВт до нескольких десятков кВт). На основе малых ГТУ начали сооружаться малые ГТУ-ТЭЦ для комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

Распределенная генерация (РГ) становится все более важным источником электроэнергии в современной энергосистеме. Хотя стоимость установки высока, источники РГ, становятся выгодными для потребителей, путем предоставления электроэнергии непосредственно потребителю, а не в отдаленный генератор. Тогда, таким образом системы РГ могут помочь увеличить объемы электроэнергии в часы пика,

так что перегрузка по мощности может быть сведена к минимуму, тем самым, предотвращая ухудшения качества электроэнергетики и обслуживания.

В настоящее время развитие технологий применения источников возобновляемой энергетики приводит к тому что в вопросах обеспечения стабильного электроснабжения источники малой мощности будут играть существенную роль. Украина в этом процессе занимает активную позицию. Учитывая климатические факторы нашей страны, ее географическое расположение потенциал возобновляемой энергетики в стране достаточно высок [4]. Согласно данным Института возобновляемой энергетики НАН Украины технически-достижимый потенциал составляет не менее 548 млрд кВт×ч/год, из них в электрогенерации – до 270 млрд кВт×ч/год (ветроэнергетика – до 60 млрд кВт×ч/год, солнечная электроэнергетика – 5,7 млрд кВт×ч/год, большая гидроэнергетика – 20,1 млрд кВт×ч/год, малая гидроэнергетика – 8,6 млрд кВт×ч/год, биоэнергетика – 27 млрд кВт×ч/год, энергия окружающей среды – до 146 млрд кВт×ч/год).

Введение в эксплуатацию в последние 5 лет в области ветроэнергетики и солнечной энергетики, и в меньшей степени малой гидроэнергетики [4, 5, 6], и других объектов возобновляемой энергетики приводит к постановке задачи создания сетей с распределенной генерацией и регулирование потоков мощности в таких сетях. Выходная мощность возобновляемых источников энергии также должна управляться независимо от локальной загрузки области. В таком случае системы с распределенной генерацией могут негативно повлиять на функции управления напряжением сети, увеличивая колебания между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с необходимым значением.

Из-за внедрения систем с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников энергии появляются проблемы с контролем и обеспечением стабильности энергосети и качества напряжения. Отсюда возникает необходимость автоматизации таких систем.

Следовательно с увеличением количества и мощности источников систем с распределенной генерацией возникают различные технические, эксплуатационные и экономические проблемы в интеграции распределенных систем в существующие энергетические системы.

Тем не менее, научно-исследовательские работы в этом направлении, показывают, что существуют проблемы, которые системы с распределенной генерацией, представляет для безопасной и надежной работы систем распределения энергии.

Актуальность работы. Технологии распределенных поколений. Из-за увеличения различных технологий, а также развития РГ, которые играют существенное и актуальное явление в энергетической системе, до сих пор нет универсального соглашения по определению параметров генераторов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с целью использования их, как объекты распределенной генерации в общей энергосистеме.

Современное определение РГ очень разнообразно и варьируется от 1 кВт – для систем на основе солнечных модулей, до ветрогенераторов от 1 МВт до 1000 МВт.

Некоторые из популярных технологий РГ перечислены ниже:

- паротурбинные установки;
- микрогэс-турбины, газовые турбины горения;
- топливные элементы;
- фотовольтаическая (PV) система;
- ветротурбины.

Внедрение систем распределенной генерации в энергосистемы Украины. Различные типы распределенной генерации, в будущем в Украине, ожидаются что они будут только расти. РГ включает в себя применение небольших генераторов, разбросанных по всей энергосистеме, чтобы обеспечить потребления энергии электрическими потребителями.

Такие системы, которые локально интегрируются в энергосеть несколько достоинств с точки зрения местоположения, поскольку, использования таких систем могут предотвратить падения напряжения на отдельном участке линии, иными словами компенсировать его.

Соответствующая мощность внедряемой РГ для эффективного и надежного энергоснабжения вызывает необходимость дополнительных исследований.

Однако размер генераторов зависит от нескольких факторов, таких как доступность входной энергии, месторасположения, экономической и экологической составляющей.

Анализ исследований показывает следующие проблемные направления при использовании систем с РГ:

- интеграция РГ в общую энергосистему;
- оптимальное расположение объектов РГ;

- изменение мощности короткого замыкания;
- качество напряжения;
- стабильность напряжения;
- несбалансированность систем с РГ.

Рассмотрим основные проблемы в вышеперечисленных направлениях.

Интеграция РГ в общую энергосистему. Системы с распределенной генерации дают ряд преимуществ, таких как увеличение поддержки напряжения, надежность, экономическую гибкость, эффективность и вспомогательные услуги, а также снижение выбросов веществ, загрязняющих окружающую среду, повышение безопасности, увеличение мощности, уменьшение потери энергии в энергосистеме.

Выход мощности РГ в сеть варьируется в зависимости от изменения локальной нагрузки. Выходная мощность ВИЭ также может управляться независимо от локальной загрузки области. Этот режим управления реализуется, если работа генераторов соответствует сигналу потребления, который может или, в некоторых случаях, не может соответствовать местным изменениям нагрузки, а также необходимо учитывать возможность выработки электроэнергии генераторами ВИЭ, которые в свою очередь зависят от природных ресурсов, таких как солнечная энергия или энергия ветра.

В таком случае системы РГ могут негативно повлиять на функции управления напряжением сети, увеличивая колебания между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с необходимым значением. Поскольку минимальный уровень напряжения может оставаться (как правило, при высокой нагрузке, отсутствие работы генераторов), но максимальный уровень напряжения может увеличиться, например, в условиях низкой нагрузки с РГ, работающими при максимальной производительности в то время, когда необходимость отсутствует. Что в свою очередь создает проблемы традиционному энергоснабжению сети, с мощностью, напряжением, частотой.

Из-за внедрения систем РГ на основе ВИЭ риск проблем с контролем и стабильностью энергосети. Например, если автоматический выключатель в распределительной системе сработал, это может привести к удалению ячейки РГ из системы. Если потеря электропитания не обнаружена блоком генератора, участок РГ продолжит работу.

Отсюда возникает необходимость автоматизации системы РГ, которая должна точно соответствовать активной и реактивной мощности нагрузки в участке системы, тогда система могла бы продолжать работать без каких-либо проблем.

Однако, этот нюанс является сомнительным, в том, что ячейка РГ будет точно соответствовать нагрузке в системе в нужный момент времени. Поэтому, будут возникать колебания частоты или напряжения, когда ячейка РГ попытается подключиться и загрузить систему. Следовательно, присоединения генераторов требуют определенных правил и алгоритмов присоединения к сети, в случае повышения нагрузки в энергосистеме РГ начинало бы отдавать нагрузку, а при потере нагрузки – остается отсоединенными до тех пор, пока сеть не будет нагружена.

На этой почве и возникает «конфликт» владельцев систем распределенной генерации и энергокомпаний, потому что не всегда энергии от РГ является востребованной.

Оптимальное расположение объектов РГ. Существует несколько способов выбора оптимального расположения источников распределенной генерации для различных целей в энергосистеме.

Базируясь на приоритетах целей внедрения источников РГ, аналитический процесс используется для определения наилучшего расположения генераторов, этот вариант возможен при существующей базе данных энергопотребителей за определенный период времени. Предлагаемый метод достаточно хорош для нынешнего состояния энергосистемы в Украине, так как большинство потребителей имеют постоянную основу использования электрической энергии и рост её потребления. Опираясь на данные такими как расширение сети, концентрация нагрузки, структурные и регуляторные изменения и т.д. можно ориентировочно определить необходимое месторасположение РГ. Но стоит учесть, что оптимальное местоположение может не быть актуальным после нескольких лет. Более того, с ростом уровня внедрения систем распределенной генерации, оптимальное местоположение может меняться, и для поиска оптимального местоположения требуется новое скоординированное исследование.

Требования к системе защиты в системах с распределенной генерации. В зависимости от характеристик РГ (его номинальной мощности, используемой технологии, режима работы), расположения генераторов и конфигурации сети, влияние распределенной генерации на защиту от перегрузки по току может отличаться. Это явно указывает на то, что источники питания на основе ВИЭ, безусловно, влияют на схему защиты распределительной сети.

Если система защиты блоков РГ может обнаружить неисправность и быстро отключиться от сети, тогда источник РГ не будет мешать нормальной работе системы защиты. Поэтому большинство стандартов присоединения требуют отключения источника ВИЭ при возникновении неисправности.

В настоящее время все больше и больше распределительных сетей автоматизированы и оснащены системами SCADA, однако, она не всегда может справиться с неисправностью, откуда и возникает необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Изменение мощности короткого замыкания. Установка новых распределенных генераторов в распределительных сетях потенциально увеличивает уровень мощности короткого замыкания (КЗ). Хотя иногда желательно иметь высокий КЗ, например, в точке подключения инвертора линии коммутируемой станции HVDC или при наличии больших нагрузок с быстро меняющимися требованиями, в общем случае увеличение КЗ потенциально указывает на возможном возникновении проблем на участке сети.

Качество напряжения. Различные РГ имеют разные характеристики и, таким образом, создают различные проблемы с качеством электроэнергии. Ярким примером является то, что один большой источник РГ, например, ветряная турбина, в слабой сети может привести к проблемам с качеством электроэнергии особенно при пуске и остановке. Чрезмерное использование силовых электроприборов и современных средств управления представляет проблемы с качеством электроэнергии и кроме того, эти устройства очень подвержены проблемам с качеством электроэнергии.

Стабильность напряжения. Традиционно, структура распределительной сети не нуждалась в рассмотрении проблем стабильности, поскольку сеть была пассивной и радиальной и оставалась стабильной в большинстве случаев, если сеть передачи сама была стабильной.

Однако это, скорее всего, изменится по мере увеличения проникновения этих схем и увеличения их вклада в сетевую энергоэффективность. Области, которые необходимо учитывать, включают в себя переходные процессы (стабильность первой гармоники), а также долгосрочную динамическую стабильность и возможный коллапс напряжения.

Несбалансированность систем с РГ. Зачастую очень часто встречаются системы РГ, которые предоставляют генерацию в сеть в однофазном режиме. Если это возникает, происходит дисбаланс системы, и он не должен увеличиваться сверх допустимого предела. Так как, работа генераторов испытывает дисбаланс нагрузок в фазах. Их производительность ухудшается из-за неуравновешенности в системе.

Выводы. В данной статье рассматриваются технологии распределенной энергетики и их влияние на будущую энергосистему. Различные варианты РГ, включенные в украинскую энергосистему, описываются вместе с будущими возможностями и вариантами. Из-за растущего спроса на ископаемое топливо и экологических проблем, возникающих при использовании традиционной генерации, внедрение распределенной генерации, поступающей от возобновляемых источников энергии, растет и ожидается, что в будущем будет расти. При увеличении источников РГ, возникают различные технические и экономические проблемы в интеграции распределенных поколений в существующие энергетические системы, которые необходимо рассматривать.

Литература

1. Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы / Л.С.Беляев, А.В. Лагереv, В.В. Посекалин; Отв. ред. Н.И.Воропай. Новосибирск: Наука, 2004, 386 с.
2. Каргиев М.В. Распределенная генерация энергии с использованием возобновляемых источников энергии // Energy Fresh. - 2010 - № 1. - С. 42-45.
3. Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні. – К., 2005. – 36 с.
4. Альтернативная энергетика в Украине: монография / Г.Г. Пивняк, Ф. П. Шкрабец; Д.: НГУ, 2013. – 109 с.
5. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Пивняк, Ф. Шкрабец, Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
6. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: монография / С.В. Тарасов, Ф.П. Шкрабец, В.А. Задонцев, С.В. Отчик; под общ. ред. В.А. Дзензерского и Г.Г. Пивняка; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 156 с.

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

УДК 652.1:586.24

О.О. Азюковський, канд. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ СТІКАННЯ З ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ З ВРАХУВАННЯМ ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ ЗБУРЕНЬ ДЛЯ ПІДЗЕМНИХ МЕТАЛЕВИХ КОМУНІКАЦІЙ

Анотація. В роботі розглянуті фактори, які впливають на струми стікання з підземного металевих газопроводу. Отримано вираз, який враховує складові, що зумовлюють величину струму стікання з трубопроводу. Отриманий результат дозволяє більш точно оцінювати корозійний стан і, як результат, формувати певні режими роботи елементів електрохімічного захисту.

Ключові слова: електрохімічна корозія, електрохімічний захист; підземний сталевий трубопровід; ток стікання з трубопроводу.

Аннотация. В работе рассмотрены факторы влияющие на токи стекания с подземного стального газопровода. Получено выражение, которое учитывает составляющие, которые формируют величину токов стекания с трубопровода. Полученный результат позволяет более точно оценивать коррозионную опасность и формировать параметры работы элементов электрохимической защиты.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, электрохимическая защита; подземный стальной трубопровод; ток стекания с трубопровода.

Abstract. The paper considers the factors influence the runoff currents from the underground steel pipeline. An expression is obtained that considers the components that form the magnitude of the currents flowing from the pipeline. The result obtained allows us to more accurately assess the dangerous of corrosion and to form the parameters of the electrochemical protection elements.

Keywords: electrochemical corrosion, electrochemical protection; underground steel pipeline; current flowing from the pipeline.

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладним задачами

Україна має розгалужену систему трубопровідного транспорту який є найбільш ефективним та раціональним для транспортування великих об'ємів рідинних та газоподібних речовин. Природний газ є однією із енергетичних складових, що користується великим попитом у всьому світі як для потреб промисловості так й для побутових цілей. Можливість використання природного газу задля забезпечення процесу його транспортування, готовність до кінцевого використання з мінімальною кількістю етапів перетворень, відносна простота процесу отримання з нього теплової енергії зумовлюють його привабливість та довготривалу перспективу використання. В Україні одночасно із магістральними системами газопроводів існують розгалужені мережі промислового та побутового споживання.

Переважну частину системи підземних газопроводів складають металеві трубопроводи. Термін експлуатації підземних металевих трубопроводів складає декілька десятків років. Водночас, слід зауважити, що відповідно до регламентних робіт здійснюється безперервний поточний ремонт, що зумовлює ситуацію, коли ланка газопроводу має ділянки із значними відмінами у часі експлуатації. Зручність експлуатації, здатність транспортувати великі об'єми газу, надійність, мінімальна залежність від природних умов зумовлюють актуальність завдання щодо збереження у робочому стані системи підземних газопроводів. Крім того, слід враховувати що навіть мінімальне порушення герметичності газопроводу призводить не тільки до втрат речовини, що транспортується, а й до значних екологічних ризиків. Тому забезпечення цілісності системи підземних металевих газопроводів зумовлює актуальність заходів та наукових завдань що спрямовані на підвищення ступеню надійності трубопровідного транспорту.

Однією із важливих ланок у експлуатації підземних металевих трубопроводів є система електрохімічного захисту. Електрохімічна корозія є одним із найбільш суттєвим фактором, що зумовлює надійність та, одночасно, є основним фактором ризику, що зумовлює цілісність газопровідної мережі.

Результати досліджень. Корозійна ситуація, що складається навколо підземного металевих об'єкту, визначається струмами стікання з нього. Струми стікання з трубопроводу визначають інтенсивність вимивання металу з стінок. Підземні трубопроводи часто знаходяться в межах активного впливу струмів, що блукають, які зумовлені залізничним електрифікованим транспортом. Водночас, підземні

комунікації знаходяться під впливом системи катодного захисту від електрохімічної корозії. Вони також формують електротехнічні кола струму, у тому числі й зменшуючи струми стікання. Отримання виразу, що забезпечує можливість розрахунку струмів стікання з трубопроводу, що знаходиться одночасно під впливом залізничного транспорту та сучасної системи катодного захисту є актуальною науковою задачею.

У випадку, коли залізнична електрифікована система транспорту є завантаженою, що відбувається у часи пікового навантаження, її можливо розглянути як систему з рівномірно розподіленим навантаженням [1]. Електричне поле, що створено контактною мережею залізничного транспорту визначається згідно до виразу [1-3]:

$$E_x^z = -\frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{\infty} j_r(\zeta) \frac{d\zeta}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y^2}} - \frac{i\omega\mu}{4\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\zeta) \left(\frac{1}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y_1^2}} \right) d(\zeta), \quad (1)$$

де $y_1^2 = y^2 - \frac{2i}{\gamma^2}$ - відстань від джерела електричного поля до точки, що розглядається; ζ - лінійний розмір (прирошення) ділянки, що розглядається; ω - частота поля; μ - магнітна проникність; x - координата повздовж трубопроводу; j_r - струм стікання з рейок; I_0 - повний струм електротехнічної системи, що розглядається; σ - провідність ґрунту; i - струм рейок; $\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ - коефіцієнт згасання; .

Наявність електричного поля (1) зумовлює розподіл струму, яке на основі виразу (2) визначається, здійснивши заміну координат, його рішенням (3) [1-4]:

$$I''(z) - \alpha^2 I(z) = -\frac{E_z^{zv}(z)}{R_{per}} \quad (2)$$

$$I_t''(x) - \alpha_t^2 I_t(x) = -\frac{E_x^{zv}(x)}{R_{per}^t} \quad (3)$$

де $\alpha_t = (1+i)\beta_t$ - стала розповсюдження, R_{per}^t - перехідний опір трубопроводу.

Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_{per}^t = R_t^{iz} + R_t^l \quad (4)$$

де R_t^{iz} - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Перетинний опір трубопроводу визначається як:

$$R_t^l = \frac{1}{\pi\sigma} \ln \frac{1.12}{\gamma\sqrt{r_t H}} \quad (5)$$

де H - глибина залягання трубопроводу, $\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ - коефіцієнт згасання в ґрунті.

Рівняння (2) має рішення, що поєднує закон зміни зовнішнього поля (напруги) E_x^{zv} та залежність зміни струму трубопроводу I_t за його довжиною x . Вважаючи трубопровід нескінченним, запишемо:

$$I_t(x) = \frac{1}{2\alpha_t R_{per}^t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} E_x^{zv}(t) dt \quad (6)$$

Поєднуючи (1) та (6) отримаємо вираз для струму трубопроводу:

$$I_t(x) = -\frac{1}{4\pi\alpha_t\sigma R_{per}^t} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} dt \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} j_r(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y^2}} + \right. \\ \left. + i\gamma^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} dt \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\xi) \left(\frac{1}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y_1^2}} \right) d\xi \right) \quad (7)$$

де y_1, y_2 відстані, що враховують товщину стінок трубопроводу.

Вираз для визначення струму трубопроводу I_t (7) вздовж його довжини, що зумовлений впливом електрифікованої залізничної колії містить значення струму стікання з рейок j_r . Проте, корозійний ефекти визначається струмом стікання з трубопроводу j_t . Для спрощення розрахунку запишемо вираз (7) враховуючи, що $\xi = \tau + t$ [5,6]:

$$I_t = -\frac{1}{4\pi\sigma\alpha_t R_{per}^t} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau) d\tau}{\sqrt{\tau^2 + y^2}} + i\gamma^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \left(\frac{1}{\sqrt{\tau^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{\tau^2 + y_1^2}} \right) d\tau \right); \quad (8)$$

$$f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial j_r(\tau+t)}{\partial t} e^{-\alpha_t|x-t|} dt; \quad (9)$$

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\tau+t) e^{-\alpha_t|x-t|} dt. \quad (10)$$

Струм стікання з залізничних рейок визначається згідно до виразу:

$$j_r = -\frac{dI_r}{dx} = \frac{\alpha_r I_n}{2} \eta e^{-\alpha_r(x-x_0)}, \quad (11)$$

де $\eta = 1 - \frac{Z_k}{Z_r}$ - коефіцієнт екранування; Z_r - повний опір рейкової колії; $Z_k = \frac{\omega\mu_0}{2} + i \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma D}$ - опір, зумовлений впливом контактної мережі на рейкові колії, D - відстань між контактною та рейковою мережами.

Струм стікання з підземного металевого трубопроводу, що знаходиться в зоні впливу струмів, що блукають визначається відповідно до виразу (12). Рівняння (12) забезпечує можливість встановлення впливу на підземні металеві циліндричні комунікації електрифікованого залізничного транспорту. Проте, підземні металеві трубопроводи знаходяться під впливом не тільки струмів, що блукають та електричних полів залізничного транспорту. Захист від електрохімічної корозії забезпечується електротехнічною системою катодного захисту [5, 6].

$$j_t = \frac{I_n \eta \alpha_r^2}{2\pi\sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left(\left(\alpha_r + \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \right) \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - \right. \\ \left. - \left(\alpha_t + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \right) \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} - \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} + \right. \\ \left. + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} \right). \quad (12)$$

де $\Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r, y)}$ - функції розрахунку інтегральних виразів; I_n - струм зосередженого навантаження (локомотиву електрифікованого рейкового транспорту).

До системи входять станції катодного захисту (СКЗ), що зумовлюють наявність захисного потенціалу на об'єкті, який захищається. Це забезпечується шляхом подавання напруги за певним законом зміни як за часом так й в залежності від корозійного стану у навколишньому середовищі та у системи «металевий підземний трубопровід – ґрунт – СКЗ».

Сучасні СКЗ створені за високочастотним принципом перетворення сигналу (рис. 1). Головною перевагою їх є масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дозволяють інтегрувати ці СКЗ до загальних систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії [4].

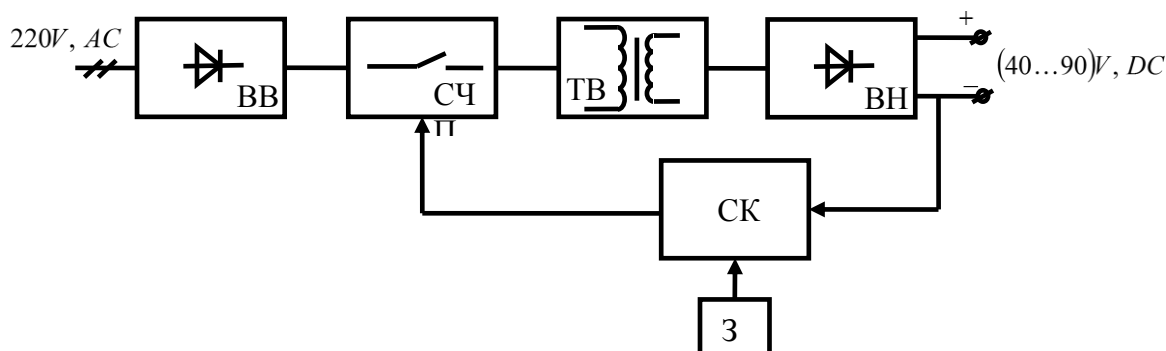


Рис. 1. Інверторний високочастотний випрямляч

Висковольтний випрямляч (ВВ) здійснює випрямлення напруги, яка за допомогою силового частотного перетворювача (СЧП) формується до змінної. Змінна напруга надходить до високочастотного трансформатора (ТВ), який перетворює рівень напруги до потрібного значення. Потім низьковольтний випрямляч (ВН) випрямляє напругу, що подається до підземного сталевому трубопроводу та анодного заземлювача. Система керування (СК) відпрацьовує сигнал завдання з блока (З) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СЧП. Приймавши сигнал на виході СКЗ правильної прямокутної геометричної форми та розклавши його в ряд Фур'є, запишемо:

$$f(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos(2\omega t) - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos(6\omega t) - \dots \right) \quad (13)$$

Напругу на підземному сталевому трубопроводі, прийнявши схему заміщення трубопроводу як систему з розподіленими параметрами [2], можливо визначити згідно виразу [5]:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x)} + \dot{A}_2 e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x)}, \quad (14)$$

а струму, що протікає через трубопровід, як:

$$\dot{I} = -\frac{A_1}{Z_v} e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x - \phi_v)} + \frac{A_2}{Z_v} e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x - \phi_v)}, \quad (15)$$

де Z_v – хвильовий опір, який визначається так:

$$Z_v = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = Z_v e^{j\psi_v}. \quad (16)$$

Здійснивши перехід від комплексних напруги та струму до функцій часу шляхом перемноження виразів (14) та (15) на величину $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ й взявши від добутку уявну частину, запишемо:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x) + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x), \quad (17)$$

де A_1, A_2 – сталі інтегрування; α – коефіцієнт згасання; β – коефіцієнт фази; ψ_0, ψ_p – фази хвилі що падає та хвилі, що є віддзеркаленням; x – відстань від точки підключення СКЗ.

Таким чином струм, що протікає через трубопровід:

$$i = \frac{A_1}{z_v} \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x - \psi_v) + \frac{A_2}{z_v} \sqrt{2} e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x - \psi_v). \quad (18)$$

Повний струм, що протікає трубопроводом, визначається як [7]:

$$I_t = \frac{I_n \alpha_r^2 \eta}{2\pi \sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left(\left(1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \right) \Psi_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} - \left(1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \right) \Psi_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \Psi_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} + \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \Psi_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - i \frac{\gamma^2 (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)}{\alpha_t^2 \alpha_r^2} \times \ln \frac{y_1}{y} \frac{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (x_0-x)} \right)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + y_1^2 + (x_0-x)} \right)} \right). \quad (19)$$

До виразу (19) входить значення струму I_n , що зумовлений зосередженим навантаженням на рейковій колії. Це зумовлює закон зміни струму стікання як за часом так й за довжиною трубопроводу (координатою x) за умови відсутності інших збурень.

Повний струм трубопроводу, що зумовлений впливом як залізничним електрифікованим транспортом так й СКЗ на основі (18,19) визначається як:

$$I_t = \frac{I_n \alpha_r^2 \eta}{2\pi \sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left(\left(1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \right) \Psi_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} - \left(1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \right) \Psi_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \Psi_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} + \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \Psi_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - i \frac{\gamma^2 (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)}{\alpha_t^2 \alpha_r^2} \times \ln \frac{y_1}{y} \frac{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (x_0-x)} \right)}{\left(\sqrt{(x-x_0)^2 + y_1^2 + (x_0-x)} \right)} \right) + \left(\frac{A_1}{z_v} \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x - \psi_v) + \frac{A_2}{z_v} \sqrt{2} e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x - \psi_v) \right). \quad (20)$$

Струм стікання з підземного металевго трубопроводу, що й є причиною корозійної руйнації комунікацій, визначмо на основі інформації про розподіл за довжиною трубопроводу (за координатою x) напруги, що зумовлена впливом СКЗ (17). Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_t^p = R_t^{iz} + R_t^l. \quad (21)$$

де R_t^{iz} - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Повний опір трубопроводу визначається виразом:

$$Z_t = Z_{po} + \tilde{Z}_t. \quad (23)$$

Поверхневий опір трубопроводу визначається згідно виразу:

$$Z_{po} = \frac{(1-i)\gamma_t}{2\pi r_t \sigma_t} \operatorname{ctg}((1-i)\gamma_t h_t). \quad (24)$$

де h_t - товщина стінок трубопроводу.

Опір трубопроводу, що зумовлено впливом навколишнього середовища (грунту) визначається [7]:

$$\tilde{Z}_t = \frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}. \quad (25)$$

У першому приближенні, можливо знехтувати поверхневим опором трубопроводу для визначення струмів стікання з нього. Тоді струм стікання визначатиметься як:

$$j_t' = \frac{A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x) + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x)}{\frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}}. \quad (26)$$

На основі (26) отримавши попередньо значення напруги за координатою x , визначмо значення струму стікання з трубопроводу, що зумовлено роботою СКЗ. Враховуючи (12, 26) запишемо вираз для повного струму стікання з підземного металевго трубопроводу, що одночасно знаходиться під впливом електрифікованого залізничного транспорту та СКЗ:

$$j_t = \frac{I_n \eta \alpha_r^2}{2\pi \sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left(\left(\alpha_r + \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \right) \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_t, y)} - \left(\alpha_t + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \right) \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t, y)} - \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t, y)} + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t, y)} \right) + \left(\frac{A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x)}{1} + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x) \right) \frac{\frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}}{\frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}}. \quad (27)$$

Висновки. Вираз 27, на відміну від відомого, враховує складові струму стікання з підземного трубопроводу, що зумовлені основними джерелами збурень для підземних металевих комунікацій. Це дозволяє більш точно оцінювати корозійний стан та ефективність заходів з катодного захисту підземних металевих комунікацій.

Список використаних джерел

1. Складов С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Складов Станислав Александрович. - Х., 2002 – 168с.
2. Азюковський О.О. Потенціал підземного металевго трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. / О.О.Азюковський // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 18-22.
3. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
4. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевго трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
5. Вербенець Б. Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів: дис. кандидата технічних наук: 05.11.13 / Вербенець Богдан Ярославович. – Л., 2011. – 106 с.
6. Складов С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Складов Станислав Александрович. - Х., 2002 - 168с.
7. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Бештою О.С.

УДК 621.365

І.В. Жежеленко, д-р. техн. наук

(Україна, м. Маріуполь, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський технічний університет»)

Ю.А. Папайка, О.Г. Лисенко, канд. техн. наук

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

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДЕКСУ НАДІЙНОСТІ

Аннотация. В статье представлены понятие «индекса надежности», как основного показателя энергетической эффективности систем электроснабжения. Разработаны научные основы расчета данного показателя, основываясь на показатели экономического развития страны.

Получено пригодны для практических целей зависимости индекса надежности и обоснованно минимальные значения резервных мощностей генерирующей энергосистемы. Выполнены расчеты индекса надежности для электрических сетей Украины и сформулированы обобщающие выводы по выполнению необходимых мероприятий для улучшения данного показателя к уровню развитых стран мира.

Выполненный анализ использования индекса надежности для оптимизации состава оборудования энергетических систем и районных подстанций.

Ключевые слова: индекс надежности, система электроснабжения, надежность электрооборудования, силовые трансформаторы, кабельные линии.

Анотація. У статті представлено поняття «індексу надійності», як основного показника енергетичної ефективності систем електропостачання. Розроблені наукові основи розрахунку даного показника, базуючись на показники економічного розвитку країни.

Отримано придатні для практичних цілей залежності індексу надійності та обґрунтовано мінімальні значення резервних потужностей генеруючої енергосистеми. Виконано розрахунки індексу надійності для електричних мереж України та сформульовано узагальнюючі висновки щодо виконання необхідних заходів для покращення даного показника до рівня розвинених країн світу.

Виконаний аналіз використання індексу надійності для оптимізації складу обладнання енергетичних систем та районних підстанцій.

Ключові слова: індекс надійності, система електропостачання, надійність електрообладнання, силові трансформатори, кабельні лінії.

Abstract. The article presents the concept of "reliability index" as the main indicator of energy efficiency of power supply systems. The scientific basis for calculating this indicator is developed, based on indicators of economic development of the country.

The reliability indexes are suitable for practical purposes and the minimum values of reserve capacities of the generating power system are substantiated. Calculations of the reliability index for electric networks of Ukraine are executed and general conclusions about the implementation of the necessary measures for improving this indicator to the level of the developed countries of the world are formulated.

The analysis of the use of the reliability index for optimization of the equipment of power systems and district substations is carried out.

Keywords: reliability index, power supply system, electrical equipment reliability, power transformers, cable lines.

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями

Реальна ситуація сьогодення української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %). Порівняно з країнами з розвинутою економікою цей показник набагато більший (для країн Західної Європи втрати складають 4-5 %, США – 6 %). Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги, невирішеністю проблем якості електричної енергії. Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж по цілому ряду показників. Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕП). Вона визнана провідними

світовими вченими та відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики і є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж.

Очевидно існує досить щільний зв'язок значень втрат електроенергії в електричних мережах різних країн з їх економікою. У країнах з більш розвинутою економікою, як правило, вище технічна культура виробництва, передачі та розподілу електроенергії, використовуються більш сучасні системи управління режимами роботи електричних мереж, контролю й обліку електроенергії, діє чітка нормативно-правова база і система тарифного регулювання.

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний також з невирішеністю таких проблем: низький рівень компенсації реактивної потужності; недостатнє використання засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги; низька якість електричної енергії.

Результати дослідження

Поняття надійності в електроенергетиці є одним з основних, що характеризує енергоефективність виробництва, передачу і розподіл електричної енергії. В різних нормативних документах під надійністю розуміється властивість об'єкта (електроустановки, електроенергетичної станції або її частини) забезпечувати необхідні функції (наприклад, безперебійне електропостачання споживачам у заданому обсязі та потрібній якості), зберігаючи свою працездатність та експлуатаційні показники. У сучасних умовах розділяють поняття надійності на оптовому ринку (системна надійність) і роздрібному ринку (надійність електричної мережі). Надійність як ймовірність бездефіцитної роботи електростанцій характеризується індексом надійності p . У СНД нормується індекс надійності, що дорівнює 0,966. Це значно нижче зарубіжних нормативів.

Забезпечення значень p означає зниження вірогідності обмеження електропостачання, що вимагає додаткових капіталовкладень у підвищення надійності всіх складових енергосистеми (генеруючих потужностей, електричних мереж різних рівнів, автоматичних пристроїв та ін.), а також витрат K на забезпечення резерву генеруючих потужностей $P_{рез}$. Значення K можна представити у вигляді

$$K = P_{рез} \cdot K_{нит}, \quad (1)$$

де $K_{нит}$ – питома вартість одного кіловату установки, що генерує потужність, долл/кВт.

Збиток, що виникає через дефіцит електроенергії при відсутності аварійного резерву

$$Z = P_{рез} T y_a q_{деф}, \quad (2)$$

де y_a – питомий збиток через недостатнє постачання електроенергії споживачу, долл/кВт·ч; $q_{деф}$ – інтегральна ймовірність виникнення дефіциту потужності.

Очевидно,

$$p = 1 - q_{деф}. \quad (3)$$

З виразів для K та Z , враховуючи, що $Z \geq K$, отримаємо [2-4]:

$$q_{деф} > \frac{K_{нит}}{T y_a}, \quad (4)$$

де $T = 8760$ год.

Останній вираз використовується зазвичай з урахуванням коефіцієнта ефективності капітальних вкладів $E_{нит}$ протягом року, а також річних витрат на амортизацію a_0 , ремонтні роботи та обслуговування $\beta_{екон}$. Таким чином,

$$q_{деф} > \frac{K_{нит} (E_{ном} + a_0 + \beta_{екон})}{y_a \cdot T}. \quad (5)$$

Наприклад, при $K_{нит} = 2,75$ долл/кВт, $a_0 + \beta_{екон} = 0,05$ та $y_a = 0,125$ долл/кВт·ч виявляється $q_{деф} \geq 0,04$ та $p = 1 - q = 0,96$. При нормованому значенні $p = 0,96$ можливий дефіцит електроенергії у споживача не більше 35 год/рік.

За кордоном, у деяких країнах, приймають $p \approx 0,999$, тоді дефіцит потужності – не більше 8 год/рік.

Згідно з технічними, енергетичними й економічними особливостями електроенергетики виділили ряд ієрархічних рівнів надійності електропостачання.

Територіальні (регіональні) розподільні мережі 220-150-110-35-10(6) кВ, призначені для забезпечення окремих споживачів, віднесено до 3-го рівня. Для електричних мереж такого рівня ймовірність бездефіцитної роботи споживачів визначена І.М. Марковичем величиною $p = 0,996$. У розрахунках було прийнято наступні показники: питома вартість резервних енергетичних потужностей $K_{\text{нмт}}$ – 2,75 долл./кВт, питомий збиток від порушень електропостачання y_0 – 0,075 долл./кВт·год.

Як відомо, одним з найважливіших показників енергетичної ефективності є індекс надійності електропостачання p .

В енергосистемах СНД значення індексу надійності знаходиться в діапазоні 0,996. Зарубіжні нормативи надійності, що відповідають сучасному стану енергетики, досить високі: в США – 0,9997, Франції – 0,9997, Нідерландах – 0,9995, Ірландії – 0,9991, Скандинавських країнах – 0,999. Перехід на більш високий рівень надійності потребує витрат $K_{\text{баж}}$ у розмірі:

$$K_{\text{баж}} = K \left(\frac{\lg p}{\lg p_{\text{баж}}} \right)^a, \quad (6)$$

де $K_{\text{баж}}$ – капіталовкладення для досягнення бажаного рівня індексу надійності $p_{\text{баж}}$; K – капітальні витрати, при яких забезпечується індекс надійності p ; $a > 1$ – показник ступеня.

При $p = 0,996$ і $p_{\text{баж}} = 0,9998$ $K_{\text{баж}} = K(1,9)^a$. Отже потрібне збільшення витрат у 1,9 рази.

Оціночні розрахунки показали, що для забезпечення більш високого рівня надійності необхідні витрати в розмірі 0,1-0,2 тис. долл./рік на 1 МВт навантаження.

Розглянемо можливість аналітичного визначення оптимального значення резервної потужності на електростанціях, що забезпечує необхідний рівень надійності роботи енергосистеми.

При збільшенні резервної потужності підвищуються витрати на спорудження електростанцій і знижуються витрати (збитки) від ймовірного недопостачання електроенергії споживачам, тобто загальні витрати можна представити у вигляді [4, 6]:

$$Z = EK + a(p_a + p_{m,o} + p_k)K + Y = K(E + (p_a + p_{m,o} + p_k))Y, \quad (7)$$

де E – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень K ; a – коефіцієнт, що враховує частку витрат палива на роботу резервної потужності (може бути прийнятий рівним 1,0-3,0); p_a , $p_{m,o}$, p_k – частка відрахувань від капітальних витрат на амортизацію, поточний ремонт і обслуговування, капітальний ремонт; Y – збиток від недопостачання електроенергії споживачам.

Враховуючи, що з ростом резервної потужності значення K зростає, а Y знижується, то можна записати:

$$Y = z + \frac{v}{P_{\text{рез}}}, \quad (8)$$

де z – складова, що враховує частку шкоди від недопостачання електроенергії споживачам, яка не залежить від значення $P_{\text{рез}}$, грн; v – складова збитку, що залежить від зміни $P_{\text{рез}}$ грн·кВт.

Підставивши значення збитку в (7), отримаємо:

$$Z = K_{\text{нмт}} P_{\text{рез}} (E + a(p_a + p_{m,o} + p_k)) + z + \frac{v}{P_{\text{рез}}}, \quad (9)$$

З (9) знайдемо оптимальне значення $P_{\text{рез}}$. Для цього візьмемо першу похідну $dZ/dP_{\text{рез}}$ і прирівняємо її до нуля:

$$\frac{dZ}{dP_{\text{рез}}} = K_{\text{нмт}} (E + a(p_a + p_{m,o} + p_k)) - \frac{v}{P_{\text{рез}}^2} = 0.$$

Звідси

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{v}{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}}. \quad (10)$$

Розглянемо шляхи визначення значення v . Розділимо ліві й праві частини виразів (8) на Y та отримаємо

$$1 = \frac{z}{Y} + \frac{v}{P_{рез}Y} = x_1 + a_1x_2, \quad (11)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{z}{Y}, \quad a_1 = \frac{v}{P_{рез}}, \quad x_2 = \frac{1}{Y}, \quad a_1 = \frac{1-x_1}{x_2}.$$

Якщо $x_1 = 1,0$, то $a_1 = 0$, $a_1x_2 = 0$ і $z = Y = P_{рез}Tq_{деф}y_0$, де T – розрахунковий період або період спостереження, приймається рівним числу годин на рік, тобто 8760 годин; $q_{деф}$ – ймовірність дефіциту потужності; y_0 – питомий системний збиток від недопостачання електроенергії споживачам за відсутності аварійного резерву потужності (знаходиться у межах 3-50 долл./кВт).

$$\text{Якщо } x_1 = 0, \text{ то } a_1 = \frac{1}{x_2} \text{ та } \frac{v}{P_{рез}} = Y,$$

тоді

$$v = P_{рез}Y, \quad (12)$$

$$\text{Якщо } 0 < x_1 < 1, \text{ то } a_1 > 0 \text{ та } \frac{v}{P_{рез}} = (1-x_1)Y \text{ або } v = (1-x_1)YP_{рез}.$$

Підставимо значення v у формулу (10) і отримаємо

$$P_{рез} = \sqrt{\frac{(1-x_1)P_{рез}^2Tq_{деф}y_0}{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}}. \quad (13)$$

Звідси ймовірність дефіциту потужності

$$q_{деф} = \frac{K_{num}(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k))}{(1-x_1)Ty_0}. \quad (14)$$

Для забезпечення $q_{деф} = 0,001$ або $p_{баж} = 0,999$ необхідно при $(E + a(p_a + p_{m.o} + p_k)) = 0,4$; $x_1 = 0,1$; $y_0 = 50$ дол./кВт·год; $T=8760$ годин мати значення K_{num} не більше 1000 дол./кВт.

Оптимізація надійності в промисловому електропостачанні

Для розподільних електричних мереж в якості основних показників надійності також застосовують:

а) ймовірність обмеження навантаження споживачам (порушення електропостачання) порівняно зі значеннями в нормальному режимі;

б) ймовірність неперевикнення середньорічного відносного електропостачання деякого нормованого значення [2, 3, 6].

В якості критерію оптимальності приймають мінімум сумарних економічних затрат:

$$Z_{над} = E_{норм}^{доп} K_{инв}^{над} (\alpha_0 + \beta_{экон}) K_{инв}^{над} + V_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (15)$$

де $E_{норм}^{доп}$ – нормативний коефіцієнт прибутковості інвестицій у надійність; $K_{инв}^{над}$ – сума інвестицій у підвищення надійності; α_0 і $\beta_{экон}$ – коефіцієнти амортизаційних відрахувань та експлуатаційних витрат; V_{Σ} – середньорічне значення збитку від порушень електропостачання.

На рис. 1 показано зміни у витратах та їх складових при зміні надійності електропостачання.

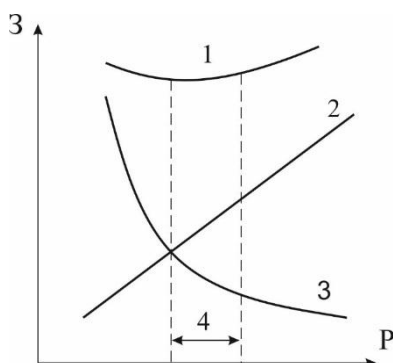


Рис. 1. Графік змін у витратах та їх складових при зміні надійності електропостачання:
1 – мінімум сумарних економічних витрат; 2 – інвестиції в підвищення надійності;
3 – збитки від порушень в електропостачанні; 4 – зона оптимальних значень

Збільшення надійності системи призводить до зменшення сумарного збитку, але потребує додаткових інвестицій у резервування мережі та експлуатаційні витрати. Сумарні витрати мають достатньо широку зону оптимальності.

Висновки

Враховуючи показники економічного розвитку України отримано граничні значення індексу надійності на рівні 0,96, що є значно нижчим за показники економічно розвинених країн. Застосування високих капіталовкладень повинно забезпечити підвищення надійності всіх компонентів електроенергетичних систем, що використовують потужність магістральних і розподільних електричних мереж та надходження інвестицій в забезпечення пристроїв противарійної автоматики й ін.

Список використаних джерел

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
3. Пивняк Г.Г. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: учеб. Пособие / Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А.; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 113 с.
4. Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А., Лысенко О.И. Интергармоник в системах электроснабжения – Научный словарь НГУ, 2017 – №6.
5. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
6. Pivnyak G. G. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise electric power supply / G. G. Pivnyak, I. V. Zhezhelenko, Yu. A. Papaika // Науковий вісник НГУ. - 2016. - № 5. - С. 62 - 66.
7. Pivnyak G.G. Transients in Electric Power Supply Systems: textbook for students of higher educational institutions / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of Academician of National Academy of Sciences of Ukraine Professor G.G. Pivnyak. – Switzerland: TTP. – 2016 – 382 p.p.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 303.724.32

В. П. Козлов, канд. техн. наук, А. А. Мартыненко, О.С. Шевцова

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА В ЛИНЕЙНОМ РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ

Анотація. Показано, що байєсовські методи є засобами аналізу даних, які при малих обсягах вибірки дозволяють оцінити регресійні моделі повніше і точніше в порівнянні з класичними статистичними методами.

Ключові слова: байєсівський підхід, регресійна модель, апіорні параметри, метод Монте-Карло, багатовимірний нормальний розподіл.

Аннотация. Показано, что байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить регрессионные модели полнее и точнее по сравнению с классическими статистическими методами.

Ключевые слова: байесовский подход, регрессионная модель, априорные параметры, метод Монте-Карло, многомерное нормальное распределение.

Abstract. It is shown that Bayesian methods are data analysis tools, which for small sample sizes allow us to evaluate regression models more fully and more accurately in comparison with classical statistical methods.

Keywords: Bayesian approach, regression model, a priori parameters, Monte Carlo method, multidimensional normal distribution.

Введение. Байесовские методы являются средствами анализа данных, которые вытекают из принципов байесовского статистического вывода [1, 2]. Классические статистические методы направлены на получение эффективных алгоритмов оценивания на основе данных относительно большого объема. В случае небольших выборок использование результатов асимптотической теории является необоснованным [1, 2]. В настоящее время актуальной задачей оценивания статистических моделей (в том числе регрессионных) является применение байесовской методологии, которая позволяет полнее оценивать модели и получать достаточно точные результаты в тех случаях, когда применение классического статистического подхода ограничено. Байесовская методология исследовалась во многих работах и используется в разных областях науки и техники. В частности, А. Зельнер исследовал использование таких методов в эконометрике [2, 3].

Постановка задачи. Показать преимущества байесовского подхода с точки зрения полноты и точности полученных результатов на примере линейной регрессионной модели прогнозирования полезного отпуска тепловой энергии.

Основное содержание работы. Наиболее распространенный способ краткосрочного прогнозирования в экономике заключается в использовании линейных регрессионных моделей. Например, запасы топлива на предстоящий отопительный период определяются на основе предполагаемого отпуска тепловой энергии, который зависит от температуры атмосферы. Для расчета коэффициентов линейных регрессионных моделей целесообразно использовать данные только за прошедший отопительный период, так как использование данных за более ранний период приведет к снижению точности прогноза. Пусть полезный отпуск теплоэнергии за прошедший отопительный период приведен в табл. 1. Эти данные можно также представить в виде зависимости от среднемесячной атмосферной температуры (рис. 1).

В общем виде регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$Y_i = \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \beta_3 x_{i,3} + \beta_4 x_{i,4} + \epsilon_i, \quad (1)$$

где $x_{i,1} = 1$ для каждого объекта наблюдения i (отпуска тепла Y_i , соответствующего среднемесячной температуре атмосферы t_i);

$x_{i,2} = 0$, если объект наблюдения i относится к группе выработки тепла с помощью ТЭЦ ($group_i = 0$), и равно 1, если – к группе выработки тепла с помощью ТЦ ($group_i = 1$);

$x_{i,3} = t_i$ (среднемесячная температура атмосферы, соответствующая объекту наблюдения i);

$x_{i,4} = x_{i,2} \times x_{i,3}$.

Для этой модели условные матожидания Y для двух разных технологий выработки тепла следующие:

$$E[Y|\mathbf{x}] = \beta_1 + \beta_3 \times t_i, \text{ если } x_2 = 0, \text{ и} \quad (2)$$

$$E[Y|\mathbf{x}] = (\beta_1 + \beta_2) + (\beta_3 + \beta_4) \times t_i, \text{ если } x_2 = 1. \quad (3)$$

Другими словами, модель предполагает, что выработка тепла линейна по t_i для обеих групп, с разницей в точках пересечения с осью ординат, равной β_2 , и с разницей в наклонах, равной β_4 .

Таблица 1

Полезный отпуск теплоэнергии за прошедший отопительный период

Месяц отопительного периода	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
Среднемесячная температура атмосферы, °C	8	2	-2	-4	-3	2
Отпуск теплоэнергии теплоэлектроцентралями (ТЭЦ), тыс. Гкал	1972	4758	5533	6975	7486	6493
Отпуск теплоэнергии теп-лоцентралями (ТЦ), тыс. Гкал	965	9586	11146	14051	15082	5557

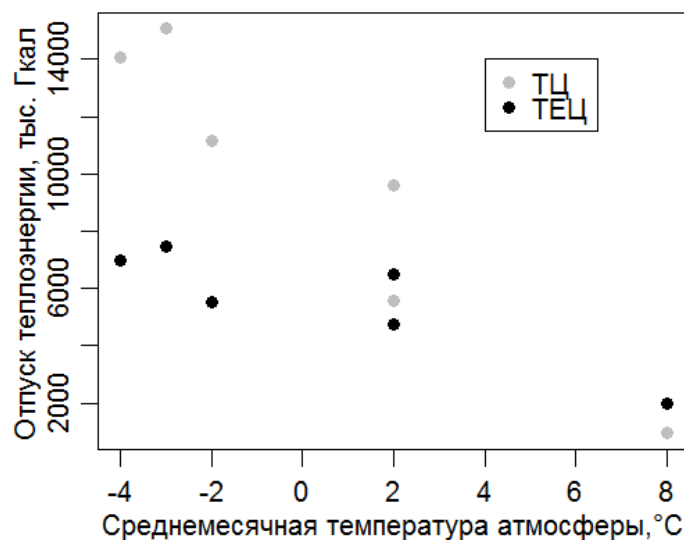


Рис. 1. Изменение полезного отпуска теплоэнергии за прошедший отопительный период

Если предположить, что $\beta_2 = \beta_4 = 0$, то линии будут идентичны для обеих групп. Если принять $\beta_4 = 0$, то получим две параллельные линии для каждой группы. При отличии всех коэффициентов от нуля получаем две несвязанные линии. Указанные регрессионные модели изображены с помощью графических средств среды R [4] на рис. 2. Приведенные на данном рисунке результаты получены на основе традиционного подхода с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [5]. Последующие результаты, приведенные в данной работе, получены с помощью байесовского подхода.

Байесовский анализ регрессионной модели требует определения априорных параметров. Определение величин этих параметров, которые представляют фактическую априорную информацию, может оказаться сложным. Эффективный принцип построения априорного распределения для β основан на том, что оценка параметра должна быть инвариантной к изменениям масштаба регрессоров [1]. Данная идея выбора априорных параметров привела к варианту использования широко изученного g-prior распределения для регрессионных параметров [3]. Указанное априорное распределение для β при (y, X, σ^2) является многомерным нормальным со средним значением и дисперсией

$$E[\beta|y, X, \sigma^2] = [X^T X / (g\sigma^2) + X^T X / \sigma^2]^{-1} X^T y / \sigma^2 = \frac{g}{g+1} (X^T X)^{-1} X^T y; \quad (4)$$

$$\text{Var}[\beta|y, X, \sigma^2] = [X^T X / (g\sigma^2) + X^T X / \sigma^2]^{-1} = \frac{g}{g+1} \sigma^2 (X^T X)^{-1}. \quad (5)$$

Для нашего примера

$$X^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 2 & -2 & -4 & -3 & 2 & 8 & 2 & -2 & -4 & -3 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 2 & -2 & -4 & -3 & 2 \end{bmatrix},$$

$$y = (1972, 4758, 5533, 6975, 7486, 6493, 965, 9586, 11146, 14051, 15082, 5557).$$

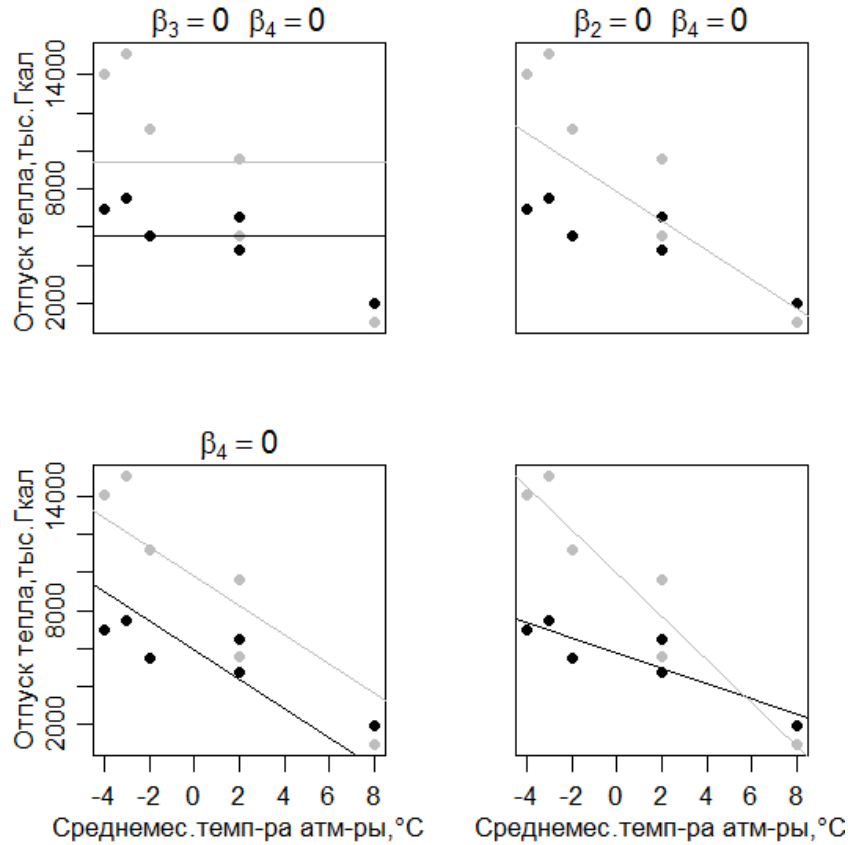


Рис. 2. Линии регрессии наименьших квадратов, полученные на основании данных о выработке тепла для четырех различных моделей

При этом априорном распределении, наряду с уравнениями (4) и (5), плотности $p(\sigma^2|y, X)$ и $p(\beta|y, X, \sigma^2)$ являются обратным гамма и многомерным нормальным распределениями соответственно [1, 3]. Так как мы можем семплировать из обоих этих распределений, то значения семплов (σ^2, β) из совместного апостериорного распределения $p(\sigma^2, \beta|y, X)$ могут быть получены с помощью метода Монте-Карло [6] для марковских цепей (Markov chain Monte Carlo, MCMC) следующим образом:

1. Семплировать $1/\sigma^2$ по условному гамма-распределению $\Gamma([v_0 + n]/2, [v_0\sigma_0^2 + \text{SSR}_g]/2)$;
2. Семплировать β по условному многомерному нормальному распределению $N(\frac{g}{g+1}\hat{\beta}_{\text{МНК}}, \frac{g}{g+1}\sigma^2[X^T X]^{-1})$.

Здесь $\text{SSR}_g = y^T(I - \frac{g}{g+1}X(X^T X)^{-1}X^T)y$; $\hat{\beta}_{\text{МНК}} = (X^T X)^{-1}X^T y = (5736.1, 4234.2, -399.4, -745.6)$.

Для нашего примера $g = n = 12$, $v_0 = 1$ и $\sigma_0 = 1443.8$. Апостериорное среднее β может быть получено непосредственно из уравнения (4). Так как $E[\beta|y, X, \sigma^2]$ не зависит от σ^2 , то мы имеем $E[\beta|y, X] = E[\beta|y, X, \sigma^2] = \frac{g}{g+1}\hat{\beta}_{\text{МНК}}$. Поэтому апостериорные средние четырех регрессионных параметров равны

(5185.1, 4016.9, -362.5, -689.2). Апостериорные стандартные отклонения этих параметров – (1142., 1593., 278., 406.). Совместное апостериорное распределение для β_2 и β_4 изображено на рис. 3. Здесь вероятности попадания в области, ограниченные замкнутыми кривыми 1, ..., 5, равны 0.975, 0.75, 0.5, 0.25, 0.025 соответственно. Расчеты проведены в среде R на основе 50000 семплов Монте-Карло.

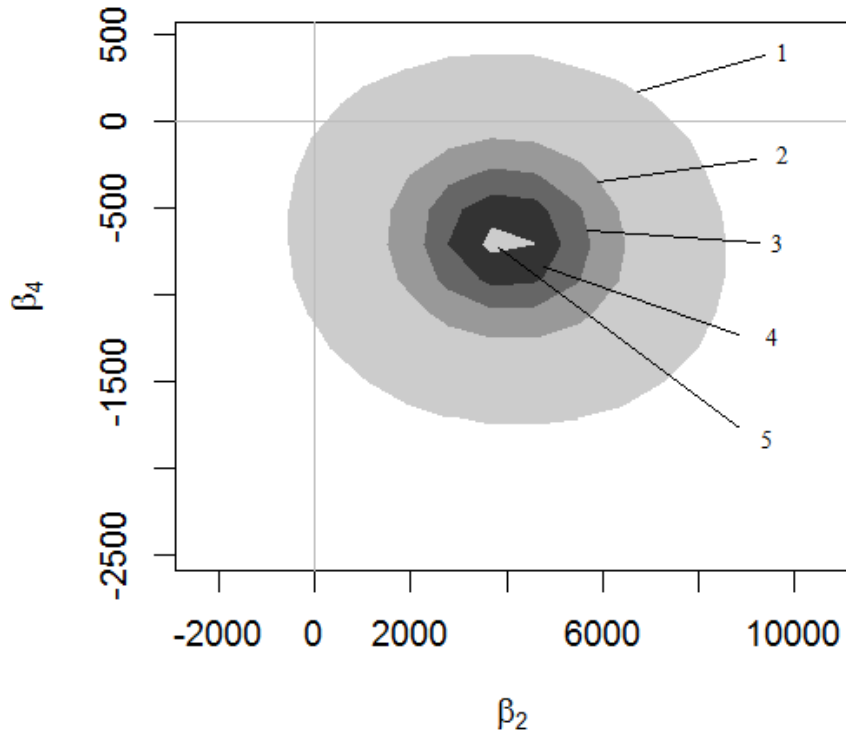


Рис. 3. Совместное апостериорное распределение для β_2 и β_4

Важным направлением регрессионного моделирования является решение того, какие объясняющие переменные включать в модель. Очевидно, что в регрессионную модель необходимо включать только те переменные, для которых имеются существенные доказательства их ассоциации с y . Это приводит к получению более простых моделей с лучшими статистическими свойствами.

Концептуально байесовское решение проблемы выбора модели следующее [1]. Если мы полагаем, что многие регрессионные коэффициенты потенциально равняются нулю, то нужно ввести в модель априорное распределение, которое отражает эту возможность. Это может быть достигнуто определением того, что у каждого регрессионного коэффициента есть некоторая отличная от нуля вероятность того, что он может быть равен нулю. Удобный способ представить это заключается в том, чтобы записать регрессионный коэффициент для переменной j как $\beta_j = z_j \times b_j$, где $z_j \in \{0,1\}$, а b_j являются некоторыми действительными числами. С такой параметризацией наше регрессионное уравнение примет вид

$$y_i = z_1 b_1 x_{i,1} + \dots + z_p b_p x_{i,p} + \epsilon_i.$$

Таким образом, z_j указывают на то, какие регрессионные коэффициенты отличны от нуля. В случае нашего примера

$$E[Y|\mathbf{x}, \mathbf{b}, \mathbf{z} = (1,0,1,0)] = b_1 x_1 + b_3 x_3 = b_1 + b_3 \times t_i;$$

$$E[Y|\mathbf{x}, \mathbf{b}, \mathbf{z} = (1,1,0,0)] = b_1 x_1 + b_2 x_2 = b_1 + b_2 \times \text{group};$$

$$E[Y|\mathbf{x}, \mathbf{b}, \mathbf{z} = (1,1,1,0)] = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 = b_1 + b_2 \times \text{group} + b_3 \times t_i.$$

Каждая величина $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_p)$ соответствует различной модели или, более определенно, различному набору переменных, имеющих регрессионные коэффициенты, отличные от нуля. Например, считаем, что модель с $\mathbf{z} = (1,0,1,0)$ является линейной регрессионной моделью для y как функции температуры. Модель с $\mathbf{z} = (1,1,1,0)$ является регрессионной моделью для y как функции температуры, но с определенной для группы точкой пересечения с осью ординат. С такой параметризацией выбор того, какую переменную включать в регрессионную модель, эквивалентен выбору, какая z_i равна 0, а какая равняется 1.

Выбор байесовской модели заключается в получении апостериорного распределения для $\mathbf{z}$. Конечно, для этого необходимо знать совместное априорное распределение для $\{\mathbf{z}, \boldsymbol{\beta}, \sigma^2\}$. Здесь необходимо использовать указанное выше g-prior распределение, которое позволяет оценить $p(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \mathbf{z})$ для каждой возможной модели $\mathbf{z}$ по формуле

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \mathbf{z}) = \iint p(\mathbf{y}, \boldsymbol{\beta}, \sigma^2|\mathbf{X}, \mathbf{z}) d\boldsymbol{\beta} d\sigma^2. \quad (6)$$

Учитывая априорное распределение $p(\mathbf{z})$ по моделям, можно вычислять апостериорную вероятность для каждой регрессионной модели:

$$p(\mathbf{z}|\mathbf{y}, \mathbf{X}) = \frac{p(\mathbf{z})p(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \mathbf{z})}{\sum_{\tilde{\mathbf{z}}} p(\tilde{\mathbf{z}})p(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{z}})}. \quad (7)$$

Таким образом, в нашем примере можно оценить должны ли β_2 или β_4 равняться нулю, вычисляя вероятность $p(\mathbf{z}|\mathbf{y}, \mathbf{X})$ для множества конкурирующих моделей. В табл. 2 приведен список из четырех указанных на рис. 2 различных регрессионных моделей, для которых мы хотим рассмотреть эти апостериорные распределения.

Таблица 2

Апостериорные распределения $p(\mathbf{z} \mathbf{y}, \mathbf{X})$ для четырех различных моделей		
$\mathbf{z}$	Модель	$p(\mathbf{z} \mathbf{y}, \mathbf{X})$
(1,1,0,0)	$\beta_1 + \beta_2 \times \text{group}_i$	0.00
(1,0,1,0)	$\beta_1 + \beta_3 \times t_i$	0.11
(1,1,1,0)	$\beta_1 + \beta_2 \times \text{group}_i + \beta_3 \times t_i$	0.36
(1,1,1,1)	$\beta_1 + \beta_2 \times \text{group}_i + \beta_3 \times t_i + \beta_4 \times \text{group}_i \times t_i$	0.53

Апостериорные вероятности определялись для каждой модели в соответствии с выражением (7). Здесь значения $p(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \mathbf{z})$ вычислены для каждой из четырех рассматриваемых величин $\mathbf{z}$ с использованием g-prior распределения для $\boldsymbol{\beta}$. При этом принято априорное распределение для моделей $p(\mathbf{z}) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$. Приведенные в табл. 2 результаты вычислений показывают, что наибольшую вероятность имеет модель, соответствующая $\mathbf{z} = (1,1,1,1)$. Необходимость включения в модель в качестве независимой переменной температуры атмосферы следует из того, что апостериорные вероятности трех моделей, учитывающих температуру атмосферы, в сумме равны единице. Доказательства значимости независимой переменной group не такие убедительные, так как суммарная вероятность для трех моделей с переменной group равна $0.00 + 0.36 + 0.53 = 0.89$. Однако эта вероятность существенно выше, чем соответствующая априорная вероятность $0.25 + 0.25 + 0.25 = 0.75$ для этих трех моделей.

Выводы. Таким образом, байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить регрессионные модели полнее и точнее по сравнению с классическими статистическими методами.

Список литературы

1. Hoff P. D. A First Course in Bayesian Statistical Methods / Peter D. Hoff. – Springer New York, 2009. – 276 p.
2. Зельнер А. Байесовские методы в эконометрии / А. Зельнер. – М.: Статистика, 1980. – 434 с.
3. Zellner A. On Assessing Prior Distributions and Bayesian Regression Analysis with g-Prior Distributions / A. Zellner // Bayesian Inference and Decision Techniques : Essays in Honor of Bruno de Finetti. – New York, North Holland Publishing Co., 1986. – Vol. 6. – P. 233–243.
4. Adler J. R in a Nutshell / J. Adler. – USA: O'Reilly Media, 2012. – 697 p.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 3-е изд. – М.: Диалектика, 2007. – 912 с.
6. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике. Вводный курс / С.М. Ермаков. – СПб: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 192 с.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Куваєвим В.М.

А.И. Швачка, Е.В. Титова, канд-ти техн. наук, Ю.К. Тараненко, докт. тех. наук, Г.И. Манко, Е.В. Чернецкий, канд-ти техн. наук, Л.Д. Чумаков, докт. тех. наук (Украина, Днепр, ГВУЗ "Украинский государственный химико-технологический университет")

РОЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ДИНАМИКИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Анотация. Показана актуальность развития методологии настройки пропорционально-интегро-дифференциального регулятора. Для расширения и углубления информационного обеспечения стратегических и оперативных задач автоматических систем управления процессов горных электромеханических комплексов предложено построение модели синтезируемой системы в виде дифференциального уравнения связи, ее разрешения с использованием динамических библиотек языка программирования высокого уровня Python. На основании проведенных исследований структур нелинейных элементов обосновано, что система измерения по структурам «вход – выход» в определенной форме новыми знаниями, которые могут быть использованы в качестве информационных модулей формирования предметной области интеллектуальных систем поддержки принятия решения в условиях неопределенного состояния горных агрегатов.

Ключевые слова: структурная схема, регулятор, система, моделирование, переходная характеристика, качество регулирования.

Аннотация. Показана актуальность развития методологии настройки пропорционального интегро-дифференциального регулятора. Для расширения и углубления информационного обеспечения стратегических и оперативных задач автоматических систем управления процессов горных электромеханических комплексов предложено построение модели синтезируемой системы в виде дифференциального уравнения связи, ее разрешения с использованием динамических библиотек языка программирования высокого уровня Python. На основании проведенных исследований структур нелинейных элементов обосновано, что система измерения по структурам «вход – выход» является в определенной форме новыми знаниями, которые могут быть использованы в качестве информационных модулей формирования предметной области интеллектуальных систем поддержки принятия решения в условиях неопределенного состояния горных агрегатов.

Ключевые слова: структурная схема, регулятор, система, моделирование, переходная характеристика, качество регулирования.

Abstract. The relevance of the development of the methodology for setting the proportional integro-differential controller is shown. To expand and deepen the information support for strategic and operational tasks of automatic control systems for mining electromechanical complexes, it is proposed to build a model of the system being synthesized in the form of a differential equation for the connection of its resolution using dynamic libraries of Python's high-level programming language. On the basis of the conducted studies of non-linear elements, it is justified that the "input-output" measurement system is in a certain form new knowledge that can be used as information modules for the formation of the subject domain of intellectual decision support systems in the conditions of an undetermined state of mining aggregates.

Keywords: block diagram, regulator, system, simulation, transient response, quality of regulation.

Введение

Автоматизация процессов горных электромеханических комплексов стала закономерным процессом развития тяжелой промышленности. С ростом спроса и желанием получить оптимальные технико-экономические показатели, возникла необходимость повышения производительности и повышения качества. Это, в свою очередь, привело к быстрому разворачиванию и совершенствования существующих автоматических систем регулирования (АСР). В условиях гранично допустимого уровня совершенствования показателей функционирования при ограничениях требований к процессу, единственным решением является совершенствование системы управления для повышения надежности, быстродействия и других показателей работы объектов горно-металлургического комплекса [1].

Широкое распространение в системах управления электромеханических комплексов получил пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) алгоритм управления. Это обусловлено простотой использования, возможность применения для широкого круга задач, реализацией на современных микропроцессорных средствах. Высокая чувствительность систем регулирования с ПИД – регуляторами к отклонениям оптимума их настроек требует выбора оптимальных параметров настроек регуляторов с учетом возможного изменения динамики объекта регулирования [2].

Анализ существующих достижений и публикаций

Для оценки качества синтезируемой АСР по виду переходного процесса необходимо построение зависимости переходного процесса от времени. Рассмотрим традиционные подходы к решению указанной проблемы [3].

1. Непосредственное построение графика переходного процесса по результатам решения дифференциального уравнения системы. Решение такого уравнения определяется двумя составляющими: вынужденной, представляющее частное решение исходного неоднородного уравнения с правой частью; свободной, решение однородного дифференциального уравнения без правой части. Этот метод позволяет получить точное решение, но его практическое использование для систем высокого порядка имеет ряд ограничений.

2. Метод с использованием преобразования Лапласа. Для практического использования данного метода необходимо воспользоваться основными свойствами преобразования Лапласа: теорема разложения, теорема свертки и др. Данный метод менее трудоемкий по сравнению с предыдущим.

3. Построение переходного процесса с использованием вещественной частотной характеристики (ВЧХ) замкнутой системы. Использование ВЧХ базируется на определенных соотношениях, связывающих между собой функцию оригинал и ее изображения, т.е. в формулах обратного преобразования Лапласа в Фурье.

Недостатком всех экспериментальных методов настройки регуляторов является неполнота информации о запасе устойчивости системы и робастности. Выбор оптимальной модели объекта должен быть основан на критерии достаточного качества управления при минимальной сложности модели. Расчет параметров настройки регулятора по формулам не может дать оптимальных настроек регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основаны на сильно упрощенных моделях объекта [4].

В современных информационных технологиях важное место отводится инструментальным средствам и среде разработки АСР. Инструментальные средства проектирования относятся к проблемно ориентированным программным средствам. Проектировщик может сосредоточиться на решении поставленной задачи и решать ее в наиболее удобной форме. Составляющими частями средств являются языки высокого уровня [5].

Развитие программных средств идет в направлении расширения диапазона поддерживаемых регуляторов, использования методов искусственного интеллекта, развития интерфейса пользователя. Несмотря на большое количество коммерческих продуктов, которые в основной своей массе являются «закрытыми», остается много нерешенных проблем, связанных с методологией принимаемого решения, а также качеством регулирования, влиянием нелинейности объекта управления и влияния возмущений.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является стабилизировать движение системы с ПИД - регулятором около выбранной траектории с учетом нелинейности характеристик объекта и неопределенности информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи

- разработать и обосновать структурную схему синтезируемой системы;
- составить математическое описание системы в виде уравнения связи переменных;
- разрешить дифференциальное уравнение системы и проанализировать результаты.

Синтез структурной схемы АСР

Структурная схема АСР представлена на рис. 1. Передаточная функция объекта охвачена отрицательной обратной связью, в цепи которой включен регулятор с ПИД – законом регулирования.

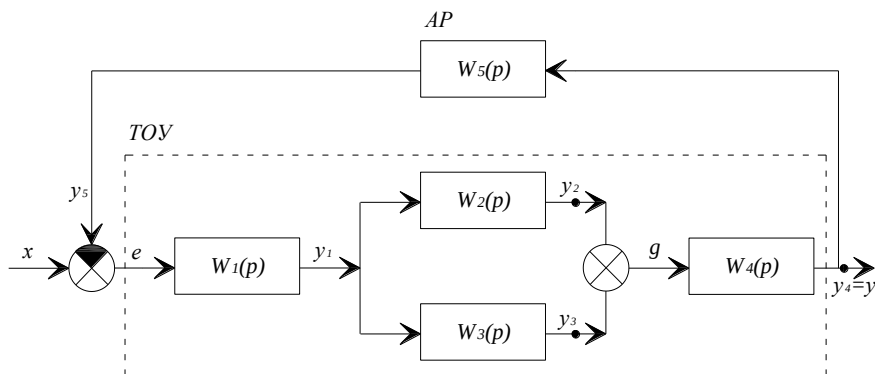


Рис. 1 Структурная схема АСР:
TOU – технологический объект управления, AP – автоматический регулятор

Рассмотрим основные динамические звенья в составе системы:

1. Колебательное звено. Математическое описание в виде дифференциального уравнения:

$$T_1^2 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \xi_1 \cdot T_1 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k_1 \cdot e, \quad (1)$$

где T_1 (k_1) – постоянная времени (коэффициент пропорциональности) колебательного звена; y_1 – выходной сигнал; e – входной сигнал, сигнал ошибки, $e = x - y_5$; ξ – коэффициент демпфирования.

2. Линейное статическое звено. Зависимость выхода (y_2) от входа (y_1) определяется по табличным данным, которые могут быть получены экспериментальным путём. Из-за погрешностей снятия данных следует применять линейную аппроксимацию:

$$y_2 = a_2 y_1, \quad (2)$$

где a_2 – коэффициент аппроксимации линейного статического звена.

3. Линейное статическое звено. Зависимость выхода (y_3) от входа (y_2) определяется по табличным данным, которые могут быть получены экспериментальным путём. Из-за погрешностей снятия данных следует применять линейную аппроксимацию:

$$y_3 = a_3 y_1, \quad (3)$$

где a_3 – коэффициент аппроксимации линейного статического звена.

4. Линейное динамическое звено, определяемое суммой входных сигналов блоков 2 и 3 (g):

$$g = a_2 y_1 + a_3 y_1, \quad (4)$$

Звено описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T_4 \frac{dy}{dt} + y = k_4 g, \quad (5)$$

где T_4 (k_4) – постоянная времени (коэффициент пропорциональности) линейного динамического звена.

5. Математическое описание автоматического регулятора (ПИД – закон регулирования):

$$y_5 = \mu_1 y + \mu_2 \frac{dy}{dt} + \mu_3 \int y(t) dt, \quad (6)$$

где μ_1 – коэффициент пропорциональности при линейной функции, μ_2 – коэффициент дифференцирования при первой производной, μ_3 – коэффициент интегрирования при неопределённом интеграле.

Составление дифференциального уравнения системы

Установка управления принята в виде единичного ступенчатого воздействия ($1(t)$). Переведём в операторную форму уравнения (1) и распишем его с учетом сигнала (e) при подаче на вход ($1(t)$):

$$(T_1^2 p^2 + \xi_1 T_1 p + 1) y_1 = k_1 \left(\frac{1}{p} - \left(\mu_1 + \mu_2 p + \mu_3 \frac{1}{p} \right) y \right). \quad (7)$$

Продифференцируем уравнение (7):

$$(T_1^2 p^3 + \xi_1 T_1 p^2 + p) y_1 = k_1 \left(1 - (\mu_1 p + \mu_2 p^2 + \mu_3) y \right). \quad (8)$$

Переходя в уравнения (4) и (5) к операторной форме и выражая (y_1), получим:

$$y_1 = \frac{T_4 p + 1}{k_4 (a_2 + a_3)} y. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в (8) и выполняя предварительное преобразование:

$$\left(T_1^2 T_2 p^4 + (\xi_1 T_1 T_2 + T_1^2) p^3 + [T_2 + \xi_1 T_1 + \mu_2 k_1 k_2 (a_2 + a_3)] p^2 + [1 + \mu_1 k_1 k_2 (a_2 + a_3)] p + \mu_3 k_1 k_2 (a_2 + a_3)\right) y = k_1 k_2 (a_2 + a_3) \quad (10)$$

Получено однородное дифференциальное уравнение четвертого порядка. Перейдем во временную область, для этого операторную форму заменим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dy^4}{dt^4} + A \frac{dy^3}{dt^3} + B \frac{dy^2}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + Dy = E, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{\xi_1 T_1 T_2 + T_1^2}{T_1^2 T_2}, \quad B = \frac{T_2 + \xi_1 T_1 + \mu_2 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}, \\ C = \frac{1 + \mu_1 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}, \quad D = \frac{\mu_3 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}, \quad E = \frac{k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}.$$

Имитационное моделирование динамики системы

Исходными данными являются динамические характеристики объекта управления (табл. 1, 2).

Таблица 1

Параметры настройки объекта управления

T_1	ζ	k_2	k_3	T_4
7	0,4	5,5	5,5	5

Таблица 2

Характеристики динамических звеньев (для аппроксимации)

y_1	0	1	2	3	4	5
y_2	0	-11	-22	-33	-44	-55
y_3	0	17	34	51	68	85

Регулятор отключен от объекта, т.е. $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$. Порядок подбора коэффициентов рекомендуется следующий: сначала подбирается коэффициент пропорционального члена (μ_1), затем управление по скорости – демпфер (μ_2), и в последнюю очередь – коэффициент интеграла (μ_3). Следует иметь в виду, что большие значения коэффициентов (μ_1 , μ_3), могут сделать систему неустойчивой.

Решение задачи проведено на языке программирования PYTHON. Основные этапы программирования включают: аппроксимация характеристик статических объектов; инициализация параметров объекта управления; оценка параметров ПИД – регулятора; решение дифференциального уравнения системы регулирования.

Принятый решатель (def) находится в состав библиотеки **Sodeint** из подбиблиотеки **SciPy** – **Integrate**. Для его построения уравнение (11) необходимо перестроить так, чтобы в левой его части была производная высшего порядка, а в правой части – все остальное:

$$\frac{dy^4}{dt^4} = -A \frac{dy^3}{dt^3} - B \frac{dy^2}{dt^2} - C \frac{dy}{dt} - Dy + E. \quad (12)$$

Рассмотрим результаты работы программы. В системе, работающей без автоматического регулятора, после внесения возмущения наблюдается апериодический переходной процесс с лавинообразным отклонением значения параметра от состояния равновесия (рис. 2).

Подключение регулятора с ПИД – законом регулирования позволило стабилизировать работу системы (рис. 3). Колебательный переходной процесс сходится с течением времени к заданному значению, однако колебания затянутые и видно наложение высокочастотной составляющей помех при выходе заданный режим.

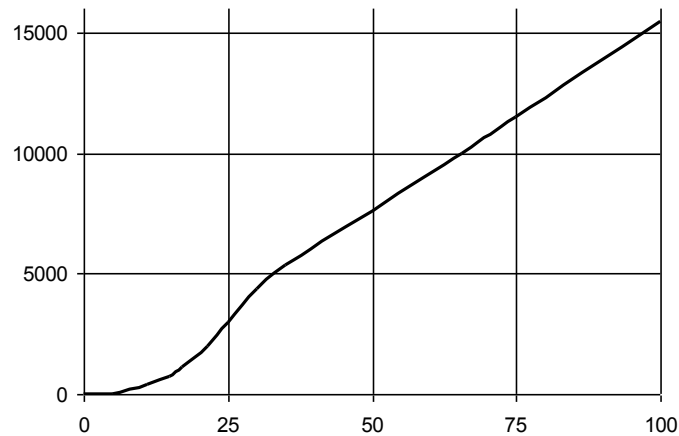


Рис. 2. Моделирование динамики АСР при отключенном регуляторе: ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$)

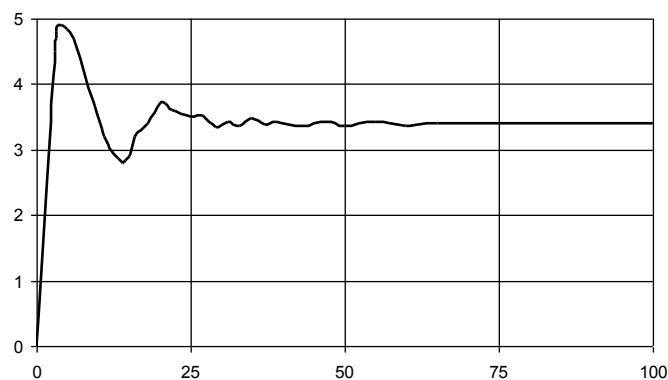


Рис. 3. Моделирование динамики АСР при подключенном регуляторе ($\mu_1 = 0,5$; $\mu_2 = 2$; $\mu_3 = 0,3$)

Учет нелинейных характеристик системы, а именно, внесением изменений в табличные значения для третьего звена (увеличение a_3 в два раза), позволили обеспечить плавный характер затухания переменной и снижение времени регулирования.

Выводы

Предложенный метод расчета показал свою работоспособность, а также целесообразность практической реализации для обеспечения устойчивой работы системы при суточном изменении нагрузки горных металлургических комплексов. Ограничением для реализации алгоритма является условия физической реализуемости, а именно, решение, которое соответствует корням с отрицательным значением. Данная проблема является предметом дальнейших исследований, включая определение области устойчивости решений.

Список литературы

1. Швачка А.И., Бородулин А.В., Чернецкий Е.В., Олейник О.Ю., Довгопольный Я.А. Применение информационных технологий в теплоэнергетической модели доменной печи и повышение ее энергоэффективности // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 5 (106). – Днепр, 2016. – С. 68 – 75.
2. Wescott T. PID Without a PhD / T. Wescott. – Wescott Design Services, 2016. – 30p.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Настройка ПИД-регулятора инерционных объектов горно-металлургического комплекса / А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка // Гірнична електромеханіка та автоматика. 2017 – Вип. 99. – С. 65 – 70.
5. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a proportional-integral-differential controller with an additional controlling action / Ya. Dovhopolyi, G. Manko, V. Trishkin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. – 2017. – Vol.6/2(90). – pp. 61-66.

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

А.М. Алексеев, канд. техн. наук, М.А. Алексеев, докт. тех. наук.

(Украина, Днепр, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ВИБРОПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Анотация. Показано, что при контроле вибропараметров объектов управления нейромережевые методы допускают эмпирический подход к задаче классификации. Для навчання нейронних мереж потрібна менша кількість реалізацій, чим для статистичного аналізу вхідних сигналів. У загальному випадку мережа із зворотним поширенням помилки дозволяє досягти меншої кількості помилок класифікації, чим будь-який з варіантів ART. При використанні репрезентативної контрольної вибірки класифікація з використанням перестроєваних спектральних операторів по ефективності порівнянна з класифікацією за допомогою двошарової нейронної мережі, в той же час забезпечуючи значно менший час навчання.

Ключевые слова: объект управления, контроль, вибропараметр, нейромережа, перестроєвані спектральні оператори.

Аннотация. Показано, что при контроле вибропараметров объектов управления нейросетевые методы допускают эмпирический подход к задаче классификации. Для обучения нейронных сетей требуется меньшее количество реализаций, чем для статистического анализа входных сигналов. В общем случае сеть с обратным распространением ошибки позволяет достичь меньшего количества ошибок классификации, чем любой из вариантов ART. При использовании репрезентативной контрольной выборки классификация с использованием перестраиваемых спектральных операторов по эффективности сопоставима с классификацией при помощи двухслойной нейронной сети, в то же время обеспечивая значительно меньшее время обучения.

Ключевые слова: объект управления, контроль, вибропараметр, нейросеть, перестраиваемые спектральные операторы.

Abstract. It is shown that when controlling vibration parameters of control objects, neural network methods allow an empirical approach to the classification problem. For learning neural networks, fewer implementations are required than for statistical analysis of input signals. In the general case, a back-propagation network allows for a smaller number of classification errors than any of the ART options. When using a representative control sample, the classification using tunable spectral operators is comparable in efficiency to the classification using a two-layer neural network, while at the same time providing significantly less training time.

Keywords: control object, vibration parameters checkout, neural network, reconfigurable spectral operators.

Введение

Спектральные методы обработки информации получили широкое распространение в задачах контроля вибрационных параметров объектов управления. Анализ частотных параметров вибраций объектов управления позволяет получать информацию об их техническом состоянии. Во многих случаях решение задач виброконтроля и диагностирования объектов связано с классификацией вибрационных сигналов. Возможным решением задачи классификации может стать использование искусственных нейронных сетей. В настоящей статье рассмотрены наиболее известные парадигмы нейронных сетей [1].

Анализ существующих достижений и публикаций

Процедура использования методов контроля параметров объектов управления по спектрам в традиционных базисах хорошо известно и широко описана в литературе. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к признакам при решении задач оперативного функционального контроля, обоснованный выбор базиса разложения необходимо проводить по комплексу критериев, вытекающих из рассмотрения информационного и вычислительного аспектов методов формирования признаков, а также требования простоты аппаратной и программной реализации методов. Согласно подходу, который предложен академиком Петровым Б.М., целесообразно использование в качестве информационного критерия при выборе признаков понятия энтропии. Основная идея при информационно-энергетическом отборе и порядок признаков заключается в адекватности описания случайного процесса с известной матрицей ковариации спектральными составляющими, которые обеспечивают наименьшую энтропию коэффициентов разложения, наибольшее сосредоточение энергии случайного процесса в минимальном количестве

членов разложения, декореляции коэффициентов разложения и приспособленность к входным данным. Этими свойствами обладают коэффициенты разложения в базисе Карунена-Лоева. Процедура диагонализации матрицы ковариаций относительно просто реализуется для матрицы ковариаций циркулянтных типа и диадной матрицы ковариаций. В первом случае базисом Карунена-Лоева есть базис Фурье, во втором - Уолша. Однако матрицы, которые диагонализуются для традиционных базисов, не вполне учитывают особенности физических процессов. В [4] предложен метод контроля параметров объектов управления, основанный на использовании субоптимальных по Карунену-Лозу перестраиваемых матричных спектральных операторов, каждый из которых синтезирован по эталону технологической ситуации, благодаря чему повышается вероятность правильной классификации параметров и сокращается время на принятие управляющего решения.

Цель исследования

Целью исследования является обоснование выбора метода формирования первичных информативных признаков вибрационных сигналов объектов управления с использованием перестраиваемых матричных спектральных операторов и использования нейронных сетей с целью контроля вибропараметров.

Основная часть

Контроль вибропараметров объектов управления выполнялся посредством классификации вибросигналов с использованием многослойной нейронной сети без обратных связей. Сеть состояла из нейронов с нелинейной активационной функцией во всех слоях, кроме последнего слоя. Для обучения нейронной сети использовался метод обратного распространения ошибки, модифицированный для повышения устойчивости обучения. В процессе моделирования нейронной сети коэффициент инерционности обучения устанавливался равным 0,5; коэффициент скорости обучения подбирался максимально допустимым по условию устойчивости сети (для различных сетей значение варьировалось в диапазоне 0,3-0,05). Метод классификации при помощи нейронных сетей моделировался при помощи специально созданного для этой цели нейросимулятора, разработанного в среде Microsoft Visual C++.

Сравнение методов классификации сигналов проводилось на спектрограммах вибрационных сигналов. Спектрограммы снимались в характерных точках вентиляционных установок шахт Западного Донбасса. Съём спектрограмм производился операторами Павлоградского наладочного управления с целью накопления экспериментального материала для автоматизации спектральной диагностики обслуживаемых ими вентиляционных установок и других объектов. Для классификации были использованы спектрограммы вибраций с основных вентиляторов шахт «Сташкова», «Юбилейная», «Благодатная», «Западно-Донбасская», «Терновская» и резервного вентилятора шахты «Западно-Донбасская».

Отобранные спектрограммы были приведены к длине спектра Фурье в 128 отсчетов и нормированы к единице по амплитуде спектральных компонент. Из отобранных для использования спектров были сформированы 10 различных классов. Разбиение на классы сигналов выполнялось с учетом того, на каких объектах, в каких точках и при каких условиях получены спектры вибраций.

В результате были сформированы 10 исходных классов, к которым отнесены спектры вибраций, характеризующие различные состояния объектов контроля. Спектры, отнесенные к определенному классу, в большинстве случаев коррелированы между собой в большей мере, чем спектры из различных классов. Тем не менее, некоторые спектры сравнительно слабо коррелируют с представителями «своего» класса. В частности, классы №№1, 3, 6 и 10 являются многосвязными в пространстве спектральных компонент. Каждый из сформированных исходных классов случайным образом был разделен на две приблизительно равные части, одна из которых использовалась как совокупность выборок для обучения распознающего алгоритма, а вторая – для проверки качества распознавания.

В процессе эксперимента сравнивалась эффективность классификации исходных спектров из контрольной группы (в скобках – обозначение метода классификации, использованное в табл. 3.1):

1. По евклидовым расстояниям (ED).
2. По минимуму энтропии спектральных коэффициентов перестраиваемых матричных операторов (Entr).
3. При помощи обученной нейросети следующей конфигурации:
 Один слой из 10 нейронов (NN-10).
 Первый слой – 128, второй – 10 нейронов (NN-128-10).
 Первый слой – 128, второй – 60, третий – 10 нейронов (NN-128-60-10).
 Первый слой – 128, второй – 300, третий – 10 нейронов (NN-128-300-10).
 Первый слой – 200, второй – 80, третий – 10 нейронов (NN-200-80-10).

Также в процессе эксперимента была предпринята попытка использования сети со структурой 128-128-60-10 (4 слоя). Однако вследствие неудовлетворительного времени обучения сети результаты работы четырехслойной сети в таблицу не включены.

Таблица 1

Результаты распознавания спектров контрольной группы							
Номер класса	Количество ошибок, по методу классификации						
	ED	Entr	NN-10	NN-128-10	NN-128-60-10	NN-128-300-10	NN-200-80-10
1	5	2	3	2	2	2	1
2		2	2	2	1	1	1
3	2	2	1	1	2	2	2
4		1	2	2	2	1	1
5	6	2	3	2	1	1	2
6	5	2	2	2	2	2	1
7	3	2	1	1	1	1	2
8		3	2	2	1	1	1
9	2	1	3	2	2	2	2
10	5	2	3	2	3	3	1
всего	28	19	22	18	17	16	14
всего, %	57%	19%	18%	17%	17%	16%	14%
Время обучения, эпох			453	181	132	142	82

Классификация с использованием перестраиваемых спектральных операторов по эффективности сопоставима с классификацией при помощи двухслойной нейронной сети, в то же время обеспечивая значительно меньшее время обучения. Метод классификации по евклидову расстоянию на данном наборе спектров дал неудовлетворительные результаты.

Эффективность метода классификации по минимуму энтропии спектральных коэффициентов снижается при переходе от полного к сокращенному набору спектров. Это связано с увеличением дисперсии спектральных компонент обучающих выборок в области высоких частот. В связи с этим анализ энтропии спектральных коэффициентов вторичного разложения целесообразно применять при большом (свыше сотни выборок) объеме исходных данных.

В общем случае использование нейронной сети для классификации сигналов по спектру Фурье требует большего по сравнению с другими методами времени для обучения системы. С другой стороны, вследствие способности к обобщению, для получения удовлетворительных результатов работы нейросети требуется значительно меньшее количество обучающих выборок.

Для получения приемлемого времени и качества обучения количество слоев в сети не должно быть менее трех. При увеличении количества слоев до четырех и более качество обучения несколько повышается, однако резко возрастает время обучения сети. Количество нейронов в слоях сети может быть различным. Результаты моделирования позволяют рекомендовать лишь порядок величин. В последнем слое количество нейронов определяется способом реагирования нейросети на различные классы сигналов. В данном эксперименте количество нейронов выходного слоя принималось равным количеству различаемых классов.

Во входном и скрытых слоях количество нейронов, с одной стороны, должно быть достаточным для запоминания предъявленных обучающих образов (информационная емкость сети повышается с увеличением количества связей между нейронами). С другой стороны, при избыточной информационной емкости сети снижается ее способность к обобщению и появляется склонность к прямому запоминанию отдельных обучающих образов. По-видимому, оптимальное для последнего скрытого слоя количество нейронов в 1,5-2 раза превышает общее количество обучающих образов, а для предыдущих слоев должно быть увеличено еще в несколько раз.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования эффективности нейронных сетей с адаптивным резонансом и ограничением количества категорий (ART-C) в задачах классификации сигналов по спектру. Проведен сравнительный анализ эффективности сетей ART-C, обучающихся самостоятельно и с учителем. Также приведены результаты испытания экспериментальной сети ART-C с голосованием. В рамках эксперимента были исследованы сети ART-2 в исходном виде и с ограничением количества категорий.

Для поиска категорий и проверки критерия резонанса использовалась косинусная функция соответствия

$$T_j = M_j = \frac{A \cdot w_j}{\|A\| \|w_j\|},$$

$$\|X\| = \sqrt{\sum_i x_i^2}, \text{ где } \|X\| - \text{норма } L_2 \text{ вектора } X.$$

Для обучения была использована функция $w_j^{t+1} = (1 - \eta)w_j^t + \eta A$.

В качестве критерия близости была использована функция соответствия $M_{i,j} = \frac{w_i \cdot w_j}{\|w_i\| \|w_j\|}$.

Кроме сетей ART-2 и ART-C, также испытывались вновь разработанные модели сетей ART с управляемым обучением и с голосованием. Для достижения управляемого обучения обычная сеть ART-C была дополнена слоем Гроссберга. Как и в сетях со встречным распространением ошибки, слой Гроссберга обучался преобразованию полученных выходов сети ART в требуемые выходы. В отличие от сетей со встречным распространением ошибки, нейроны в слое Гроссберга в данном случае имели переменную структуру связей. При добавлении новой категории в слой распознавания сети ART каждый из этих нейронов связывался с вновь добавленным нейроном, а затем производилось обучение слоя Гроссберга.

Для обеспечения работы в режиме голосования в состав сети ART-C с управляемым обучением была введена специальная управляющая структура, а также модифицирована работа подсистемы распознавания. В сети с голосованием на входной вектор реагируют все нейроны, вычисляя свою функцию близости. Затем вклады всех нейронов суммируются, и выходом сети считается номер класса, для которого сумма оказалась наибольшей. При суммировании учитывается, сколько раз данный нейрон оказывался победителем при подаче на вход сети образцов данного класса; поэтому в сумму функций близости не включаются «голоса» тех нейронов, которые ни разу не были победителями для входных векторов данного класса. За счет этого отсеиваются реакции нейронов, не имеющих к данному классу никакого отношения.

Сравнение методов классификации сигналов проводилось на спектрограммах вибрационных сигналов.

Ранее на этом же наборе данных производился анализ эффективности классификации спектров при помощи нейронных сетей с обратным распространением ошибки в сравнении с обычными методами классификации. Это позволяет провести корректное сравнение эффективности всех рассмотренных методов, включая ART-C.

В процессе экспериментов сравнивалась эффективность классификации исходных спектров из обучающей и контрольной группы для сетей ART-C с различными значениями параметров функционирования.

Были проведены четыре эксперимента с различными вариантами сетей ART.

1. ART-2. Обучение и классификация проводились с различными значениями параметров η и ρ . Значения η устанавливались в пределах от 0.1 до 1, а ρ – от 0.3 до 0.95.

2. ART-C. В сетях ART-C параметр ρ устанавливается автоматически в процессе работы сети в зависимости от ограничения на количество классов. В процессе проведения эксперимента параметр η устанавливался в пределах от 0.1 до 1, а ограничение на количество классов принималось равным 10, 15, 20 и 25.

3. ART-C с управляемым обучением. Условия эксперимента совпадают с таковыми для ART-C.

4. ART-C с управляемым обучением и голосованием. Условия эксперимента совпадают с таковыми для ART-C.

Эффективность классификации оценивалась по количеству допущенных сетью ошибок и приведена в таблицах 2-4.

Выводы

1. В общем случае сеть с обратным распространением ошибки позволяет достичь меньшего количества ошибок классификации, чем любой из вариантов ART. Это обусловлено большим, чем в ART, количеством межнейронных связей и слоев нейронов, а, следовательно, и большей емкостью сети.

2. Сеть ART способна выделять только односвязные классы, так как она фактически производит динамическую кластеризацию поступающих на ее вход векторов по критерию (обычно геометрической) близости. Таким образом, сеть не способна отнести к одному и тому же классу векторы, распадающиеся

Таблица 2

Результаты работы сети ART-2 на обучающей выборке

η	Количество ошибок, %, для ρ													
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
0.1	65,5	61,8	61,8	50,9	45,5	45,5	41,8	41,8	29,1	29,1	18,2	10,9	10,9	9,1
0.2	65,5	61,8	61,8	52,7	47,3	45,5	43,6	41,8	29,1	29,1	21,8	10,9	10,9	5,5
0.3	65,5	61,8	61,8	52,7	49,1	45,5	41,8	41,8	27,3	29,1	21,8	16,4	10,9	5,5
0.4	61,8	61,8	52,7	52,7	49,1	45,5	41,8	41,8	27,3	29,1	21,8	16,4	10,9	5,5
0.5	61,8	52,7	49,1	52,7	49,1	49,1	43,6	41,8	27,3	23,6	21,8	16,4	10,9	5,5
0.6	52,7	52,7	47,3	52,7	50,9	49,1	41,8	30,9	27,3	29,1	21,8	10,9	10,9	5,5
0.7	52,7	52,7	45,5	52,7	50,9	49,1	32,7	25,5	29,1	25,5	21,8	10,9	10,9	5,5
0.8	56,4	52,7	47,3	52,7	41,8	40,0	30,9	29,1	29,1	25,5	16,4	12,7	10,9	5,5
0.9	54,5	54,5	49,1	43,6	45,5	32,7	30,9	29,1	25,5	25,5	12,7	12,7	10,9	5,5
1.0	54,5	54,5	49,1	43,6	43,6	34,5	34,5	30,9	29,1	25,5	16,4	12,7	10,9	5,5

Таблица 3

Результаты работы сети ART-2 на тестовой выборке

η	Количество ошибок, %, для ρ													
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
0.1	69,4	67,3	67,3	57,1	59,2	59,2	51,0	51,0	40,8	42,9	36,7	32,7	36,7	61,2
0.2	69,4	69,4	67,3	59,2	55,1	57,1	55,1	51,0	38,8	40,8	38,8	28,6	36,7	59,2
0.3	69,4	67,3	67,3	59,2	55,1	55,1	53,1	53,1	38,8	40,8	38,8	34,7	36,7	59,2
0.4	67,3	67,3	59,2	59,2	55,1	53,1	51,0	49,0	36,7	38,8	40,8	36,7	38,8	57,1
0.5	67,3	59,2	59,2	59,2	55,1	55,1	49,0	46,9	34,7	34,7	40,8	38,8	38,8	55,1
0.6	59,2	59,2	57,1	59,2	59,2	55,1	49,0	34,7	34,7	38,8	40,8	36,7	38,8	55,1
0.7	59,2	59,2	57,1	59,2	59,2	55,1	36,7	32,7	34,7	40,8	40,8	36,7	38,8	55,1
0.8	61,2	59,2	57,1	59,2	53,1	46,9	34,7	32,7	36,7	40,8	36,7	34,7	38,8	55,1
0.9	57,1	57,1	55,1	51,0	53,1	40,8	36,7	36,7	38,8	46,9	34,7	34,7	38,8	55,1
1.0	55,1	55,1	53,1	51,0	46,9	40,8	36,7	40,8	49,0	46,9	40,8	36,7	40,8	55,1

Таблица 4

Результаты работы сети ART-2 на тестовой выборке

η	Количество ошибок, %, для ρ													
	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
0.1	69,4	67,3	67,3	57,1	59,2	59,2	51,0	51,0	40,8	42,9	36,7	32,7	36,7	61,2
0.2	69,4	69,4	67,3	59,2	55,1	57,1	55,1	51,0	38,8	40,8	38,8	28,6	36,7	59,2
0.3	69,4	67,3	67,3	59,2	55,1	55,1	53,1	53,1	38,8	40,8	38,8	34,7	36,7	59,2
0.4	67,3	67,3	59,2	59,2	55,1	53,1	51,0	49,0	36,7	38,8	40,8	36,7	38,8	57,1
0.5	67,3	59,2	59,2	59,2	55,1	55,1	49,0	46,9	34,7	34,7	40,8	38,8	38,8	55,1
0.6	59,2	59,2	57,1	59,2	59,2	55,1	49,0	34,7	34,7	38,8	40,8	36,7	38,8	55,1
0.7	59,2	59,2	57,1	59,2	59,2	55,1	36,7	32,7	34,7	40,8	40,8	36,7	38,8	55,1
0.8	61,2	59,2	57,1	59,2	53,1	46,9	34,7	32,7	36,7	40,8	36,7	34,7	38,8	55,1
0.9	57,1	57,1	55,1	51,0	53,1	40,8	36,7	36,7	38,8	46,9	34,7	34,7	38,8	55,1
1.0	55,1	55,1	53,1	51,0	46,9	40,8	36,7	40,8	49,0	46,9	40,8	36,7	40,8	55,1

на две геометрически удаленные группы. Следует отметить, однако, что этот недостаток свойственен всем нейронным сетям, обучающимся без учителя. Для его преодоления в сети ART необходимо перевести сеть в режим обучения с учителем.

3. К преимуществам сетей ART следует отнести способность к дообучению новым образам без потери ранее приобретенных знаний. За счет этого парадигма ART позволяет совмещать режим работы с обучением, чем и отличается от остальных нейросетевых парадигм. В приложении к промышленной диагностике это означает, что система функционального контроля, использующая ART, способна приступить к работе сразу, не требуя предварительной настройки или обучения.

4. В процессе функционирования изменяются не только веса межнейронных связей, но и конфигурация слоя распознавания сети ART, что затрудняет ее аппаратную реализацию. С другой стороны, ввиду невысокой вычислительной сложности сети и чрезвычайно быстрого прогресса микропроцессорных средств, программная реализация парадигмы ART не представляет никаких трудностей и легко может быть введена в состав существующих систем управления, если в них используются компьютеры или другие микропроцессорные устройства.

5. Вариант сети ART с ограничением количества категорий позволяет избавиться от необходимости настраивать параметры функционирования сети ART. Вместо этого достаточно лишь установить ожидаемое количество различных классов входных сигналов. В случае, если классы распознаваемых сигналов могут оказаться многосвязными, может потребоваться увеличение максимально допустимого количества категорий.

6. Если для перекодировки полученных выходных реакций сети ART-C в требуемые выходы используется дополнительный слой Гроссберга, увеличение количества категорий, распознаваемых сетью, в 2-3 раза по сравнению с количеством классов входных сигналов позволяет повысить точность классификации, особенно в случае сложной конфигурации классов.

7. При использовании репрезентативной контрольной выборки классификация с использованием перестраиваемых спектральных операторов по эффективности сопоставима с классификацией при помощи двухслойной нейронной сети, в то же время обеспечивая значительно меньшее время обучения.

Список литературы

1. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М.: Изд. Вильямс, 2018. – 1104 с.
2. Alekseyev M. Dynamic objects parameters control on the basis of rebuilt spectral operators application / M. Alekseyev & T. Vysotskaya // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems : Proceedings of the international forum on energy efficiency, Dnipropetrovs'k, Ukraine, October 2013. – Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. – С.133 – 136.

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 622.625.28

A.G. Monia, PhD, associate professor

(Ukraine, Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukraine)

LONG BRAKING OF THE MINE LOCOMOTIVE ON BIAS AT THE PULSING BRAKE MOMENT

Анотація. Ціль статті – розробити математичну модель і дослідити процес гальмування шахтного локомотива дисковим гальмом на затяжному уклоні при пульсуючому гальмовому моменту. На основі розробленої математичної моделі гальмування шахтного локомотива на затяжному уклоні дисковим гальмом, що створює на осі колісної пари пульсуючий синусоїдальний гальмовий момент, встановлено максимальне абсолютне значення уклону колії, при якому температура робочої поверхні гальмового диска не перевищить припустиме значення під час затяжного спуску. Виконано порівняльний аналіз гальмування шахтного локомотива на затяжному уклоні дисковим гальмом, що створює на осі колісної пари постійний і пульсуючий синусоїдальний гальмові моменти.

Ключові слова: фрикційна пара, коефіцієнт зчеплення, дискове гальмо, гальмовий момент, колісна пара, рейкова колія.

Аннотация. Цель статьи – разработать математическую модель и исследовать процесс торможения шахтного локомотива дисковым тормозом на затяжном уклоне при пульсирующем тормозном моменте. На основе разработанной математической модели торможения шахтного локомотива на затяжном уклоне дисковым тормозом, создающим на оси колесной пары пульсирующий синусоидальный тормозной момент, установлено максимальное абсолютное значение уклона пути, при котором температура рабочей поверхности тормозного диска не превысит допустимое значение во время затяжного спуска. Выполнен сравнительный анализ торможения шахтного локомотива на затяжном уклоне дисковым тормозом, создающим на оси колесной пары постоянный и пульсирующий синусоидальный тормозные моменты.

Ключевые слова: фрикционная пара, коэффициент сцепления, дисковый тормоз, тормозной момент, колесная пара, рельсовый путь.

Abstract. Article purpose - to develop mathematical model and to investigate process of braking of the mine locomotive a disk brake on a long bias at the pulsing brake moment. On the basis of the developed mathematical model of braking of the mine locomotive on a long bias the disk brake creating the pulsing sinusoidal brake moment on an axis of wheel couple established the maximum absolute value of a bias of a way at which temperature of a working surface of a brake disk will not exceed admissible value during long descent. Comparative analysis of braking of the mine locomotive on a long bias is made by the disk brake creating the constant and pulsing sinusoidal brake moments on an axis of wheel couple.

Keywords: frictional couple, coupling coefficient, disk brake, brake moment, wheel couple, railway line

The implementable force of braking and the loudspeaker of the drive of the mine locomotive when braking are defined first of all by coupling of wheels with rails. Brake force under the influence of the static and dynamic factors taking place when braking the locomotive has a statistical property and results from frictional interaction of a wheel and a rail [1].

From the moment of emergence of the first locomotives the numerous researches directed to studying of coupling of a wheel with a rail as the physical phenomenon were conducted, hypotheses of forming of force of adhesion in different operational conditions were entered. Taking into account influence on the size of force of adhesion of a condition of surfaces of frictional couple, physical properties of materials, speeds of the movement, geometry of a bandage of wheels and a profile of a way, normal loading were defined mean values of coefficient of coupling which were used for operational calculations. Influence of parameters of a running gear and properties of the suspender of the mine locomotive on the force of adhesion and brake characteristics was studied in detail [2].

In work [3] it is offered to improve traction and brake characteristics of the mine locomotive due to application of the elastic axle-box node including rubber-metal elements. In work [4] the mathematical model of brak-

ing of the mine locomotive a disk brake on a straight horizontal section of a railway line describing forced oscillations of elements of the wheel and motor block taking into account the nonlinear characteristic of interaction of frictional couple a wheel rail is developed and approved. In work [5] research of process of braking of the mine locomotive on a horizontal railway line by the disk brake creating the pulsing brake moment on an axis of wheel couple for the purpose of implementation of the greatest possible coefficient of coupling of wheels with rails is described, recommendations about the analytical choice of the brake moment for different conditions of a railway line are made, constructive conceptual solutions on production of the disk brake creating the pulsing brake moment are proposed.

Article purpose – to develop mathematical model and to investigate process of braking of the mine locomotive a disk brake on a long bias at the pulsing brake moment.

Forced oscillations of the wheel and motor block of the mine locomotive in the course of braking on the straight section of a railway line having a bias a disk brake taking into account the nonlinear characteristic of interaction of frictional couple a wheel rail can be described by system of six differential equations of the second order

$$\left. \begin{aligned} (m_c/4 - m_3 - m_4) \ddot{y} &= - \left[C_{y3}(y - y_3) + \beta_{y3}(\dot{y} - \dot{y}_3) + \right. \\ &\quad \left. + C_{y4}(y - y_4) + \beta_{y4}(\dot{y} - \dot{y}_4) + (m_c/4 - m_3 - m_4) g \sin \beta \right], \\ m_3 \ddot{y}_3 &= C_{y3}(y - y_3) + \beta_{y3}(\dot{y} - \dot{y}_3) + F_3(S_3) - m_3 g \sin \beta, \\ m_4 \ddot{y}_4 &= C_{y4}(y - y_4) + \beta_{y4}(\dot{y} - \dot{y}_4) + F_4(S_4) - m_4 g \sin \beta, \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 &= - \left[C_{\varphi 3}(\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{\varphi 3}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + r F_3(S_3) \right], \\ I_4 \ddot{\varphi}_4 &= - \left[C_{\varphi 4}(\varphi_4 - \varphi_2) + \beta_{\varphi 4}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) + r F_4(S_4) \right], \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 &= C_{\varphi 3}(\varphi_3 - \varphi_2) + \beta_{\varphi 3}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + C_{\varphi 4}(\varphi_4 - \varphi_2) + \\ &\quad + \beta_{\varphi 4}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) - u M'_t/2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

where m_c – mass of structure; m_3, m_4 – the specified mass of the corresponding wheels; y, y_3, y_4 – linear movements of the locomotive and corresponding wheels; $\dot{y}, \dot{y}_3, \dot{y}_4$ – linear speeds; $\ddot{y}, \ddot{y}_3, \ddot{y}_4$ – linear accelerations; C_{y3}, C_{y4} – coefficients of rigidity of the corresponding elastic elements; β_{y3}, β_{y4} – coefficients of viscous internal resistance of the corresponding elastic elements; $C_{\varphi 3}, C_{\varphi 4}$ – coefficients of rigidity of the corresponding half shafts of the wheel and motor block; $\beta_{\varphi 3}, \beta_{\varphi 4}$ – coefficients of viscous internal resistance of the corresponding half shafts of the wheel and motor block; β – a tilt angle of a way (positive at the movement on rise and negative at the movement on descent); $F_3 = \psi_3(S_3)(m_l g/8) \cos \beta$, $F_4 = \psi_4(S_4)(m_l g/8) \cos \beta$ – forces of adhesion of the corresponding wheels; ψ_3, ψ_4 – coefficients of coupling of the corresponding wheels; S_3, S_4 – relative slidings of the corresponding wheels; m_l – mass of the locomotive; g – acceleration of gravity; I_2 – the given moment of inertia of a reducer, a disk brake and the engine concerning an axis of wheel couple corresponding to one wheel couple (depends on the location of a disk brake); I_3, I_4 – the given moments of inertia of the corresponding wheels concerning an axis of wheel couple; $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – angular data of an output shaft of a reducer and corresponding wheels; $\dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3, \dot{\varphi}_4$ – angular speeds; $\ddot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_3, \ddot{\varphi}_4$ – angular accelerations; r – radius of a circle of driving of wheels; M_t – the braking moment on day off to a reducer shaft (in case of an arrangement of a disk brake on an engine shaft $M_t = u M'_t/2$, where u – a gear ratio of a reducer; M'_t – the braking moment on an engine shaft).

Coefficients of coupling of wheels with rails ψ_3, ψ_4 are also ψ functions of relative slidings of the corresponding wheels and are on a formula [6]

$$\psi = k_1 \left[\operatorname{th}(k_2 S) - k_3 S + k_4 S^3 \right]. \quad (2)$$

Relative slidings can be determined by formulas at any moment

$$S_3 = (\dot{\phi}_3 r - \dot{y}_3) / \dot{y}_3, \quad S_4 = (\dot{\phi}_4 r - \dot{y}_4) / \dot{y}_4. \quad (3)$$

At small tilt angles of a way ($|\beta| \leq 5^\circ$)

$$\sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{i}{1000},$$

where i – a bias of a way (positive at the movement on rise and negative at the movement on descent).

Let's find the maximum absolute value of a sine of the angle of an inclination of a way at which temperature of a working surface of a brake disk will not exceed admissible value T_d (under the terms of work of frictional couple) after the locomotive, moving on descent with the switched-off engines, passes a way y with a constant speed v with the set mass of structure. Let's believe that from brake means only the disk brake of each drive cart is involved.

At the first stage the task is reduced to definition of the best axial effort $N_{\max}$ at which through a period $t = y/v$ temperature of a surface of friction of the brake disk rotating with a constant angular speed $\omega = (v/r)u$ at the reference temperature $T_n = 25$ of $^\circ\text{C}$ will not exceed T_d . For this purpose we will use a formula

$$T_{1,2} = \theta_{1,2}(T_d - T_n) + T_n, \quad (4)$$

where $T_{1,2}$ – temperature on a friction surface (hereinafter the index 1 belongs to a disk, 2 – to frictional pads); $\theta_{1,2}$ – dimensionless temperature.

Dimensionless temperature in turn is on a formula [7]

$$\theta_{1,2}(\rho, 0, Fo) = \frac{2\pi Bi_{1,2}}{Bi_{1,2}^2 + 1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{0,1,2}(v_n \rho) (2 + \pi \rho_1 V_{0,1,2}(\rho_1 v_n))}{v_n (4 - \pi^2 \rho_1^2 V_{0,1,2}(\rho_1 v_n))} \times \int_0^{Fo} Ki(Fo - \tau) \varphi_{1,2}(v_n, \tau) d\tau, \quad (5)$$

where $\rho = r/R_2$ – dimensionless radius; r – current radius; R_2 – external radius of a disk; $Fo = a_1 t / R_2^2$ – Fourier's criterion (dimensionless time); $a_{1,2} = \lambda_{1,2} / c_{1,2} \gamma_{1,2}$ – heat diffusivity coefficients; λ_1, λ_2 – heat conductivity coefficients; c_1, c_2 – specific heat capacities; γ_1, γ_2 – density; t – current time; $Bi_{1,2} = (\sigma_{1,2} / \lambda_{1,2}) R_2$ – Biot's criterion; σ_1, σ_2 – the heat emission coefficients considering specific conditions of process of heat emission; $V_{0,1,2}(v_n \rho) = (Bi_{1,2} Y_0(v_n) - v_n Y_1(v_n)) J_0(v_n \rho) + (v_n J_1(v_n) - Bi_{1,2} J_0(v_n)) Y_0(v_n \rho)$ – kernel of final integral transformation of Hankel; v_n – eigenvalues; J_0, Y_0 – Bessel functions according to the first and the second sort of an order zero; J_1, Y_1 – Bessel functions according to the first and the second sort of first order;

$\rho_1 = R_1 / R_2$; R_1 – internal radius of a disk; $Ki = \frac{q(t) R_2}{(T_d - T_n) \lambda_1}$ – Kirpichev's criterion;

$q(t) = \frac{M_t \omega}{t_t F} \int_0^t \left(1 - \frac{\tau}{t_t}\right) d\tau$ – thermal flow; $M_t = \mu N_{\max} R_e$ – the brake moment arising in a disk brake; μ –

friction coefficient for couple of materials of a disk and a frictional pad; $R_e = \frac{2}{3} \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2} \frac{\alpha}{\sqrt{2(1 - \cos \alpha)}}$ –

equivalent radius of friction; α – central corner of ring sector of a frictional pad; t_t – braking time;

$F = \alpha (R_2^2 - R_1^2) / 2$ – area of contact; $\varphi_1 = \alpha_{\text{tp}} \kappa e^{-v_n^2 Fo} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi Fo}} - (1 - \kappa) Bi_1 e^{\kappa^2 Bi_1^2 Fo} \operatorname{erfc}((1 - \kappa) Bi_1 \sqrt{Fo}) \right)$;

$\varphi_2 = \frac{(1 - \alpha_{\text{tp}}) \sqrt{a} e^{-a v_n^2 Fo}}{\lambda \sqrt{\pi Fo}}$; $\alpha_{\text{tp}} = \sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1} / (\sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \gamma_2})$ – the coefficient of distribution of thermal

flows showing what part of heat generated at friction is taken away in a brake disk; $\kappa = \alpha/2\pi$;

$\operatorname{erfc} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\tau^2} d\tau = 1 - \operatorname{erf} x$; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau$ – integral of probabilities; $a = a_2/a_1$; $\lambda = \lambda_2/\lambda_1$.

Further, we will substitute the value of the brake moment M'_t corresponding $N_{\max}$ in system of differential equations (1). For a disk brake with a multisector disk we use a formula

$$\begin{aligned} M'_t &= \frac{2}{u} (M_0 - A \sin(\alpha \varphi_2)) = M'_0 - A' \sin(\alpha' \varphi_1) = \\ &= M'_0 \left(1 - A^* \sin(\alpha' \varphi_1) \right) = M'_0 \left(1 - \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \sin(\alpha' \varphi_1) \right) \quad (\mu_1 > \mu_2), \end{aligned} \quad (6)$$

where M_0 – a constant component of the moment of braking on an axis of wheel couple; A – amplitude of fluctuations of a variable component of the moment of braking on an axis of wheel couple; α – number of the periods of a sinusoid for one turn of wheel couple; $M'_0 = 2M_0/u$ – a constant component of the moment of braking on an engine shaft; $A' = 2A/u$ – amplitude of fluctuations of a variable component of the moment of braking on an engine shaft; $\alpha' = \alpha/u$ – number of the periods of a sinusoid for one turn of a shaft of the engine; μ_1, μ_2 – friction coefficients for two couples of materials of a disk and frictional pads.

The system of differential equations (1) taking into account formulas (2), (3), (6) is nonlinear as unknown functions are included into it not linearly. She represents mathematical model of braking of the mine locomotive a disk brake on a long bias at the nonlinear brake moment. Having integrated system (1) taking into account formulas (2), (3), (6), we will find value of a sine of the angle of an inclination of a way β at which the speed of the locomotive will remain to a constant.

We will carry out calculations at the parameters of disk brakes specified below with homogeneous and multisector brake disks. A disk brake with a homogeneous disk: disk material – steel 45 HB 415; material of frictional pads – 6KH-1; internal radius of a working zone of a disk $R_1 = 9,3 \cdot 10^{-2}$ m; external radius of a working zone of a disk $R_2 = 1,7 \cdot 10^{-1}$ m; disk thickness $2b_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ m; a form of frictional pads – in the form of ring sector with the central corner $\alpha = \pi/4$; thickness of frictional pads $2b_2 = 1,1 \cdot 10^{-2}$ m. A disk brake with a multisector disk: quantity of the sectors of a brake disk made in turn of steel 45 HB 415 and the SCh 15-32 NV 200 gray cast iron, – eight; material of frictional pads – 6KH-1; internal radius of a working zone of a disk $R_1 = 9,3 \cdot 10^{-2}$ m; external radius of a working zone of a disk $R_2 = 1,8 \cdot 10^{-1}$ m; disk thickness $2b_1 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ m; a form of frictional pads – in the form of ring sector with the central corner $\alpha = \pi/4$; thickness of frictional pads $2b_2 = 1,1 \cdot 10^{-2}$ m.

We will carry out calculation of the best axial effort $N_{\max}$ for a multisector brake disk in the assumption that the disk is not broken into sectors and it is made either of steel 45 HB 415, or of the SCh 15-32 NV 200 gray cast iron. As rated we will accept smaller of the received values.

At the chosen parameters of a disk brake with a homogeneous disk, the mass of structure $m_c = 5 \cdot 10^4$ kg, a way $y = 1000$ m, speed $v = 3$ m/s and rails covered with liquid coal dirt, we will receive $|\sin \beta| = 0,0139$ that corresponds $|i| \approx 13,9$ ‰. At the chosen parameters of a disk brake with a multisector disk and the same input datas $|\sin \beta| = 0,0152$ that corresponds $|i| \approx 15,2$ ‰.

It should be noted that at other conditions of a railway line we will receive approximately the same values of a bias of a way, but relative sliding of wheels on rails will differ.

Conclusions

1. On the basis of the developed mathematical model comparative analysis of braking of the mine locomotive on a long bias is made by the disk brake creating the constant and pulsing sinusoidal brake moments on an axis of wheel couple.

2. It is established that at the chosen parameters of a disk brake with a multisector disk the maximum absolute value of a bias of a way at which temperature of a working surface of a brake disk will not exceed admissible value during long descent for set lengths of a way, speeds and the mass of structure will be more, than at the chosen parameters of a disk brake with a homogeneous disk. For example, with a length of way 1000 m,

the speed of the engine 3 m/s and mass of structure $5 \cdot 10^4$ kg the difference of biases is equal to 1,3% that makes 9,35% of the maximum absolute value of the bias corresponding to a disk brake with a homogeneous disk.

References

1. Проців В.В. Формування динамічної моделі шахтного шарнірно-зчленованого локомотива, що рухається в режимі гальмування [Текст] / В.В. Проців // Наук. вісн. НГУ. – 2009. – № 4. – С. 76–83.
2. Таран І.А. Математическая модель движения рудничного локомотива в условиях торможения [Текст] / И.А. Таран // Вибрации в технике и технологиях. – 1999. – № 3 (12). – С. 47–49.
3. Дерюгин О.В. Динамическая модель шахтного локомотива с упруго-вязкими продольными связями в ходовой части [Текст] / О.В. Дерюгин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1998. – №3. – С. 92–93.
4. Сердюк А.А. Разработка математической модели торможения шахтного локомотива дисковым тормозом [Текст] / А.А. Сердюк, А.Г. Моця // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – Вип. 69. – С. 127–132.
5. Моця А.Г. Выбор рациональных параметров дискового тормоза шахтного локомотива с многосекторным тормозным диском [Текст] / А.Г. Моця // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2003. – Вип. 71. – С. 75–82.
6. Проців В.В. Экспериментальное определение характеристик сцепления шахтного локомотива в режиме торможения [Текст] / В.В. Проців, А.Г. Моця // Геотехн. механіка: міжвід. зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 40. – С. 231–236.
7. Моця А.Г. Интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности для определения тепловой нагрузки дискового тормоза шахтного локомотива [Текст] / А.Г. Моця // Наук. вісн. НГУ. – 2012. – № 3. – С. 86–91.

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

УДК: 621.3.078.4: 621.512

А.В. Бобров, А.М. Романовский канд-ты техн. наук

(Украина, Днепр, колледж ракетно-космического машиностроения Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара)

А.Ю. Жеребцов,

(Украина, Днепр, ТОВ "Акта-сервис")

В.Б. Сприса, П.В. Руснак

(Национальный университет «Львовская политехника»)

Е.С. Шкаран, И.В. Назаренко

(Украина, Днепр, Национальная металлургическая академия Украины)

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ – ПРИВОД – КОМПРЕССОР – ПНЕВМОСЕТЬ»**

Анотація. В роботі проведено аналіз результатів моделювання математичної моделі, що дозволяє визначати оптимальний режим роботи системи виробництва і розподілу стислого повітря, що складається з наступних елементів "електрична мережа - привод - компресор - пневмосети". Проведений аналіз показав, що запропонований варіант регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску забезпечує скорочення витрат електричної енергії, споживаної розглянутою електромеханічною системою. У зіставленні з класичним двоохпозиційним регулюванням, економія досягається в межах 1...13% в залежності від значень витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачами..

Ключові слова: електропривод, регулювання, компресор, електромеханічна система.

Аннотация. В работе проведен анализ результатов моделирования математической модели, позволяющей определять оптимальный режим работы системы производства и распределения сжатого воздуха, состоящей из следующих элементов "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть". Проведенный анализ показал, что предлагаемый вариант регулирования с «плавающим» верхним уровнем давления обеспечивает сокращение расхода электрической энергии, потребляемой рассматриваемой электромеханической системой. В сопоставлении с классическим двухпозиционным регулированием, экономия достигается в пределах 1...13 % в зависимости от значений расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками.

Ключевые слова: электропривод, регулирование, компрессор, электромеханическая система.

Abstract. The paper analyzes the results of modeling a mathematical model that allows to determine the optimal mode of operation of the production and distribution of compressed air, consisting of the following elements "electrical network - drive - compressor - pneumatic network". The analysis showed that the proposed control option with a "floating" upper pressure level ensures a reduction in the consumption of electrical energy consumed by the electromechanical system under consideration. In comparison with the classical two-stage regulation, savings are achieved within 1...13%, depending on the values of the compressed air consumption consumed by the pneumatic receivers.

Keywords: electric drive, control, compressor, electromechanical system.

Введение. Система двухпозиционного регулирования давления широко применяется в поршневых компрессорных установках. Нормальная работа потребителей сжатого воздуха обеспечивается благодаря поддержанию в системе давления в заданном интервале ($P_{min} \div P_{max}$).

Повышения энергоэффективности системы “электрическая сеть – компрессор – пневмосеть” в целом можно достичь, выполнив “плавающим” верхний уровень давления. В работе [1] введен критерий экономичности для системы управления и определения значения верхнего уровня давления на одном цикле накачки спуска давления – КПД. Обоснование этого энергетического показателя базируется на выяснении зависимостей между различными показателями элементов всей системы, определении наиболее весомых, с точки зрения потерь энергии, элементов электромеханической системы, а также взаимосвязи между ними.

Для решения ранее [2] сформулированной задачи оптимизации разработана цифровая математическая модель. При создании модели были приняты допущения, описанные в [3], учитывающие цель моделирования – получение оптимального значения максимального верхнего уровня давления в пневмосистеме, соответствующего максимуму целевой функции (КПД) при различных фиксированных расходах сжатого воздуха пневмоприемниками. Полученные значения могут быть реализованы в системе регулирования производства сжатого воздуха с определенной точностью (до 10% от расчетных значений). Рассмотрим полученные результаты моделирования для электромеханических систем с классическим двухпозиционным управлением и двухпозиционным управлением с оптимальным верхним уровнем давления.

Постановка задачи. Ранее в [4] работе были определены оптимальные параметры модели электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть». Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 Зависимость потребления электроэнергии энергии электромеханической системой за один час, при различных методах управления.

Классическое двухпозиционное управление, кВт·ч	Двухпозиционное управление с оптимальным верхним уровнем, кВт·ч	Разница в процентах	Классическое двухпозиционное управление, кВт·ч	Двухпозиционное управление с оптимальным верхним уровнем и ограничениями по количеству пусков, кВт·ч	Разница в процентах
94,7	86,5	8,66%	94,7	94,7	0,00%
100,3	95,9	4,39%	100,3	100,3	0,00%
105	96,4	8,19%	105	104,2	0,76%
111,2	101,2	8,99%	111,2	109,8	1,26%
116,8	108,7	6,93%	116,8	113,5	2,83%
122,1	113,5	7,04%	122,1	117,5	3,77%
128,1	118,2	7,73%	128,1	121,5	5,15%
134,1	123,6	7,83%	134,1	125,5	6,41%
140,5	129,2	8,04%	140,5	129,2	8,04%
147,7	130,7	11,51%	147,7	132,8	10,09%
157	135,8	13,50%	157	135,8	13,50%

Проведем анализ полученных результатов с энергетической точки зрения.

Решение задачи. При сравнении значений количества электроэнергии, потребляемой электромеханической системой за один час, с классическим двухпозиционным управлением и двухпозиционным управлением с оптимальным верхним уровнем давления видно, что экономия электроэнергии составляет от 0,76% до 13,50% для различного расхода сжатого воздуха. Четко прослеживается тенденция: с увеличением потребления сжатого воздуха пневмоприемниками возрастает разница между этими двумя методами управления. Это объясняется тем, что интервал накачки при больших расходах сжатого воздуха гораздо (до 10 раз) больше периода снижения давления в пневмосистеме, а значит большая часть потерь энергии в электромеханической системе происходит именно на интервале накачки давления. Поэтому при использовании оптимального верхнего уровня давления существенно снижаются как продолжительность повышения давления в пневмосистеме, так и потери энергии в электромеханической системе, в целом.

При сравнении значений количества электроэнергии, потребленной при классическом двухпозиционном управлении и двухпозиционном с оптимальным верхним уровнем давления и ограничениями по количеству пусков видно, что при малых расходах сжатого воздуха в силу вступает ограничение, а при больших – увеличивается экономия электроэнергии. Объясняется это тем, что время цикла увеличения – снижения давления переменное. Чем выше расход сжатого воздуха, тем больше время цикла и меньше количество пусков приводного двигателя в час. Соответственно, справедливо и обратное утверждение. Следует отметить, что система управления электропотреблением при использовании оптимального верхнего уровня давления выходит за границы установленных ограничений (по количеству пусков). Она определяет такое значение верхнего предела давления, при котором наиболее полно используется допустимое количество пусков поршневой компрессорной установки в час.

В результате реализации разработанной математической модели получены оптимальные значения максимального верхнего уровня давления в пневмосистеме P_{maxopt} , соответствующего максимуму целевой функции (КПД), при различных фиксированных расходах сжатого воздуха пневмоприемниками $Q_{\text{потр}}$ в установленных ограничениях.

Для адекватной оценки полученных результатов моделирования необходимо произвести расчеты параметров электромеханической системы для различных типов воздушных поршневых компрессорных установок с асинхронным приводом с различной производительностью, рассчитанными на уровень давления в пневмосистеме до 8 атм.

Выводы. Предлагаемый вариант регулирования с «плавающим» верхним уровнем давления обеспечивает сокращение расхода электрической энергии, потребляемой рассматриваемой электромеханической системой. В сопоставлении с классическим двухпозиционным регулированием, экономия достигается в пределах 1...13 % в зависимости от значений расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками. Предложенный метод управления электропотреблением, заключающийся в непрерывном измерении расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, на участке накачки давления в каждом цикле управления и установлении расчетного оптимального значения максимального уровня давления в пневмосистеме, соответствующего максимальному КПД комплекса, реализует оптимальные параметры режима работы электромеханической системы.

Перечень ссылок

1. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров. Технічна електродинаміка.-№3.-2004.-с.70-71.
2. Бобров О.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса / О.В. Бобров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Наук.-виробн. журнал. –Кременчук: КНУ, 2011.-Вип. 4. (16). – С. 124.
3. Бобров А.В., Безкровный В.О. Допущения и ограничения в расчете КПД электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» / Бобров А.В., Безкровный В.О. // Молодь: наука та інновації 2016: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (6-7 грудня 2016 р., Дніпро): тез. Доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. Гірн. Ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2016. – С.11-8 – 11-10.
4. Бобров О.В. Результати досліджень енергоефективного режиму роботи електромеханічної системи виробництва та розподілу стислого повітря / О.В. Бобров, С.І. Випанасенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2. (26). – С. 85 – 90.

Рекомендовано к печати: к-том техн. наук, доц. Цыленковым Д.В.

УДК 62-83

В.А. Волков, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТРАМВАЯ

Анотація. Розроблено та досліджено енергозберігаюче керування тяговими частотно-регульованими асинхронними двигунами трамвая, яке забезпечує мінімізацію загальних втрат енергії в цих двигунах при пуско-гальмівних режимах і найменше енергоспоживання трамвая в сталих режимах роботи. Отримано розрахункові аналітичні залежності для коефіцієнта корисної дії рушійного механі-

зму і статичного моменту опору тягового приводу трамвая, для загальних основних втрат енергії тягових двигунів і загального енергоспоживання трамвая. Дослідженні електромеханічні і енергетичні процеси в тягових частотно-регульованих асинхронних двигунах трамвая при сталих і пуско-гальмівних режимах.

Ключові слова: тяговий асинхронний двигун, частотне регулювання, енергозберігаюче керування, трамвай.

Аннотация. Разработано и исследовано энергосберегающее управление тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая, которое обеспечивает минимизацию общих потерь энергии в этих двигателях при пуско-тормозных режимах и наименьшее электропотребление трамвая в установившихся режимах работы. Получены расчетные аналитические зависимости для коэффициента полезного действия движущего механизма и статического момента сопротивления тягового привода трамвая, для общих основных потерь энергии тяговых двигателей и общего энергопотребления трамвая. Исследованы электромеханические и энергетические процессы в тяговых частотно-регулируемых асинхронных двигателях трамвая при установившихся и пуско-тормозных режимах.

Ключевые слова: тяговый асинхронный двигатель, частотное регулирование, энергосберегающее управление, трамвай.

Abstract. The energy-saving control of traction frequency-regulated asynchronous engines for a tram has been developed and investigated, which minimizes the total energy losses in these engines during start-stop regimes and the lowest power consumption of the tram in steady-state operating regimes. The calculated analytical dependences are obtained for the efficiency of the driving mechanism and the static moment of resistance of the tram drive, for the main energy losses of the traction engines and the total energy consumption of the tram. The electromechanical and energy processes in the traction frequency-regulated asynchronous engines for a tram under steady-state and start-braking regimes are investigated.

Keywords: traction asynchronous engine, frequency regulation, energy-saving control, tram

Введение. Развитие в мире городского электротранспорта с начала 2000-ых годов характеризуется широким внедрением в нем в качестве тяговых двигателей частотно-регулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД) с короткозамкнутым ротором, благодаря чему у этого привода существенно увеличиваются эксплуатационная надежность, межремонтные сроки эксплуатации и общие сроки службы (по сравнению с ранее используемыми в нем тяговыми двигателями постоянного тока). При этом до настоящего времени, по-прежнему, одним из наиболее распространенных и востребованных видов электротранспорта остается трамвай, производство которого на основе тяговых ЧРАД освоено в Германии (фирмами «Siemens», «Gothoer Waggonfabrik») [1], Италии («AnsaldoBreda», «Nubera») [2], России («Петербургский трамвайно-механический завод», «Усть-Катавский вагоностроительный завод», «Транспортные системы», «Уралтрансмаш») [3] и других странах. В связи с упомянутым широким применением трамваев с тяговыми ЧРАД становится актуальным и востребованным практикой для этих двигателей уменьшение потерь мощности и потребления ими энергии в установившихся и пуско-тормозных режимах, а для этого – разработка и исследование в данных режимах энергосберегающего управления тяговыми ЧРАД, направленного на уменьшение непроизводительных потерь энергии в трамвае.

Из анализа существующей зарубежной и отечественной научно-технической литературы выявлено, что исследованию отмеченных выше вопросов посвящены, к сожалению, только малочисленные публикации. В частности, в работе [2] рассмотрены вопросы расчета сил сопротивления движению трамвая, разработки компьютерной имитационной модели для оценки потребляемых его тяговыми ЧРАД мощности и энергии от электрической подстанции в установившихся и пуско-тормозных режимах при заданных траекториях изменения скорости трамвая (но – без исследования влияния вида этих траекторий на потери мощности и энергии тяговых ЧРАД). Другие известные публикации [4, 5] посвящены исследованию энергоэффективности гибридного тягового частотно-регулируемого асинхронного привода трамвая (характеризующегося возможностью питания инвертора из контактной электрической сети либо от дополнительно установленных для этой цели аккумуляторной батареи или суперконденсаторов) и совершенствованию управления этим гибридным приводом при рекуперативном торможении. Причем указанное совершенствование управления заключается в формировании такого вида энергосберегающих траекторий скорости трамвая (и его тяговых двигателей), при которых рекуперированная энергия при торможении накапливается в аккумуляторной батарее или суперконденсаторах данного трамвая, а дальнейшее потребление энергии в режимах тяги трамвая происходит сначала от упомянутых аккумуляторной батареи или суперконденсаторов, а только затем – из контактной электрической сети (чем обеспечивается общее снижение потребления энергии тяговыми двигателями из контактной электрической сети и уменьшение потерь энергии в последней).

Таким образом, в известной научно-технической литературе ныне существует недостаток исследований энергосберегающего управления тяговыми ЧРАД для обычного (негибридного) трамвая, а также электромеханических и энергетических процессов указанных тяговых приводов, работающих в частых режимах разгона и торможения трамвая. Актуальность же самой задачи энергосбережения обусловлена наблюдающимся в настоящее время удорожанием в мире и Украине электрической энергии. Кроме этого, применительно для Украины (обладающей с советских времен большим парком чешских трамваев марки «Tatra-T6B5» [6] с тяговыми двигателями постоянного тока) очень актуальна, практически востребована и особенно важна задача проведения для этих трамваев модернизации, связанной с заменой тяговых двигателей постоянного тока на ЧРАД. Это позволяет: во-первых, повысить энергоэффективность функционирования, эксплуатационную надежность и продлить сроки службы этих трамваев (в Киеве, Днепре, Харькове, Одессе, Львове, Запорожье и других больших городах Украины) при значительном сокращении средств на указанную модернизацию (вследствие сохранения кузова и основной части вспомогательного оборудования у этих трамваев). Во-вторых, – позволит загрузить работой украинские электротехнические предприятия и обеспечить заработной платой их инженерно-технический персонал.

Цель работы. Целью предложенной статьи является разработка энергосберегающего управления тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая в установившихся и пуско-тормозных режимах, исследование для них электромеханических и энергетических процессов.

Исходные допущения:

- принято идеализированное представление короткозамкнутого трехфазного ЧРАД, дополненное учетом потерь мощности в стали этого двигателя [7];
- полагается применение векторного типа системы автоматического управления (САУ) электроприводом, в которой обеспечивается раздельное регулирование намагничивающей I_{1x} и активной I_{1y} проекций обобщенного вектора статорного тока $\bar{I}_1$ (образованного основными гармоническими составляющими фазных статорных токов) двигателя на оси вращающейся ортогональной координатной системы «х-у», связанной вещественной осью «х» с обобщенным вектором потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_r$ ЧРАД;
- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов в режимах разгона и торможения (что является на практике возможным с учетом упомянутого использования векторных САУ из-за их высокого быстродействия и точности) [7];
- объектом исследования являются энергетические и электромеханические процессы для тягового ЧРАД одновагонного трамвая (содержащего четыре идентичных тяговых двигателя) с предложенным энергосберегающим управлением при режимах разгона и электрического торможения (с рекуперацией энергии в контактную электрическую сеть) или равномерного движения (с характеристиками макета трамвая из табл.1) [6];
- распределение суммарных значений статического момента сопротивления и тягового момента привода между четырьмя тяговыми двигателями трамвая полагается равномерным;
- принималось отсутствие проскальзывания между движущимися колесами трамвая и рельсами;
- параметры ЧРАД (у которого активные сопротивления были приведены к температуре 115 °С) полагались неизменными (представлены в табл.1);
- рассматривались только основные составляющие общих потерь мощности и энергии ЧРАД, вызванные основными (первыми) гармоническими составляющими фазных статорных токов [7];
- математические зависимости и последующие расчеты выполнены в общепринятой для машин переменного тока относительной системе единиц [7] (в которой номинальные значения частоты статора ω_{1n} и синхронной скорости ротора ω_n , как известно, одинаковы между собой и равны 1 о.е., а наибольшее значение ω_m скорости для рассматриваемого ЧРАД, согласно табл.1, равно $4000/1500 = 2,667$ о.е.);
- в тяговом электроприводе при режимах разгона и торможения посредством САУ реализовывались две зоны регулирования: в первой зоне (при $0 \leq \omega \leq \omega_n$) – при постоянстве модуля потокосцепления ротора Ψ_r , равном его номинальному значению Ψ_{rn} , а во второй (при $\omega_n \leq \omega \leq \omega_m$) – при постоянстве соотношения: $\omega_1 \cdot \Psi_r = \omega_{1n} \cdot \Psi_{rn} = const$ [7] (что обеспечивает наибольшую достигаемую перегрузочную способность двигателя по электромагнитному моменту в этих режимах).

Таблица 1

Номинальные параметры двигателя и макета трамвая

Название параметра, единицы измерения	Значение
1	2
I Двигатель АТМ 225 М4У2	

1	2
- мощность, кВт	55
- действующее линейное напряжение, В	450
- частота статорного напряжения, Гц	50
- номинальная/максимальная скорость, об/мин	1500/4000
- скольжение, %	1,5
- крутящий момент, Нм	350
- кратность пускового момента	1,8
- кратность максимального момента	3,5
- коэффициент полезного действия, %	92
- коэффициент мощности	0,86
II Макет одновагонного трамвая (на базе трамвая «Tatra-T6B5»)	
- масса порожнего вагона, т	18,4
- номинальная вместимость вагона, чел.	120
- максимальная скорость трамвая, км/ч	65
- максимальное ускорение порожнего вагона при разгоне и торможении, м/с ²	1,8
- среднее замедление пустого вагона при аварийном торможении, м/с ²	2,3
- количество тяговых двигателей, шт.	4
- общая мощность тяговых двигателей, кВт	220
- номинальное напряжение контактной электрической сети, В	550
- допустимые отклонения постоянного напряжения контактной электрической сети от ее номинального значения, В	+ 170 - 150
- преодолеваемый уклон подъема при максимальной нагрузке, %	8
- площадь фронтальной проекции, м ²	7,3
- коэффициент аэродинамического сопротивления	0,70
- КПД силового преобразователя, %	95
- максимальная мощность потребления собственных нужд по время движения, кВт	1

На *первом этапе* определим силы сопротивления движению трамвая, а также приведенные к валу двигателя статический момент сопротивления и момент инерции тягового привода трамвая.

Результирующая сила F_c сопротивления движению трамвая равняется сумме сил от действия трения качения F_k , аэродинамического сопротивления F_a и действия уклона F_y рельсового пути [8, 9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= F_k + F_a + F_y = mg \left(\mu \sqrt{1-i^2} + i \right) + 0.5 C_a \rho_{\theta} S_{\phi} v^2, \quad i = \sin \alpha, \\ F_k &= \mu \cdot mg, \quad F_a = 0.5 C_a \rho_{\theta} S_{\phi} v^2, \quad F_y = mg \cdot i, \quad \mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где m [кг] – масса трамвая; i и α – соответственно крутизна уклона и угол уклона рельсового пути; v [м/с] – скорость трамвая; $\mu = 1.03 \cdot 10^{-3}$ – общий удельный коэффициент трения (где $\mu_1 = 0.45 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от трения качения колесной пары по рельсу; $\mu_2 = 0.1 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от трения скольжения колесной пары по рельсу; $\mu_3 = 0.15 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление, учитывающее влияние вагона; $\mu_4 = 0.33 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от ударов колесной пары на стыках рельсов); $C_a = 0.70$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho_{\theta} = 1.226$ кг/м³ – плотность воздуха (при температуре 15 °С); $S_{\phi} = 7.3$ м² – площадь фронтальной проекции трамвая; $g = 9.81$ м/с² – ускорение свободного падения; силы F_c , F_k , F_a и F_y – вычисляются в ньютонах [Н].

Баланс между суммарной полезной мощностью $P_{\partial \theta \Sigma}$ [Вт] = $n \cdot P_{\partial \theta} = M_c \cdot \omega$, развиваемой всеми идентичными между собой тяговыми двигателями трамвая, и механической мощностью P_m [Вт] = $F_c \cdot v$, создаваемой движущимися с равномерной скоростью v [м/с] трамваем, характеризуется для двигательного и генераторного режимов работы его тяговых двигателей соотношениями соответственно:

$$P_m = \eta_{м\partial} \cdot P_{\partial \theta \Sigma} \quad \text{или} \quad P_{\partial \theta \Sigma} = P_m \cdot \eta_{м\epsilon}, \quad (2)$$

где $\eta_{мд}$ и $\eta_{мг}$ – значения коэффициента полезного действия (КПД) движущего механизма трамвая соответственно в двигательном и генераторном (тормозном) режимах; M_c [Нм] – суммарный приведенный к валу тягового двигателя статический момент сопротивления тягового привода трамвая; ω [рад/с] – угловая частота вращения (скорость) для всех ($n=4$) тяговых двигателей (с одинаковой номинальной механической мощностью $P_{дв.н}$); $P_{дв}$ [Вт] – текущая механическая мощность на валу одного тягового ЧРАД.

Подставив значения вышеперечисленных параметров в (2), определим в относительной системе единиц (о.е.) значения суммарного приведенного к валу тягового двигателя статического момента сопротивления M_c для двигательного

$$M_{c[o.e.]} = \frac{P_M}{\omega \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot v}{\omega \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c}{\varepsilon \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = n \cdot M_{c,дв} \quad (3)$$

и генераторного

$$M_{c[o.e.]} = \frac{P_M \cdot \eta_{мг}}{\omega \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot v \cdot \eta_{мг}}{\omega \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot \eta_{мг}}{\varepsilon \cdot M_{\delta}} = n \cdot M_{c,дв} \quad (4)$$

режимов работы, где $M_{c,дв}$ [о.е.] – значение статического момента сопротивления, приложенного к валу каждого одного тягового двигателя; ε [рад/м] – соотношение между собой соответствующих друг другу угловой скорости ω [рад/с] ЧРАД и скорости v [м/с] поступательно движущегося трамвая:

$$\varepsilon \text{ [рад/м]} = \omega / v. \quad (5)$$

Исходя из приведенных в [8] численных табличных данных об относительных значениях потерь мощности $\Delta P_M / n \cdot P_{дв.н}$ в движущем механизме трамвая в функции развиваемой при этом всеми тяговыми двигателями относительной суммарной полезной мощности $P_{дв\Sigma} / n \cdot \Delta P_{дв.н}$, найдем для двигательного режима значение КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма в функции относительной механической мощности $P_M / n \cdot P_{дв.н}$ трамвая в виде:

$$\eta_{мд} = \frac{P_M}{P_M + \Delta P_M} = \frac{1}{1 + \Delta P_M / P_M} = 1 - \frac{\Delta P_M}{P_{дв\Sigma}} = 1 - \frac{\Delta P_M / n \cdot P_{дв.н}}{P_{дв\Sigma} / n \cdot P_{дв.н}}, \quad \frac{\Delta P_M}{n \cdot P_{дв.н}} = \eta_{мд} \cdot \frac{P_{дв\Sigma}}{n \cdot P_{дв.н}}. \quad (6)$$

Соответствующий табличным данным график КПД $\eta_{мд} = f(P_M / P_{дв\Sigma})$ изображен на рис.1 жирными точками.

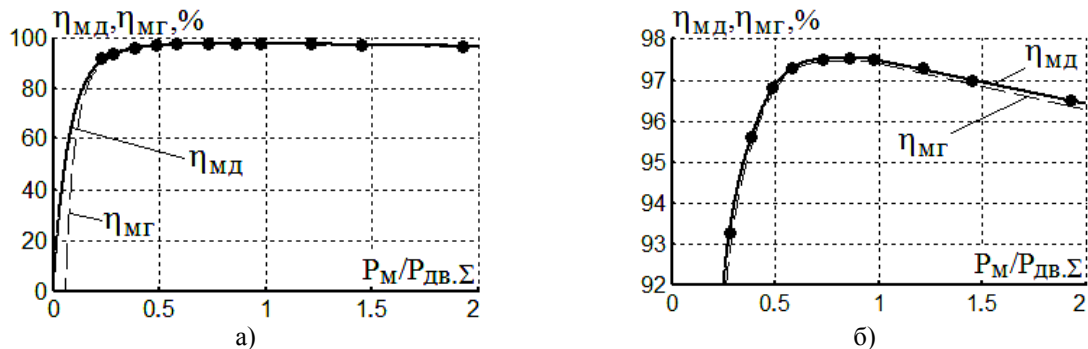


Рис. 1 Зависимости КПД движущего механизма трамвая для двигательного ($\eta_{мд}$) и генераторного ($\eta_{мг}$) режимов работы его тяговых двигателей от отношения мощностей $P_M / P_{дв.н}$ (а – полный график; б – фрагмент полного графика при $\eta_{м} \geq 92\%$; точками показаны табличные значения КПД)

По вычисленным из (6) табличным значениям осуществлена интерполяция изменения КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма трамвая в двигательном режиме следующими аналитическими соотношениями:

$$\eta_{мд} = \begin{cases} 95.81 \cdot \{1 - 0.012 \cdot \operatorname{sh}[12.8 \cdot (0.4 - \tau)]\} & \text{при } 0 \leq \tau < 0.4; \\ 97.53 - 37.46 \cdot |0.88 - \tau|^{4.2} & \text{при } 0.4 \leq \tau \leq 1; \\ 98.53 - 1.056 \cdot \tau & \text{при } \tau > 1, \end{cases} \quad \text{где } \tau = P_{м}/n \cdot P_{дв.н}. \quad (7)$$

Соответствующий этой интерполяции график $\eta_{мд}$ показан на рис.1 сплошной линией (при этом погрешность при предложенной аналитической интерполяции не превышает $\pm 0.1\%$).

С учетом второго соотношения из (2) найдем в генераторном режиме работы значение КПД $\eta_{мг}$ движущего механизма трамвая из соотношений:

$$\eta_{мг} = P_{дв.н} / P_{м} = (|P_{м}| - \Delta P_{м}) / |P_{м}| = 1 - \Delta P_{м} / |P_{м}|. \quad (8)$$

Определив из первого выражения в (6) соотношение:

$$\Delta P_{м} / |P_{м}| = (1 / \eta_{мд}) - 1 \quad (9)$$

и подставив его в последнее соотношение из (8), получим зависимость, связывающую между собой значения КПД движущего механизма трамвая в двигательном $\eta_{мд}$ и генераторном $\eta_{мг}$ режимах:

$$\eta_{мг} = 2 - 1 / \eta_{мд}, \quad 0 \leq \eta_{мг} \leq 1. \quad (10)$$

Зависимость (10) позволяет, в свою очередь, с учетом интерполяции из (7) для значения КПД $\eta_{мд}$ рассчитать зависимость КПД $\eta_{мг}$ движущего механизма трамвая в генераторном режиме, построенную на рис.1 и показанную пунктирной линией. При этом, согласно (8), генераторный режим работы трамвая характеризуется условиями: $F_c, P_{м} < 0$ и $|P_{м}| > \Delta P_{м}$; при невыполнении хотя бы одного из этих условий происходит двигательный режим работы трамвая (со значением КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма).

Подставив из (1) в (3) и (4) окончательное выражение для силы F_c и исходя из соотношений (7) и (10) для КПД $\eta_{мг}$, преобразуем выражения из (3) и (4) для приведенного значения статического момента сопротивления M_c трамвая к виду:

$$\left. \begin{aligned} M_c &= \frac{1}{\eta_{мг}} \cdot (M_{с0} + q \cdot \omega^2), \quad M_{с0} = \frac{mg(\mu\sqrt{1-i^2} + i)}{\varepsilon \cdot M_{\delta}}, \quad q = \frac{C_a \rho_{\delta} S_{\phi} \omega_{\delta}^2}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot M_{\delta}}, \\ \eta_{мг} &= \begin{cases} \eta_{мд} & \text{для двигательного режима,} \\ (\eta_{мг})^{-1} & \text{для генераторного режима} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

в котором величины: $M_c, M_{с0}, q$ и ω представлены в принятой системе относительных единиц; ω_{δ} [рад/с] и M_{δ} [Нм] – базисные значения соответственно скорости ротора и электромагнитного момента тягового ЧРАД; величины m и ε приведены соответственно в [кг] и [рад/м].

Рассчитанные из (11) нагрузочные характеристики $M_c / n \cdot M_{дв.н} = f(\omega, i)$ тягового привода трамвая показаны на рис. 2. На этом же рисунке штрих-пунктиром изображены нагрузочные характеристики, соответствующие одно-, двух- и трехкратным значениям номинальной мощности тягового двигателя.

Найдем массу трамвая при номинальной вместимости в нем пассажиров (равной 120 чел.):

$$m = m_{нор} + 70 \cdot 120 = 18400 + 8400 = 26800 \text{ кг}, \quad (12)$$

которую в дальнейшем будем использовать при проводимых расчетах (где $m_{нор} = 18400$ – масса порожнего одновагонного трамвая; 70 кг – средняя масса одного человека).

Исходя из известных зависимостей для вычисления кинетической энергии W_k [Дж] трамвая предс-

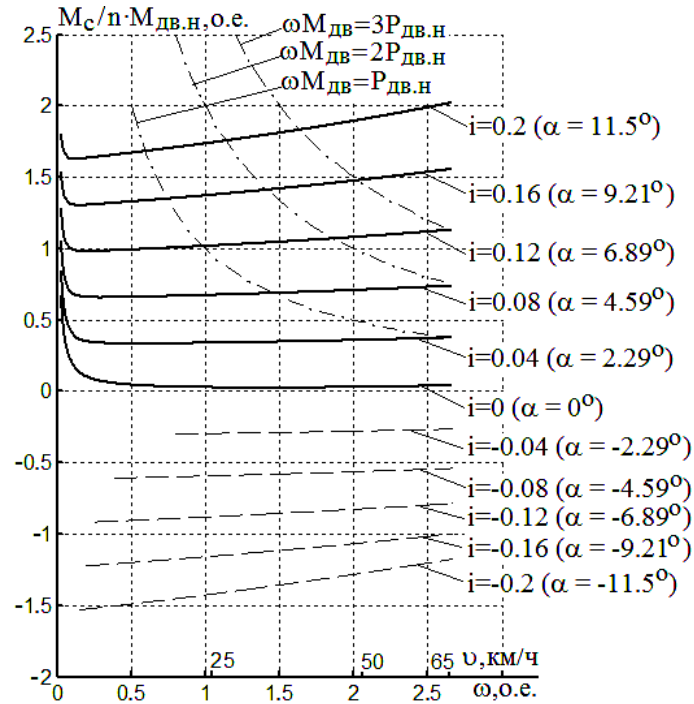


Рис.2 Нагрузочные характеристики тягового двигателя при варьировании его скорости ω (или скорости v трамвая) и разных значениях уклона i рельсового пути

$$W_{\kappa\Sigma} = 0.5 \cdot (1 + \gamma) \cdot m \cdot v^2 = 0.5 \cdot J \cdot \omega^2, \quad (13)$$

тавленных соответственно через массу m [кг] трамвая (движущегося поступательно со скоростью v [м/с]) или через приведенный (к вращающемуся с угловой скоростью ω [рад/с] валу тягового двигателя) момент инерции J [кг м²] тягового привода, определим значение последнего в виде:

$$J = (1 + \gamma) \cdot m \cdot v^2 / \omega^2 = (1 + \gamma) \cdot m / \varepsilon^2, \quad (14)$$

где γ – коэффициент, учитывающий в транспортном средстве соотношение между собой значений кинетических энергий вращательно и поступательно движущихся масс (для трамвая примем $\gamma = 0,1$) [8].

При этом статический момент сопротивления $M_{c,дв}$ и приведенный (к валу двигателя) момент инерции J_1 для каждого одного (из четырех) тягового двигателя вычисляются из соотношений:

$$M_{c,дв} = M_c / n \text{ и } J_1 = J / n. \quad (15)$$

Для перевода момента инерции J тягового привода из абсолютных в относительные единицы следует полученное из (14) значение разделить на базисное значение для момента инерции.

На **втором этапе** рассмотрим аналитические зависимости для расчета общих основных потерь мощности (ООПМ) $\Delta P_{эм}$ и общих основных потерь энергии (ООПЭ) для ЧРАД в режимах разгона и торможения, а также энергосберегающее управление тяговыми двигателями трамвая в указанных режимах.

Принимая во внимание упомянутое используемое двухзонное регулирование скорости ЧРАД, считаем для этого двигателя значение ООПМ в виде:

$$\Delta P_{дв} = \begin{cases} \Delta P_{дв.1} - \text{при } 0 \leq \omega \leq \omega_n \text{ (зона 1)}, \\ \Delta P_{дв.2} - \text{при } \omega_n < \omega \leq \omega_m \text{ (зона 2)}, \end{cases} \quad (16)$$

где значения текущих потерь мощности $\Delta P_{дв.1}$ и $\Delta P_{дв.2}$ этого двигателя, соответствующие зонам 1 и 2 регулирования, вычисляются (в относительной системе единиц) из соотношений [7]:

$$\Delta P_{\partial\delta,1} = a_1 + b \cdot \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{mH}} \right)^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2 \approx a_1 + b \cdot \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c \cdot \omega^\lambda + d \cdot \omega^2 \quad (17)$$

$$\Delta P_{\partial\delta,2} = a_2 \left(\frac{\Psi_{rH}}{\omega_1} - \frac{T_r \Psi_{rH}}{\omega_1^2} \omega_1' \right)^2 + b \omega_1^2 \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c (\Psi_m / \Psi_{mH})^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2. \quad (18)$$

В выражениях (17) и (18) используются обозначения: ω и ω_1 – соответственно скорость ротора и угловая частота статора двигателя; ω' – производная скорости ротора по текущему времени; $\lambda = 1.3$ – коэффициент, учитывающий изменение потерь мощности в стали ЧРАД от частоты статора ω_1 ; Ψ_m и Ψ_{mH} – соответственно текущее и номинальные значения модуля обобщенного вектора магнитного потока в воздушном зазоре двигателя. Постоянные коэффициенты a_1 , a_2 , b , c , d вычисляются в виде::

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (\Psi_{rH} / L_m)^2 \cdot (R_s + 0.005 P_{\partial\delta,1} / \eta_n), \quad a_2 = (R_s + 0.005 P_{\partial\delta,2} / \eta_n) / L_m^2, \\ b &= (R_s + k_r^2 R_r + 0.005 P_{\partial\delta,2} / \eta_n) / k_r^2 \Psi_{rH}^2, \quad c = \Delta P_{ст,н}, \quad d = \Delta P_{мех,н} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где: R_s и R_r – фазные активные сопротивления соответственно статорной и роторной обмоток; L_m и k_r – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора; $P_{\partial\delta,н}$ и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и КПД тягового двигателя; $\Delta P_{ст,н}$ и $\Delta P_{мех,н}$ – номинальные значения соответственно потерь мощности в стали и механических потерь двигателя.

Суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}$, $\Delta W_{m\Sigma}$ для всех тяговых двигателей и значения ООПЭ ΔW_p , ΔW_m для одного тягового двигателя при разгоне и торможении трамвая, общие времена разгона t_p и торможения t_m тяговых двигателей определяются из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{p\Sigma} &= \Delta W_{p\Sigma 1} + \Delta W_{p\Sigma 2}, \quad \Delta W_{p\Sigma 1} = n \cdot \Delta W_{p1}, \quad \Delta W_{m\Sigma} = \Delta W_{m\Sigma 1} + \Delta W_{m\Sigma 2}, \quad \Delta W_{m\Sigma 1} = n \cdot \Delta W_{m1}, \\ \Delta W_{p\Sigma 2} &= n \cdot \Delta W_{p2}, \quad \Delta W_{m\Sigma 2} = n \cdot \Delta W_{m2}, \quad \Delta W_p = \Delta W_{p1} + \Delta W_{p2}, \quad \Delta W_m = \Delta W_{m1} + \Delta W_{m2}, \\ \Delta W_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} \Delta P_{\partial\delta,1} dt, \quad \Delta W_{p2} = \int_0^{t_{p2}} \Delta P_{\partial\delta,2} dt, \quad \Delta W_{m1} = \int_0^{t_{m1}} \Delta P_{\partial\delta,1} dt, \quad \Delta W_{m2} = \int_0^{t_{m2}} \Delta P_{\partial\delta,2} dt, \\ \Delta W_{p,m\Sigma} &= \Delta W_{p\Sigma} + \Delta W_{m\Sigma}, \quad t_p = t_{p1} + t_{p2}, \quad t_m = t_{m1} + t_{m2} \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

где ΔW_{p1} и ΔW_{p2} – значения ООПЭ для одного ЧРАД при разгоне, соответствующие 1-ой и 2-ой зонам регулирования скорости; ΔW_{m1} и ΔW_{m2} – значения ООПЭ этого двигателя при торможении, соответствующие 1-ой и 2-ой зонам регулирования скорости; t_{p1} и t_{m1} – длительности времен разгона и торможения для первой зоны регулирования скорости (при $0 \leq \omega \leq \omega_n$); t_{p2} и t_{m2} – длительности времен разгона и торможения для второй зоны регулирования (при $\omega_n < \omega \leq \omega_m$); t – текущее время, которое условимся отсчитывать от начала, на протяжении и в пределах рассматриваемых зон регулирования скорости и режимов разгона ($0 \leq t \leq t_{p1}$ и $0 < t \leq t_{p2}$) или торможения ($0 \leq t \leq t_{m1}$ и $0 \leq t < t_{m2}$) ЧРАД.

Из теории вариационного исчисления известно, что при минимизации значений интегралов из (20) (что является условием минимизации ООПЭ в ЧРАД при разгоне и торможении) подынтегральные функции $\Delta P_{\partial\delta,1}$ и $\Delta P_{\partial\delta,2}$ из (17) и (18) соответствуют уравнению Эйлера [11]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{\partial\delta})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} \omega'' + \frac{\partial^2(\Delta P_{\partial\delta})}{\partial \omega \cdot \partial \omega'} \omega' + \frac{\partial^2(\Delta P_{\partial\delta})}{\partial \omega \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_{\partial\delta})}{\partial \omega} = 0, \quad (21)$$

где ω'' – вторая производная скорости ω двигателя по текущему времени t .

Подставив значение для статического момента сопротивления M_c из (11) в окончательное выражение из (17), а затем полученное выражение – в уравнение (21), преобразуем последнее к виду:

$$\omega'' = K_1 \cdot \omega + \left(\frac{2q^2}{J^2} \right) \omega^3 + \left(\frac{\lambda \cdot c \cdot n^2}{2b^2 J^2} \right) \omega^{\lambda-1}, \quad \text{где } K_1 = (2bqM_{co} + d \cdot n^2) / bJ^2, \quad (22)$$

соответствующему режимам разгона и торможения ЧРАД в первой зоне регулирования скорости.

Вследствие нелинейного вида полученного дифференциального уравнения (22) оно не имеет точного аналитического решения. Как показали проведенные исследования численных решений этого уравнения, полученных методом Рунге-Кутты, они могут быть интерполированы (с относительным среднеквадратичным отклонением менее 0,7 %) траекториями скорости, названными «квазиоптимальными»:

$$\omega = \omega_n \cdot \frac{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t\right)}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t_{p1}\right)}, \quad \omega = \omega_n \frac{\text{sh}\left[\xi^* \sqrt{K_1} \cdot (t_{m1} - t)\right]}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t_{m1}\right)} - \quad (23)$$

вогнутой или

$$\omega = \omega_n \cdot \left\{ 1 - \frac{\text{sh}\left[\xi^* \sqrt{K_1} \cdot (t_{p1} - t)\right]}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t_{p1}\right)} \right\}, \quad \omega = \omega_n \left\{ 1 - \frac{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t\right)}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_1} \cdot t_{m1}\right)} \right\} - \quad (24)$$

выпуклой формы.

Аналогично (после подстановки значения для момента сопротивления M_c из (11) в выражение (18), а затем полученного выражения – в уравнение (21) Эйлера) уравнение (21) было преобразовано к виду:

$$\omega'' \approx K_2 / \omega, \quad \text{где } K_2 = n^2 \cdot d \cdot \Psi_{rn}^2 / bJ^2 \quad (25)$$

и получены квазиоптимальные траектории скорости для второй зоны регулирования ЧРАД:

$$\omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \frac{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t\right)}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{p2}\right)}, \quad \omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \frac{\text{sh}\left[\xi^* \sqrt{K_2} \cdot (t_{m2} - t)\right]}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{m2}\right)} - \quad (26)$$

вогнутой или

$$\omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \left\{ 1 - \frac{\text{sh}\left[\xi^* \sqrt{K_2} \cdot (t_{p2} - t)\right]}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{p2}\right)} \right\}, \quad \omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \left\{ 1 - \frac{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t\right)}{\text{sh}\left(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{m2}\right)} \right\} - \quad (27)$$

выпуклой формы.

Причем первые зависимости из выражений (23), (24) и (26), (27) соответствуют разгону, а вторые – торможению ЧРАД. После подстановки выражений (23), (24) и (26), (27) в зависимости (17) и (18) были рассчитаны из (20) значения ООПЭ: $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 1}$ – при варьировании времен разгона t_{p1} и торможения t_{m1} в первой зоне скоростей трамвая (для скорости $v_n = 24.4$ км/ч); $\Delta W_{p\Sigma 2}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ – при варьировании времен разгона t_{p2} и торможения t_{m2} во второй зоне скоростей трамвая (для скорости $v_m = 50$ км/ч), – которые изображены в виде графиков на рис.3 и рис.4. Причем в зависимостях (23), (24) и (26), (27) значение поправочного коэффициента ξ^* соответствует всегда минимально возможному значению ООПЭ для ЧРАД, найденному из интегральных зависимостей в (20) при любых конкретных значениях времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} для первой и второй зон регулирования скорости. Рассчитанные значения для коэффициента ξ^* приведены в виде графиков на рис.5.

Для тяговых ЧРАД трамвая были вычислены для сравнения из (20) суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ при разгоне и торможении применительно к параболического вида (вогнутой и выпуклой формы) и линейного вида тахограммам (ТГ). На рис.3 и рис.4 и последующих рисунках и таблицах условимся обозначать величины, относящиеся к квазиоптимальным траекториям ско-

рости вогнутой и выпуклой формы – соответственно K' и K'' ; к параболическим траекториям скорости вогнутой и выпуклой формы – соответственно Π' и Π'' ; к линейной траектории скорости – L .

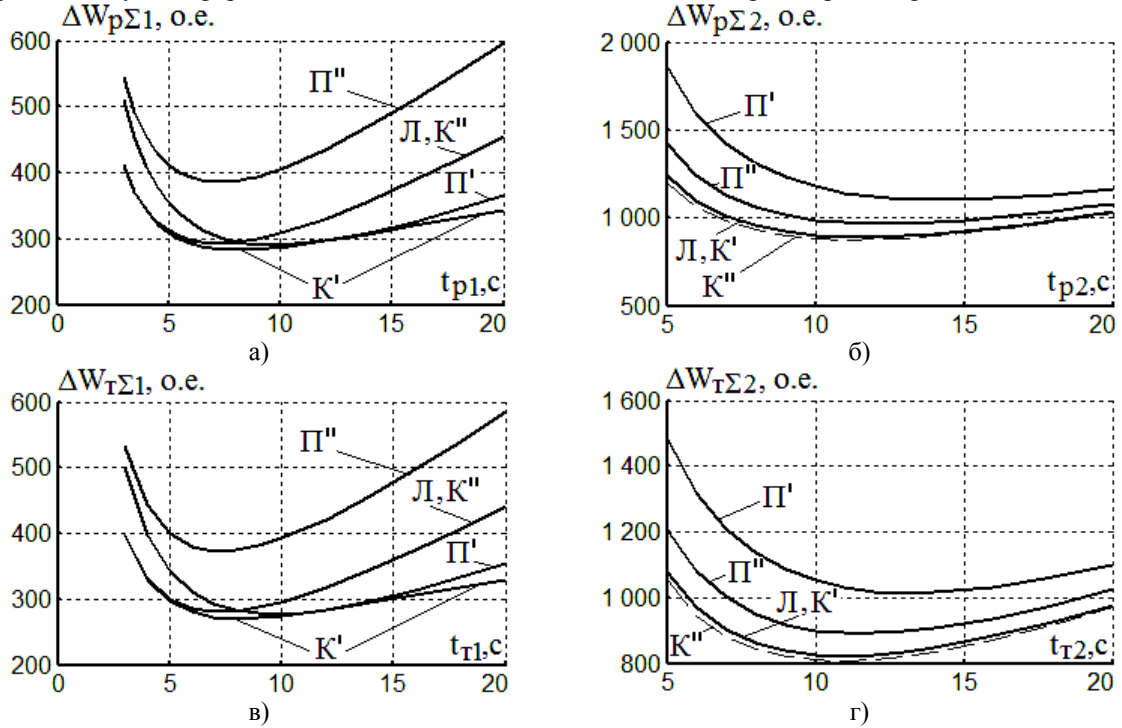


Рис.3 Зависимости суммарных ОПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ при разгоне (а, б) и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ и торможении (в,г) для тяговых ЧРАД трамвая (для $i = 0$, $v_n = 24,4$ км/ч и $v_m = 50$ км/ч) в первой (а,в) и второй (б,г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} для: K' и K'' – квазиоптимальных соответственно вогнутой и выпуклой, Π' и Π'' – параболических соответственно вогнутой и выпуклой, L – линейной тахограмм

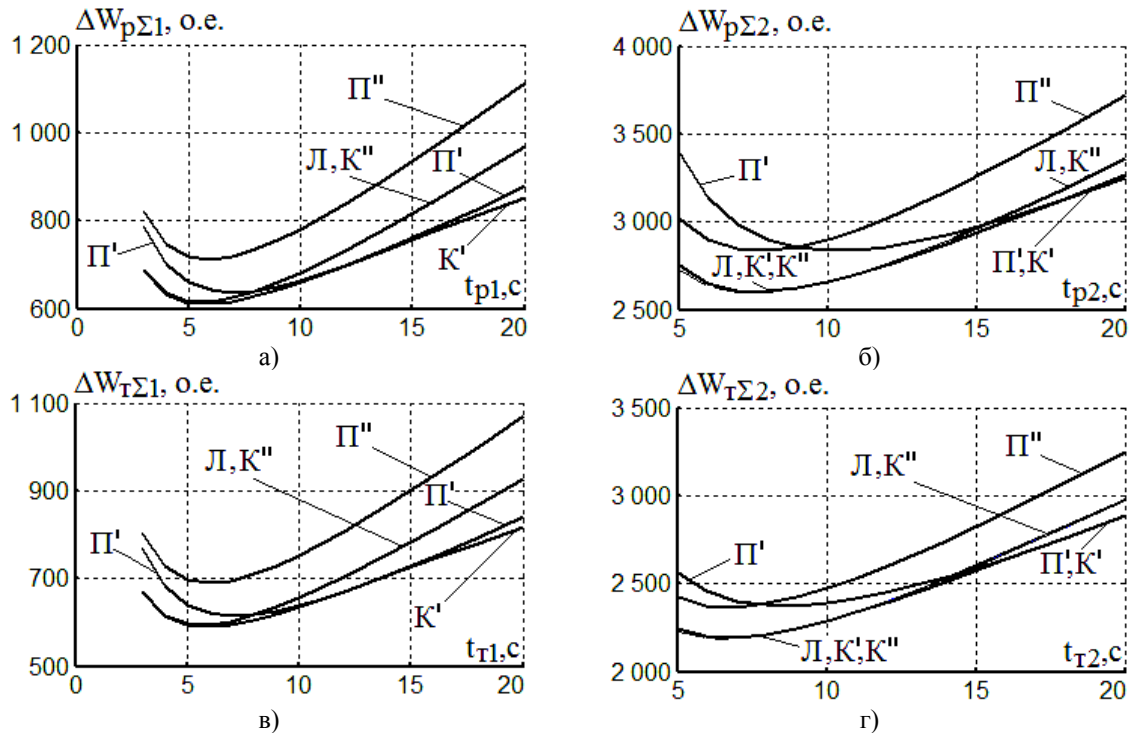


Рис.4 Зависимости суммарных ОПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ при разгоне (а, б) и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ и торможении (в,г) для тяговых ЧРАД трамвая (для $v_n = 24,4$ км/ч и $v_m = 50$ км/ч) в первой (а,в) и второй (б,г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1} , t_{p2} (для $i = 0,08$) и тор-

можения t_{m1}, t_{m2} (для $i = -0.08$) для: K' и K'' – квазиоптимальных соответственно вогнутой и выпуклой, Π' и Π'' – параболических соответственно вогнутой и выпуклой, L – линейной тахограмм

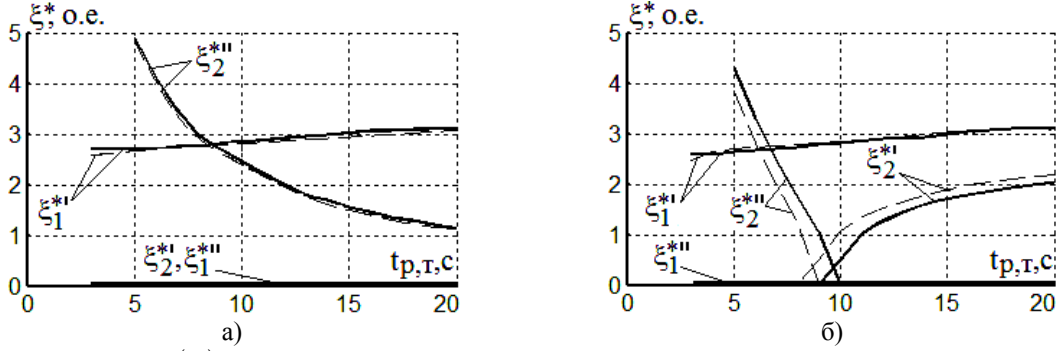


Рис.5 Зависимости $\xi^*(t_p), \xi^*(t_m)$ для квазиоптимальных тахограмм вогнутой и выпуклой (показаны одним и двумя штрихами соответственно) формы при первой и второй зонах регулирования (показаны индексами 1 и 2 соответственно) для значений уклона: а – $i = 0$, б – $i = 0.08$ (разгон) и $i = -0.08$ (торможение), изображенные: сплошной линией – для разгона, пунктиром – для торможения

По результатам выполненных расчетов представлены в табл.2 (для $i = 0$) и табл.3 (для $i = \pm 0.08$) значения оптимальных времен разгона t_{p1}^o, t_{p2}^o и торможения t_{m1}^o, t_{m2}^o в первой и второй зонах и соответствующие им оптимальные (минимальные) суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o$ и $\Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$ для всех тяговых ЧРАД трамвая при рассматриваемых различных траекториях скорости (в табл.2 – для скорости $v_n = 24.4$ км/ч, в табл.3 – для скорости $v_m = 50$ км/ч), а также значения удельных потерь энергии $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}$ и $\Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ для ЧРАД при перемещениях α_{p1}, α_{p2} и α_{m1}, α_{m2} его ротора в режимах разгона и торможения в зонах регулирования 1 и 2, вычисленные в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{p1} &= \Delta W_{p\Sigma 1}^o / \alpha_{p1}, \quad \Delta p_{m1} = \Delta W_{m\Sigma 1}^o / \alpha_{m1}, \quad \Delta p_{p\Sigma} = \Delta W_{p\Sigma}^o / \alpha_p, \quad \Delta p_{p,m\Sigma} = \Delta W_{p,m\Sigma}^o / (\alpha_p + \alpha_m), \\ \Delta p_{p2} &= \Delta W_{p\Sigma 2}^o / \alpha_{p2}, \quad \Delta p_{m2} = \Delta W_{m\Sigma 2}^o / \alpha_{m2}, \quad \Delta p_{m\Sigma} = \Delta W_{m\Sigma}^o / \alpha_m, \quad \Delta W_{p,m\Sigma}^o = \Delta W_{p\Sigma}^o + \Delta W_{m\Sigma}^o, \\ \alpha_{p1} &= \int_0^{t_{p1}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{m1} = \int_0^{t_{m1}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{p2} = \int_0^{t_{p2}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{m2} = \int_0^{t_{m2}^o} \omega \cdot dt, \\ \alpha_p &= \alpha_{p1} + \alpha_{p2}, \quad \alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2}, \quad t_p^o = t_{p1}^o + t_{p2}^o, \quad t_m^o = t_{m1}^o + t_{m2}^o, \end{aligned} \right\} (28)$$

где t_p^o и t_m^o – общие оптимальные времена разгона и торможения трамвая; α_p и α_m – результирующие положения вала тягового ЧРАД соответственно при разгоне и торможении.

В табл.4 приведены результаты расчета (при $i = 0, v_m = 50$ км/ч) оптимальных значений общих времен разгона t_p^o и торможения t_m^o и соответствующих им суммарных значений ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}^o, \Delta W_{m\Sigma}^o$ и $\Delta W_{p,m}^o$ для всех тяговых ЧРАД трамвая в пуско-тормозных режимах применительно к рассмотренным видам (K', K'', Π', Π'' и L) тахограмм, а также – дополнительно для комбинированной (из участков K' и K'') квазиоптимальной тахограммы. Согласно табл.4 наименьшие значения суммарных удельных ООПЭ $\Delta p_{p,m\Sigma}$ тяговых ЧРАД присущи для: параболического Π'' и квазиоптимального K'' вида выпуклой формы и линейной L тахограмм (которые далее обозначим при пуско-тормозных режимах энергосберегающими управлениями 1, 2 и 3 соответственно), а также для – комбинированной тахограммы, состоящей из участков квазиоптимальных тахограмм вогнутой K' и выпуклой K'' формы (обозначим ее управлением 4). Формы тахограмм, соответствующих энергосберегающим управлениям 1, 2, 3 и 4, изображены на рис.6, а входящие в них участки (из ранее рассмотренных тахограмм) показаны в табл.5.

На **третьем этапе** для оптимальных времен разгона и торможения из табл.2 и табл.3 (при $v_m = 50$ км/ч) рассчитаны из зависимостей (6), (13), (18) – (20), (22), (25), (26) и (28), (29) электромеханические (скорость ω и положения α_p и α_m вала двигателя при разгоне и торможении, скорость v трамвая) и

энергетические (общие основные потери мощности $\Delta P_{ов}$ и энергии ΔW_p , ΔW_m в ЧРАД) переходные процессы которые показаны на рис.7. Также на данном рисунке изображены переходные процессы для

Таблица 2

Оптимальные времена $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ и ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o, \Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$, удельные потери $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}, \Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ энергии при разгоне и торможении тяговых ЧРАД трамвая (при $m = 26.8$ т, $i = 0$, $v_n = 24.4$ км/ч, $v_m = 50$ км/ч) для различных видов тахограмм

Обозначение ТГ	Разгон						Торможение					
	t_{p1}^o	$\Delta W_{p\Sigma 1}^o$	Δp_{p1}	t_{p2}^o	$\Delta W_{p\Sigma 2}^o$	Δp_{p2}	t_{m1}^o	$\Delta W_{m\Sigma 1}^o$	Δp_{m1}	t_{m2}^o	$\Delta W_{m\Sigma 2}^o$	Δp_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'	8,1	70,676	0.0660	11,5	223,24	0.0405	8,1	67,579	0.2792	11,6	222,73	0.0371
K''	7,2	73,120	0.0647	11,2	219,06	0.0393	7,2	70,025	0.0619	10,6	201,86	0.0495
Π'	9,8	72,456	0.0706	14,3	275,55	0.0454	9,8	69,358	0.0676	13,2	253,45	0.0453
Π''	7,3	96,373	0.0639	12,3	241,57	0.0368	7,3	93,269	0.0610	11,6	222,73	0.0360
L	7,2	73,120	0.0647	11,5	223,24	0.0405	7,2	70,025	0.0619	10,9	205,64	0.0394

Таблица 3

Оптимальные времена $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ и ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o, \Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$, удельные потери $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}, \Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ энергии при разгоне и торможении тяговых ЧРАД трамвая (при $m = 26.8$ т, $i = \pm 0.08$, $v_n = 24.4$ км/ч, $v_m = 50$ км/ч) для различных видов тахограмм

Обозначение ТГ	Разгон (при $i = 0.08$)						Торможение (при $i = -0.08$)					
	t_{p1}^o	$\Delta W_{p\Sigma 1}^o$	Δp_{p1}	t_{p2}^o	$\Delta W_{p\Sigma 2}^o$	Δp_{p2}	t_{m1}^o	$\Delta W_{m\Sigma 1}^o$	Δp_{m1}	t_{m2}^o	$\Delta W_{m\Sigma 2}^o$	Δp_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'	5,7	152,62	0.1859	7,7	650,43	0.176 4	5,84	147,51	0.8548	6,7	548,06	0.170 8
K''	5,5	153,67	0.1780	7,4	649,00	0.179 7	5,7	148,58	0.1660	6,5	547,10	0.172 7
Π'	7	159,29	0.2174	10,3	709,03	0.162 4	7,1	153,98	0.2072	8,6	593,66	0.162 8
Π''	5,9	177,84	0.1440	7,7	709,07	0.172 5	6	172,41	0.1373	6,7	591,72	0.165 4
L	5,5	153,67	0.1780	7,7	650,43	0.176 4	5,7	148,58	0.1660	6,7	548,06	0.170 8

Таблица 4

Оптимальные значения общих времен разгона t_p^o и торможения t_m^o и суммарных $\Delta W_{p\Sigma}^o, \Delta W_{m\Sigma}^o, \Delta W_{p,m\Sigma}^o$ и суммарных удельных $\Delta p_{p\Sigma}, \Delta p_{m\Sigma}, \Delta p_{p,m\Sigma}$ ООПЭ тяговых двигателей трамвая в режимах разгона и торможения (при $i = 0, v_m = 50$ км/ч)

Управление	Вид ТГ	Обозначение величин							
		t_p^o	t_m^o	$\Delta W_{p\Sigma}^o$	$\Delta W_{m\Sigma}^o$	$\Delta W_{p,m\Sigma}^o$	$\Delta p_{p\Sigma}$	$\Delta p_{m\Sigma}$	$\Delta p_{p,m\Sigma}$
Един. измер.		с	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
	K'	19.6	19.7	293.92	321.58	615.5	0.1065	0.3163	0.4228
1	K''	18.4	17.8	292.18	272.00	564.18	0.1039	0.1002	0.2041
	Π'	24.1	23	348.01	322.81	670.82	0.1161	0.1129	0.2290
2	Π''	19.5	18.9	337.95	316.00	653.95	0.1007	0.0970	0.1977
3	L	18.7	18.1	296.36	275.66	572.02	0.1052	0.1013	0.2065
4	K', K''	19.3	18.8	289.74	269.44	559.18	0.1052	0.1016	0.2068

електромагнитного моменту $M_{\delta\theta}$ и положения s_p и s_m трамвая при разгоне и торможении, модуля обобщенных векторов статорного тока I_1 ЧРАД, вычисленных из зависимостей [7]:

$$\left. \begin{aligned} M_{\delta\theta} &= (M_c + J\omega')/n, \quad I_1 = (I_{1x}^2 + I_{1y}^2)^{0.5}, \quad I_{1x} = (\Psi_r + T_r \cdot \Psi_r')/L_m, \\ s_p[M] &= \varepsilon \cdot \alpha_p / z_p, \quad s_m[M] = \varepsilon \cdot \alpha_m / z_p, \quad I_{1y} = M_{\delta\theta} / k_r \Psi_r \end{aligned} \right\}, \quad (29)$$

где I_{1x} , I_{1y} – намагничивающая и активная проекции обобщенного вектора статорного тока $\bar{I}_1$; T_r и L_m – электромагнитная постоянная времени ротора и индуктивность намагничивания двигателя; z_p – число пар полюсов тягового ЧРАД ($z_p = 2$).

Таблица 5
Обозначение составных частей тахограмм при энергосберегающих управлениях 1,2,3 и 4

Вид управления	Интервалы времени			
	t_{p1}^o	t_{p2}^o	t_{m1}^o	t_{m2}^o
1	K''	K''	K''	K''
2	Π''	Π''	Π''	Π''
3	$\mathcal{L}$	$\mathcal{L}$	$\mathcal{L}$	$\mathcal{L}$
4	K'	K''	K'	K''

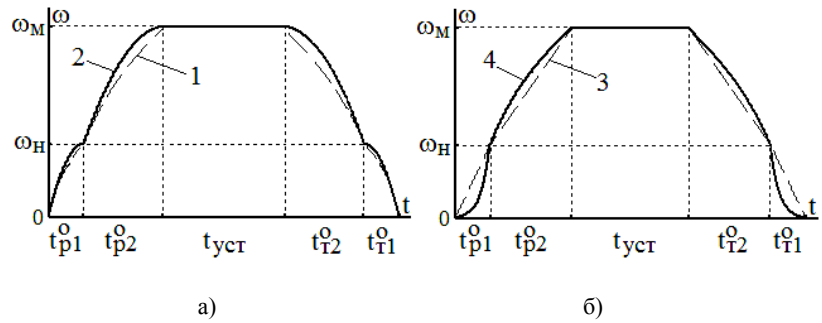


Рис. 6 Формы тахограмм при энергосберегающих управлениях: а – для управления 1 и 2; б – для управления 3 и 4

При этом аналогично соотношению из (3) и согласно [8] сила тяги F_m и поступательное движение трамвая описываются зависимостями

$$F_m = n \cdot M_{\delta\theta} \cdot \varepsilon \cdot \eta_{м\delta} \cdot M_{\delta} \quad \text{и} \quad F_m - F_c = m \cdot (1 + \gamma) \cdot v', \quad (30)$$

в которых F_m и F_c – силы соответственно тяги и сопротивления движению, [Н]; v' [м/с²] – первая производная скорости трамвая по времени.

Условием работы тягового привода без буксования является непревышение силой тяги F_m ее предельного значения $F_{пред}$, равного силе сцепления:

$$|F_m| \leq F_{пред} = \begin{cases} mg \cdot k_{cu} & \text{– при разгоне,} \\ 0.8 \cdot mg \cdot k_{cu} & \text{– при рекуперативном торможении,} \end{cases} \quad (31)$$

где k_{cu} – коэффициент сцепления колес трамвая с металлическим рельсом (при нормальных погодных условиях принимает значение: $k_{cu} = 0.15$) [8].

С учетом соотношений из (30) и (31) условием работы тягового привода трамвая без буксования может быть также непревышение моментом двигателя $M_{\delta\theta}$ предельного для него значения $M_{пред}$:

$$|M_{\delta\theta}| \leq M_{пред} = \begin{cases} \frac{mg \cdot k_{cu}}{n \varepsilon \eta_{м\delta} M_{\delta}} & \text{– при разгоне,} \\ \frac{0.8 \cdot mg \cdot k_{cu}}{n \varepsilon \eta_{м\delta} M_{\delta}} & \text{– при рекуперативном торможении,} \end{cases} \quad \tau = \frac{v \cdot [F_c + (1 + \gamma) \cdot m v']}{n \cdot P_{\delta\theta,н}}, \quad (32)$$

где значение КПД $\eta_{м\delta}$ движущего механизма трамвая находится при параметре τ , вычисляемом из (32).

Как свидетельствуют проведенные расчеты для массы $m = 26.8$ [т] трамвая, предельные значения момента $M_{пред}$ составляют $2.3M_{дв.н}$ при трогании и $1.3M_{дв.н}$ при последующем разгоне или $1.8M_{дв.н}$ на заключительной стадии рекуперативного торможения и $1.04M_{дв.н}$ на предшествующих этому скоростях при данном торможении. Согласно рис.7 развиваемые при разгоне и торможении трамвая текущие значения электромагнитного момента $M_{дв}$ двигателя не превышают указанных для него предельных значений $M_{пред}$, что обеспечивает функционирование тяговых двигателей трамвая при рассмотренных траекториях скорости в пуско-тормозных режимах без буксования. Для перехода при оценке электро-механических и энергетических процессов от относительных к абсолютным значениям следует полученные в относительных единицах значения умножить на базисные значения, приведенные для ЧРАД в табл.6.

На **четвертом этапе** рассмотрим энергосберегающее управление тяговыми ЧРАД трамвая при его движении с равномерной скоростью ($v = const$) и при неизменном уклоне ($i = const$) рельсового пути. С учетом соотношений из (11) этому, очевидно, соответствуют постоянные значения угловой скорости $\omega = const$ и момента сопротивления $M_c = const$ двигателя.

Для установившихся режимов ЧРАД известно оптимальное (минимально возможное) соотношение

Таблица 6

Базисные значения для величин двигателя

Величина	I_1	M, M_c	Ψ	ω_1	ω	$P, \Delta P$	$W, \Delta W$	R_s, R_r	L	J	t
Размерность	А	Нм	Вб	рад/с	рад/с	кВт	Дж	Ом	мГн	кг·м ²	с
Значение	126	443	1,17	100π	50π	69,52	221,3	2,913	9,27	0,00897	$0.01/\pi$

χ_o между основными электромагнитными потерями мощности $\Delta P_{эм}$ и абсолютным значением $|M_{дв}|$ развиваемого электромагнитного момента $M_{дв}$ этого двигателя [7]:

$$\chi_o = \frac{2}{k_r L_m} (X \cdot Y)^{0.5} = \frac{\Delta P_{эм}}{|M_{дв}|} = \min, \quad (33)$$

где параметры X и Y рассчитываются в виде:

$$X = R_s + 0.005 \frac{P_n}{\eta_n} + k_r^2 \left(R_r + \frac{\Delta P_{ст.н} L_{\sigma}^2 \omega_1^2}{\Psi_{тн}^2} \right) \quad \text{и} \quad Y = R_s + 0.005 P_n / \eta_n + \Delta P_{ст.н} L_m^2 \omega_1^{1.3} / \Psi_{тн}^2, \quad (34)$$

где L_{σ} – индуктивность рассеяния ротора тягового двигателя.

В указанном оптимальном режиме, реализующем минимизацию основных электромагнитных $\Delta P_{эм}$ и общих $\Delta P_{дв}$ потерь мощности двигателя, эти потери мощности рассчитываются с учетом (33) в виде:

$$\Delta P_{эм} = \chi_o |M_{дв}| = \frac{2|M_{дв}|}{k_r L_m} \left(\frac{X}{Y} \right)^{0.5} \quad \text{и} \quad \Delta P_{дв} = \Delta P_{эм} + d \cdot \omega^2. \quad (35)$$

Применительно к трамваю представляет интерес минимизация его удельной потребляемой общей энергии p_{Σ} при перемещении вала тяговых ЧРАД в установившихся (с равномерной скоростью $\omega = const$ и длительностью времени t_{ycm}) режимах движения:

$$p_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma} \cdot t_{ycm}}{\alpha} = \frac{P_{\Sigma} \cdot t_{ycm}}{\omega \cdot t_{ycm}} = \frac{P_{\Sigma}}{\omega} = \min \quad \text{и} \quad P_{\Sigma} = [M_c \cdot \omega + n \cdot (\Delta P_{дв} + \Delta P_{мод})] / \eta_{сн} + P_{сн}, \quad (36)$$

где P_{Σ} – общая потребляемая мощность трамвая в установившемся режиме движения со скоростью $v = const$; α – перемещение вала тягового двигателя за время этого установившегося движения; $\Delta P_{мод} \approx \tau_m \cdot \Delta P_{дв.н}$ – модуляционные потери мощности одного тягового ЧРАД, вызванные высокочастотными гармониками его фазных статорных токов (где $\Delta P_{дв.н}$ – номинальные потери мощности тяго-

вого двигателя; $\tau_m \approx 0.03$); $P_{сн}$ – активная мощность потребления собственных нужд трамвая (затрачиваемая на питание бортового компьютера, сигнализации, освещения и др.). Заметим, что при отсутствии проскальзывания движущих колес трамвая относительно рельсов перемещение α вала ЧРАД прямо пропорционально перемещению s трамвая: $s[M] = \varepsilon \cdot \alpha / z_p$.

Из (36) рассчитаны применительно к установившимся режимам работы трамвая и показаны на рис.8 характеристики удельной потребляемой (показанной пунктиром) или генерируемой (изображенной пунктиром) энергии $p_\Sigma = P_\Sigma / \omega$ трамваем при изменении значения его скорости v , скорости ω тягового двигателя и при различных значениях i уклона рельсового пути. Согласно рис.8 минимальные значения удельной потребляемой энергии p_Σ достигаются при определенных энергосберегающих значениях скорости v^* и ω^* трамвая или тягового ЧРАД (эти значения на данном рисунке изображены только для характеристики с уклоном $i = 0$, где $v^* = 34,6$ км/ч, $\omega^* = 1.42$ о.е.).

Задавшись расстоянием L_o между соседними остановками трамвая и исходя из ранее рассмотренных зависимостей для суммарных значений ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}$ и $\Delta W_{m\Sigma}$ всех тяговых двигателей трамвая, модуляционных потерь мощности ΔP_{mod} и электромагнитного момента $M_{ов}$ тягового ЧРАД, с учетом второго выражения из (35) определим из следующих соотношений:

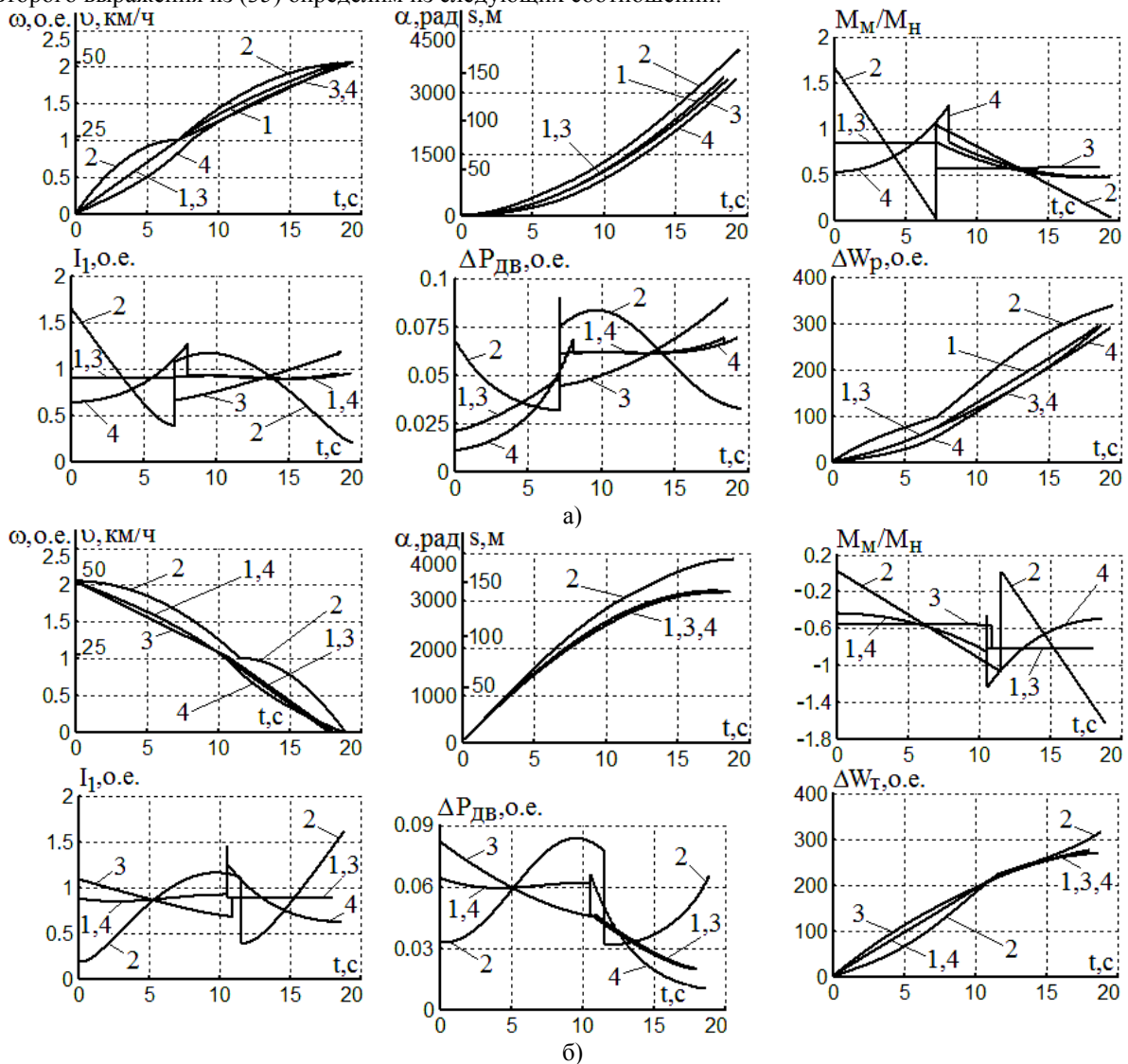


Рис.7 Электромеханические и энергетические переходные процессы (для $m = 26.8$ т, $v_m = 50$ км/ч, $i = 0$) при разгоне (а) и торможении (б) тягового ЧРАД трамвая (при оптимальных временах пуско-тормозных режимов для управлений 1, 2, 3 и 4 соответственно)

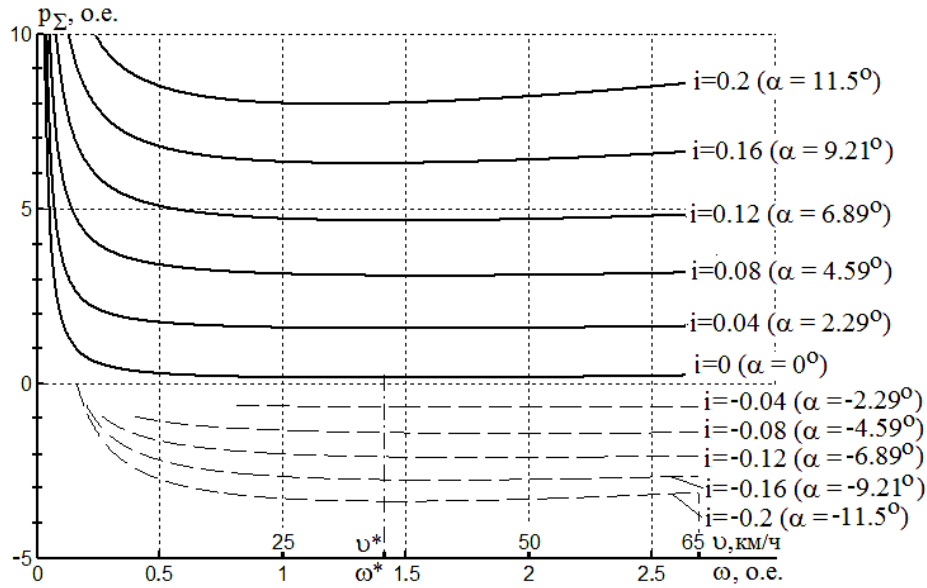


Рис.8 Удельные потребление (показанное сплошной линией) и генерация (изображенная пунктиром) энергии трамвая в оптимальном установившемся режиме

Таблица 7

Результаты расчета суммарных ООПЭ тяговых двигателей за время движения трамвая между остановками ($L_o = 400$ м, $i = 0$) при разных установившихся скоростях v_m для управления 1, 2, 3 и

4

v_m	Управ-	t_p^o	t_m^o	t_{ycm}	s_p	s_m	s_{ycm}	$\Delta W_{p\Sigma}$	$\Delta W_{m\Sigma}$	ΔW_{ycm}	ΔW_{Σ}
км/ч	ление	с	с	с	м	м	м	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
24,4	1	7.2	7.2	44.6	48.74	48.75	302.51	73.12	70.02	336.1	479.2
	2	7.2	7.3	39.7	64.99	65.90	269.11	96.38	93.27	299.2	488.9
	3	7.2	7.2	44.6	48.74	48.75	302.51	73.12	70.02	336.1	479.2
	4	8.1	7.2	45.4	46.20	46.00	307.8	70.68	67.59	342.1	480.4
35	1	11.7	10.6	30.2	54.2	52.5	293.3	140.8	134.9	383.1	658.8
	2	11.2	11.1	27.5	67.2	65.9	266.9	172.0	165.5	348.9	686.4
	3	10.8	10.6	30.2	53.9	52.2	293.9	141.3	135.3	383.1	659.7
	4	10.8	10.6	30.4	53.0	51.2	295.8	138.4	132.5	385.6	656.5
50	1	18.4	17.8	7.1	144.7	156.5	98.8	292.2	272.0	294.0	858.2
	2	19.5	18.9	4.28	174.1	166.5	59.4	338.0	316.0	148.9	802.9
	3	18.7	18.1	8.63	143.1	137.0	119.9	296.4	275.6	300.2	872.2
	4	19.3	18.8	8.63	143.4	136.7	119.9	289.7	269.4	300.2	859.3

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\Sigma} &= \Delta W_{p\Sigma} + \Delta W_{m\Sigma} + \Delta W_{ycm}; \quad \Delta W_{ycm} = n \cdot \Delta P_{\partial\delta} \cdot t_{ycm}, \\ W_{\Sigma} &= W_{p\Sigma} + W_{m\Sigma} + W_{ycm}; \quad W_{p\Sigma} = \int_0^{t_p} \frac{n}{\eta_{cn}} (\omega \cdot M_{\partial\delta} + \Delta P_{mod}) \cdot dt + \frac{\Delta W_{p\Sigma}}{\eta_{cn}} + P_{cn} \cdot t_p; \quad s_p = \frac{\alpha_p}{\varepsilon}, s_m = \frac{\alpha_m}{\varepsilon}; \\ W_{m\Sigma} &= \int_0^{t_m} \frac{n}{\eta_{cn}} (\omega \cdot M_{\partial\delta} + \Delta P_{mod}) \cdot dt + \frac{\Delta W_{m\Sigma}}{\eta_{cn}} + P_{cn} \cdot t_m; \quad W_{ycm} = P_{\Sigma} \cdot t_{ycm}; \quad t_{ycm} = [L_o - (s_p + s_m)] / v \end{aligned} \right\} (37)$$

суммарное значение ООПЭ ΔW_{Σ} и общее потребление энергии W_{Σ} трамваем при прохождении им упомянутой дистанции L_o между соседними остановками. Результаты выполненных расчетов (при режимах разгона и торможения: оптимальных времен t_p^o и t_m^o , пройденных в пуско-тормозных режимах расстояний трамваем s_p и s_m , потребляемой энергии $W_{p\Sigma}$ и $W_{m\Sigma}$; при установившемся режиме движения со скоростью $v = const$: времени t_{ycm} этого движения и пройденного при этом расстояния s_{ycm} , ООПЭ ΔW_{ycm} в данном режиме; суммарных ООПЭ ΔW_{Σ} трамваем в установившихся и пуско-тормозных режимах) представлены применительно к управлениям 1, 2, 3 и 4 в табл.7. Как показали выполненные рас-

четы, удельный расход электроэнергии трамвая (при $m = 26.8$ т, $v_m = 50$ км/ч, $i = 0$) для всех рассмотренных видов энергосберегающего управления не превышает 80 Вт·ч/т·км.

На *пятом этапе* приведем расчет ожидаемой годовой экономии $\mathcal{E}_z$, приходящийся на один моторный вагон трамвая и достигаемой за счет уменьшения непроизводительных потерь энергии в тяговых двигателях при переходе к оптимальным длительностям их времен разгона и торможения:

$$\mathcal{E}_z = (\Delta W_g \cdot \Delta W_{\delta} \cdot 12 \cdot 16 \cdot 365) / 3600 = 2585 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $\Delta W_g = \Delta W_{p,m\Sigma} - \Delta W_{p,m\Sigma}^0 \approx 600$ о.е. – суммарное снижение потерь электроэнергии (согласно табл.3) при одном разгоне и одном торможении (то есть, при одном пуско-тормозном режиме) в тяговых двигателях одновагонного трамвая; $\Delta W_{\delta} = 0.2213$ кДж – базисное значение энергии (согласно табл.6); 12 – количество пуско-тормозных режимов в час; количество рабочих часов трамвая; 16 – количество часов работы трамвая в сутки; 365 – количество рабочих дней в году; 3600 – количество кДж в 1 кВт·ч.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные и исследованные виды энергосберегающего управления тяговыми ЧРАД трамвая (основанные при пуско-тормозных режимах на применении предложенных в табл.5 квазиоптимальных тахограмм с изломом на границе первой и второй зон регулирования скорости этих двигателей и использовании оптимальных длительностей времен разгона и торможения, а в установившихся режимах – на применении оптимального управления ЧРАД по минимуму электромагнитных потерь мощности в нем, позволяют минимизировать согласно табл.7 суммарные основные потери энергии тяговых двигателей трамвая при его движении на дистанции между соседними остановками.

2. Полученные аналитические зависимости (7) и (10) обеспечивают расчет текущего значения КПД движущего механизма трамвая в функции развиваемой им механической мощности и с учетом двигательного или генераторного режимов работы, что позволяет определить из (11) и (30) уточненные значения статического момента сопротивления тягового привода и создаваемой им силы тяги.

3. Для пуско-тормозных режимов согласно рис.3 и рис.4 установлен «U»-образный вид зависимости суммарных ООПЭ $W_{p\Sigma 1}$, $W_{p\Sigma 2}$ и $W_{m\Sigma 1}$, $W_{m\Sigma 2}$ для тяговых ЧРАД трамвая от длительности их времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} в первой и второй зонах регулирования скорости. Выявлено,

что при переходе к оптимальным значениям общих времен разгона t_p^0 и торможения t_m^0 обеспечивается согласно табл.4 уменьшение суммарных ООПЭ $\Delta W_{p,m}$ в пуско-тормозных режимах на 1,3 – 2 раза. При этом важной особенностью тягового привода трамвая является то, что большая часть (от 50 до 100 %) его общего времени функционирования приходится на пуско-тормозные режимы.

4. Разработанные квазиоптимальная выпуклой формы (соответствующая управлению 1) и комбинированная квазиоптимальная (соответствующая управлению 4) тахограммы, показанные на рис.6, наряду со своими высокими (согласно табл.4 и табл.7) энергосберегающими свойствами, позволяют обеспечить более плавный пуск и торможение трамвая (в сравнении с параболическим управлением 2) и уменьшить при этом (согласно рис.7) максимальные текущие значения электромагнитного момента тяговых ЧРАД (что увеличивает запас по сцеплению движущих колес трамвая с рельсом и уменьшает перегрузочную способность силового преобразователя по току). При этом выявлено, что в первой зоне регулирования квазиоптимальная вогнутой формы или линейная тахограммы близко совпадают между собой, что упрощает реализацию комбинированного квазиоптимального управления.

5. Установлено, что при оптимальных значениях длительностей времен разгона t_{p1}^0 , t_{p2}^0 , t_p^0 и торможения t_{m1}^0 , t_{m2}^0 , t_m^0 наименьшие согласно табл.4 соотношения Δp_p , Δp_m , $\Delta p_{p,m}$ между суммарными ООПЭ всех тяговых двигателей и перемещением вала тягового ЧРАД присущи параболического и квазиоптимального вида выпуклой формы тахограммам.

6. Проведенные исследования переходных электромеханических и энергетических процессов тягового ЧРАД трамвая при разгоне и торможении (иллюстрируемые временными диаграммами на рис.7) свидетельствуют об их практической реализуемости, так как их текущие значения находятся в диапазоне допустимых для них рабочих значений.

7. Использование для установившихся режимов движения трамвая предложенного энергосберегающего значения v^* скорости (определяемого из построенных графических зависимостей на рис.8) позволяет уменьшить на (7 – 33) % энергопотребление трамвая в этих режимах.

8. Разработанное и исследованное энергосберегающее управление при пуско-тормозных и установившихся режимах трамвая предназначено для снижения в нем непроизводительных потерь энергии и рекомендуется для применения как в существующих трамваях, оснащенных тяговыми ЧРАД, так и при проектировании и создании отечественного украинского трамвая с указанным типом тягового двигателя.

Список литературы

1. Фирма «Siemens» <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/rail-solutions/rolling-stock/trams-and-light-rail.html> (23.10.2018)
2. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network / J. Edstrand. – Goteborg, Sweden, 2012. – 101 p.
3. ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (23.10.2018)
4. Xiao Zh. Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route / Zh. Xiao, P. Sun, Q. Wang, Y. Zhu, X. Feng. – Chengdu, China, 2018. – PP. 1– 21.
5. Fernandez L.M. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway / L.M. Fernandez, P. Garcia, C.A. Garcia, F. Jurado. – Spain, 2011. – 2183 – 2191.
6. Сайт «Харьков транспортный» http://gortransport.kharkov.ua/ps_models/50/ (23.10.2018)
7. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
8. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, Е.П. Исаев, Н.Н. Сидоров: Учебник для вузов ж/д транспорта. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328с.
9. Атаманов Ю.Е. Теория подвижного состава городского электрического транспорта / Ю.Е. Атаманов, В.Н. Плющ. – Минск, Беларусь, 2012. – 236с.
10. Клепиков В.Б. Энергоэффективность рекуперативных режимов электромобилей / В.Б. Клепиков, А.В. Семиков // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6, С. 36 – 42.
11. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584 с.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 62-83

Н.Н. Казачковский, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ALTIVAR 21

Анотація. Експериментально досліджені вихідні напруга та струм, споживана перетворювачем частоти (ПЧ) активна потужність залежно від моменту двигуна та вихідної частоти ПЧ за різних законів частотного керування асинхронним двигуном. Доведено, що енергоощадний закон частотного керування (закон мінімального струму) внаслідок зменшення напруги на статорі двигуна та статорного струму забезпечує найменший рівень споживання перетворювачем частоти активної потужності.

Ключові слова: перетворювач частоти, асинхронний двигун, статор, активна потужність, закон мінімального струму

Аннотация. Экспериментально исследованы выходные напряжение и ток, потребляемая преобразователем частоты (ПЧ) активная мощность в зависимости от момента двигателя и выходной частоты ПЧ при различных законах частотного управления асинхронным двигателем. Доказано, что энергосберегающий закон частотного управления (закон минимального тока) вследствие уменьшения напряжения на статоре двигателя и статорного тока обеспечивает наименьший уровень потребления преобразователем частоты активной мощности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, асинхронный двигатель, статор, активная мощность, закон минимального тока

Abstract. The output voltage and current consumed by the frequency converter (inverter) are experimentally investigated, depending on the engine moment and the frequency of the IF on the basis of different laws of frequency control of the induction motor. It is proved that the energy saving law of frequency control (the law of minimum current) due to the reduction of the voltage on the stator of the engine and stator current provides the lowest level of consumption of the converter of active power.

Keywords: frequency converter, asynchronous motor, stator, active power, law of minimum current

Преобразователи частоты (ПЧ) находят все большее применение в современном электроприводе. Наибольшую эффективность они обеспечивают при регулировании скорости асинхронных двигателей турбомеханизмов (вентиляторов, насосов, дымососов, воздуходувок и т.п.). Компания «Шнейдер Электрик» выпускает серию ПЧ Altivar 21, специально предназначенную для подобных механизмов (для использования в жилищном и коммерческом секторе, диапазон мощностей 0,75...75 кВт). Преобразователи имеют набор законов частотного управления, обеспечивающих их адаптацию к конкретным условиям применения. Задачей данной статьи является экспериментальное сопоставление законов управления ПЧ (в первую очередь в части энергопотребления).

Экспериментальная лабораторная установка состояла из испытуемого ПЧ (ATV21) с асинхронным двигателем AIP71A6Y2 (0,37 кВт, 220/380 В, 2,3/1,3 А, 916 об/мин) и нагрузочного агрегата. В состав последнего входил двигатель, аналогичный испытуемому и сочлененный с ним валами, а также ПЧ Altivar 71 (0,75 кВт, 380 В). Преобразователь Altivar 71 служил для плавного изменения нагрузки на валу испытуемого двигателя и использовался в двух режимах: регулирования момента (для обеспечения достаточно больших нагрузок) и регулирования скорости (для задания нагрузок, близких к холостому ходу). Исследования проводились в двигательном режиме испытуемого двигателя, для чего нагрузочный агрегат переводился в рекуперативный режим. Для сброса рекуперированной энергии служил тормозной резистор, включенный в звено постоянного тока ПЧ Altivar 71. Частота вращения агрегата задавалась с терминала испытуемого ПЧ, уровень нагрузки – с аналогового входа нагрузочного ПЧ.

Исследовались следующие законы частотного управления:

- закон $U/f = \text{const}$ ($P_t=0$);
- закон $U/f = \text{var}$ ($P_t=1$, для турбомеханизмов);
- IR -компенсация ($P_t=2$, степень компенсации $F402=100\%$);
- бездатчиковое векторное управление ($P_t=3$);
- закон минимального тока (т.н. «энергосберегающий» закон, $P_t=4$).

При проведении экспериментов оценивались значения следующих переменных:

- выходной ток и напряжение испытуемого ПЧ (действующие значения);
- его выходная частота;
- частота вращения двигателей;
- момент испытуемого двигателя;
- активная мощность, потребляемая преобразователем.

В качестве базовой (номинальной) частоты для испытуемого ПЧ была установлена частота $\nu L=50$ Гц, в качестве максимальной – $FH=60$ Гц. Номинальное выходное напряжение $\nu L_v=380$ В. В диапазоне частот 0...50 Гц (первая зона) регулирование осуществлялось с постоянным магнитным потоком, в диапазоне 50...60 Гц (вторая зона) выходное напряжение равнялось номинальному и производилось ослабление поля. Частота модуляции $F401=8$ кГц.

Основные свойства законов управления отображают вольт-частотные и механические характеристики.

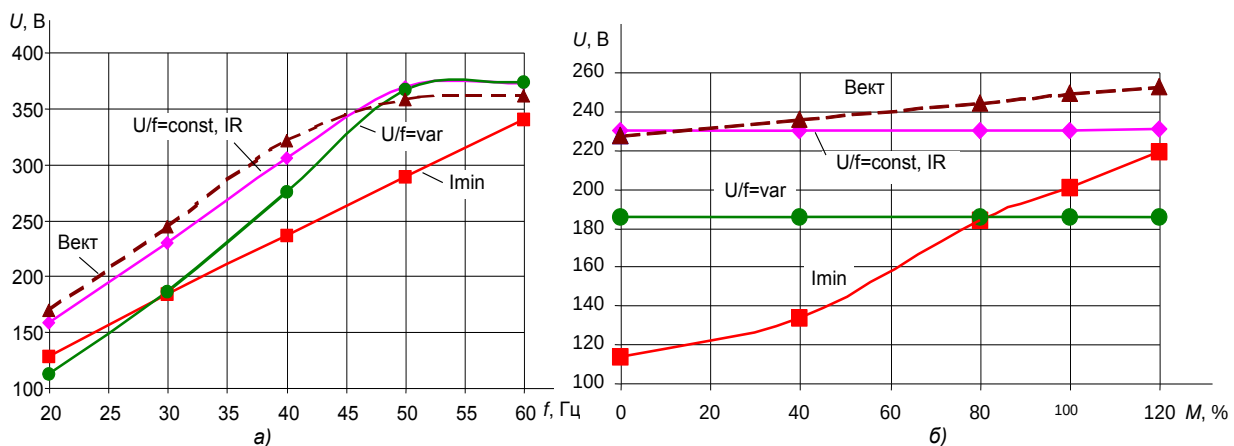


Рис. 1 Выходное напряжение как функция:
а) частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Вольт-частотные характеристики (ВЧХ) законов $U/f = \text{const}$ и IR -компенсации практически совпадают (рис. 1, а). Подобна им и характеристика для векторного управления. ВЧХ закона управления для турбомеханизмов в первой зоне является крутопадающей и криволинейной, а во второй совпадает с пер-

выми двумя. ВЧХ для закона минимального тока гораздо своеобразнее. Она близка к линейной во всем диапазоне частот и расположена заметно ниже остальных.

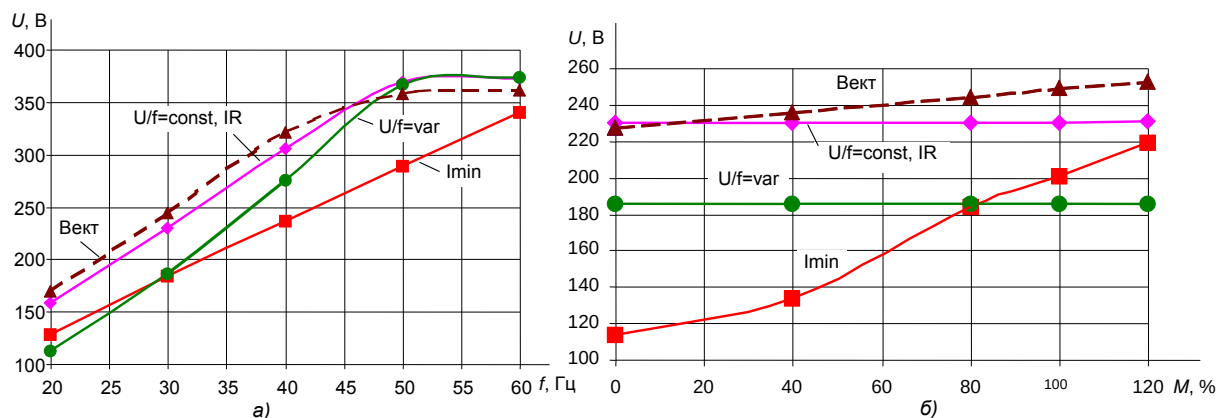


Рис. 1 Выходное напряжение как функция:
а) частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Только для двух законов (векторного и минимального тока) изменение момента нагрузки заметно влияет на вид ВЧХ. Известно, что при векторном управлении обратная связь по скорости увеличивает выходное напряжение при росте нагрузки (рис. 1, б). Поэтому, чем больше момент, тем выше соответствующая ВЧХ. Для закона минимального тока характерна еще большая связь между нагрузкой и уровнем напряжения (рис. 1, б).

Жесткость механических характеристик (рис. 2) для законов IR -компенсации, $U/f = \text{const}$ и $U/f = \text{var}$ практически одинакова (лишь у последнего на низких частотах наблюдается некоторое смягчение). Наибольшая жесткость во всем диапазоне частот, естественно, присуща векторному управлению благодаря влиянию обратной связи. Механические характеристики при использовании энергосберегающего закона имеют переменную жесткость: малую при моментах до 40% и намного большую (почти как при векторном управлении) в остальном диапазоне нагрузок. Этот факт можно объяснить резким, почти пропорциональным увеличением магнитного потока при росте нагрузки, которое иллюстрируется рис. 3, где показана зависимость отношения U/f от момента (как известно, это отношение пропорционально потоку статора).

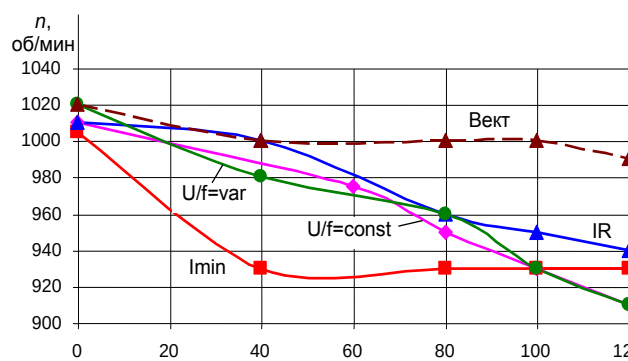


Рис. 2 Механические характеристики ($f=50$ Гц)

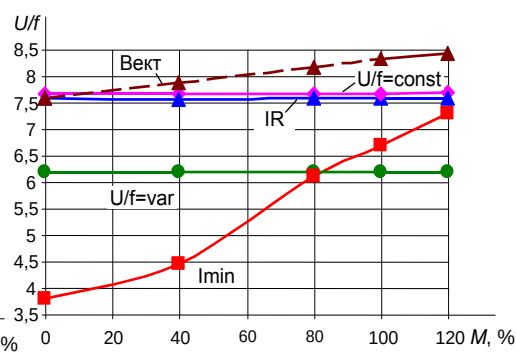


Рис. 3 U/f как функция момента ($f=30$ Гц)

В первой зоне со снижением частоты магнитный поток (рис. 4) для законов $U/f = \text{const}$ и IR -компенсации остается практически неизменным, а для закона $U/f = \text{var}$ снижается (последнее обусловлено более быстрым снижением напряжения, см. рис. 1, а). На малых частотах растет роль активного сопротивления статора по сравнению с индуктивными сопротивлениями и падает жесткость механических характеристик машины. Поэтому векторный закон обеспечивает заданную жесткость благодаря увеличению напряжения и потока. Для закона минимального тока характерен монотонный рост потока со снижением частоты (об этом свидетельствует и меньший наклон его ВЧХ на рис. 1, а).

Выходной ток ПЧ для энергосберегающего закона практически не зависит от выходной частоты (рис. 5, а) и наименьший в сравнении с другими законами практически во всем диапазоне нагрузок и частот (только при больших моментах и малых частотах закон $U/f = \text{var}$ может иметь меньшую величину

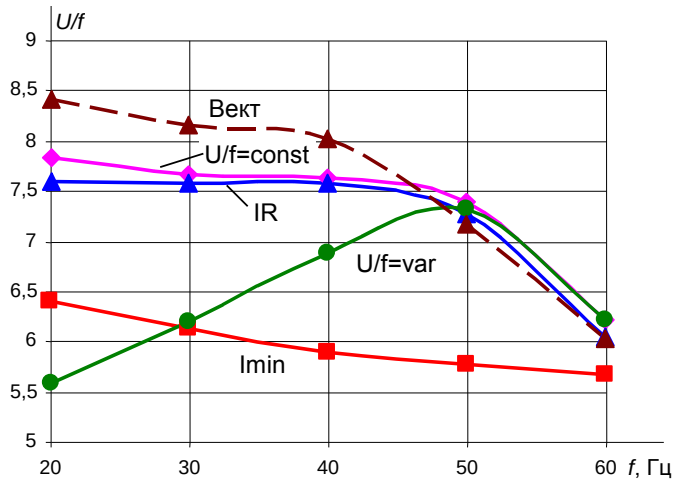


Рис. 4 Зависимость U/f от выходной частоты ($M=80\%$)

терно для IR-компенсации и закона минимального тока (рис. 6). Последний безусловно лучший на всех частотах при нагрузках, близких к номинальной, а при снижении нагрузки — лишь больших частотах. Снижение энергопотребления обусловлено уменьшением потерь в двигателе (потери в стали пропорциональны квадрату напряжения, в обмотке статора — квадрату тока).

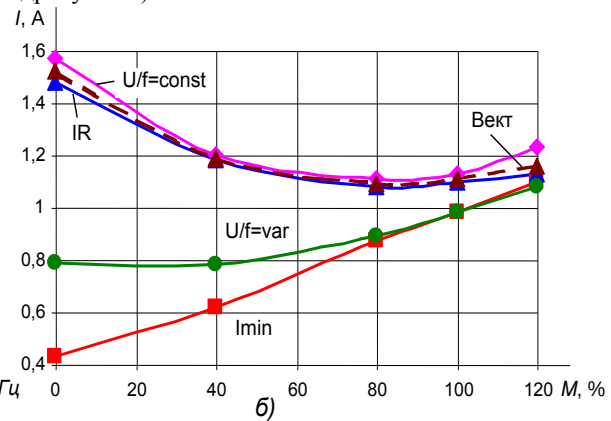
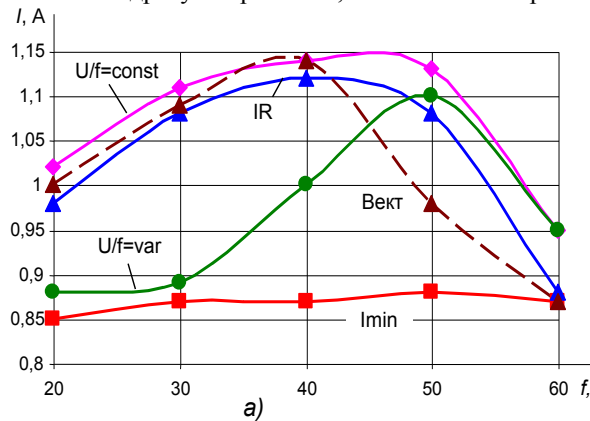


Рис. 5 Выходной ток ПЧ как функция:
а) выходной частоты ($M=80\%$); б) момента ($f=30$ Гц)

Выводы

1. При использовании закона минимального тока степень снижения напряжения на выходе ПЧ по сравнению с другими законами достигает 43% и тока — 24%. Это обеспечивает снижение нагрева двигателя и ПЧ.

2. При нагрузках, близких к номинальной, наибольшая экономия электроэнергии присуща закону минимального тока (при номинальной частоте от 10 до 24%).

3. К области применения закона минимального тока следует отнести механизмы с неглубоким регулированием скорости (порядка 1:2) при постоянной и переменной нагрузке. Практически во всем диапазоне частот данный закон в энергетическом смысле эффективнее традиционно применяемого для турбомеханизмов закона $U/f = var$.

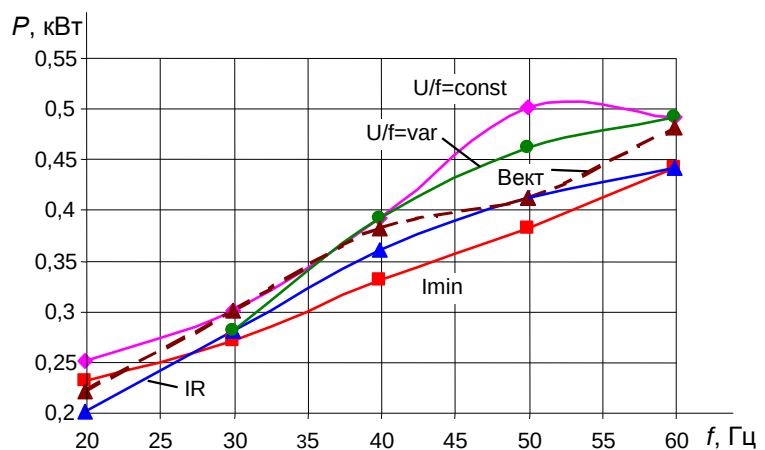


Рис. 6 Потребляемая ПЧ мощность ($M=100\%$):

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Беитой А.С.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

УДК 621.311.25: 621.311.29

Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук

(Украина, Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТБОРА ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ НАКОПИТЕЛЯ ПРИ НИЗКИХ УРОВНЯХ ОСВЕЩЕННОСТИ

Анотація Робота присвячена імітаційному моделюванню процесу відбору низькопотенційної енергії фотоелектричних перетворювачів з метою більш раціонального використання сонячної енергії. На основі запатентованого методу авторами розроблена імітаційна модель процесу зарядки накопичувача в середовищі Matlab/Simulink. Отримані результати підтверджують адекватність моделі. Верифікація моделі проведена з використанням параметрів серійно виробляемого фотоелектричного модуля PSM4 150W, який складається з 72 сонячних елементів.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, низькопотенційна енергія, зарядка накопичувача, імітаційна модель, Matlab/Simulink.

Аннотация Работа посвящена имитационному моделированию процесса отбора низкопотенциальной энергии фотоэлектрических преобразователей с целью более рационального использования солнечной энергии. На основе запатентованного метода авторами разработана имитационная модель процесса зарядки накопителя в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты подтверждают адекватность модели. Верификация модели проведена с использованием параметров серийно выпускаемого фотоэлектрического модуля PSM4 150W, состоящего из 72 солнечных элементов.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, низкопотенциальная энергия, зарядка накопителя, имитационная модель, Matlab/Simulink.

Abstract This work is devoted to the simulation modeling of low potential energy photoelectric converters take process for the purpose of more rational use of solar energy. Based on the patented method, the authors developed a simulation model of the storage charging process in Matlab/Simulink. The results obtained confirm the adequacy of the model. The model verification carried out using parameters of commercially available photovoltaic module PSM4 150W, consisting of 72 solar cells.

Keywords: photovoltaic module, low-potential energy, storage charging, simulation model, Matlab/Simulink.

Введение

Вследствие присущей фотоэлектрическим установкам (ФЭУ) нестабильности уровня генерируемой энергии возникает необходимость в ее накоплении для энергоснабжения потребителей в периоды неблагоприятных условий работы ФЭУ, когда выработка электроэнергии снижается ниже допустимого уровня. В свою очередь, входящие в состав ФЭУ накопители энергии на основе химических источников тока (ХИТ) нуждаются в восполнении израсходованной в эти периоды энергии.

Известно [1], что современные ФЭУ способны функционировать при суммарной интенсивности освещенности величиной от 10 Вт/м², в то время как зарядка накопителей традиционными методами возможна при интенсивности солнечного излучения величиной от 100 Вт/м². Следовательно, энергия солнечной батареи, выработанная в интервале солнечной интенсивности от 10 Вт/м² до 100 Вт/м², не может быть использована для зарядки входящего в состав ФЭУ накопителя. В связи с этим актуальной задачей на современном этапе развития солнечной энергетики является рациональное использование выработанной солнечной батареей энергии в широком диапазоне освещенности. Авторами [2] разработан метод зарядки накопителя энергией солнечной батареи в неблагоприятных условиях ее работы. Метод основан на порционном отборе энергии солнечных элементов батареи промежуточными накопителями на основе суперконденсаторов малой емкости с последующим ее суммированием и передачей на накопительный суперконденсатор до необходимого уровня энергии зарядного импульса накопителя. Теперь, для имплементации запатентованного метода назрела необходимость в его детальной проработке, что удобно сделать путём имитационного моделирования процесса отбора энергии солнечной батареи для

энергетической оценки возможности зарядки накопителя в условиях низкой освещенности солнечной батареи.

Цель работы

Повышение эффективности использования энергии солнечной батареи.

Постановка задачи

Разработать имитационную модель процесса отбора энергии солнечной батареи для энергетической оценки возможности зарядки накопителя в условиях низкой освещенности солнечной батареи и определить время зарядки накопителя в зависимости от уровня освещенности.

Основная часть

При разработке имитационной модели отбора энергии солнечной батареи использовали устройство [3], реализующее метод зарядки накопителей в составе ФЭУ [2]. Функционально-структурная схема устройства представлена на рис. 1.

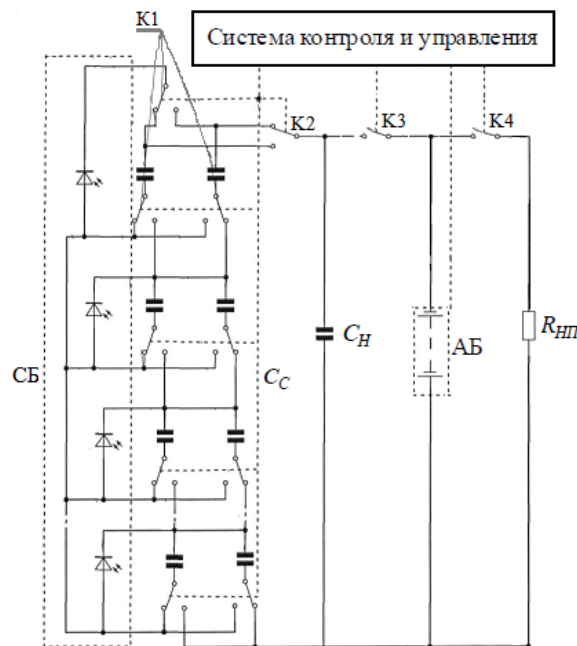


Рис. 1. Блок-схема устройства для отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя

В кратком изложении принцип работы устройства заключается в следующем. Для отбора энергии от солнечной батареи каждый суперконденсатор блока C_c соединяют с каждым элементом солнечной батареи (СБ), накапливают энергию каждого элемента солнечной батареи в каждом суперконденсаторе путем зарядки током I_{3c} в течение времени t_{3c} до получения на нем необходимого уровня напряжения.

Допустимые значения параметров суперконденсаторов в зависимости от текущих параметров солнечных элементов определяются из выражения:

$$U_{c_c} = \frac{1}{C_c} \int_0^{t_{3c}} i_{CB}(t) dt = \frac{I_{3c}}{C_c} \cdot t_{3c}, \quad (1)$$

где $C_c \geq \frac{I_{K3max} \cdot \tau_{Bmax}}{0,03 U_{xx}}$ – емкость суперконденсаторов, подключенных к солнечной батарее; I_{K3max} – ток короткого замыкания солнечной батареи при максимальном уровне освещенности; τ_{Bmax} – максимальная длительность включенного состояния конденсатора, или время его заряда; U_{xx} – напряжение холостого хода солнечной батареи; i_{CB} – текущее значение тока солнечной батареи; t_{3c} – время зарядки суперконденсаторов; I_{3c} – постоянный ток зарядки суперконденсаторов.

Затем перемещают накопленную в суперконденсаторах электрическую энергию в накопительный конденсатор C_n путем подключения к нему коммутатором К1 отключенных от солнечных элементов и последовательно соединенных суперконденсаторов каждого элемента солнечной батареи. При этом от-

бор энергии от солнечной батареи и передача ее в накопительный конденсатор осуществляется до тех пор, пока накопленная в нем энергия достигнет уровня, достаточного для формирования одного зарядного импульса накопителя, равного:

$$W_3 = \frac{1}{2} C_H \cdot U_{C_H}^2, \quad (2)$$

где C_H – емкость накопительного конденсатора; U_{C_H} – напряжение на конденсаторе C_H , которое удовлетворяет условию $U_{C_H} > U_{AB}$; U_{AB} – напряжение аккумуляторной батареи.

После выполнения условия $U_{C_H} > U_{AB}$, ключ К2 размыкается и замыкается ключ К3. Энергия W_3 передается от накопительного конденсатора аккумуляторной батарее импульсами тока амплитудой $I_3 = \frac{U_{C_H}}{R_{AB}}$ и продолжительностью $t_3 = R_{AB} C_H \ln \frac{U_{C_H}}{U_{AB}}$ до достижения уровня полной заряженности аккумуляторной батареи (АБ) с сопротивлением R_{AB} . При условии допустимого уровня разряженности аккумуляторной батареи, равном 40 %, необходимое для полной зарядки аккумуляторной батареи количество импульсов определяется из выражения:

$$N = \frac{\Delta W_{AB}}{W_i}, \quad (3)$$

где ΔW_{AB} – энергия, которую необходимо подать на аккумуляторную батарею для полной зарядки; W_i – энергия зарядного импульса.

При достижении аккумуляторной батареей уровня полной заряженности по сигналу системы контроля и управления ключ К3 размыкается, замыкается ключ К4 и заряженная аккумуляторная батарея подключается к нагрузке $R_{нп}$.

Для проверки возможности зарядки накопителя энергией солнечной батареи в диапазоне интенсивностей освещенности от 10 Вт/м² до 100 Вт/м² и определения зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности необходимо определить соответствующие этим уровням параметры промежуточных накопителей C_C и C_H , исходя из выражений (1) и (2). Для решения этой задачи была создана приведенная на рис. 2 имитационная модель процесса отбора энергии от солнечной батареи с помощью программного продукта Matlab/Simulink и с использованием компонентов библиотеки Simscape [4].

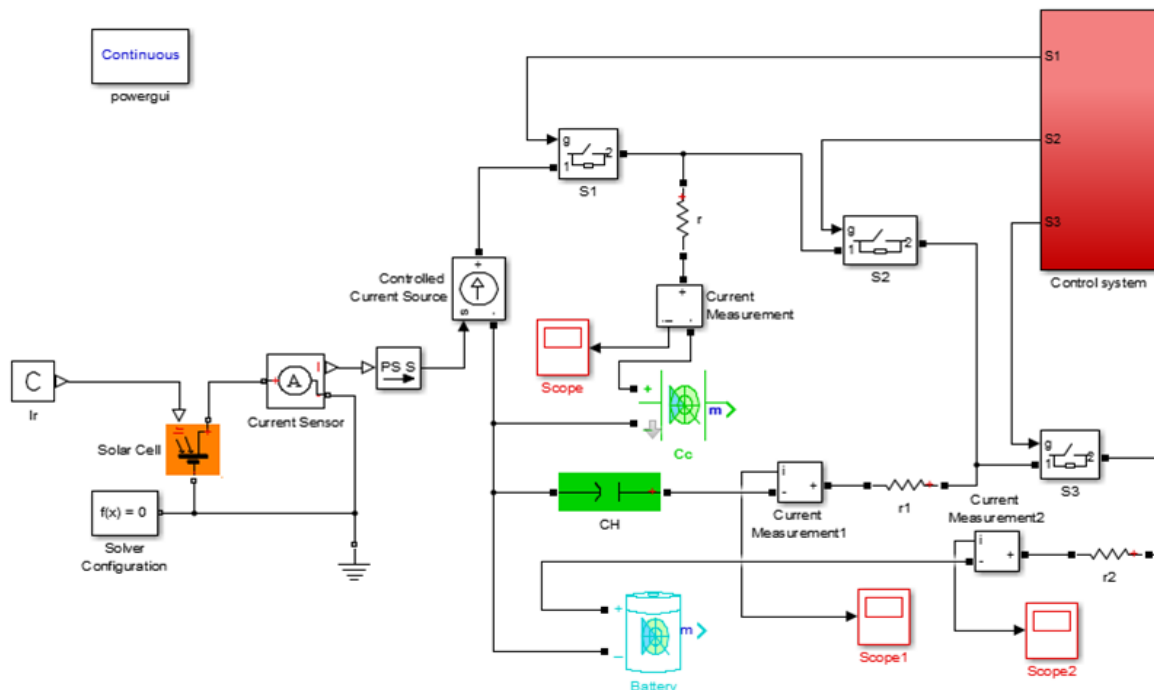


Рис. 2. Модель процесса отбора энергии в Matlab/Simulink

Имитационная модель разработана на примере серийно выпускаемого фотоэлектрического модуля PSM4 150W на основе монокристаллического кремния, состоящего из 72 солнечных элементов [5]. Па-

Энергозбереження та енергоефективність

параметры солнечных элементов, необходимые для определения значений параметров суперконденсаторов C_C и C_H в соответствии с выражениями (1) и (2), приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Электрические параметры солнечных элементов

Тип ФЭМ	Группа	КПД	Пиковая мощность, Вт	Ток короткого замыкания, А	Напр. холостого хода, В, не менее	Ток пик. мощн., А	Напр. пик. мощн., В, не менее
ФЭМ 125/150	135	13,5	от 2,00 до 2,06	от 4,21 до 5,51	0,58	от 2,00 до 2,06	0,41
	140	14	от 2,07 до 2,14	от 4,37 до 5,43	0,59	от 2,00 до 2,06	0,41
	145	14,5	от 2,15 до 2,20	от 4,53 до 5,62	0,59	от 2,00 до 2,06	0,41
	150	15	от 2,21 до 2,29	от 4,68 до 5,70	0,59	от 2,00 до 2,06	0,42

В модели в качестве накопителя энергии используется свинцово-кислотная аккумуляторная батарея емкостью 100 А·ч, а в качестве промежуточных накопителей C_C и C_H используются суперконденсаторы производства фирмы Maxwell [6].

Моделирование процесса отбора энергии по методу [2] заключается в последовательном выполнении операций по алгоритму, краткое описание которого приведено в [3]. Условия моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Условия моделирования

Диапазон уровней освещенности, Вт/м ²	10-100
Емкость АБ, А·ч	100
Энергия полностью заряженной АБ, Дж	4320·10 ³
Допустимый уровень разряда АБ, %	40
Энергия, которую необходимо подать на АБ для полной зарядки, ΔW_{AB} , Дж	1728·10 ³

Результаты моделирования процесса отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя при выполнении приведенных выше условий отражены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты моделирования

Емкость, Ф		Освещенность, Вт/м ²	Энергия C_C , Дж	Количество импульсов для зарядки C_H	Энергия зарядного импульса C_H , W_i , Дж	Количество зарядных импульсов, N	Время зарядки АБ, час
C_C	C_H						
1	2,5	100	22,14	14	320	5400	6,05
		90	19,93	16			6,06
		80	17,38	18			6,07
		70	15,12	21			6,08
		60	13,29	24			6,09
		50	11,08	28			6,11
		40	8,81	36			6,14
		30	6,48	49			6,19
		20	4,43	72			6,28
		10	2,26	141			6,55

Как следует из приведенных в таблице данных, для полной зарядки аккумуляторной батареи от уровня ее разряженности от 40 А·ч до 100 А·ч в зависимости от интенсивности освещенности в интервале от 10 Вт/м² до 100 Вт/м² требуется соответственно от 6,55 часов до 6,05 часов, что удовлетворяет условиям эксплуатации накопителей энергии на основе ХИТ свинцово-кислотной электрохимической системы. Для наглядности на рис. 3 приведена диаграмма зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности.

Следует отметить, что на продолжительность времени зарядки свинцово-кислотных ХИТ существенное влияние оказывает режим зарядки. Авторы [7] установили, что длительность процесса зарядки свинцово-кислотного аккумулятора от разряженного состояния до достижения 100 %-ной степени заряженности составляет в среднем 12–15 часов, при этом наиболее продолжительное время зарядки, примерно 7–10 часов, необходимо для достижения 80–100 %-ной степени заряженности, что связано с крайне низкой эффективностью использования зарядного тока на этом этапе, которая составляет примерно 5–10 %. Задача повышения эффективности зарядки успешно решается применением импульсных

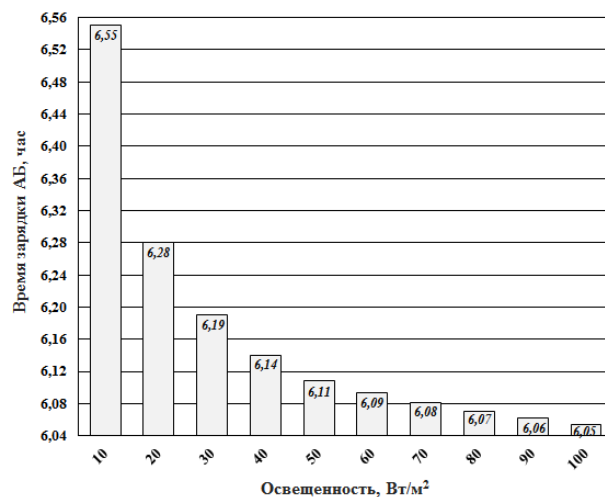


Рис. 3. Диаграмма зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности

методов зарядки различных модификаций. Существенное значение при этом имеет то обстоятельство, что режим зарядки импульсным током позволяет значительно сократить время зарядки накопителя на последнем его этапе. Предложенный авторами метод [2], положенный в основу разработанной имитационной модели, наряду с возможностью использования энергии солнечной батареи для зарядки накопителя при низких уровнях освещенности обеспечивает импульсный режим зарядки накопителя в интервале уровней зарядки от 40 % до 100 %, в котором использование режима с постоянным током малоэффективно, и таким образом сокращает время зарядки накопителя.

Выводы

Разработана имитационная модель автоматизированного электротехнического комплекса отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя энергии в условиях низких уровней освещенности. По результатам моделирования определено, что время, необходимое для зарядки накопителя от уровня заряженности 40 % до полной зарядки, равно примерно 6,0–6,5 часов.

Анализ полученных результатов имитационного моделирования подтверждает возможность использования энергии солнечной батареи для зарядки накопителя в условиях низких уровней освещенности по методу [2], который в сочетании с импульсным режимом зарядки обеспечивает допустимое по эксплуатационным нормам время зарядки накопителя на основе свинцово-кислотных химических источников тока.

Список использованных источников

1. Кудря, С. О. Підвищення ефективності акумулювання енергії вітру в автономних системах. / С. О. Кудря, В. М. Головка, В. Б. Павлов, В. І. Будько. // Відродження енергетики. – 2009. – № 3. – С. 10-18.
2. Дзензерский, В. А. Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая. // Электротехника и энергоэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 73-77.
3. Пат. на корисну модель 105347 Україна, МПК H02J7/32, H02J7/35. Пристрій для заряджання хімічного джерела струму енергією сонячної батареї / В. О. Дзензерський, М. Я. Житник, С. В. Плаксін, С. Я. Остаповська, О. І. Ширман; власник Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг». – № а 2013 10093; заявл. 14.08.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.
4. Черных, И. В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink [Электронный ресурс]. – <http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/>
5. Фотоэлектрический модуль на основе монокристаллического кремния PSM4 150W [Электронный ресурс]. – <http://rmcip.com/rus/production/pvl/psm4.html>
6. Конденсаторы: Ультраконденсаторы [Электронный ресурс]. – <http://www.efo-power.ru/products/?l3=25>
7. Каменев, Ю. Б. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 3. Импульсный заряд / Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель. // Электрохимическая энергетика. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 77–82.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

О.М. Заславський, канд. техн. наук, В.В.Ткачов, д-р техн. наук, професор, С.М.Проценко, І.А.Шедловський, К.В.Соснін, канд-ти техн. наук, В.І.Шевченко, О.В.Карпенко, (Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОБІГРІВАЧАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗА УМОВИ РІЗНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ОБІГРІВІ

Анотація. Розглядається проблема практичної реалізації системи децентралізованого керування нагрівачами на основі теорії колективної поведінки, приведена розробка експериментального зразка системи, в якій формується система визначення пріоритетів нагрівачів і алгоритм функціонування смарткона відповідно до моделі децентралізованого управління. Розроблений стенд для експериментальної перевірки правильності функціонування системи управління. Результати експерименту показали працездатність розробленого алгоритму функціонування системи і системи формування пріоритетів, сумарна потужність нагрівачів, включених в електричну мережу, в різних ситуаціях не перевищувала заданих значень.

Ключові слова: електричне опалення, колективна поведінка, децентралізоване управління.

Аннотация. Рассматривается проблема практической реализации системы децентрализованного управления нагревателями на основе теории коллективного поведения, приведена разработка экспериментального образца системы, в которой формируется система определения приоритетов нагревателей и алгоритм функционирования смарткона в соответствии с моделью децентрализованного управления. Разработан стенд для экспериментальной проверки правильности функционирования системы управления. Результаты эксперимента показали работоспособность разработанного алгоритма функционирования системы и системы формирования приоритетов, суммарная мощность нагревателей включенных в электрическую сеть в различных ситуациях не превышала заданных значений.

Ключевые слова: электрическое отопление, коллективное поведение, децентрализованное управление.

Abstract. The problem of the practical implementation of a decentralized heater control system based on the collective behavior theory is considered, the development of an experimental model of the system in which a heater prioritization system and a smartcon functioning algorithm are developed in accordance with the decentralized control. Model is developed, a bench for experimental verification of the correctness of the control system is developed. Results the experiment showed the performance of p of the developed algorithm for the functioning of the system and the system of forming priorities, the total power of the heaters included in the electrical network in various situations did not exceed the specified values.

Keywords: electric heating, collective behavior, decentralized control.

Вступ. Концепція побудови децентралізованої інтелектуальної системи автоматичного розподілу енергії між електричними нагрівальними пристроями зводиться до наступних положень.

1. Підключення нагрівального пристрою до мережі електропостачання здійснюється не безпосередньо, а через «розумний» конектор-смарткон, який в конструктивному відношенні являє собою пристрій двостороннього роз'ємного з'єднання, що включається між розеткою мережі електроживлення і нагрівальним пристроєм.

2. Смарткони являються системо утворюючими елементами, які обмінюючись інформацією, наприклад, по силовій мережі електропостачання об'єкту, що контролюється, приймають рішення про підключення або відключення відповідних нагрівальних пристроїв, домагаючись, з одного боку, безумовного виконання обмеження потужності, яка може бути використана для опалення, а з інший – найбільш ефективного використання цієї потужності з урахуванням пріоритетів, що задаються при налаштуванні бажаного розподілу температур.

3. Регулювання температури нагрівального пристрою в зоні його розміщення здійснюється його власним термостатом. Смарткон лише підключає нагрівальний пристрій до мережі електропостачання.

4. Мережевий контролер в децентралізованій системі здійснює лише функції вимірювання сумарної споживаної об'єктом потужності, підсумовування запитів на ресурс електричної потужності, необхідної нагрівачам, а також підсумовування рангів пріоритетів нагрівачів, які в даній системі мають сенс плати за ресурс, пропонуваної кожним смартконом.

На підставі цих даних обчислюється середньозважена ціна ресурсу, яку мережевий контролер повідомляє усім смартконам. Необхідною (але не достатньою) умовою підключення нагрівача до мережі електроживлення є перевищення запропонованої смартконом плати за ресурс над вартістю цього ресурсу, обчисленою відповідно до середньозваженої ціни і необхідної кількості ресурсу (потужності). Остаточне рішення щодо підключення нагрівача до мережі електроживлення (або відключення від неї) смарткон приймає після перевірки додаткових умов, що гарантують виконання обмежень потужності і відсутність невикористаного ресурсу, що перевищує мінімальну потребу в ньому серед числа учасників розподілу. Якщо ж ці умови не відповідають попередньо прийнятим рішенням, смарткон повертається в число учасників розіграшу ресурсу. Ітераційна процедура розіграшу ресурсу повторюється до тих пір, доки всі смарткони не переведуть відповідні нагрівачі у стан «увімкнути» або «вимкнути».

Запропонована концепція спирається на теорію колективної поведінки автоматів, які взаємодіють з випадковим середовищем.

Постановка задачі. Постановку задачі розглянемо на прикладі.

Є ресурс в кількості R . В якості ресурсу можуть виступати сировина, обладнання, енергетичні, фінансові або людські ресурси, час і т. п. Є споживачі ресурсу в кількості N , для кожного з яких задана функція $\Psi_j(r_j)$ – ефект, який досягається j -м споживачем, коли кількість одержаного ним ресурсу дорівнює r_j . Потрібно розділити ресурс між споживачами так, щоб максимізувати сумарний ефект, тобто потрібно знайти

$$\max \sum_{j=1}^N \Psi_j(r_j). \quad (1)$$

За умови

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N r_j &\leq R & (r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N); \\ \sum_{j=1}^N r_j &\leq R & (r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N). \end{aligned}$$

Рішення задачі про розподіл ресурсу має два аспекти: обчислювальний і управлінський. У разі, коли функції $\Psi_j(r_j)$ відомі, виникає суто обчислювальна задача нелінійного програмування, ряд способів вирішення якої добре відомий. З іншого боку, якщо функції апріорно невідомі, а відомі лише їх поточні значення, при чому самі функції, як це часто буває на практиці, змінюються в часі, то виникає задача оперативного перерозподілу ресурсу в процесі функціонування системи, тобто задача управління.

З огляду на той факт, що рівняння системи є приватними похідними від функції Лагранжа, можна організувати децентралізовану поведінку в задачі про розподіл ресурсу, засновану на градієнтному методі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr_j}{dt} &= k_1 \left(\frac{d\Psi_j(r_j)}{dr_j} - \lambda \right), \\ \frac{d\lambda}{dt} &= k_2 \left(\sum_{j=1}^N r_j - R \right). \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Класичне вирішення такої постановки задачі наводиться у роботах [1, 2]. Такий підхід еквівалентний тому, що кожен споживач ресурсу максимізує свою локальну функцію користі виду

$$s_j = \Psi_j(r_j) - \lambda r_j. \quad (3)$$

У цьому випадку множник Лагранжа λ має сенс ціни на ресурс, яка формується центральним пристроєм по різниці між попитом і пропозицією. Залежно від суми запитів ресурс розподіляється наступним чином. Якщо сума запитів не перевищує наявну кількість ресурсу, то запити задовольняються

повністю. Якщо сума запитів перевищує наявну кількість ресурсу, то весь ресурс розподіляється між споживачами пропорційно їхнім запитам, тобто

$$r_j = \begin{cases} x_j & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j \leq R, \\ \frac{Rx_j}{\sum_{j=1}^N x_j} & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j > R, \end{cases} \quad (4)$$

де x_j – запит j -го споживача ресурсу.

Методика виконання роботи. Відмінною особливістю запропонованого підходу [3] є колективна поведінка її агентів, які спільно здійснюють розподіл ресурсу дискретними порціями, керуючись локальним правилом «все або нічого».

Процес самоорганізації системи підтримується динамічною зміною рівнів пріоритетів $\psi_i(t)$ (пропонованої плати за ресурс) автоматів, які беруть участь в розподілі потужності

$$\psi_i(t) = \begin{cases} \psi_{i0}, & t = 0, \text{ if } \alpha_i = 1, \\ \psi_{i0} + K(t), & \text{if } \alpha_i = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де ψ_{i0} – початкова ставка i -го автомата в грі за отримання необхідної йому потужності, $K(t)$ – монотонно зростаюча в часі функція підвищення пріоритету автомата, який не одержав необхідний ресурс потужності.

Відлік часу починається з моменту відключення нагрівача.

Приклад процесу формування рангів пріоритету двох опалювальних пристроїв демонструється на рис. 1.

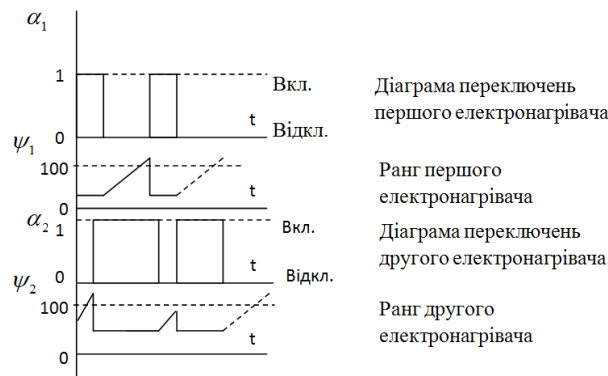


Рис. 1 Діаграми переключень та зміни рангів пріоритетів нагрівачів в інтелектуальній мережі опалювальних пристроїв

Основні результати. Для експериментальної перевірки запропонованих моделей були розроблені і виготовлені принципові схеми смарткону і мережевого контролера і розроблена функціональна схема експериментального стенду (рис. 2).

Мета проведення експерименту: перевірка роботи всіх вузлів експериментального зразка інтелектуальної мережі прямого електричного опалення в реальних умовах.

Ліміт потужності, що не повинна перевищуватись у мережі живлення задано на рівні 2,8 кВт.

Оскільки смарткон є подовжувачем розетки, до нього може бути підключено будь яке обладнання. Для блокування помилкових відключень обладнання, яке не має відношення до опалювальної мережі, смарткон повинен розпізнавати характер підключеного до нього навантаження. Якщо підключене до смарткону обладнання не розпізнається як нагрівальний пристрій, цей смарткон не бере участь у розподілу потужності мережі живлення. Якщо підключене до смарткону обладнання розпізнається як нагрівальний пристрій, необхідно для цього смарткону знати величину потужності підключеного нагрівача, щоб

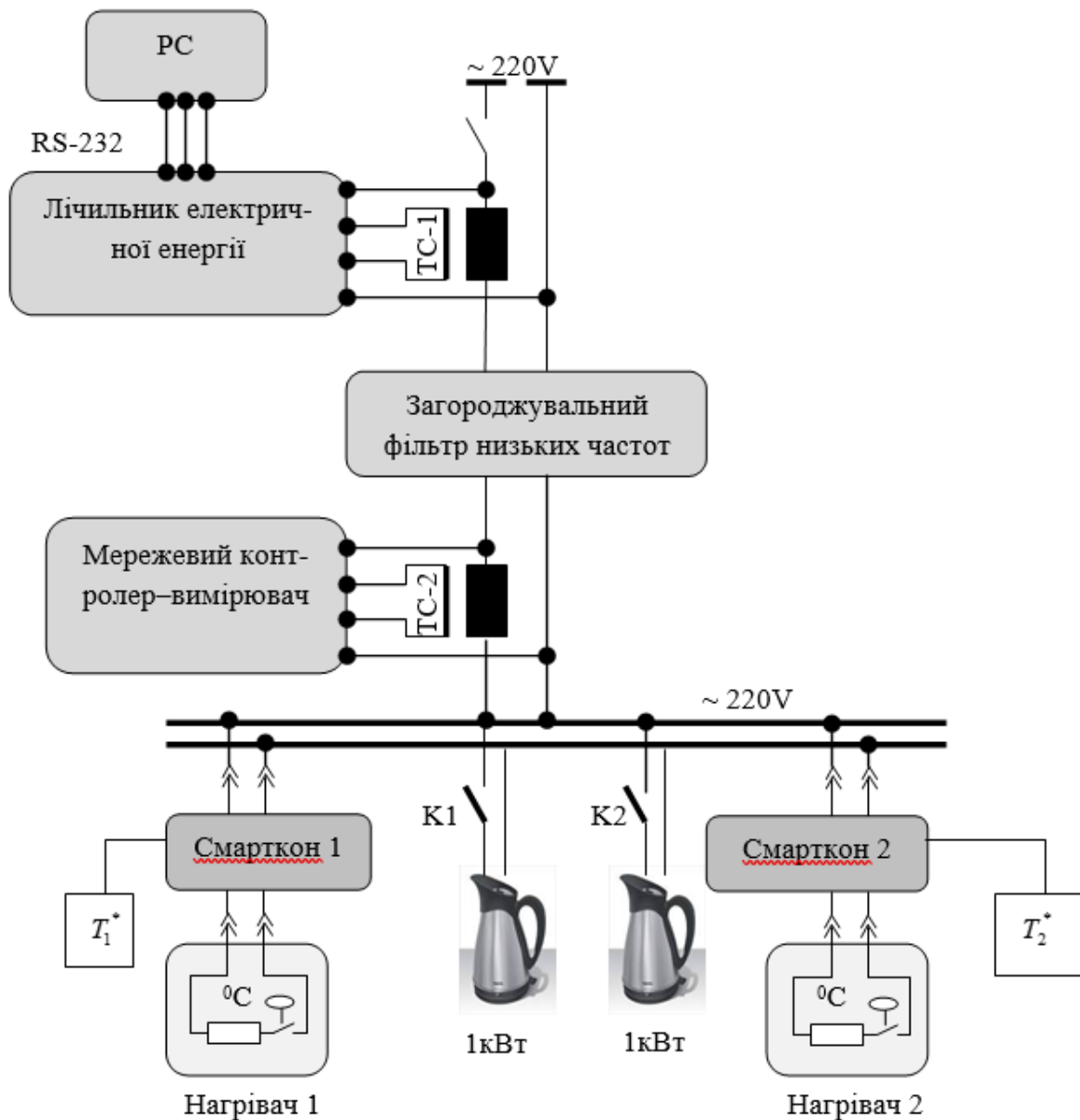


Рис. 2 Функціональна схема експериментального зразку інтелектуальної мережі прямого електричного опалення приміщень

брати участь у колективному розподілі потужності мережі живлення. Схема вузла розпізнавання навантаження показана на рис. 3.

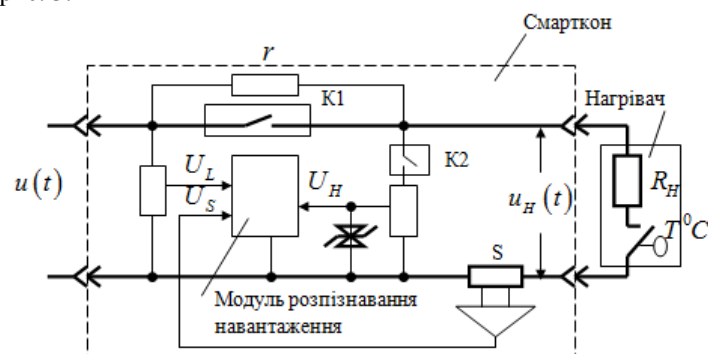


Рис. 3 Функціональна схема вузла розпізнавання навантаження

Силовий ключ К1 шунтується резистором r , величина якого набагато більше ніж опір нагрівача R_H найменшої можливої потужності. Це необхідно для того, щоб при відключеному нагрівачі (розімкнуто ключ К1) була можливість розпізнати характер та величину навантаження смарткону. При розімкненому ключі К1 замикається ключ К2, який підключає ланцюг вимірювання падіння напруги на опорі нагрівача.

Сигнал, пропорційний цій вимірюваній величині, подається на вхід U_H модуля розпізнавання навантаження. З шунта S знімається сигнал, пропорційний струму навантаження. Цей сигнал подається на вхід U_S модуля розпізнавання навантаження і використовується для контролю замикання та розмикання реле термостату нагрівача, а також при вимірюванні потужності нагрівача в робочому стані.

Сигнал, пропорційний напрузі мережі живлення, до якої підключено смарткон, подається на вхід U_L модуля розпізнавання навантаження.

У робочому стані при замкненому ключі К1 на нагрівач подається напруга мережі живлення U . Потужність, яка споживається із мережі живлення дорівнює

$$P = \frac{U^2}{R_H}. \quad (6)$$

При розімкненому ключі К1 послідовно з нагрівачем включено резистор $r \gg R_H$. При цьому потужність, яка споживається із мережі живлення дорівнює

$$\tilde{P} = \left(\frac{U}{R_H + r} \right)^2 R_H \approx \frac{U^2}{r^2} R_H. \quad (7)$$

Висловивши з цього рівняння R_H та підставляючи одержане значення в (6), одержуємо

$$P = \frac{U^4}{r^2} \tilde{P}^{-1} = \text{const} \cdot \tilde{P}^{-1}. \quad (8)$$

Таким чином потужність нагрівача може бути визначена, як величина зворотно пропорційна потужності $\tilde{P}$, яка споживається із мережі живлення при підключеному нагрівачі та розімкненому ключі К1. Цю величину модуль розпізнавання навантаження одержує прямим інтегруванням добутку миттєвих значень падіння напруги на нагрівачі $u_H(t)$ та струму, який протікає при розпізнаванні через нагрівач $i_H(t)$

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) i_H(t) dt, \quad (9)$$

де T – інтервал усереднення потужності.

Для розпізнавання характеру навантаження вимірюється реактивна потужність

$$\tilde{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H \left(t - \frac{1}{4f} \right) \frac{u(t) - u_H(t)}{r} dt, \quad (10)$$

де $f = 50$ Гц – частота напруги мережі живлення.

Якщо через смарткон підключено нагрівальний прилад, його реактивна потужність досить мала. Якщо через смарткон підключено комп'ютер, або холодильник, або який-небудь електромеханічний прилад, його реактивна потужність значно вища. Якщо через смарткон підключено освітлювальний прилад, його реактивна потужність мала, але й активна потужність теж значно менша ніж 500 Вт – найменша потужність електроопалювального приладу. Ці співвідношення потребують експериментальної перевірки. Для вирішення задачі періодичного контролю за станом нагрівача, який може бути підключений до нагрівання, може бути в стані очікування нагрівання, або може бути відключений терморегулятором був розроблений алгоритм функціонування смарткона (рис. 4). Кожні три секунди на відмітку часу запускається задача виміру навантаження. Якщо нагрівач працює в режимі нагрівання, проводиться вимірювання потужності, що споживається нагрівачем. Якщо нагрівач знаходиться в очікуванні нагріву

то на 30 мілісекунд, він підключається до мережі, через 10 мілісекунд, а потім протягом 20 мілісекунд вимірюється потужність, яка споживана нагрівачем. Таким чином, в алгоритмі розподілу навантаження вводиться значення про стан та витрати нагрівачів.

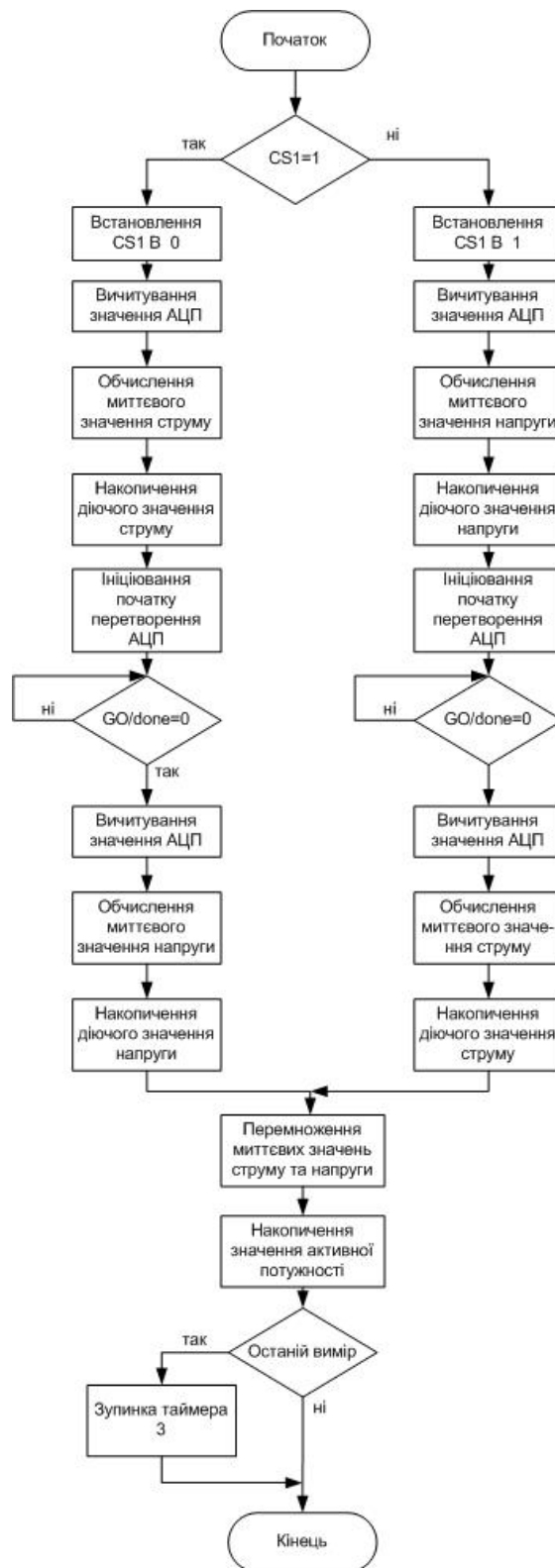


Рис. 4 Алгоритм функціонування смарткона

Контроль за ходом експерименту виконувався за допомогою персонального комп'ютера підключеного до мережевого контролера МК через перетворювач інтерфейсів USB/R232. Управління електро-нагрівальними пристроями здійснювалося смартфонами 1 і 2. Електронагрівальні пристрої містять регулятори температури, які дозволяють споживачу задавати необхідну температуру. Температуру в приміщенні, смартфони додатково контролюють датчиками температури T1 і T2.

Вимірювання загальної потужності, яка споживається електричною мережею при роботі нагрівальних пристроїв здійснюється додатково інтелектуальним лічильником електричної енергії ЛО-3Т5-4М1.

Додаткові нагрівачі підключаються до силової мережі вимикачами K1 і K2.

Метою експерименту є перевірка працездатності системи децентралізованого керування нагрівальними пристроями, які обігрівають приміщення за заданими умовами.

Обмін інформацією між ВК і смартфонами виконується через силову електромережу 220 В за допомогою протоколу Powerline. ВК являється ведучим пристроєм, він передає смартфонам значення заданої температури в зоні регулювання, а також команду на включення, або відключення навантаження.

Був прийнятий наступний сценарій експерименту. Спочатку одночасно включалися нагрівачі Н1 і Н2, через заданий інтервал часу перемикачем K1 включалося додаткове навантаження. Ще через заданий інтервал перемикачем K2 включалося друге додаткове навантаження.

На рис. 5 наведено результати експериментальної перевірки алгоритму працездатності децентралізованої системи керування електричними нагрівальними пристроями. Згідно прийнятому сценарію експерименту в момент часу t_1 включалися нагрівачі Н1 і Н2, у момент часу t_2 було включене перше додаткове навантаження (K1), оскільки загальне навантаження на силову мережу перевищало задане значення, з невеликою затримкою відключився нагрівач Н2 (його температура T2 менше відрізнялася від заданого значення). У момент часу t_3 було включене друге додаткове навантаження. Згідно алгоритму функціонування смартфона через невелику затримку відключився нагрівач Н1. У момент часу t_4 було відключене перше додаткове навантаження. Після чого з невеликою затримкою включався нагрівач Н2, у якого більша різниця між заданою температурою і вимірюваною. У момент часу t_5 було відключене друге додаткове навантаження (K2), після чого через невелику затримку автоматично включився нагрівач Н1.

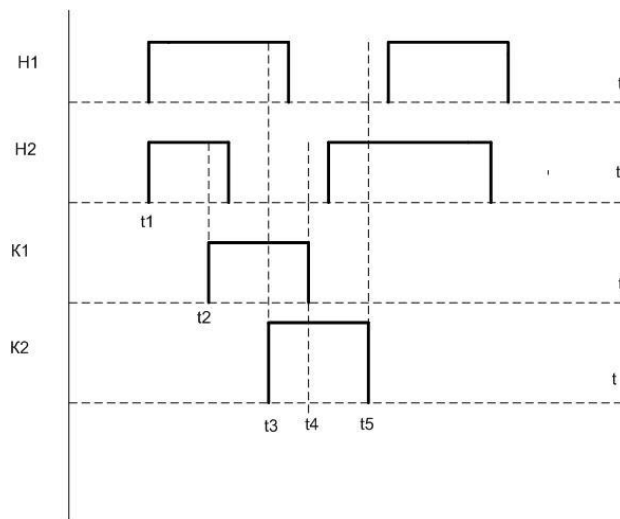


Рис. 5 Результати експериментальної перевірки роботи системи децентралізованого керування нагрівальними пристроями

Висновки. Результати експериментальної перевірки роботи системи фіксувалися у комп'ютерному протоколі випробувань і довели, що її поведінка в цілому, а також поведінка її складових частин – смартфонів та контролера ВК відповідає вимогам до системи прямого електричного опалення, і сценарію експерименту. В процесі випробувань сумарна потужність електричної енергії, яка використовувалася, для опалення не перевищувала задані обмеження.

Список використаних джерел

1. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973 – 405 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977 – 256 с.
3. Aleksander M. Zaslavsky, Viktor V. Tkachov, Stanislav M. Protsenko, Andrii V. Bublikov, Batyrbek Suleimenov, Nurbek Orshubekov, Konrad Gromaszek, "Self-organizing intelligent network of smart electrical heating devices as an

alternative to traditional ways of heating", Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104456K (7 August 2017); doi: 10.1117/12.2281225; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2281225>.

4. А.М.Заславский, В.В.Ткачев, А.В.Бубликов, О.В.Карпенко. Оптимальное распределение энергии в интеллектуальной сети прямого электрического отопления. Электротехнические и компьютерные системы. Одесский национальный политехнический университет, 2017, № 25 (101), С. 358–366.

5. О.М.Заславский, С.М.Проценко, О.В.Карпенко, М.В.Козарь. Автоматичне вимірювання потужності обладнання, підключеного до інтелектуальної мережі прямого електричного опалення. Одеський національний політехнічний університет, 2017, № 25 (101), С. 381–387.

УДК 621.311.019

В.В. Кузнецов, канд.техн. наук, Е.В. Кузнецова

(Украина, Днепр, Национальная металлургическая академия Украины)

А.В. Кузнецова, Д.В. Галушко, М.А. Лобко, Д.А. Чернышов

(Украина, Днепр, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара)

О.А. Ровенский

(Украина, Днепр, Национальный горный университет)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена анализу отрицательного влияния некачественной электроэнергии на эксплуатационные показатели электроустановок. Особое внимание уделено причинам ухудшения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий, поскольку это приводит к снижению надежности и эффективности работы электропотребителей. Так же установлен различный характер режимов потребления и генерации реактивной мощности в линиях 27,5, 10 и 0,4 кВ. Выявлен 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.

Анотація. Стаття присвячена аналізу впливу неякісної електричної енергії на експлуатаційні показники електроустановок. Особливу увагу приділено причинам зниження якості електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств, оскільки це призведе до зниження надійності та ефективності роботи електроспоживачів. Встановлено 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.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the negative impact of poor-quality electricity on the performance of electrical installations. Particular attention is paid to the reasons for the deterioration of the quality of electrical energy in the power supply systems of industrial enterprises, since this leads to a decrease in the reliability and efficiency of electrical consumers. 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.

Введение

Как известно [1], любая электромагнитная среда формируется как результат определенного технологического процесса. В электроэнергетическом процессе системы электроснабжения - это распределение, передача и потребление электрической энергии. Каждому этапу данного процесса свойственны определенные изменения, вызванные отклонениями от заданного режима, принципом действия электрооборудования и т.д. Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) являются теми уровнями электромагнитной совместимости электрической сети, при которых гарантируется нормальное функционирование любых электротехнических средств, подключенных к сети, если эти ПКЭ не превышают допустимых значений.

Качество электроэнергии в общем понятии электромагнитной совместимости потребителей в системах электроснабжения является важнейшей проблемой современной электроэнергетики. От ее решения во многом зависит повышение эффективности использования электрической энергии. Разработка основных направлений повышения энергоэффективности системы электроснабжения связана с определением причин вызвавших снижение качества электрической энергии. Качество электроэнергии является существенным фактором, влияющим на эффективность режимов энергосистемы и потребителей.

Проблема обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях является актуальной. Это вызвано тем, что в последнее время широко внедряются новые прогрессивные технологические процессы и системы и, как следствие, непрерывный ростом числа нелинейных и несимметричных потребителей электроэнергии [2].

Цель работы.

Выявление основных причин, влияющих на отклонения показателей качества электроэнергии от нормируемых значений.

Основные причины отклонения показателей качества электроэнергии от нормируемых.

При выборе мер по улучшению эффективности работы электрооборудования в условиях некачественной электроэнергии прежде всего необходимо выяснить причины сложившейся ситуации, определить фактические значения нормируемых показателей качества и сопоставить последние с допустимыми. При этом следует отметить, что несмотря на большую важность рассматриваемого вопроса в настоящее время отсутствуют сведения о комплексной оценке состояния качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий Украины.

К исключению следует отнести разве что исследования качества электроэнергии в цеховых сетях Алчевского металлургического комбината [3]. Как на указанном, так и на других аналогичных предприятиях страны основными потребителями являются электроприводы прокатных станов черновых и заготовочных клетей. Мощность таких приводов может достигать 13 МВт, как, например, электропривод блюминга ОАО «Арселор-Миталл» (г. Кривой Рог). Хотя модернизация, связанная с заменой системы «генератор-двигатель» (Г-Д) на «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д), привела к улучшению регулировочных свойств последнего, системы ТП-Д обусловили существенное ухудшение качества электроэнергии на предприятиях.

В работе [3] показано, что использование систем ТП-Д на главных приводах прокатных станов приводит к существенному искажению цехового напряжения. В сети присутствуют высшие гармоники вплоть до 23-38 порядка, причем как четные, так и нечетные. Коэффициенты отдельных гармонических составляющих превышают допустимые значения в 5-7 раз.

Несмотря на то, что вопрос влияния систем ТП-Д на качество электроэнергии достаточно детально исследуется с момента массового применения таких приводов, т.е. с 70-х годов прошлого столетия [4,5,6], указанная проблема и по сей день актуальна, хотя и стала лишь одной из причин низкого качества электроэнергии в цехах промышленных предприятий Украины. К сожалению, в работе [3] к тому же рассматриваются только системы ТП-Д, а известные на сегодняшний день «классические» публикации, например [5,6], существенно устарели, так как появились новые технологические установки, изменилась структура энергопотребления предприятий. Таким образом, необходимо более глубокое изучение причин типовых искажений электроэнергии, их качественных и количественных характеристик. Лишь на таком основании должна строиться методика выбора рациональных мер по улучшению качества электроэнергии.

Выполненные дополнительные исследования [7-12] дают, на наш взгляд, возможность сформулировать основные причины рассматриваемых искажений.

Так, одной из часто встречающихся причин несинусоидальности, особенно в сетях малой мощности, является насыщение сердечников силовых трансформаторов цеховых подстанций. Этот случай характерен для небольших предприятий, а также технологических объектов сельского хозяйства. Насыщение магнитопровода указанных трансформаторов может быть обусловлено работой нагревательных элементов, сварочного оборудования и других мощных потребителей. Типовая кривая питающего напряжения при этом имеет «усеченный» вид, а в его спектральном составе ярко выделяется третья гармоника (рис. 1 а, б).

Как известно, последняя вредна для АД и трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в треугольник. Это связано с тем, что они образуют нулевую последовательность, сопротивление электрических обмоток на которой невелико (определяется индуктивностями рассеивания), а указанное соединение обеспечивает контур для протекания токов третьей гармоники. В результате увеличиваются потери, повышается температура обмоток и падает нагрузочная способность указанного электрооборудования.

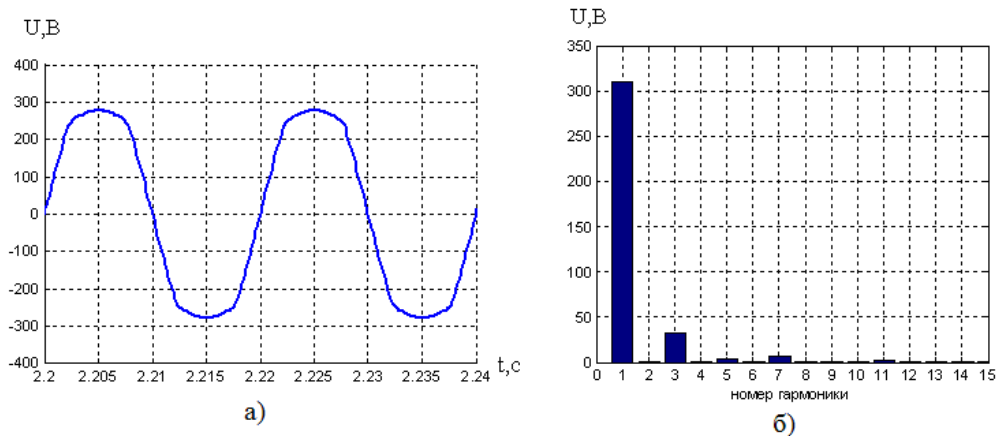


Рис. 1 Типовая форма кривой напряжения в случае насыщения сердечников силовых трансформаторов (а) и его спектральный состав (б)

Следующей распространенной причиной искажения синусоидальности является наличие в сети мощных полупроводниковых преобразователей [9,10]. В моменты коммутации таких устройств потребляемые ими токи имеют пиковые значения, в результате на входах остальных потребителей наблюдаются «провалы» напряжения (рис. 2 а).

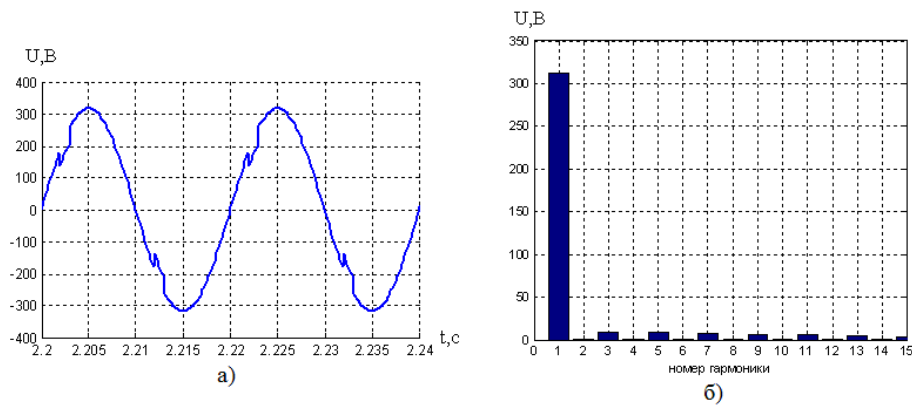


Рис. 2 Форма кривой напряжения при наличии коммутационных помех (а) и его спектральный состав (б)

Приведенная форма кривой характерна для цеховых сетей крупных промышленных предприятий, таких как металлургические, нефтеперерабатывающие и горно-обогатительные комбинаты, где установлены мощные регулируемые электроприводы с выпрямителями или преобразователями частоты. Опыт свидетельствует, что, несмотря на принимаемые меры по повышению электромагнитной совместимости, показатели качества питающего напряжения в таких случаях все же превышают предельные уровни допустимых значений.

Как видно, в спектральном составе напряжения, искаженного полупроводниковыми преобразователями, имеются практически все гармоники высшего порядка рис. 2 (б). Хотя они и слабо влияют на пульсации момента асинхронного двигателя [3, 9, 10], однако приводят к дополнительным потерям в стали указанных двигателей и трансформаторов, обуславливают их повышенный нагрев, что снижает энергоэффективность и надежность электрооборудования. При наличии в цеховой сети мощных потребителей, питаемых от указанных преобразователей с фазоимпульсным регулированием (гальванические ванны, дуговые печи), нарушается также симметрия синусоиды напряжения, а в спектре выделяется и вторая гармоника (рис.3 а, б). Последняя же, как известно, обуславливает протекание токов обратной последовательности, образуя, таким образом, тормозной электромагнитный момент на валу двигателя. Повышаются также вибрации в его механической части, ускоряется износ и снижается надежность оборудования.

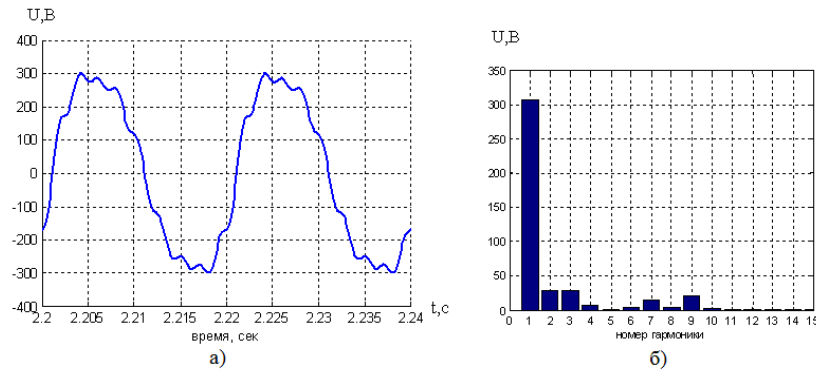


Рис. 3 Форма кривой напряжения с наличием второй гармоники (а) и его спектральный состав (б)

Количественная оценка показателей качества электроэнергии в цеховых сетях предприятий.

Полученные в условиях конкретных промышленных предприятий осциллограммы напряжений [13] подтверждают наличие в их цеховых сетях некачественной электроэнергии. Так, на рис. 4, а приведена кривая линейного напряжения цеха крекинга нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) «Укртатнафта», в спектре которого рис. 4, б содержится большое количество высших гармоник. Здесь для удобства отображения амплитуда первой (основной) гармоники показана не полностью.

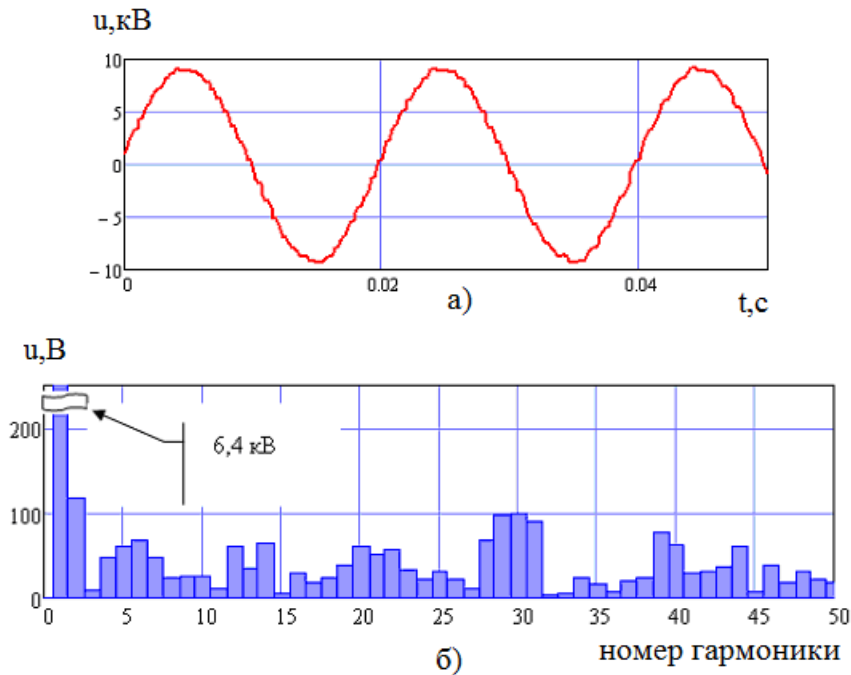


Рис.4 Осциллограмма линейного напряжения подстанции крекингového цеха нефтеперерабатывающего завода «Укртатнафта» (а) и его спектральный состав (б)

Значения нормируемого показателя качества напряжения (коэффициента гармонических составляющих сетевого напряжения $k_{U(n)}$ по фазам в рассматриваемом случае приведены в табл. 1. Жирным шрифтом выделены превышения допустимых величин. Здесь не соответствуют требованиям качества по коэффициенту гармонических составляющих гармоники №№ 6, 8, 10, 12, 14, 16.

Рассчитанное же в соответствии с [14] для рассматриваемого случая значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в целом K_U для всех трех фаз не превысило 3,6%, что удовлетворяет требованиям качества электроэнергии (нормально допустимое значение 5%).

Таблиця 1

Значения нормируемого показателя качества электроэнергии в цеху крекинга НПЗ

№ гармоники	Нормально допустимое значение коэффициента $k_{U(n)}$ для сети 6 кВ, %	Предельно допустимое значение коэффициента $k_{U(n)}$ для сети 6 кВ, %	Реальные значения		
			Фаза «АВ» $k_{U(n)}, \%$	Фаза «ВС» $k_{U(n)}, \%$	Фаза «СА» $k_{U(n)}, \%$
4	0,7	1,05	0,87	0,32	0,55
6	0,3	0,45	0,91	0,91	0,55
8	0,3	0,45	0,49	0,19	0,60
10	0,3	0,45	0,28	0,66	0,23
12	0,2	0,35	0,60	0,55	0,52
14	0,2	0,35	0,60	0,31	0,50
16	0,2	0,35	0,48	0,07	0,35

На рис. 5 показаны полученные осциллограммы линейных напряжений и их спектральный состав цеха механической обработки ООО «Завод монтажных изделий», г. Днепропетровск. Такая форма кривых обусловлена перегруженностью цеховой подстанции и наличием мощной индукционной установки для закалки. В представленном случае, в отличие от предыдущего, высшие гармоники находятся в допустимом диапазоне, однако коэффициент искажения синусоидальности составляет 8,4%, т.е. превышает нормально допустимое значение.

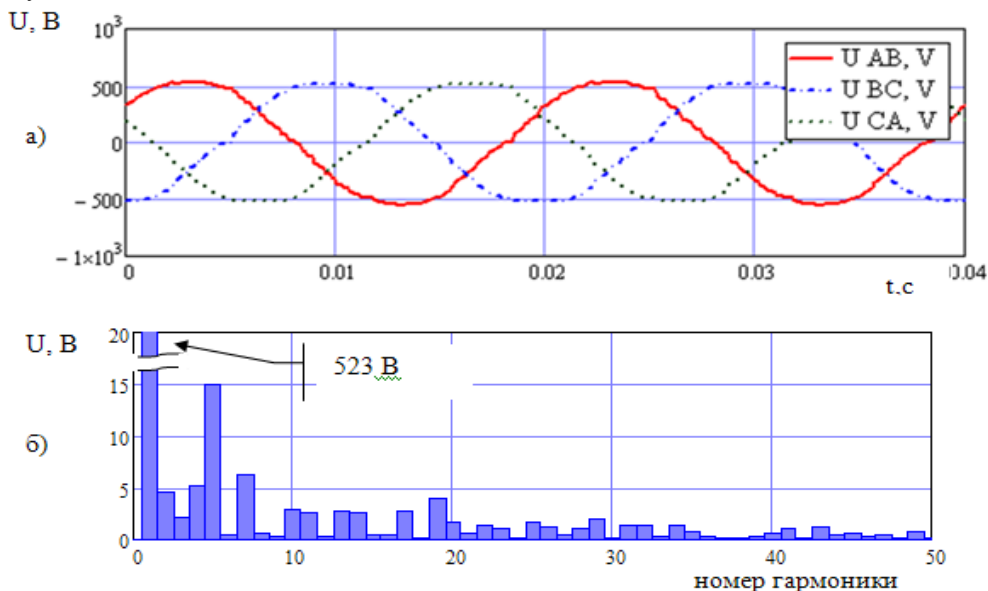


Рис. 5 Осциллограммы (а) и спектральный состав (б) линейных напряжений подстанции механического цеха ООО «Завод монтажных изделий», г. Днепропетровск

В качестве следующего примера рассмотрим цеховые сети Запорожского трансформаторного завода. Электроснабжение его технологических потребителей осуществляется с помощью двух трансформаторных подстанций 6 кВ/0,4кВ через распределительную систему, протяженностью 124 км. Обработка статистических данных, полученных на вводе предприятия, показала, что существенных отклонений по ПКЭ нет. Максимальное и минимальное значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составило 0,75% и 0,32% соответственно. Значения же указанных коэффициентов по обратной последовательности (K_{2U}) оказались равными 0,9% и 0,38% .

В качестве рассматриваемых цеховых сетей данного предприятия были взяты те, где сконцентрировано наибольшее количество разнотипных потребителей, в том числе таких, которые заведомо ухудшают ПКЭ: механического, сварочного и литейного цехов. В табл. 2 показан состав потребителей по установленной мощности в указанных цехах ОАО «ЗТЗ», из которой видно, какие из них являются виновниками отклонений ПКЭ.

Таблица 2

Состав потребителей по установленной мощности в цехах ОАО «ЗТЗ»

Наименование цеха	% от установленной мощности				
	Потребители, не влияющие на ПКЭ		Потребители, влияющие на ПКЭ		
	Станки с АД	Обжиговые печи	Сварочное оборудование	Ванны металлопокрытий	Индукционные печи
Механический	92,5	5	2,5	-	-
Сварочный	27,3	2,7	70	-	-
Литейный	5,9	34,4	-	50	9,6

Анализ режима электропотребления этого предприятия показал, что на качество электроэнергии в значительной степени влияют электроприемники сварочного цеха, в котором установлены выпрямители с мостовой схемой; литейного цеха, в котором находятся ванны металлопокрытий с питанием от вентильных преобразователей постоянного тока, увеличивающих коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Значения показателей качества питающего напряжения всех рассмотренных предприятий приведены в табл. 3. Жирным шрифтом выделены те из них, которые превышают нормально допустимые величины.

Таблица 3

Значения показателей качества электроэнергии в цехах обследованных предприятий

Предприятие	Цех	Показатели качества электроэнергии			
		k_U , %	$k_{U(n)}$ %	δU , %	K_{2U} , %
ОАО «ЗТЗ»	Механический	2...4	0,07...0,14	-5...+4	1,7...1,9
	Сварочный	8...12	0,07...0,15	-9...+5	1,5... 3,6
	Литейный	7... 11	0,07...0,15	-7...+5	2...3,5
Нефтеперерабатывающий завод	Крекинг	2,6...4,6	0,35...0,91	-1...+1	0,5...1,2
	Ректификации	2,3...4,3	0,01... 0,02	-1,2...+1	1...1,5
	Цех фильтрации	0,1...03	0,01...0,02	-1...+1	0,2...1,8
Завод монтажных изделий	Механической обработки	7,4...9,4	0,01...0,02	-0,5...+0,5	1...1,5
	Ремонтный	0,9...2,9	0,01.. 0,02	-1...+1	0,3...1,7
	Инструментальный	1,8...3,8	0,01.. 0,02	-1,2...+1	1...2

Так, на предприятии ОАО «ЗТЗ» наибольшее отклонение ПКЭ от допустимых значений зафиксировано в сварочном и литейном цехах, что отрицательно влияет на работу находящихся в них электропотребителей. Значительное искажение синусоидальности кривой напряжения негативно сказывается на техническом состоянии станков и механизмов с асинхронным электроприводом. Возрастают также суммарные потери электрической энергии, снижается качество выпрямленного тока преобразовательных установок, необходимого для гальванического производства. Несоответствие значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности нормально допустимому значению приводит к возникновению магнитных полей, вращающихся встречно ротору АД, вызывающих вибрации и разрушения подшипников.

Таким образом, анализ типовых искажений и количественная оценка показателей качества электроэнергии в цеховых сетях рассмотренных промышленных предприятий позволяет сделать выводы о том, что качество электрической энергии в аналогичных сетях многих промышленных предприятий Украины не отвечает установленным требованиям. В них присутствуют искажения, обусловленные работой полупроводниковых преобразователей, насыщением магнитопроводов трансформаторов и т.д.

Обращает на себя внимание и то, что при соответствии ГОСТу коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, по отдельным гармоникам наблюдается существенное превышение значений коэффициентов гармонических составляющих сетевого напряжения. А это свидетельствует о предпочтительности использования последних при анализе эффективности электрооборудования, работающего в сетях с некачественной электроэнергией.

И, наконец, главный вывод экспериментов: качество электроэнергии на входе предприятия и в его цеховых сетях существенно отличается. Таким образом, одинаковые потребители, находящиеся в разных цехах, характеризуются различной энергоэффективностью и требуют индивидуального подхода при выборе средств для ее повышения.

Качество электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог.

Отдельный интерес с точки зрения качества электроэнергии представляет получившее достаточное распространение электроснабжение нетяговых электропотребителей от электрифицированных железных дорог. Это составляющие инфраструктуры крупных железнодорожных станций и узлов, в том числе локомотивные и вагонные депо, культурно-бытовые объекты и даже сторонние потребители, подключенные непосредственно к тяговым подстанциям. При этом некоторые потребители, расположенные на железнодорожных перегонах и станциях, находящихся в зонах между подстанциями (освещение, устройство автоблокировки и др.), подключаются, как правило, к линиям, так называемого, продольного электроснабжения с напряжением 6, 10, 35 кВ.

Если основное питание устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также связи осуществляется от отдельных линий электрообеспечения автоблокировки, то резервное – от линий «два провода – рельсы» (ДПР) с номинальным напряжением 25 кВ или продольного электроснабжения (ПЭ) напряжением 6 и 10 кВ. Применяемые в данном случае однофазные комплектные трансформаторные подстанции (КТП) монтируются непосредственно на железнодорожных опорах [15].

От указанных линий ПЭ и ДПР получают питание так же и сторонние потребители в виде промышленных предприятий и населения, отпуск электроэнергии которым за последние пять лет вырос на 15% и составил на 01.01.2015 г. почти 8 млн. кВт·ч [16]. Происходят структурные изменения и в характере нагрузки, а именно: увеличивается доля бытового оборудования (персональные компьютеры, серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания, микроволновые печи и т.п.), которое использует однофазные источники питания, а также регулируемые электроприводы систем кондиционирования и вентиляции. Освещение выполняется с помощью люминесцентных ламп с электронным балластом. У этой группы потребителей доля нелинейной нагрузки значительно превышает линейную составляющую.

Как правило, источники питания офисного оборудования используют мостовые выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами. В выпрямителях, используемых в современных источниках электропитания, напряжение сети подается непосредственно на диодный мост. При этом выпрямленный ток преобразуется с помощью коммутатора в переменный ток высокой частоты, а затем снова выпрямляется. Такие источники питания вызывают значительные искажения формы потребляемого тока, существенную долю которого составляют компоненты с частотой третьей гармоники [17]. Появление высших гармоник оказывает неблагоприятное воздействие на работу силового электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики, вызывает ускоренное старение изоляции [18].

Таким образом, решение проблемы эффективности использования электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог является достаточно актуальным и должно, как и в предыдущих случаях, базироваться на результатах оценки ПКЭ непосредственно в процессе ее передачи и потребления энергии в рассматриваемых сетях. А это самостоятельная и не менее сложная научно – практическая задача.

Учитывая, что современные средства измерительной техники (СИТ) реализуют гибкие алгоритмы обработки и анализа экспериментальных данных высокого уровня сложности - они обеспечивают достаточную для поставленной цели точность измерений. При этом контроль и фиксация качества электромагнитных процессов в цепях переменного тока осуществляются в основном портативными анализаторами, такими, например, как EDL-175xr или PNA-296 производства фирмы SATEC построенными на базе прибора для учета электрической энергии РМ175.

На рис. 6 приведена схема измерения показателей качества электроэнергии, на действующем электрифицированном участке переменного тока в линии ДПР.

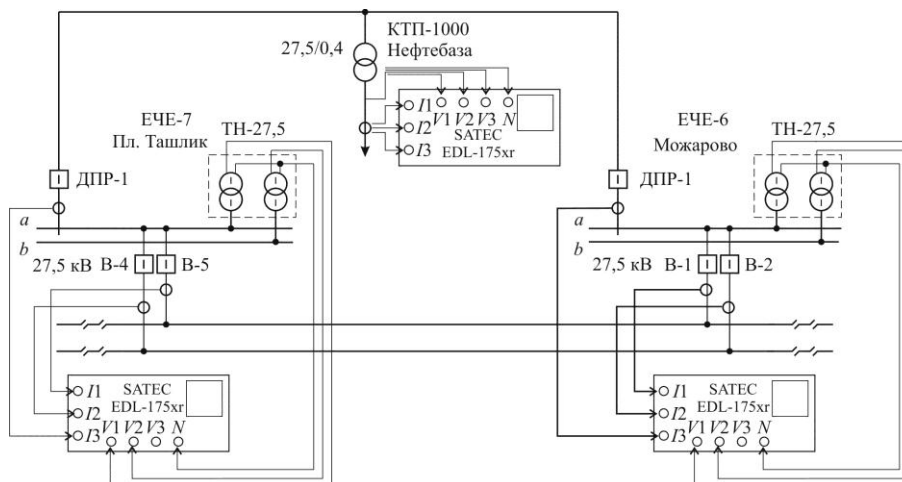


Рис. 6 Схема проведения измерений на промышленном объекте, который питается от ДПР

Она позволила оценить такие показатели качества электрической энергии как:

- уровень и отклонения напряжения;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности;
- коэффициент искажения синусоидальности напряжения.

Дополнительно выполнена оценка коэффициента реактивной мощности.

В качестве примера на рис. 7 приведены фрагменты регистрации указанных показателей в линии питания нетяговых потребителей ДПР напряжением 27,5 кВ, а результаты их статистической обработки – в таблице 4. Аналогично обследованы и линии с напряжением 10 и 0,4 кВ.

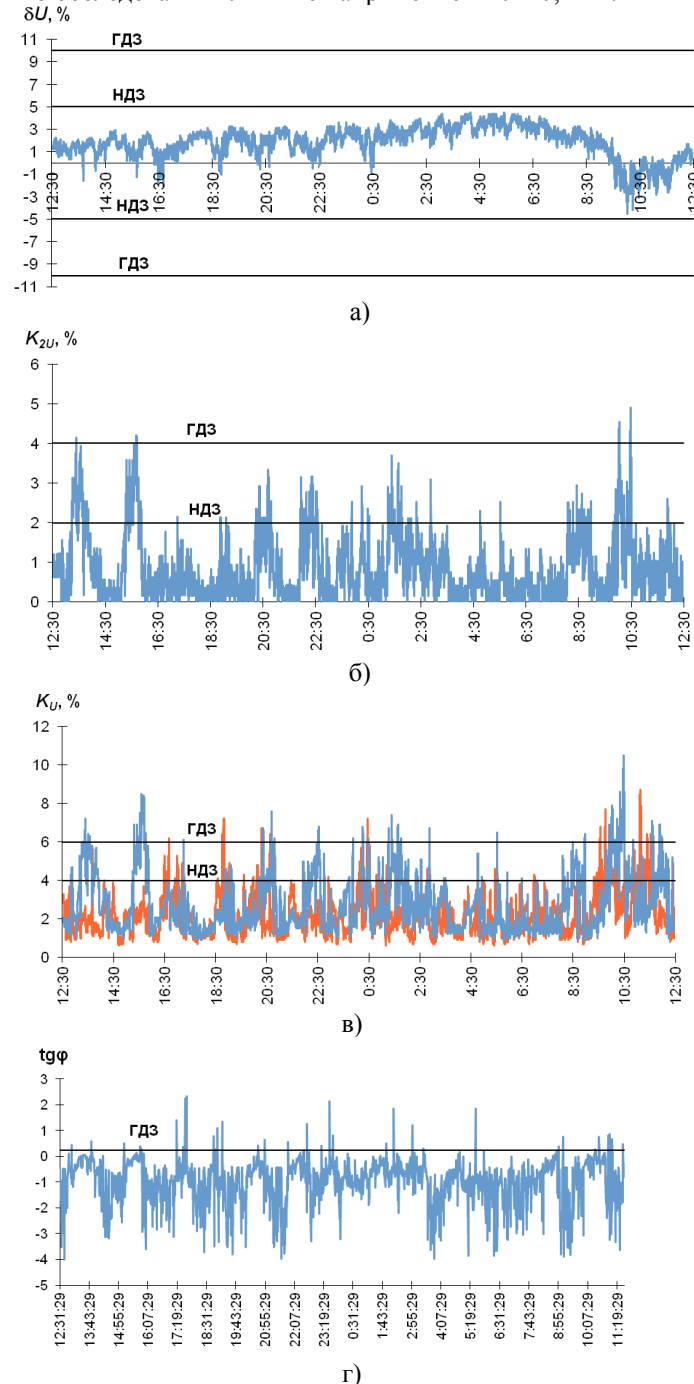


Рис. 7 Изменения показателей качества электроэнергии в линии ДПР 27,5кВ:

- а) отклонение напряжения; б) коэффициент несимметрии по обратной последовательности;
в) коэффициент искажения синусоидальности напряжения г) коэффициент реактивной мощности

Анализ полученных результатов качества электроэнергии в линии ДПР позволяет сделать вывод, что в целом статистические характеристики установившегося отклонения напряжения в сети 27,5 кВ находятся в пределах допустимых значений и за время наблюдения изменялись незначительно. Коэффи-

Статистические характеристики показателей качества электроэнергии в линии ДПР 27,5 кВ

Показатель	U			δU	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			$\text{tg}\varphi$	$K_i, \%$
	U_A	U_B	U_C			U_A	U_B	U_C		
M	27844,55	28179,63	28016,05	1,86	0,83	2,76	2,14	0,0	-0,97	
Mo	28034,00	28401,00	28122,00	2,61	0,03	1,40	1,20	0,0	0,00	
Me	27938,00	28305,00	28074,00	2,09	0,56	2,30	1,90	0,0	-0,78	
D	208507,75	166606,06	139821,9	1,87	0,588	2,14	1,18	0,0	0,80	
s	456,63	408,17	373,93	1,37	0,767	1,46	1,09	0,0	0,89	
As	-0,93	-0,94	-0,89	-0,89	1,41	1,25	1,60	0,0	-0,88	
Ex	1,67	0,87	0,93	0,96	1,93	1,37	3,74	0,0	1,36	
min	25259,00	26393,00	26313,00	-4,50	0,03	0,90	0,60	0,0	-3,99	6,4
max	28799,00	28974,00	28743,00	4,52	4,90	10,50	8,70	0,0	2,35	41,7

циент несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций изменялся в пределах 0 ... 3,63%, что превышает нормально допустимое значение, но находится в границах предельно допустимых значений. Коэффициент же искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах указанных подстанций варьировался в пределах 0 ... 10,5%, что превышает как нормально допустимое, так и предельно допустимое значение.

В линии 10 кВ статистические характеристики отклонения напряжения также находятся в нормированных пределах и за время наблюдения изменялись незначительно. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности изменялся в пределах 0 ... 1,58%, что также не превышает нормально допустимого значения. Однако, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения - варьировался в еще больших пределах 0 ... 14,4%, что превышает все допустимые нормы.

В то же время, на присоединениях 0,4 кВ величина коэффициента K_U находится в пределах 1,4 ... 10,3%, что превышает нормально допустимое, но находится в границах предельно допустимого значения. При этом установившееся отклонение напряжения изменялось от - 2,66% до + 7,42%, что превышает нормально допустимые значения. Коэффициент же несимметрии напряжения по обратной последовательности на присоединениях 0,4 кВ варьировался в значительных пределах 0 ... 3,43%, хотя превышения нормально допустимого значения и происходили лишь в некоторые моменты времени.

Интерес представляет и наблюдение за изменениями коэффициента реактивной мощности в исследуемых линиях. Так, в случае ДПР почти в течение всего времени имеет место генерация реактивной мощности. Можно предположить, что она вызвана большой емкостной проводимостью линии при незначительном уровне нагрузки. В случае же 10 кВ режимы генерации и потребления реактивной мощности чередуются, что и было вызвано цикличностью технологического процесса нетягового потребителя. Относительно присоединения 0,4 кВ на протяжении почти всего времени наблюдения имело место потребление лишь реактивной мощности. Значение величины $\text{tg}\varphi$ на всех исследуемых напряжениях превышает нормированный уровень в 0,25.

Особого внимания заслуживает исследование коэффициента искажения тока. Действующие на территории Украины нормативные документы, регулирующие вопросы обеспечения качества электроэнергии, рассматривают показатели качества электроэнергии, производные от напряжения [18]. В европейских же странах используется стандарт IEEE 519-1992 [19], который определяет максимальные значения токов нечетных гармоник в процентном отношении к току нагрузки. В соответствии с данным стандартом максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока зависит от отношения тока короткого замыкания сети в точке общего присоединения к току нагрузки. В результате, для мощной сети (примем во внимание тот факт, что мощность тяговой подстанции значительно превышает мощность нетяговой нагрузки) максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока не должна превышать 15%. Токи гармоник с порядковыми номерами $p < 11$ должны быть меньше 12% от тока нагрузки. Как показали результаты расчетов коэффициенты искажения тока в исследуемых линиях значительно превышают приведенные нормативы. При этом интервалы изменений искажения тока имеют большие значения в линии ДПР и в получающих от нее питание потребителях 0,4 кВ.

Выводы

Проведенные исследования на промышленных предприятия позволяют сделать следующие выводы о том, что качество электрической энергии многих промышленных предприятий Украины не соответствует ГОСТу. В цеховых сетях присутствуют искажения, обусловленные работой полупроводниковых преобразователей, насыщением магнитопроводов трансформаторов и т.д. При соответствии требованиям ГОСТа коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, по отдельным гармоникам наблюдается существенное превышение коэффициентов гармонических составляющих сетевого напря-

жения, что свидетельствует о предпочтительности использования последних при анализе энергоэффективности АД работающих в условиях некачественного питания. Экспериментально установлено, что качество электроэнергии на входе предприятия и по его цехам отличается. Таким образом, одни и те же потребители, находящиеся в разных цехах, работают с различной энергоэффективностью, обусловленной отклонениями ПКЭ и требуют индивидуального подхода при решении вопроса их защиты.

В результате выполненных исследований показателей качества электроэнергии в линиях питания нетяговых потребителей железных дорог установлено, что проблема обеспечения качества электрической энергии в рассматриваемых случаях еще более актуальна в связи с происходящими изменениями характера нагрузки. Особого внимания требует решение этого вопроса для ведомственных промышленных предприятий, так как для них характерно наличие значительного количества оборудования, на работу которого существенно влияет качество электрической энергии [20].

Результаты проведенных работ свидетельствуют, что компенсация реактивной мощности на указанных предприятиях имеет свою специфику на каждом из уровней напряжения, которую необходимо учитывать при разработке мероприятий по улучшению качества электрической энергии. Показатели последнего, определяемые отечественными нормативными документами, не соответствуют установленным нормам и имеют широкий разброс статистических характеристик. Коэффициент же искажения синусоидальности кривой тока, регламентируемый международными стандартами, также превышает допустимые значения. Как следствие, проблема повышения качества электрической энергии в сетях нетягового электроснабжения железных дорог является более сложной, а ее решение должно предусматривать меры, направленные не только на повышение энергоэффективности, но и обеспечение надежности электроснабжения и снижения потерь в линиях.

Список использованных источников

1. Кириленко О. В. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2001. – С. 87–91.
2. Сиченко В. Г. Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії/ В.Г. Сиченко // Гірничі електромеханіка та автоматика: Науково – технічний збірник НГУ. – Дніпропетровськ.: Випуск: 2015. №1(94). – С.25-30.
3. Полилов Е.В. Экспериментальные исследования качества электрической энергии в основных цехах «АМК». Анализ гармонического состава сетевого напряжения / Е.В. Полилов, А.Б. Зеленев // Вісник КДПУ. – Випуск 3/2006(39). – Частина 1. – С.93-97.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 360 с.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 340 с.
6. Жежеленко И.В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
7. Родькин Д.И. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах / Д.И.Родькин, А.П.Черный, В.А. Мартыненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – Вип.1. –2002. – С.81-85.
8. Зиновкин В.В. Моделирование добавочных потерь в электрооборудовании системы электротехнического комплекса при несинусоидальных токах / В.В. Зиновкин // Вісник КДПУ. – Випуск 4/2007(45). – С. 49-52.
9. Жук А.К. Анализ влияния тиристорного преобразователя на питающую сеть с учетом коммутационных колебаний / А.К. Жук // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2003. – №60. – С.39-47.
10. Запальский В.Н. Спектральный анализ работы типовых полупроводниковых преобразователей в автономных электроэнергетических системах / В.Н. Запальский // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2007. – С.230-231.
11. Полищук И.И. Электропривод переменного тока с IGBT-транзисторным преобразователем: электромагнитная совместимость и качество электроэнергии / И.И. Полищук // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2007. – С.403-406.
12. Климов В.П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания / В.П. Климов, А.Д. Москалев // Практическая силовая электроника. – Научно-технический сборник / Под ред. Г.М. Малышкова, А.В. Лукина. – М.: АОЗТ "ММП-Ирбис", 2002. – Вип. 5. – С. 39-46.
13. Качан Ю.Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Ю.Г.Качан, А.В.Николенко, В.В. Кузнецов // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Вип. 84. – Дніпропетровськ, 2010. – С.9-16.
14. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. – М: Издательство стандартов. –1998. – 15 с.
15. Ратнер, М.П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. / М.П. Ратнер, Е.Л. Могилевский. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.

16. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2014 році. – К. Укрзалізниця, 2015. – 240 с.
17. 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
18. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Сасенко, Д. О. Босий. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
19. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.
20. Средства эффективного использования электрической энергии [Текст] : монография / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко, В. В. Кузнецов ; Запорож. гос. инженер. акад. - Запорожье : ЗГИА, 2016. - 156 с.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Качаном Ю.Г..

УДК 69.03

*І.М. Луценко, канд. техн. наук., Є.В. Кошеленко, П.С. Циган,
(Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")*

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Мета. Дослідження впливу конструктивних параметрів багатоквартирних житлових будинків на величину питомого енергоспоживання. Оцінка досяжного рівня енергоефективності будівель за рахунок модернізації їх огороджуючих конструкцій. **Наукова новизна** полягає у встановленні закономірностей між параметрами огороджуючих конструкцій та досяжним рівнем енергетичної ефективності будівель на основі аналізу фактичних даних будівель. **Практична цінність** полягає в оцінці поточного рівня енергетичної ефективності будівлі та розробці заходів для зниження питомих витрат енергії на її утримання. Було встановлено, що для будинків з білої цегли різної поверховості в умовах м.Дніпро очікувана величина зниження енергоспоживання відносно поточного рівня за рахунок модернізації огороджуючих конструкцій становить 38-45%. **Результати.** Визначено поточний рівень енергетичної ефективності на прикладі трьох багатоповерхових житлових будівель. Показано, що за рахунок впровадження заходів з термомодернізації огороджуючої оболонки будівлі досягається підвищення рівня енергетичної ефективності з **F** до **E**, рідше **D** рівнів. Для подальшого зниження енергоспоживання будівлями необхідно проводити також модернізацію інженерних мереж. Згідно з розрахунками для досліджуваних трьох будівель після модернізації фасадів та обладнання індивідуальних теплових пунктів можна досягти **B** і **C** рівнів енергетичної ефективності.

Ключові слова: Енергоефективність, опір теплопередачі, енергетичний паспорт, термомодернізація.

Аннотация. Цель. Исследование влияния конструктивных параметров жилых домов на величину удельного энергопотребления. Оценка достижимого уровня энергоэффективности зданий за счет модернизации их ограждающих конструкций. **Научная новизна** состоит в установлении закономерностей между параметрами ограждающих конструкций и достижимым уровнем энергетической эффективности зданий на основании анализа фактических данных зданий. **Практическая ценность** состоит в оценке текущего уровня энергетической эффективности зданий и разработке мероприятий по снижению удельного расхода энергии на их содержание. Было установлено, что для зданий из белого кирпича разной этажности в условиях г.Днепра ожидаемая величина снижения энергопотребления относительно текущего уровня за счет модернизации ограждающих конструкций составляет 38-45%. **Результаты.** Определен текущий уровень энергетической эффективности на примере трех жилых зданий. Показано, что за счет реализации мероприятий по термомодернизации ограждающей оболочки зданий достигается повышение уровня энергетической эффективности с **F** до **E**, реже **D** уровней. Для дальнейшего снижения энергопотребления зданиями необходимо также производить модернизацию инженерных сетей. Согласно расчетов для исследуемых трех объектов после модернизации фасадов и оборудования индивидуальных тепловых пунктов можно достичь **B** и **C** уровней энергетической эффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность, сопротивление теплопередаче, энергетический паспорт, термомодернизация

Abstract. Purpose. Investigation the influence of construction parameters of apartment houses on the value of energy consumption per 1 m² of heated space. **The scientific originality** consists in establishing patterns between the parameters of the building envelope and the achievable level of energy efficiency of buildings based on the analysis of actual data of buildings. **The practical value.** It was estimated that for white brick buildings of different heights in the conditions of the Dnipro city, the expected reduction in energy consumption relative to the current level due to the modernization of walling is 38-45%. **Findings.** The current level of energy efficiency is determined by the example of three typical residential buildings. It is shown that due to the implementation of measures for thermal modernization of the building envelope, an increase in the level of energy efficiency from F to E, less often D levels is achieved. To further reduce of buildings energy consumption, it is also necessary to modernize the engineering networks. According to the calculations for the studied objects, after upgrading of the envelope and equipment of individual heat points, it is possible to achieve B and C energy efficiency levels.

Keywords: energy efficiency, thermal resistance, energy passport, thermal modernization

Вступ. В умовах постійного зростання цін на енергетичні ресурси першочерговими задачами сьогодення стають задачі енергозбереження. Зокрема, однією з таких задач є мінімізація вартості утримання житлових та громадських будівель. Протягом останніх десятиліть спостерігається поступове підвищення середньої температури внаслідок парникового ефекту. Зміни клімату, доступність великої кількості різноманітних пристроїв для кліматизації приміщень та поступовий розвиток норм щодо комфортності умов всередині приміщень призвели до того, що тепер під кліматизацією розуміємо не тільки опалення будівель протягом холодної частини року, але і видалення надлишкового тепла влітку. Підтримання комфортних умов перебування людей вимагає залучення все більшої кількості енергії, що тягне за собою зростання споживання енергетичних ресурсів, збільшення викидів і подальші зміни клімату.

Вирішення задачі зменшення об'єму споживання енергетичних ресурсів передбачає кілька можливих шляхів: заміщення традиційних видів палива нетрадиційними відновлюваними, зокрема «чистими» видами енергії – енергією сонця, вітру, припливів тощо (тобто перехід на технології, які не потребують спалювання палива), зниження споживання енергетичних ресурсів за рахунок термомодернізації будівель, використання вторинного тепла, оптимізація парку громадських та виробничих будівель із виведенням з експлуатації низькоефективних. Всі описані шляхи можуть бути поєднаними для досягнення кращого ефекту, ніж при реалізації одного якогось напрямку.

Метою даної роботи є оцінка можливого потенціалу енергозбереження у житловому секторі за рахунок термомодернізації будівель, які знаходяться в експлуатації. Основні заходи з енергозбереження, які пропонує сьогодинішній ринок послуг для багатоквартирних житлових будинків – це утеплення стін, заміна вікон, заміна або встановлення металопластикових рам на балкони та лоджії, заміна дверей, регулювання режимів роботи системи опалення за рахунок встановлення індивідуальних теплових пунктів, спорудження будинкових котельних. Описані вище заходи охоплюють досить широкий об'єм можливих робіт, проте він не є вичерпним. Так, найчастіше не проводиться модернізація систем вентиляції будівель, систем розподілу тепла, рідко розглядається можливість використання вторинного тепла відпрацьованого повітря та стічних вод тощо.

Близько половини будівель, які на сьогодні знаходяться в експлуатації – це багатоповерхові цегляні будинки з білої цегли. При опрацюванні матеріалів до даної роботи були обстежені близько сотні будівель, зокрема половину об'єктів становили цегляні будинки різної поверховості. Для оцінки потенціалу енергозбереження в таких будинках розглянемо типові 5(6)-ти, 9-ти та 16-ти поверхові будівлі.

За останні десять років власними силами мешканців будинків були замінені вікна у подвійному дерев'яному плетінні та спарені дерев'яні вікна на вікна зі склопакетами у металопластиковому плетінні. Кількість замінених вікон на даний момент коливається у межах 60-80% від загальної їх загальної кількості. Також силами мешканців були засклені та частково утеплені до 90% балконів та лоджій. Таким чином, можна передбачити, що потенціал доступної економії за рахунок модернізації або заміни світлопрозорих конструкцій будівлі вже практично вичерпано. Звичайно, технічний прогрес не стоїть на місці і вікна, які встановлені протягом останнього року, відрізняються від тих, які були встановлені десять років тому, проте якщо брати кількісні показники, зокрема термічний опір таких вікон, то для стандартних подвійних вікон у дерев'яному плетінні показник термічного опору становить 0,42 м²·°C/Вт, у той час як для звичайного двокамерного склопакету з тепловідбиваючим покриттям 0,76 м²·°C/Вт. Тобто опір теплопередачі таких склопакетів вже майже удвічі більший порівняно з вікнами у подвійних дерев'яних плетіннях. Подальше вдосконалення склопакетів, створення додаткових тепловідбиваючих покриттів, заповнення їх інертними газами вже не дає різкого зростання опору теплопередачі ($R = 0,8-1,0$ м²·°C/Вт) порівняно зі звичайним двокамерним склопакетом. Зважаючи на це, на даному етапі для вікон, які не відслужили й половини свого терміну експлуатації, постає питання доцільності їх модернізації та заміни на більш сучасні з додатковими покриттями і це питання потребує техніко-економічного обґрунтування [3]. Для металопластикових вікон характерним є неправильний монтаж за допомогою тимчасової монтажної піни, яка під дією ультрафіолетового випромінювання осипається і залишає відкриті шпарини, через які

йде інфільтрація холодного повітря до будівель, тому під час виконання фасадних робіт потрібно приділяти увагу швам між стінами та вікнами і закладати в кошторис комплексного утеплення також ремонт швів.

Для цегляних будинків, які поширені на території України характерною є товщина стін 0,54-0,57 м, тобто стіна у дві цеглини плюс вапняно-піщана штукатурка. Термічний опір таких стін коливається у межах 0,78-0,81 м²·°C/Вт, при мінімальній величині опору теплопередачі згідно з ДБН В.2.6-31:2016 3,3 м²·°C/Вт [1]. Таким чином, опір теплопередачі стін у чотири рази менший від мінімальної величини, відповідно втрати крізь стіни у чотири рази більші порівняно з нормативними. Тому значний потенціал для енергозбереження наявний саме в комплексному утепленні стін. При цьому утеплення повинно здійснюватися професійними монтажними організаціями із дотриманням норм до виконання фасадних робіт зокрема робіт з утеплення, оскільки непрофесійні виконавці при виконанні робіт залишають значну кількість містків холоду – не утеплені кріпильні профілі, наскрізні отвори під трубопроводи кондиціонерів тощо. При проведенні тепловізійної зйомки утепленої частини фасадів будівель виявляється пошкодження шарів теплоізоляції через розтріскування, наявність суцільних неутеплених поясів, зон намокання утеплювача тощо. Ці явища можуть бути викликані неякісним монтажем теплоізоляції, неправильно підібраним матеріалом, товщиною його шару, неправильним улаштуванням паробар'єрів тощо. Таку теплоізоляцію при комплексному утепленні будівлі необхідно демонтувати, дати стіні просохнути та утеплити знову.

Для аналізу наявного потенціалу енергозбереження від виконання модернізації огорожуючих конструкцій розглянемо дані для трьох типових будівель, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Об'ємно-планувальні характеристики будівлі

Найменування показника	Будівля 1	Будівля 2	Будівля 3
Кількість поверхів, шт.	6	9	16
Довжина будинку, м	37,8	20	33
Ширина будинку, м	10,5	18	24
Висота будинку, м	16,8	28,1	45,1
Товщина стін, м	0,54	0,54	0,54
Площа перекриттів, м ²	396,90	360	476,00
Будівельний об'єм, м ³	6667,92	10116	21467,60
Опалювана площа, м ²	2075,41	2874,69	6982,40
Опалюваний об'єм, м ³	5603,62	8783,78	19681,60
Загальна площа вікон, м ²	479,02	572,74	748,02
У т.ч. заміненіх вікон, м ²	319,28	441,94	505,82
% заміненіх вікон	66,65	77,16	67,62
незамінених вікон, м ²	159,74	130,80	242,20
Загальна площа дверей, м ²	14,3	6,56	13,2
Загальна площа стін, м ²	1129,6	1556,3	4380,2
Коефіцієнт скління фасадів будинку	0,295	0,268	0,145
Показник компактності будинку	0,431	0,325	0,310

Аналіз енергетичної ефективності будівлі в цілому передбачає визначення відповідності показників енергоспоживання певним класам та розробку заходів зі зниження питомого енергоспоживання на 1м² опалюваної площі. На величину питомого енергоспоживання впливає значна кількість чинників таких як об'ємно-планувальні характеристики будівлі, тип системи опалення, тип системи вентиляції, наявність регуляторів, автоматизація енергоспоживання тощо. Одним з важливих чинників, які визначають енергетичну ефективність будівлі є теплоізоляційні якості її оболонки – стін, даху, перекриттів підвалу або техпідпілля, дверей та світлопрозорих конструкцій.

Характеристики інженерних мереж будівель, що розглядаються у даній роботі:

- система опалення однотрубна без регульовальної арматури та без автоматичного регулювання в ІТП;
- система вентиляції витяжна з природною тягою;
- система холодного водопостачання централізована;

- централізоване гаряче водопостачання підведене але з 2018 року відсутнє, силами мешканців встановлюються індивідуальні електричні бойлери для забезпечення потреб у гарячій воді;
 - електропостачання централізоване від мереж ДТЕК «Дніпровські електромережі».

Теплотехнічні характеристики будівель, які відображають відповідність теплоізоляційних характеристик елементів огорожуючих конструкцій будівлі діючим мінімальним вимогам, розраховані на основі [2] і представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Теплотехнічні характеристики огорожуючих конструкцій будівель

Приведений опір теплопередачі зовнішніх огорожень, $m^2 \cdot ^\circ C / Wt$	Нормативне значення	Будівля 1	Будівля 2	Будівля 3
стін	3,3	0,78	0,78	0,78
вікон і балконних дверей (середньозважений для усіх світло-прозорих конструкцій будівлі)	0,75	0,64	0,67	0,64
вхідних дверей, воріт (середньозважений для усіх дверей будівлі)	0,6	0,6	0,16	0,6
горищних перекриттів (холодного горища)	4,95	4,95	4,95	4,95
перекриттів над неопалюваними підвалами або підпіллям	3,75	3,75	3,75	3,75

У даній роботі не ставилася задача дослідження стану горищ та підвальних приміщень будівель, тому опори теплопередачі перекриттів горищ і підвалів прийнято рівними мінімальним вимогам до цих перекриттів. Як видно з таблиці 2, будівлі досить близькі за теплотехнічними показниками. У будівлі 2 встановлено металеві неутеплені двері, тому середній опір теплопередачі вхідних дверей є низьким, у двох інших будівлях двері металеві утеплені, їх опір теплопередачі відповідає мінімальним вимогам. Середньозважений термічний опір вікон і балконних дверей для будівлі 2 є дещо вищим порівняно з іншими будівлями, що пояснюється кращим співвідношенням між заміненними метало пластиковими вікнами та незаміненими вікнами у дерев'яних плетіннях.

Для розглянутих будівель на основі [2] було визначено розрахункову величину питомого енергоспоживання до модернізації огорожуючих конструкцій будівлі та після кількох етапів модернізації. Під етапами модернізації огорожуючих конструкцій будівлі розуміємо:

етап 1 – комплексне утеплення стін полістиролом, для розглянутих будівель необхідно здійснити утеплення стін полістиролом шаром щонайменше 139 мм, при цьому буде досягнуто нормативне мінімальне значення опору теплопередачі стін $3,3 m^2 \cdot ^\circ C / Wt$;

етап 2 – заміна дерев'яних вікон на вікна у метало пластиковому плетінні з подвійними склопакетами та тепловідбиваючим покриттям, теплоізоляційні характеристики яких задовольняють мінімальні вимоги;

етап 3 – заміна неутеплених дверей на металеві утеплені, опір теплопередачі яких задовольняє нормативні вимоги.

Розрахункові дані щодо питомого енергоспоживання будівель до та після трьох етапів термомодернізації наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахункові показники питомого енергоспоживання

Показник	Будівля 1	Будівля 2	Будівля 3
1	2	3	4
Розрахункове значення питомих теплових витрат на опалення будинку, $kWt \cdot год / m^2$	142,88	147,79	152,27
Нормативне значення енергоспоживання, $kWt \cdot год / m^2$	72	69	63
Поточний клас енергетичної ефективності будівлі	F	F	F
Питоме енергоспоживання будівлі після впровадження етапу 1 (утеплення стін пінополістиролом шаром 140 мм)	94,08	95,40	87,63
Питоме енергоспоживання будівлі після впровадження етапу 2 (заміна вікон)	88,03	91,31	84,11
Питоме енергоспоживання будівлі після впровадження етапу 3 (утеплення дверей)	88,03	90,18	84,11

Енергозбереження та енергоефективність

1	2	3	4
Зниження енергоспоживання відносно поточного стану, %	38,4	39,0	44,8
Очікуваний клас енергетичної ефективності будівлі після модернізації огорожуючих конструкцій	D	E	E
Питоме енергоспоживання будівлі після облаштування ІТП з автоматичним регулюванням подачі тепла в залежності від погодних умов	64,08	67,18	62,29
Загальне зниження енергоспоживання відносно поточного стану, %	55,2	54,5	59,1
Очікуваний клас енергетичної ефективності будівлі після модернізації огорожуючих конструкцій та облаштування ІТП	B	C	C

Розрахунки питомого енергоспоживання будівлі показали, що найбільша економія енергії на утримання будівлі досягається за рахунок комплексного утеплення стін, найменша економія – за рахунок утеплення вхідних дверей. Це пояснюється частиною площі, що займає дана однорідна конструкція, у загальній площі огорожуючих конструкцій.

Висновки. За даними розрахунків питомого енергоспоживання будівлями бачимо, що модернізація огорожуючих конструкцій дає зниження споживання енергії на опалення будівлі від 38 до 45% відносно поточного стану будівлі. Найбільший внесок у це зниження дає комплексне утеплення стін будівлі, найменший – утеплення або заміна вхідних дверей.

Проте слід зауважити, що навіть при повній модернізації огорожуючих конструкцій у більшості будівель не досягається мінімально необхідний для будівель, що знаходяться в експлуатації, клас енергетичної ефективності C, у кращих випадках досягається клас D.

Для підвищення класу енергетичної ефективності та досягнення рівнів B і C необхідно виконувати також модернізацію інженерних мереж будівлі. Так, облаштування індивідуальних теплових пунктів (ІТП), що дозволяють в автоматичному режимі здійснювати регулювання подачі теплоносія в залежності від погодних умов, дозволяє разом з заходами з термомодернізації огорожуючих конструкцій досягти скорочення питомого енергоспоживання на 55-60% і досягти B та C класів енергетичної ефективності будівель.

Список літератури

1. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель.
2. ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції.
3. Ратушняк Г.С. Оцінка доцільності підвищення термічного опору огорожуючих конструкцій багатоповерхових житлових будівель / Г.С. Ратушняк, А.М. Очеретний// Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016 - №6. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/19464>.

УДК 622.418

М.В. Холоменюк,

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

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ВНУТРІШНІХ ПРОЦЕСІВ У ДЕТАНДЕРІ ПЕРЕСУВНОГО ПНЕВМОЕЛЕКТРИЧНОГО КОНДИЦІОНЕРА

Анотація. Досліджено вплив вологості стиснутого повітря на температуру потоку, розширеного в об'ємному детандері пневмoeлектричного кондиціонера. Запропонована номограма для визначення фактичної температури розширеного вологого повітря за величиною очікуваної температури сухого повітря при його розширенні в детандері.

Ключові слова: кондиціонер пневмoeлектричний, вологість стиснутого повітря, температура розширеного потоку.

Аннотация. Исследовано влияние влажности сжатого воздуха на температуру потока, расширявшегося в объемном детандере пневмоэлектрического кондиционера. Предложена номограмма для определения фактической температуры расширявшегося влажного воздуха по величине ожидаемой температуры сухого воздуха при его расширении в детандере.

Ключевые слова: кондиционер пневмоэлектрический, влажность сжатого воздуха, температура расширявшегося потока.

Annotation. Influence of humidity of the compressed air is investigational on the temperature of stream, broadening in a volume detandere pnevmoelektricheskogo conditioner. A nomogram is offered for determination of actual temperature of broadening moist air on the size of the expected temperature of dry air at his expansion in detandere.

Keywords: conditioner of pnevmoelektricheskii, humidity of the compressed air, temperature of broadening stream.

При необхідності локального охолодження атмосферного повітря, зокрема в привибійному просторі тупикових гірничих виробок глибоких шахт, дієвою альтернативою традиційним системам кондиціювання повітря, що будуються зазвичай на основі парокомпресорних холодильних машин, можуть стати малогабаритні пересувні пневмоелектричні кондиціонери. Ці агрегати складаються з розширювальної машини – детандера, яка живиться з мережі стиснутого повітря. Навантаженням детандера є трифазний асинхронний короткозамкнений двигун, що працює в генераторному режимі. Електрична енергія, яка виробляється генератором, відводиться в живильну електричну мережу.

Холодильний ефект при роботі цих агрегатів досягається шляхом змішування струменя холодного повітря, що розширилося в детандері, з атмосферним повітрям у потрібному місці.

Головна відмінність кондиціонера полягає у відведенні ним енергії від об'єкта, що охолоджується, у вигляді електричної енергії, а не в формі тепла, як це відбувається у відомих аналогах. Завдяки цьому кондиціонер має малі габарити, що дозволяє розташовувати його безпосередньо в місці споживання виробленого холоду, та підвищує енергетичну ефективність за рахунок повернення більшої частини активної електричної енергії, витраченої на стискання повітря, у живильну електричну мережу.

Використання сучасних вискооефективних об'ємних детандерів робить ці агрегати конкурентними в порівнянні з іншими системами охолодження повітря, залишаючи їхню головну перевагу – виключну простоту та надійність.

Стиснуте повітря, що надходить до детандера, практично завжди насичене водяною парою. Охолодження розширюваного в детандері насиченого вологою повітря обумовлює зменшення його максимального паровмісту, що викличе випадіння вологи з повітря у вихідному патрубці детандера. Скрита теплота конденсації, що буде виділятися при цьому, сприйматиметься розширюваним повітрям і це викличе зростання температури вологого повітря на виході з детандера в порівнянні з температурою сухого розширеного повітря.

Це перевищення температури можна розрахувати за формулою

$$\Delta T = r(d_{\text{н1}} - d_{\text{н2}})c_p^{-1},$$

де ΔT – перевищення температури розширеного вологого повітря над температурою сухого, К; r – питома теплота конденсації водяної пари. Зважаючи на незначну різницю між значеннями теплоти конденсації водяної пари при різних температурах, у розрахунках приймаємо її сталою $r = 2500$ кДж/кг; $d_{\text{н1}}$ і $d_{\text{н2}}$ – паровміст насиченого вологого повітря у вхідному та вихідному патрубках детандера відповідно, кг/кг сухого повітря; c_p – ізобарна теплоємність сухого повітря. Приймаємо $c_p = 1$ кДж/(кг·К).

Падіння температури розширюваного вологого повітря нижче від 273 К приведе до замерзання вологи, яка випадає. Скрита теплота льодоутворення, що буде виділятися при цьому, теж буде передаватися до розширюваного потоку. Це обумовить ще більше перевищення його температури над температурою сухого повітря. Перевищення температури слід рахувати в цьому разі за формулою

$$\Delta T = (r + q)(d_{\text{н1}} - d_{\text{н2}})c_p^{-1},$$

де q – скрита теплота льодоутворення. $q = 334,11$ кДж/кг.

Паровміст насиченого повітря у вхідному патрубці детандера визначається за формулою

$$d_{\text{н1}} = 0,622 p_s (p_{\text{п}} - p_s)^{-1},$$

де p_n – тиск стиснутого повітря на вході в детандер, Па; p_s – парціальний тиск пари в насиченому вологому повітрі, Па. Парціальний тиск визначається температурою цього повітря.

У детандері стиснуте повітря розширюється до атмосферного тиску $p_{атм}$, тому паровміст повітря на його виході береться з довідника залежно від кінцевої температури [1]. Приймаємо $p_{атм} = 101$ кПа.

Визначимо фактичну кінцеву температуру насиченого вологого повітря, що розширюється в детандері пневмоелектричного кондиціонера, $T_{кв}$, за величиною очікуваної температури сухого розширюваного повітря $T_{кс}$. Для вирішення цього завдання побудуємо графік залежності

$$\Delta T = f(T_{кв}).$$

Робочий цикл сучасних роторних детандерів має фазу розширення, а частота обертання роторів становить 18000...20000 об/хв. Це дає підставу вважати розширення повітря в детандері адіабатним і визначати кінцеву температуру сухого розширеного повітря за рівнянням

$$T_{кс} = T_n \left(\frac{p_{атм}}{p_n} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

де T_n – початкова температура повітря; $k = 1,4$ – показник адіабати повітря.

Приймаємо тиск повітря на вході в детандер $p_n = 0,45$ МПа, його температуру $t_n = 40^\circ \text{C}$ ($T_n = 313 \text{ K}$). Тоді $T_{кс} = 204 \text{ K}$.

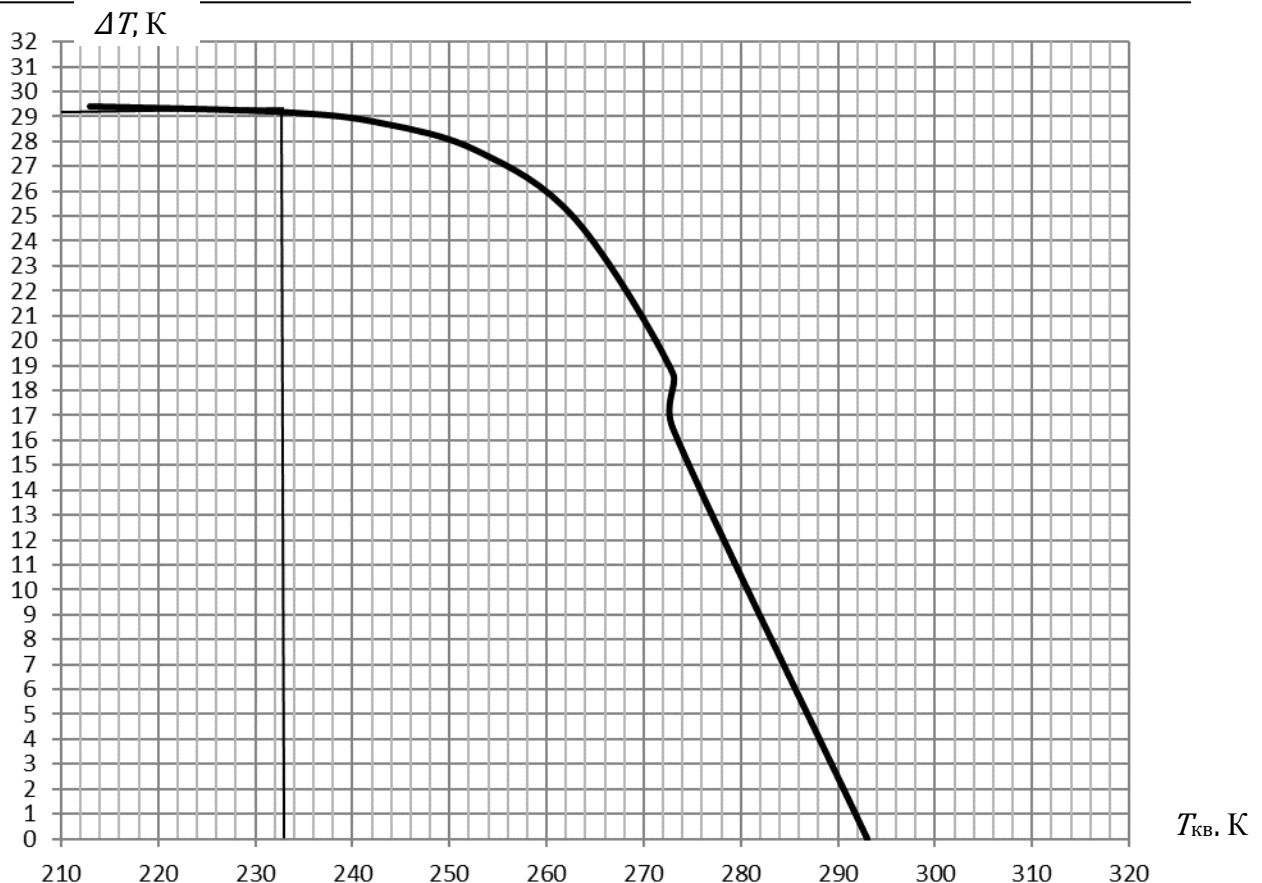
При $t_n = 40^\circ \text{C}$ $p_s = 7,3835$ кПа.

Для побудови графіка складемо таблицю.

$d_{н1} \cdot 10^3$, кг/кг сух. повітря	$T_{кв}$, К	$d_{н2} \cdot 10^3$, кг/кг сух. повітря	∇T , К
10,38	293	14,7448	0
	283	7,6556	6,81
	273п	3,7870	16,48
	273л	3,7867	18,69
	263	1,6047	24,87
	253	0,6366	27,61
	243	0,2342	28,75
	233	0,0791	29,19
	223	0,0241	29,35
	213	0	29,42
	203	0	29,42

Через відсутність даних про паровміст повітря при $t_{кв} < -50^\circ \text{C}$ ($T_{кв} < 223 \text{ K}$), приймаємо в цьому діапазоні температур $d_{н2} = 0$.

За даними таблиці будуємо графік залежності (1). Він наведений на рисунку.



Номограма для визначення кінцевої температури вологого повітря, що розширилося в детандері

Для визначення фактичної кінцевої температури насиченого вологого повітря, що розширилося в детандері, на побудованому графіку знаходимо точку з координатами $T_{\text{вс}} - \Delta T$, для якої різниця

$$T_{\text{вс}} - \Delta T = T_{\text{кк}}.$$

Температура $T_{\text{кк}}$ є відшукуванню.

Для прийнятих вихідних даних $T_{\text{вс}} = 233 \text{ K}$ або $t_{\text{вс}} = -40^\circ \text{ C}$.

Для цієї температури поправка становить близько $\Delta T = 29,19 \text{ K}$.

За розглянутою методикою можна визначити кінцеву температуру вологого повітря для будь-яких довільних вихідних даних.

Висновки

1. Виконаний аналіз вказує на суттєву залежність температури повітря, яке розширилося в детандері пневмoeлектричного кондиціонера, від вологості стиснутого повітря, що надходить до детандера – перевищення температури вологого розширеного повітря над очікуваною температурою сухого повітря при його розширенні може становити десятки градусів.

2. Різниця між фактичною температурою розширеного вологого повітря та очікуваною температурою сухого повітря при його розширенні в детандері залежить від початкових параметрів стиснутого повітря – від його тиску та температури.

Список літератури

1. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 168 с.

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

А.В. Бубліков, канд. техн. наук

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”)

СТВОРЕННЯ БАЗИ ПРАВИЛ ДЛЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВИДОБУВНИМ КОМБАЙНОМ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМАЛЬНИХ ПИТОМИХ ЕНЕРГОВИТРАТ

Розглянуто новий принцип побудови системи автоматичного керування видобувним комбайном на основі нечіткої логіки. Розглядається один з етапів алгоритму нечіткого виводу – формування бази правил нечітких продукцій. Проведено обґрунтування алгоритму прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі видобувного комбайна для системи нечіткого керування. Рішення щодо зміни швидкості подачі приймається на основі ситуативного аналізу з метою забезпечення енергоефективного режиму роботи видобувного комбайна. На основі цього алгоритму сформований перелік правил нечітких продукцій та створена база правил системи нечіткого управління видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат.

Ключові слова: видобувний комбайн, система нечіткого автоматичного керування, енергоефективний режим

Рассмотрен новый принцип построения системы автоматического управления добычным комбайном на основе нечеткой логики. Рассматривается один из этапов алгоритма нечеткого вывода – формирование базы правил нечетких продукций. Проведено обоснование алгоритма принятия решений касательно изменения скорости подачи добычного комбайна для системы нечеткого управления. Решение по изменению скорости подачи принимается на основе ситуационного анализа с целью обеспечения энергоэффективного режима работы добычного комбайна. На основе этого алгоритма сформирован перечень правил нечетких продукций и создана база правил системы нечеткого управления добычным комбайном по критерию минимальных удельных энергозатрат.

Ключевые слова: добычной комбайн, система нечеткого автоматического управления, энергоэффективный режим

The new principle of synthesis of system of automatic control for a coal-combine based on fuzzy logic is considered. One of the phases of the algorithm of fuzzy output is considered - the formation of the base of rules for fuzzy control system. A substantiation of the decision-making algorithm for changing the feed rate of the coal-combine for the fuzzy control system has been carried out. The decision to change the feed rate is taken on the basis of a situational analysis in order to ensure the energy-efficient working mode of the coal-combine. On the basis of this algorithm the base of rules of system of fuzzy control by coal-combine on the criterion of minimum specific energy consumption has been created.

Keywords: coal-combine, system of fuzzy automatic control, the energy-efficient working mode.

Вступ

Вугільний видобувний комбайн сучасного покоління є високотехнологічною гірничою машиною, що характеризується складним характером взаємопов'язаних фізичних процесів в її конструктивних вузлах, а також складним характером взаємодії з зовнішнім середовищем. Це є причиною того, що на сьогодні на видобувних комбайнах відсутні системи керування так званого верхнього рівня, що у режимі реального часу на основі аналізу інформаційних сигналів здатні приймати рішення щодо керування комбайном у різних ситуаціях в автономному режимі замість оператора. У роботах [1,2] запроваджені основи створення таких систем, коли видобувний комбайн розглядається як мехатронна система, а система керування комбайном верхнього рівня фактично є її інформативною компонентою.

За умови аналізу підходу щодо створення системи керування видобувним комбайном високого рівня слід відзначити добре вивчені умови роботи видобувних комбайнів та усі особливості щодо їх керування [3]. Крім того, потрібно врахувати відносно простий алгоритм дій операторів за умови керування комбайнами та досить короткий список ситуацій, які аналізує оператор за умови прийняття рішень [4]. З урахуванням цього, представлення алгоритму керування для системи керування комбайном верхнього рівня у вигляді бази незмінних правил нечітких продукцій є цілком прийнятним.

Постановка задачі

З оглядом на відомий підхід щодо формування бази правил у рамках створення алгоритму нечіткого виводу [5], наразі є актуальною наукова задача встановлення причинно-наслідкових зв'язків за умови

прийняття рішень у різних ситуаціях при керуванні видобувним комбайном з метою створення бази правил для системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат.

Рішення задачі

Аналіз інформації щодо поведінки операторів видобувних комбайнів в умовах експлуатації комбайнів на шахтах України, Казахстану та Росії з тонкими вугільними пластами, яка у значній кількості накопичена за декілька десятиліть [3,4], дозволив виявити певні закономірності у діях операторів щодо ручного режиму управління швидкістю подачі.

Оператор збільшує швидкість подачі видобувного комбайна з підвищеною інтенсивністю, доки не помічає накопичення циркулюючого вугілля у робочому просторі виконавчого органу. Важкі умови роботи оператора та його розташування відносно переднього виконавчого органу не дозволяють йому помітити початкову стадію процесу заштибовки, тому він фіксує значну заштибовку, коли об'єм циркулюючого вугілля займає 50 – 80% робочого об'єму виконавчого органу. Після цього він пригальмовує видобувний комбайн, різко або поступово зменшуючи швидкість подачі до певного значення, та очікує на розштибування виконавчого органу. Після видалення накопиченого вугілля й породи з робочого простору виконавчого органу, оператор знову збільшує швидкість подачі, але вже з меншою інтенсивністю.

Таким чином, відбувається періодичне прискорення та пригальмовування видобувного комбайна з метою запобігання значної заштибовки переднього виконавчого органу комбайна.

Такий алгоритм дій оператора щодо управління швидкістю подачі видобувного комбайна у ручному режимі в умовах обмеженої навантажувальної продуктивності виконавчих органів може бути закладений в основу бази правил для системи нечіткого управління комбайном, але з певною адаптацією з оглядом на можливість системи ідентифікувати процес заштибовки на більш ранній стадії, коли об'єм циркулюючого вугілля не перевищує 30-40% робочого об'єму виконавчого органу.

Розглянемо перевагу фіксації процесу заштибовки виконавчого органу видобувного комбайну на ранній стадії на основі удосконаленої статичної робочої характеристики видобувного комбайна УКД300, що працює в умовах пласта C_5 шахти «Павлоградська» Донецького басейну (рис.1).

Характеристика на рис.1 отримана за допомогою комплексної імітаційної моделі вугільного видобувного комбайна як складної мехатронної системи [2].

Особливість характеристики на рис.1 полягає в тому, що до критичної за заштибовкою виконавчого органу швидкості подачі (2,77 м/хв – точка А на рис.1) середні питомі енерговитрати комбайна залежать в основному від режиму різання матеріалу зубками та визначаються тільки швидкістю подачі комбайна, якщо на часовому інтервалі усереднення суттєво не змінюється опірність вугілля різанню. Середнє значення питомих енерговитрат комбайна для конкретних умов його роботи є незмінною величиною для певного значення швидкості подачі.

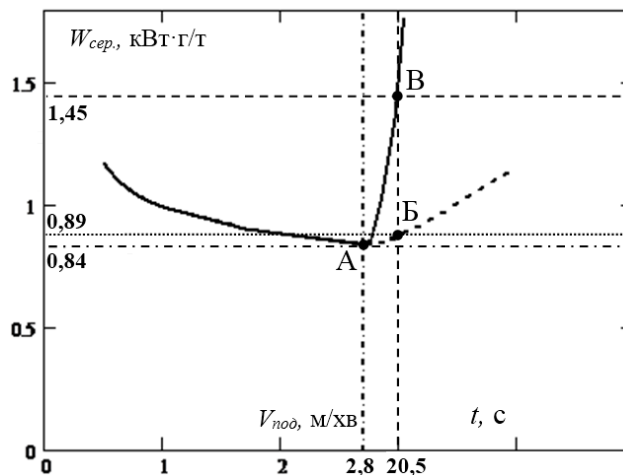


Рис. 1 Статична залежність питомих енерговитрат видобувного комбайна від середньої швидкості подачі (до точки А) та від часу усереднення питомих енерговитрат (після точки А)

Але після початку заштибовки виконавчого органу з кожним його обертанням у робочому просторі органу залишається все більше невивантаженої, надлишкової маси зруйнованого матеріалу, із-за чого збільшується тиск маси матеріалу на поверхні органу та, відповідно, збільшуються питомі енерговитрати

комбайна. Тобто, питомі енерговитрати комбайна починають збільшуватись з часом навіть за умови незмінної швидкості подачі. Тому на рис.1 права частина графіку (після точки А) представлена як залежність питомих енерговитрат від часу їх усереднення за умови незмінної швидкості подачі.

Оскільки в залежності від величини відхилення поточної середньої швидкості подачі від критичної швидкості подачі за заштибовкою маємо різний приріст циркулюючого об'єму зруйнованого матеріалу у робочому просторі органу, інтенсивність збільшення з часом середніх питомих енерговитрат також буде різною. Тому після початку заштибовки виконавчого органу треба розглядати не одну залежність питомих енерговитрат комбайну від часу їх усереднення, а сімейство таких залежностей – для кожної величини відхилення поточної середньої швидкості подачі від критичної швидкості подачі за заштибовкою буде своя залежність.

На рис.1 після точки А представлені дві залежності питомих енерговитрат комбайну від часу їх усереднення, що отримані за умови незмінної швидкості подачі 3,2 м/хв (суцільна лінія на рис.1) та незмінної швидкості подачі 2,9 м/хв (пунктирна лінія на рис.1). Після усереднення питомих енерговитрат комбайна протягом 20,5 с у першому випадку середні питомі енерговитрати становлять 1,45 кВт·г/т за умови об'єму циркулюючого матеріалу біля 80% від робочого об'єму виконавчого органу (точка В на рис.1), а у другому випадку – 0,89 кВт·г/т за умови об'єму циркулюючого матеріалу біля 30% від робочого об'єму виконавчого органу (точка Б на рис.1).

Перший випадок (суцільна лінія на рис.1) відображає управління швидкістю подачі комбайна оператором у ручному режимі, коли він помічає заштибовку виконавчого органу на пізній стадії. При цьому робота комбайна буде протікати з коливанням поточної швидкості подачі навколо критичного значення за заштибовкою з амплітудою приблизно 0,4 м/хв, та з середніми питомими енерговитратами 1,145 кВт·г/т, що на 36,3% більше, ніж за умови роботи комбайна з транспортуванням й навантаженням зруйнованого матеріалу без заштибовки виконавчого органу.

Другий випадок (пунктирна лінія на рис.1) відображає управління швидкістю подачі комбайна в автоматичному режимі з ідентифікацією режиму заштибовки виконавчого органу на ранній стадії. При цьому робота комбайна буде протікати з коливанням поточної швидкості подачі навколо критичного значення за заштибовкою з амплітудою приблизно 0,15 м/хв, та з середніми питомими енерговитратами 0,865 кВт·г/т, що на 3% більше, ніж за умови роботи комбайна з транспортуванням й навантаженням зруйнованого матеріалу без заштибовки виконавчого органу.

Отже, фіксування процесу заштибовки виконавчого органу на ранній стадії призведе до зменшення питомих енерговитрат видобувного комбайна приблизно на 33%. Тому за умови формування бази правил для системи нечіткого управління видобувним комбайном за навантажувальною продуктивністю виконавчих органів треба надавати більш високий пріоритет саме ідентифікації заштибовки органу на ранній стадії.

З оглядом на алгоритм дій оператора щодо управління швидкістю подачі видобувного комбайна у ручному режимі в умовах обмеженої навантажувальної продуктивності виконавчих органів та з урахуванням більш високого пріоритету ідентифікації процесу заштибовки на ранній стадії запропонований алгоритм прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі для системи нечіткого управління комбайном у вигляді орієнтованого графу переходів (рис.2).

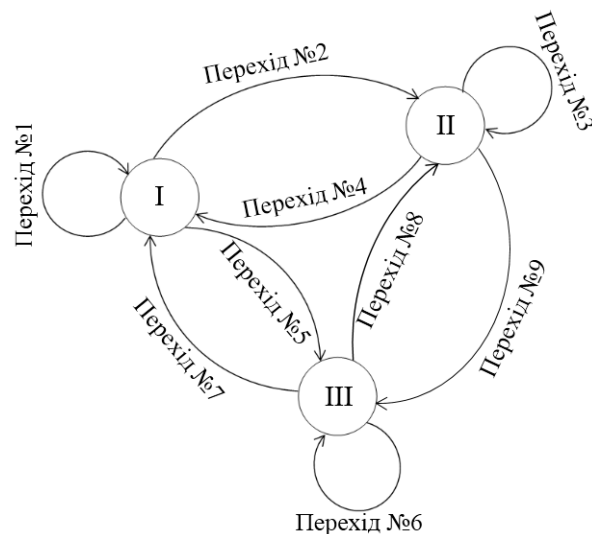


Рис. 2 Алгоритм прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі для системи нечіткого автоматичного управління комбайном

Стан I системи на рис.2 відповідає режиму нормального транспортування й навантаження зруйнованого матеріалу виконавчим органом, стан II та III – режиму, відповідно, значної та незначної заштибовки виконавчого органу видобувного комбайна. Зазначимо, що між переходами із стану в стан на рис.2 існує часова затримка з метою проведення аналізу інформативного сигналу та оцінювання інформативних критеріїв, що визначають умови переходів.

Умовами переходів у запропонованому алгоритмі прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі для системи нечіткого управління комбайном на рис.2 є як результати ідентифікації певних характеристик режиму роботи комбайна за умови стаціонарності статистичних характеристик інформативних критеріїв, так і результати ідентифікації переходів від однієї характеристики режиму роботи до іншої.

Перехід №1 на рис.2 є складним та містить дві частини, що розділені логічною операцією “АБО”. Умовами першої частини є відсутність зміни режиму роботи та перебування минулого разу у стані I. Дією першої частини переходу №1 є значне збільшення швидкості подачі комбайна. Умовами другої частини є перебування у стані I, відсутність зміни режимів роботи та перебування минулого разу у стані II або III. Дією другої частини переходу №1 є незначне збільшення швидкості подачі комбайна. Друга частина переходу №1 введена для забезпечення коливання швидкості подачі навколо критичного за заштибовкою значення з меншою амплітудою з фіксуванням заштибовки виконавчого органу на ранній стадії.

Умовами переходу №2 на рис.2 є перебування у стані I та зміна характеристик режиму роботи “нормальне навантаження → значна заштибовка”, а дією – значне зменшення швидкості подачі.

Перехід №3 на рис.2 здійснюється за умови перебування у стані II та відсутності зміни режиму роботи. При цьому відбувається значне зменшення швидкості подачі.

Перехід №4 відбувається за умови перебування у стані II та зміни характеристик режиму роботи “значна заштибовка → нормальне навантаження”. При цьому відбувається незначне збільшення швидкості подачі.

Умовами переходу №5 на рис.2 є перебування у стані I та зміна характеристик режиму роботи “нормальне навантаження → незначна заштибовка”, а дією – незначне зменшення швидкості подачі.

Перехід №6 на рис.2 здійснюється за умови перебування у стані III та відсутності зміни режиму роботи. При цьому відбувається незначне зменшення швидкості подачі.

Умовами переходу №7 на рис.2 є перебування у стані III та зміна характеристик режиму роботи “незначна заштибовка → нормальне навантаження”, а дією – незначне збільшення швидкості подачі.

Перехід №8 відбувається за умови перебування у стані III та зміни характеристик режиму роботи “незначна заштибовка → значна заштибовка”. При цьому відбувається значне зменшення швидкості подачі.

Умовами переходу №9 на рис.2 є перебування у стані II та зміна характеристик режиму роботи “значна заштибовка → незначна заштибовка”, а дією – незначне зменшення швидкості подачі.

Таким чином, розподіл процесу заштибовки на ранню та пізню стадії протікання з виділенням унікальних закономірностей зміни інформативного сигналу, що притаманні тільки певній стадії процесу заштибовки, дозволяє запропонувати більш енергоефективне та гнучке управління швидкістю подачі комбайна, коли рішення щодо величини зміни швидкості подачі приймається в залежності від того, на якій стадії наразі протікає заштибовка виконавчого органу, а також в залежності від попереднього режиму роботи комбайна. Відзначимо, що у запропонований алгоритм прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі закладена закономірність зменшення інтенсивності збільшення швидкості подачі з наближенням до критичної за заштибовкою швидкості подачі з метою отримати перехід “нормальне навантаження → незначна заштибовка” замість переходу “нормальне навантаження → значна заштибовка”.

На основі запропонованого алгоритму прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі комбайна сформуємо перелік правил нечітких продукцій, що складуть основу бази правил системи нечіткого управління комбайном. Для цього у контексті нечіткої логіки введемо наступні лінгвістичні нечіткі вислови стосовно умов правил нечітких продукцій (при цьому для спрощення у висловах під режимом роботи мається на увазі його характеристика):

- наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження;
- до цього перебували у режимі нормального навантаження;
- наразі перебуваємо у режимі незначної заштибовки;
- до цього перебували у режимі незначної заштибовки;
- наразі перебуваємо у режимі значної заштибовки;
- до цього перебували у режимі значної заштибовки;
- зміна режимів роботи комбайна відсутня;
- ідентифіковано перехід від режиму нормального навантаження до режиму незначної заштибовки;
- ідентифіковано перехід від режиму незначної заштибовки до режиму нормального навантаження;
- ідентифіковано перехід від режиму нормального навантаження до режиму значної заштибовки;
- ідентифіковано перехід від режиму значної заштибовки до режиму нормального навантаження;
- ідентифіковано перехід від режиму незначної заштибовки до режиму значної заштибовки;

- ідентифіковано перехід від режиму значної заштибовки до режиму незначної заштибовки.
Також у контексті нечіткої логіки введемо наступні лінгвістичні нечіткі вислови стосовно висновків правил нечітких продукцій:

- відбувається незначне збільшення швидкості подачі видобувного комбайна;
- відбувається значне збільшення швидкості подачі комбайна;
- відбувається незначне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна;
- відбувається значне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна.

Перелік правил нечітких продукцій для системи нечіткого управління комбайном:

- ЯКЩО “зміна режимів роботи комбайна відсутня” ТА “до цього перебували у режимі нормального навантаження” ТО “відбувається значне збільшення швидкості видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “зміна режимів роботи комбайна відсутня” ТА “до цього перебували у режимі незначної заштибовки” ТА “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження” ТО “відбувається незначне збільшення швидкості видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “зміна режимів роботи комбайна відсутня” ТА “до цього перебували у режимі значної заштибовки” ТА “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження” ТО “відбувається незначне збільшення швидкості видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження” ТА “ідентифіковано перехід від режиму нормального навантаження до режиму значної заштибовки” ТО “відбувається значне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі значної заштибовки” ТА “зміна режимів роботи комбайна відсутня” ТО “відбувається значне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі значної заштибовки” ТА “ідентифіковано перехід від режиму значної заштибовки до режиму нормального навантаження” ТО “відбувається незначне збільшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі нормального навантаження” ТА “ідентифіковано перехід від режиму нормального навантаження до режиму незначної заштибовки” ТО “відбувається незначне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі незначної заштибовки” ТА “зміна режимів роботи комбайна відсутня” ТО “відбувається незначне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі незначної заштибовки” ТА “ідентифіковано перехід від режиму незначної заштибовки до режиму нормального навантаження” ТО “відбувається незначне збільшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі незначної заштибовки” ТА “ідентифіковано перехід від режиму незначної заштибовки до режиму значної заштибовки” ТО “відбувається значне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”;
- ЯКЩО “наразі перебуваємо у режимі значної заштибовки” ТА “ідентифіковано перехід від режиму значної заштибовки до режиму незначної заштибовки” ТО “відбувається незначне зменшення швидкості подачі видобувного комбайна”.

Висновки

Аналіз інформації щодо поведінки операторів видобувних комбайнів в реальних умовах їх експлуатації дозволив запропонувати алгоритм прийняття рішень щодо зміни швидкості подачі для системи нечіткого управління комбайном у вигляді переліку правил нечітких продукцій. При цьому за умови створення бази правил для системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат закладена закономірність зменшення інтенсивності збільшення швидкості подачі з наближенням до критичної за заштибовкою швидкості подачі з метою забезпечення енергоефективного режиму роботи комбайна за рахунок запобігання значної заштибовки робочого органу.

Список літератури

1. Стадник Н. И. 2013. Мехатронный подход при анализе движущихся горных комплексов / Н. И. Стадник // Энергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу. – 2013. – №1(19). – С. 91–98.
2. Бубліков А. В. Експертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи / А. В. Бубліков // Гірничі електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 97. – С. 41 – 48.
3. Топорков А. А. Машинист горных выемочных машин / А. А. Топорков. – М. : Недра, 1991. – 334 с.
4. Казаков С. С. Справочник машиниста угледобывающих комплексов / С. С. Казаков, И. Л. Элькин. – Киев : Техника, 1989. – 165 с.
5. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с. – ISBN 5-94157-087-2

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

*Л.І. Мещераков, д-р техн. наук, Д.В. Ципленков, канд. техн. наук, Я.К. Жарко
(Україна, Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)*

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК

Анотація. Показана структура та функціональні можливості розробленого програмного забезпечення інформаційної системи, що розраховує енергетичну потребу окремої будівлі для визначення основних параметрів сонячних установок, таких як площа сонячних батарей, кількість паралельних та послідовних секцій панелей, ємність накопичувача потужності фотоелектричного фрагмента станції. Розроблена інформаційна система призначена для застосування в області використання нетрадиційних джерел енергії, як в комерційній сфері так і в сфері науки.

Ключові слова: сонячні батареї, енергія споживання, інвертор, інтерфейс програми.

Аннотация. Показаны структура и функциональные возможности разработанного программного обеспечения информационной системы, которая рассчитывает энергетические потребности отдельных строений для определения основных параметров солнечных установок, таких как площадь солнечных батарей, количество параллельных и последовательных секций панелей, емкость накопителя мощности фотоэлектрического фрагмента станции. Разработанная информационная система предназначена для использования в области применения нетрадиционных источников энергии, как в коммерческой сфере, так и в сфере науки.

Ключевые слова: солнечные батареи, энергия потребления, инвертор, интерфейс программы.

Abstract. A structure are shown and functional possibilities of the developed informative system software, which calculates power necessities of separate structures for computation of basic parameters of sun options, such as an area of sun batteries, quantity of parallel and successive sections of panels, capacity of store of power of photo-electric fragment of station. The developed informative system is intended for the use in area of application of traditional energy sources, both in the commercial sphere, and in the field of science.

Keywords: sun batteries, energy of consumption, inverting, interface of the program.

Вступ. Надмірне використання світових запасів корисних копалин для отримання енергії зумовлює пошуки нетрадиційних джерел енергії. Альтернативним джерелом являється сонячна енергія. На сьогодні одним з найосновніших серед нетрадиційних джерел енергії є енергія сонця у формі радіації та світла. За даними фахівців, упродовж одного тижня на земну поверхню від сонця надходить така кількість енергії, яка перевершує енергію світових запасів усіх видів палива. Саме тому розробки в сфері сонячної енергетики являються дуже важливі для сьогодення. І хоча набраний темп розвитку даного напрямку альтернативної енергетики неухильно зростає, все ж сонячна енергетика володіє не тільки достоїнствами, але й недоліками. Велика кількість розрахункових параметрів сонячних батарей спонукає потребу в автоматизованих засобах вирішення даного завдання і тому проблема розрахунку сонячних установок являється актуальною та має широке практичне значення.

Постановка задачі. Основною задачею роботи являється створення програмного забезпечення інформаційної системи, що розраховує енергетичну потребу окремої будівлі для розрахунку найосновніших параметрів сонячних установок: площу сонячних батарей, кількість паралельних та послідовних секцій панелей, ємність накопичувача, потужності фотоелектричного фрагмента станції. У відповідності до проведеного аналізу поставлені основні функціональні задачі перед програмною системою: можливість працювати з системою некваліфікованих користувачів, що мають наміри придбати сонячну станцію за допомогою розрахунків; можливість порівнювати дані, які залежать від розташування сонячної панелі, її куту нахилу; та відповідне прискорення часу роботи підприємств, що займаються поширенням сонячних станцій.

Основний зміст роботи. Згідно алгоритму визначення основних параметрів сонячних установок спочатку здійснюється визначення профілю навантаження, споживаної енергії та необхідної потужності інвертора. Дані вводяться з клавіатури користувачем в інтерфейсі програми. При цьому визначається перелік всіх навантажень змінного струму із зазначенням їх номінальної потужності та числа годин роботи в добу на весь період роботи. Дані заносяться в таблицю 1. Помножається потужність на число годин роботи для кожного навантаження і записується енергія споживання за добу також в таблицю 1. В подальшому рахується профіль навантаження і добова потужність споживання змінного струму разом включених навантажень за весь період експлуатації енергоустановки, що теж заносяться в таблицю 1. Для профілю споживання енергії вибирається найбільше значення сумарної потужності разом працюю-

Енергозбереження та енергоефективність

чих навантажень. Ця величина приймається як номінальна потужність, яку повинен забезпечити інвертор. З технічних характеристик навантажень вибирається навантаження з найбільшою піковою потужністю в момент включення та вибирається конкретний інвертор, що забезпечує прийнятну номінальну потужність і допустиму пікову потужність на вході та з паспортних даних вибираються необхідні змінна напруга на виході та діапазон вхідних постійних струмів і напруг. Сумарна величина енергії споживання за весь період роботи являє собою енергію, яку має виробити сонячна панель без урахування власних втрат та всіх втрат енергосистеми.

Таблиця 1

Добові навантаження змінного струму і профіль потреби енергії

#	Навантаження змінного струму	Потужність в Вт	Годин за добу	Вт*год/добу	Дні роботи						Енергія Вт*год
					1		2		...k		Профіль
					Вт	Вт*год	Вт	Вт*год	Вт	Вт*год	Вт*год
1	Навантаження 1	A Вт	B годин	A*B							
2	Навантаження 2	B Вт	Г годин	B*Г							
.. n	Навантаження 3	N Вт	T годин	N*T							
Всього					Σ1 Вт		Σ2 Вт		Σk Вт		Σ за весь час роботи

Для побудови графіків інсоляції під певні широту і довготу місцевості необхідно з багаторічної бази даних NASA [1, 2, 3] витягнути дані інсоляції та побудувати профіль середньодобового навантаження. Визначення оптимального кута нахилу фотоелектричної панелі здійснюється через необхідність перерахування для профілю надходження щодобового коефіцієнту перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальною на похилу поверхню. Результати заносяться в таблицю 2.

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) \cdot R_n + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

де E_p - середньомісячна денна кількість розсіяного сонячного випромінювання, що надходить на горизонтальну поверхню; E_p/E - середньомісячна денна частка розсіяного (дифузійного) сонячного випромінювання; R_n - середньомісячний коефіцієнт перерахунку прямого сонячного випромінювання з горизонтальною на похилу поверхню; β - кут нахилу поверхні сонячної батареї до горизонту; ρ - коефіцієнт відображення (альbedo) поверхні Землі та навколишніх тіл, зазвичай приймається рівним 0,7 для зими і 0,2 для літа.

Таблиця 2.

Таблиця R_n

№	Кут нахилу β , градуси	Номер дня			
		1	2	k-1	k
1	0	R_n			
2	5				
3	10				
...	...				
17	85				
18	90				R_n

В подальшому розраховується коефіцієнт перерахунку з горизонтальної площини на похилу з південною орієнтацією для сумарного сонячного випромінювання. Результати заносяться в таблицю

$$R_n = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{zn} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{zn} \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_z + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta}, \quad (2)$$

де φ - широта місцевості, град; β - кут нахилу сонячної батареї до горизонту, град; δ - нахил Сонця (кут між лінією, що з'єднує центри Землі та Сонця, і її проекцією на площину екватора) в середній день місяця, град:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (3)$$

n - порядковий номер дня, відрахований від 1 січня (номер середнього розрахункового дня для кожного місяця року); ω_z - годинний кут заходу (сходу) Сонця для горизонтальної поверхні:

$$\omega_z = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta), \quad (4)$$

ω_{zn} - годинний кут заходу Сонця для похилій поверхні з південною орієнтацією:

$$\omega_{zn} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg} \delta]. \quad (5)$$

Після розрахунку середньодобової сумарної кількості сонячної енергії, що надходить на похилу поверхню результати заносяться в таблицю:

$$E_n = R \cdot E. \quad (6)$$

З стовпчика «Сума, Вт*годин» таблиці треба вибрати найбільше значення енергії та відповідне значення кута нахилу цієї енергії. Сформоване значення кута відповідає оптимальному нахилу фотоелектричної панелі.

Розрахунок площі поверхні фотоелектричної панелі достатньої падаючої сонячної енергії: визначаються через уточнення щодобової питомої сонячної енергії для похилій поверхні. Для цього енергію кожної доби з бази даних NASA необхідно помножити на відношення сумарної енергії з таблиці (під конкретний обраний кут нахилу панелей) до сумарної енергії, що потрапляла на землю за весь рік спостережень. Результат заноситься в рядок "Профіль сумарний при певному нахилі поверхні". Отриманий результат треба поділити на ККД фотоелектричного модуля - це і визначає площу фотоелектричної панелі.

Загальна кількість фотомодулів розраховується через визначення сумарної енергії профілю потреби за весь період роботи з таблиці та поділити на профіль сумарний при оптимальному нахилу поверхні. Результат розділити додатково на 2. Чим і визначається загальна кількість фотомодулів.

Кількість паралельних та послідовних секцій розраховується по етапам. На першому треба розділити номінальну вхідну напругу інвертора на номінальну напругу фотомодуля з прийнятим раніше ККД. Так визначається кількість фотоелектричних модулів у послідовній секції. На другому етапі необхідно розділити загальну кількість фотоелектричних модулів отриманих раніш на кількість фотоелектричних модулів в послідовній секції, що покаже кількість паралельних секцій.

Ємності накопичувача енергії (акумулятора) розраховуються через поділ повної сумарної потреби енергії на номінальну напругу накопичувача, при цьому урахувати температурний коефіцієнт та коефіцієнт погіршення погодних умов. А розрахунок коефіцієнту температури показує в якій місцевості знаходиться накопичувач енергії (будинок, вулиця, гараж). Коефіцієнт погодних умов вказує кількість не сонячних днів, зимою ця кількість в Україні досягаю в середньому 16 днів.

Опис користувацького інтерфейсу. Блок-схема алгоритму програми зображено на рис. 1. Початкове вікно інформаційної системи Solar energy calculation має вигляд зображений на рис. 2. Зліва вводяться данні споживачів, їх потужність та назву, правіше – часові інтервали. Для вводу даних одного споживача енергії необхідно заповнити потужність та назву електроприладу. Часові проміжки вводяться окремо (початок – кінець), при необхідності можливо додати проміжки часу відповідно кнопкою. Результат вводу даних споживачів енергії зображено на рис. 3. Діаграма часових даних споживачів будується по потужності (вісь Y) та по часовим проміжкам (вісь X) і має вигляд зображений на рис. 4. Далі переходять на пункт «сонячна інсоляція», де обирається один з обласних центрів України (місце знаходження, що потребує сонячні батареї). Також можливо порівняти дані інсоляції для різного проміжку ча-

су за 2017 рік. Наприклад, з січня і до вересня місяця. Відповідно візуалізуються графіки, що мають вигляд який представлено на рис. 5.

Користувачський інтерфейс дає можливість наочно побачити розрахунки коефіцієнтів перерахунку та енергії, що зображуються в вигляді таблиць як на рис. 6 та рис. 7. Форма інтерфейсу кінцевого розрахунку всіх параметрів представлено на рис. 8. Після вводу всіх необхідних даних треба натиснути кнопку «провести розрахунок». Результат програми, що видає повні данні по сонячній станції та акумулятора зображені на рис. 9. Вихід з програми виконується стандартною кнопкою «exit».

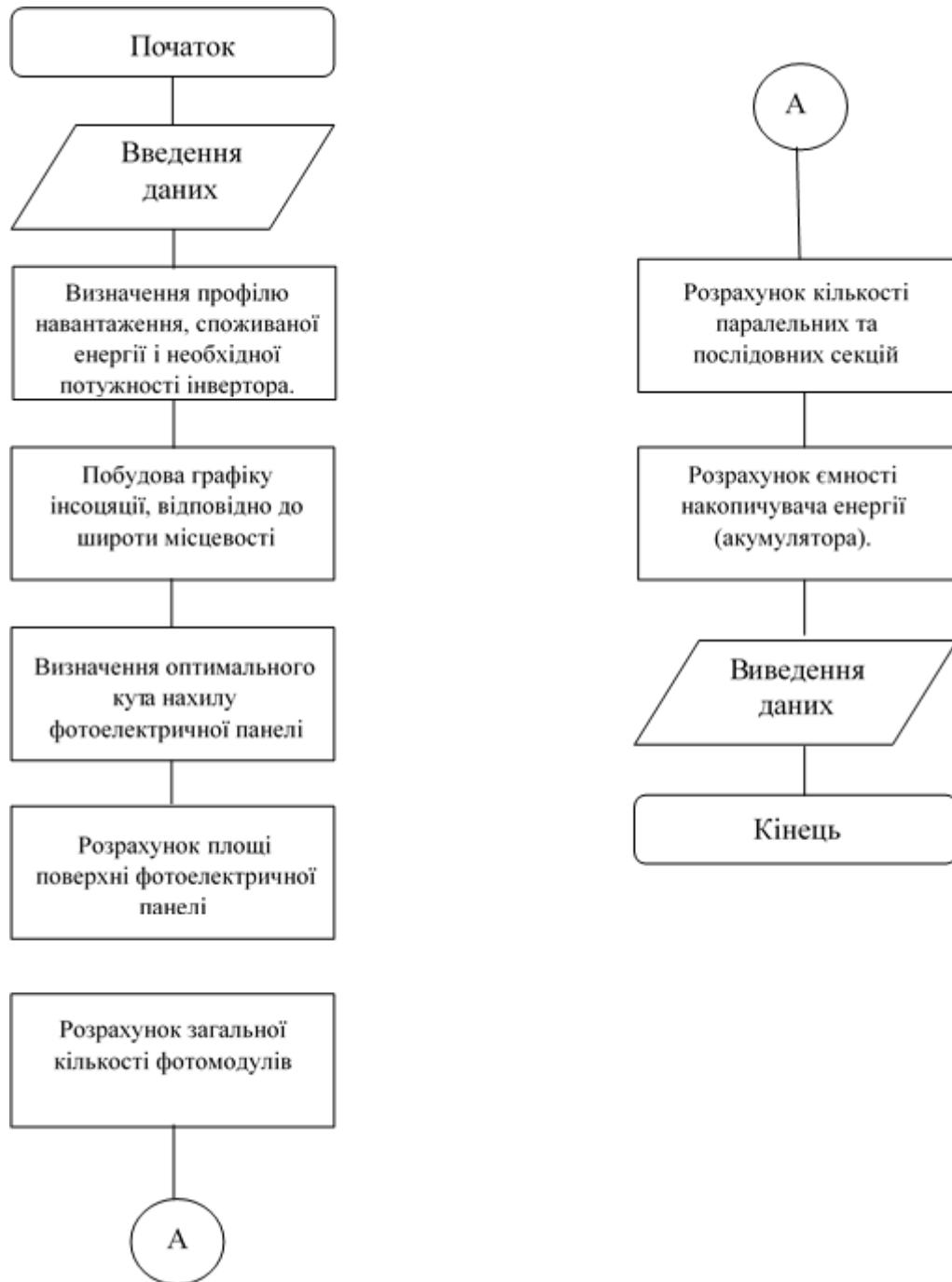


Рис. 1. Блок-схема алгоритму програмного забезпечення

Енергозбереження та енергоефективність

Solar energy calculation

Діаграми навантаж **Солнечная инсоляция** Коэффициент пересчета Rn Коэффициент пересчета R Расчет Eп Конечный расчет

Ввод: Добавить: + Сумма Вт*час/сутки:

Потребитель

Мощность

С По

	Потребитель	Мощность в Вт	Часов в сутки	Вт * час / сутки
*				

Рис.2. Початкове вікно програми Solar energy calculation

Solar energy calculation

Діаграми навантаж Солнечная инсоляция Коэффициент пересчета Rn Коэффициент пересчета R Расчет Eп Конечный расчет

Ввод: Добавить: + Сумма Вт*час/сутки: 14099

Потребитель

Мощность

С По

	Потребитель	Мощность в Вт	Часов в сутки	Вт * час / сутки
▶	Холодильник	100	23:50:00	2383
	Чайник	2000	00:15:00	500
	Телевизор	100	06:45:00	675
	Машинка	2500	01:00:00	2500
	Микроволно...	2000	00:15:00	500
	Компьютер	50	04:10:00	208
	Колонка Вод.	1500	04:25:00	6625
	Фен	500	01:25:00	708
*				

Рис. 3. Основні дані споживачів енергії

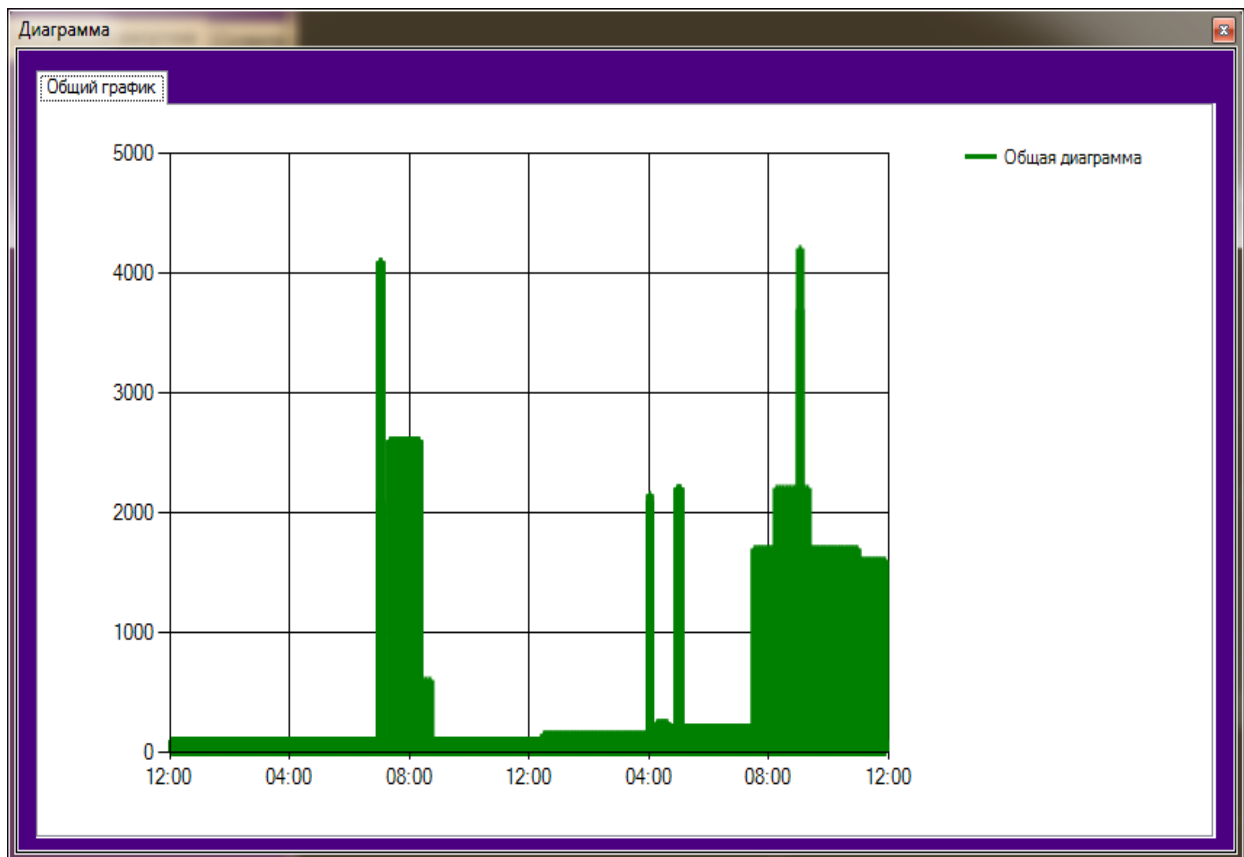


Рис. 4. Діаграма часових даних споживачів

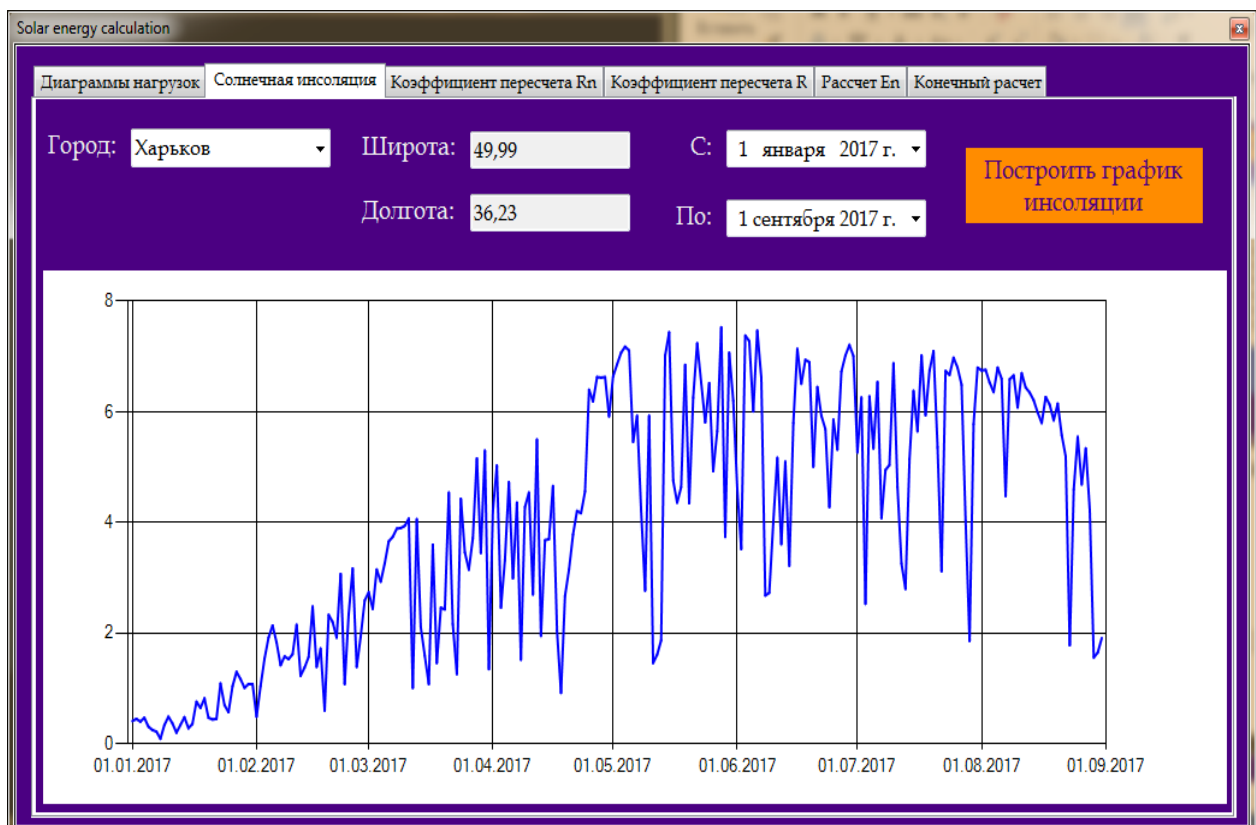


Рис. 5. Дані інсоляції для різного проміжку часу

Solar energy calculation

Диаграммы нагрузок Солнечная инсоляция Коэффициент пересчета Rn Коэффициент пересчета R Расчет En Конечный расчет

Rn

Угол Наклона "beta"	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...	1,100...
10	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...	1,191...
15	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...	1,274...
20	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...	1,347...
25	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...
30	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...
35	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...
40	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...
45	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...
50	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...	1,555...
55	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...	1,549...
60	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...	1,531...
65	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...	1,502...
70	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...	1,461...
75	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...	1,409...
80	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...	1,346...

Рис. 6. Коефіцієнти перерахунку енергії

Solar energy calculation

Диаграммы нагрузокСолнечная инсоляцияКоэффициент пересчета RnКоэффициент пересчета RРасчет EnКонечный расчет

En

Оптимальный наклон фотоэлектрической панели: 15

	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291
▶	1470	1080	2310	2800	910	1110	2350	1830	1000	2520	3050	1500	1210	1010	550	1750	990	2640
...	1466...	1077...	2304...	2793...	907,9...	1107...	2344...	1825...	997,7...	2514...	3043...	1496...	1207...	1007...	548,7...	1746...	987,8...	2634...
...	1460...	1073...	2295...	2782...	904,3...	1103...	2335...	1818...	993,7...	2504...	3031...	1490...	1202...	1003...	546,5...	1739...	983,8...	2623...
...	1450...	1065...	2279...	2763...	898,0...	1095...	2319...	1806...	986,8...	2486...	3010...	1480...	1194...	996,7...	542,7...	1727...	977,0...	2605...
...	1435...	1054...	2255...	2734...	888,6...	1083...	2294...	1786...	976,5...	2460...	2978...	1464...	1181...	986,2...	537,0...	1708...	966,7...	2577...
...	1414...	1039...	2222...	2694...	875,6...	1068...	2261...	1760...	962,2...	2424...	2934...	1443...	1164...	971,8...	529,2...	1683...	952,6...	2540...
...	1387...	1019...	2180...	2643...	859,0...	1047...	2218...	1727...	944,0...	2378...	2879...	1416...	1142...	953,4...	519,2...	1652...	934,5...	2492...
...	1354...	995,4...	2129...	2580...	838,7...	1023...	2165...	1686...	921,6...	2322...	2811...	1382...	1115...	930,8...	506,9...	1612...	912,4...	2433...
...	1316...	966,9...	2068...	2506...	814,7...	993,8...	2104...	1638...	895,3...	2256...	2730...	1342...	1083...	904,2...	492,4...	1566...	886,3...	2363...
...	1271...	934,2...	1998...	2422...	787,2...	960,2...	2032...	1583...	865,0...	2179...	2638...	1297...	1046...	873,7...	475,7...	1513...	856,4...	2283...
...	1221...	897,5...	1919...	2326...	756,2...	922,4...	1952...	1520...	831,0...	2094...	2534...	1246...	1005...	839,3...	457,0...	1454...	822,7...	2193...
...	1166...	857,0...	1833...	2221...	722,1...	880,8...	1864...	1452...	793,5...	1999...	2420...	1190...	960,1...	801,4...	436,4...	1388...	785,5...	2094...
...	1106...	813,0...	1738...	2107...	685,0...	835,5...	1769...	1377...	752,7...	1897...	2296...	1129...	910,8...	760,3...	414,0...	1317...	745,2...	1987...
...	1042...	765,8...	1638...	1985...	645,3...	787,1...	1666...	1297...	709,1...	1787...	2162...	1063...	858,0...	716,2...	390,0...	1241...	702,0...	1872...
...	974,5...	716,0...	1531...	1856...	603,3...	735,9...	1558...	1213...	662,9...	1670...	2022...	994,4...	802,2...	669,6...	364,6...	1160...	656,3...	1750...
...	903,6...	663,8...	1419...	1721...	559,3...	682,3...	1444...	1124...	614,7...	1549...	1874...	922,0...	743,7...	620,8...	338,0...	1075...	608,5...	1622...
...	830,2...	609,9...	1304...	1581...	513,9...	626,9...	1327...	1033...	564,8...	1423...	1722...	847,2...	683,4...	570,4...	310,6...	988,4...	559,1...	1491...

Рис. 7. Енергія з урахуванням поправок

Рис. 8. Повні вихідні данні по сонячній станції та акумулятору

Висновки. Створене програмне забезпечення інформаційної системи в повній мірі забезпечує розрахунок енергетичної потреби окремої будівлі для визначення основних параметрів сонячних установок: площу сонячних батарей, кількість паралельних та послідовних секцій панелей, ємність накопичувача, потужності фотоелектричного фрагмента станції. Базовими функціями програми являються: побудова діаграм споживачів електроенергії (побутових приладів); порівняння даних сонячної радіації по різних обласних центрах України; наочне подання проміжних розрахункових параметрів з яких можна робити окремі висновки. При цьому були виконані вимоги підприємств скоротити час розрахунку, забезпечити безпеку вихідних даних та скоротити персонал при необхідності. Даний продукт є дуже корисний для підприємств розробки батарей та акумуляторів, адже вони одразу зможуть розрахувати потрібні данні, будучи впевненими в правильності вихідних даних. Вихідна інформація може використовуватися в сфері купівлі продажу спеціалізованих організацій чи організацій, що займаються установкою сонячних батарей.

Список використаної літератури

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підруч. /С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 230 с.
2. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы и солнечные батареи / А.П. Кашкаров. – Москва, 2011. –313 с.
3. Шкрабец Ф.П. Электротехника, основы электроники и микропроцессорной техники: уч. пособие / Ф.П Шкрабец, Д.В. Ципленков, Ю.В Куваев, О.Б Иванов, В.И. Панченко, А.А Колб, – Д.: НГУ, 2004. – 515 с.
4. Півняк Г.Г. Основы вітроенергетики. Підручник [Текст] / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
5. Прокопеня И.Н. Применение нетрадиционных источников в теплоснабжение / И.Н. Прокопеня, А.А. Матявин – Минск: Беларусский Национальный технический университет, 2016. – 153 с.
6. “Global Wind Energy Council (GWEC) Statistics,” Global Wind Energy Council Web Site,2007–14p.

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

А.М. Муха, д-р. тех. наук, Д.В. Устименко, канд. техн. наук, О.Ю. Балійчук, канд. техн. наук, О.Я. Куриленко

(Україна, Дніпро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна)

ПОРІВНЯННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ СИЛЬНОСТРУМОВИХ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ, ЯК КРИТЕРІЙ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. Показано, що на підставі результатів стендових випробувань сильнострумових ковзних контактів електрорухомого складу залізниць постає можливість визначення типів накладок, які забезпечують відносно низькі втрати потужності у системі "Контактний провід-накладка струмоприймача". Проведені тепловізійні дослідження системи контактний провід-накладка струмоприймача, при встановленні різних типів накладок, але однакових початкових умовах - струм навантаження, швидкість ковзання та сила притискання, дозволяють кількісно оцінити енергоефективність ковзного контакту та визначити тип накладки, який забезпечує мінімальні втрати енергії. Крім того, отримані результати, дозволяють наочно підтвердити ефективність та необхідність проведення стендових випробувань, як обов'язкового елементу процесу прийняття рішення, щодо впровадження накладок в експлуатацію.

Ключові слова: стендові випробування, тепловізійні дослідження, ковзний контакт, контактний провід, накладка струмоприймача, перегрів.

Аннотация. Показано, что на основании результатов стендовых испытаний сильнотоочных скользящих контактов электроподвижного состава железных дорог возникает возможность определения типов накладок, которые обеспечивают относительно низкие потери мощности в системе "Контактный провод-накладка токоприемника". Проведенные тепловизионные исследования системы контактний провод-накладка токоприемника, при установке различных типов накладок, но одинаковых начальных условиях - ток нагрузки, скорость скольжения и сила прижима, позволяют количественно оценить энергоэффективность скользящего контакта и определить тип накладок, который обеспечивает минимальные потери энергии. Кроме того, полученные результаты позволяют наглядно подтвердить эффективность и необходимость проведения стендовых испытаний, как обязательного элемента процесса принятия решения, по внедрению накладок в эксплуатацию.

Ключевые слова: стендовые испытания, тепловизионные исследования, скользящий контакт, контактний провід, накладка токоприемника, перегрев.

Abstract. It is shown that, based on the results of bench tests of high-current sliding contacts of electric rolling stock of railways, it is possible to determine the types of linings that provide relatively low power losses in the system "Contact wire-pad of current collector". Thermal imaging studies of the contact wire-lining system of the current collector, when installing various types of lining, but the same initial conditions - load current, slip speed and pressing force, allow us to quantify the energy efficiency of the sliding contact and determine the type of lining that provides minimal energy loss. In addition, the results obtained make it possible to visually confirm the effectiveness and necessity of carrying out bench tests, as an obligatory element of the decision-making process, for the introduction of overlays into operation.

Keywords: bench tests, thermal imaging studies, sliding contact, contact wire, current collector pad, overheating.

Вступ

Безумовно, будь-який електричний контакт, особливо ковзні електричні контакти, визначають показники надійної роботи електроенергетичної, електромеханічної або електротехнічної системи у цілому. Для електрорухомого складу залізниць, на сучасному етапі його розвитку, постає задача збільшення швидкості руху, що вимагає відповідного збільшення і потужності, що споживається з контактної мережі. Але зі збільшенням струмового навантаження контакту та швидкості ковзання струмоприймаючої накладки по контактному проводу, як відомо, різко погіршуються умови струмознімання, значно збільшуються комутаційні втрати електричної енергії, внаслідок нестабільно значення перехідного опору системи. Вирішити проблему стабільності контактному перехідного опору можливо за рахунок збільшення сили притискання струмоприймача до контактного проводу, збільшення площі притискання у контакті та інші засоби, але всі вони лімітуються властивостями матеріалу накладок струмоприймача. Кожен з типів

накладок струмоприймачів виготовляється за своєю, як правило унікальною технологією, що надає накладкам особливих якостей, відповідних переваг та недоліків, тому єдиним економічно обґрунтованим шляхом визначення раціонального типу накладок, залишаються порівняльні стендові випробування, які дозволять рекомендувати до подальших експлуатаційних випробувань ті типи накладок, які відповідають чинним вимогам, зокрема ГОСТ 32680-2014 "Токоъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия" [1].

Аналіз існуючих досягнень та публікацій

Проблематикою ковзного контакту в системах електричної тяги присвячено значна кількість робіт, серед яких "класичні труди", які присвячені як правило дослідженню графітних, вуглецевих накладок [2-6], так і більш сучасних матеріалів [7-9], серед яких окремим класом виділяємо композитні матеріали, наприклад "Романіт-УВЛШ" [10, 11]. Більшість представлених досліджень пов'язані з трибологічними аспектами ковзного контакту, та їх покращенню за рахунок домішок до вихідних матеріалів, технології виготовлення та інших факторів, які більше відносяться до питань фізико-хімічних властивостей речовин та технології їх виготовлення. Автори "класичних" праць приділяли увагу питанню розсіювання теплової енергії у місці контакту, але це призводило до створенню великої кількості моделей, які базувалися на масивах значної кількості величин, які мали імовірнісний характер. На сучасному етапі розвитку безконтактних технологій контролю теплових процесів, зокрема за допомогою тепловізорів, з'явилась можливість впровадження створення узагальнених критеріїв, які базуються саме на реальних експериментальних значеннях. Однією з таких величин, є температура у місці ковзного контакту, яку пов'язують, як правило, зі значенням контактного перехідного опору, але значення ці залежить від сили натиснення у місці контакту, швидкості ковзання і безпосередньо від значення сили струму, тобто це є нелінійна, імовірнісна величина. Виходячи з вище представленого доцільним є проводити стендові випробування накладок струмоприймачів з різних матеріалів, в однакових початкових умовах, та на підставі отриманих значень температурних та інших нормативних показників рекомендувати, чи не рекомендувати проводити експлуатаційні випробування накладок струмоприймачів у реальних умовах на електрорухомому складі.

Мета досліджень

Метою досліджень є аналіз порівняльних результатів, щодо значень температури у місці ковзного контакту, під час проведення стендових випробувань накладок струмоприймачів різних типів, з подальшим визначення накладок, які б забезпечували найменші втрати потужності, під час передачі електричної енергії до споживача, тобто характеризуються найкращими показниками енергоефективності.

Основна частина

Стендові випробування проводилися на базі галузевої науково-дослідної лабораторії "Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу" Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна з використанням спеціалізованого стенду з дослідження зносу контактного проводу (рис.1). Початкові умови: струм ковзного контакту 300 А, сила притискання накладки 40 ± 8 Н, кількість проходів 10 тис., час випробувань 50 хв.



Рис. 1. Загальний вигляд стенду з дослідження зносу контактного проводу.

Для визначення рівня теплових втрат у зоні ковзного контакту під час випробувань було застосовано безконтактний метод з використання тепловізора "Testo 875" (рис.2). Отримані під час досліджень різних типів накладок теплограми (рис. 3...12) у подальшому аналізувались за допомогою відповідного програмного забезпечення, з метою встановлення максимального значення температури у місці ковзного контакту. Дослідження проводились для усталених теплових режимів.

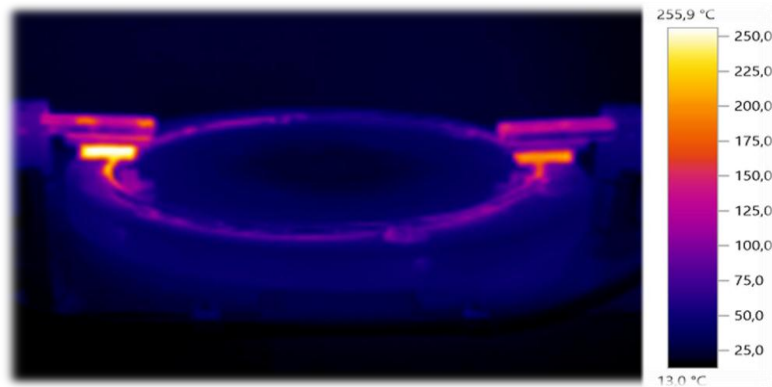


Рис. 2. Теплограма випробувального стенду під час випробувань.

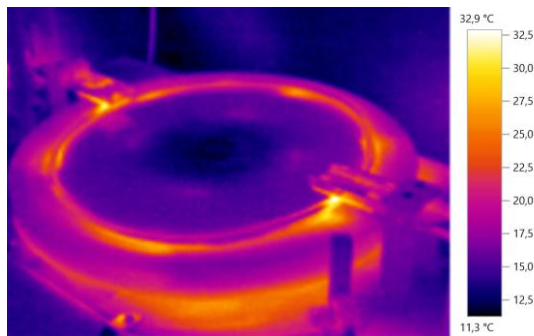


Рис.3. Теплограма зразка №1.

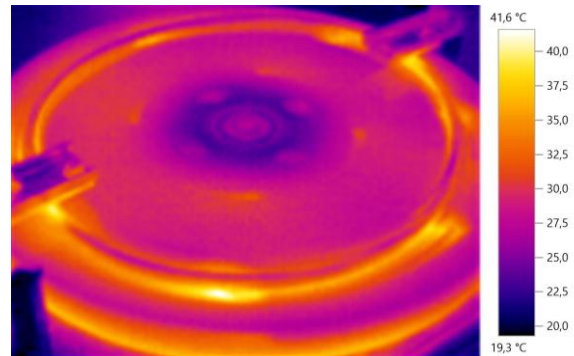


Рис.4. Теплограма зразка №2.

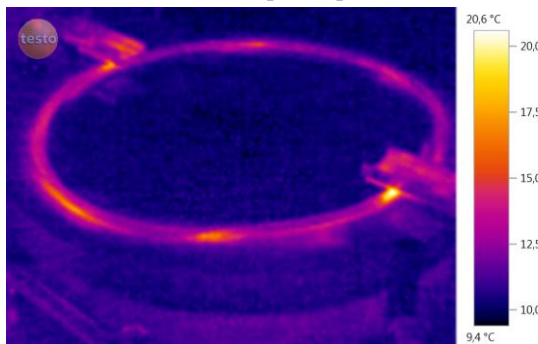


Рис.5. Теплограма зразка №3.

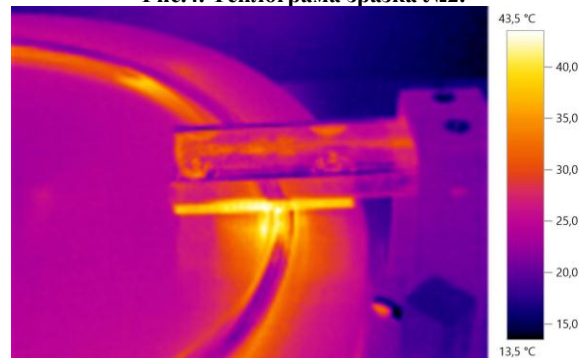


Рис.6. Теплограма зразка №4.

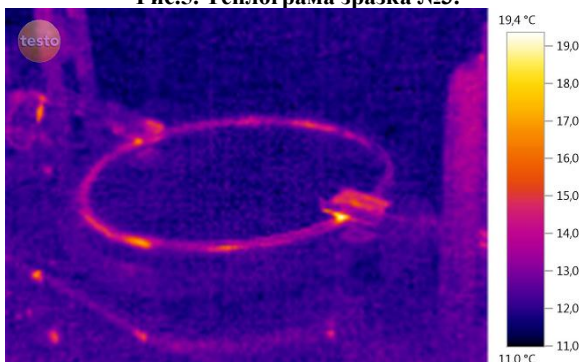


Рис.8. Теплограма зразка №6.

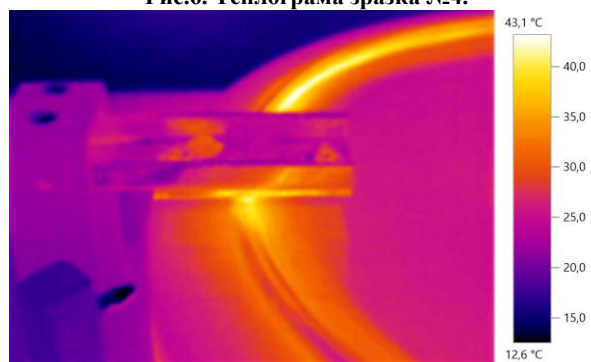


Рис.7. Теплограма зразка №5.

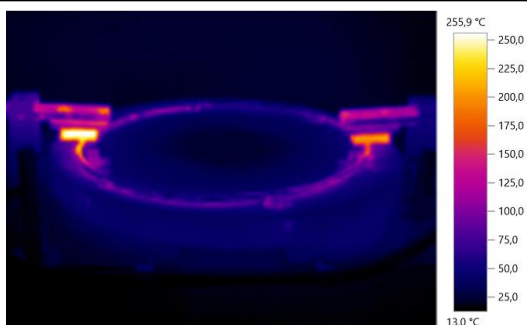


Рис.9. Теплограма зразка №7.

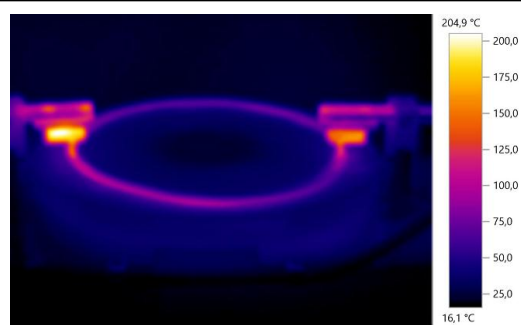


Рис.10. Теплограма зразка №8.

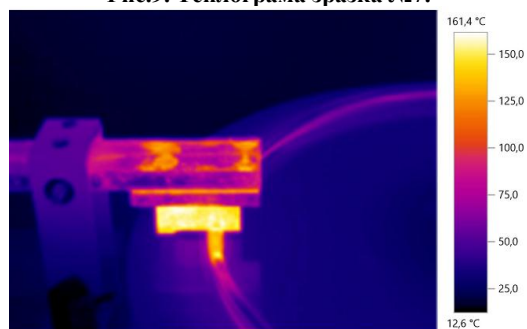


Рис.11. Теплограма зразка №9.

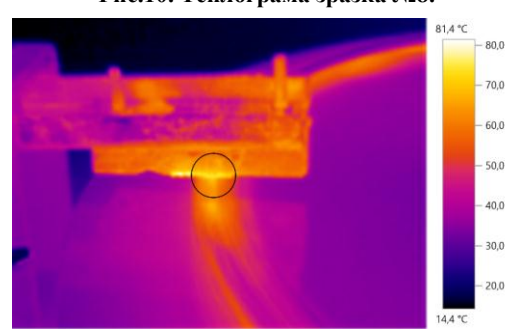


Рис.12. Теплограма зразка №10.

При дослідженнях зразків №4 та №6 випробувальний стенд заклинило, тобто випробування були припинені, тому у подальшому ці зразки не перевірялись оскільки не виконуються вимоги ГОСТ 32680-2014. При дослідженнях зразків №5 розпочались інтенсивні вібрації зразків накладок, тому випробування припинено передчасно.

Гістограма максимальних значень температур в зоні ковзного контакту різних зразків накладок представлені на рис.13.

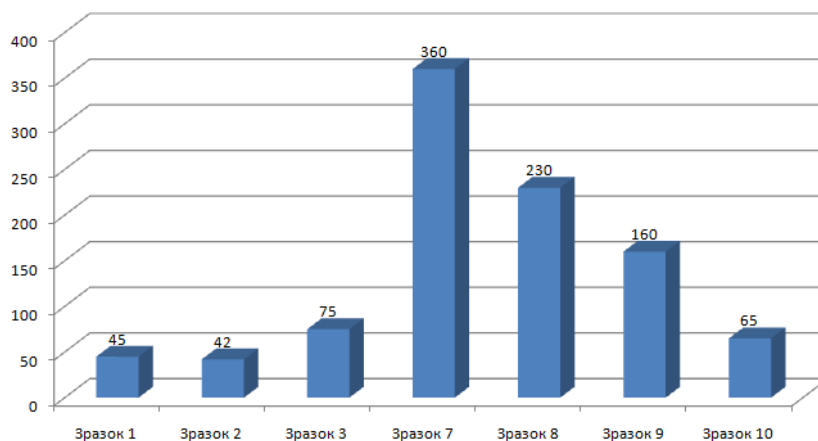


Рис. 13. Максимальні температури в зоні ковзного контакту.

Виходячи з твердження, що теплові втрати в зоні ковзного контакту не виконують корисної роботи, а лише нагрівають контактний провід та накладку, тобто ці втрати безповоротні та знижують енергоефективність системи, приймаємо, що зразок при дослідження якого зафіксовано найнижчу температуру є найбільш енергоефективним. Такий зразок на 100% реалізує свій енергетичний потенціал, тобто втрати потужності на нагрівання серед досліджених зразків є мінімальними. Таким зразком є накладки з матеріалу "Романіт-УВЛШ", які обрані з партії з твердістю поверхні 70...74 HRB. Енергоефективність інших зразків представимо у відносних одиницях, використовуючи пропорції. Результати представимо на рис.14.

Як бачимо з рис.14 зразок 7 (вугільно-графітні накладки) споживає більше на 100-12=88% енергії, яку витрачає на власне нагрівання, він має найгірші показники енергоефективності. Наближеним до найкращого показника, є зразок №1 - накладки з матеріалу "Романіт-УВЛШ", які обрані з партії з твердістю поверхні 34...49 HRB.

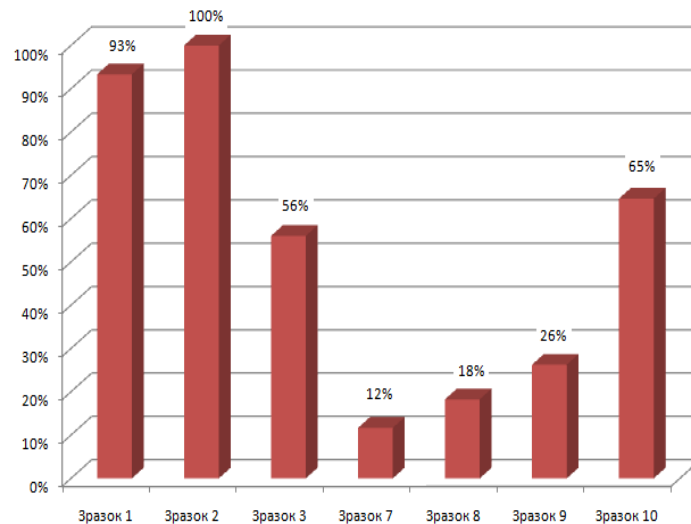


Рис.14. Енергоефективність різних типів накладок

Висновки

1. Автори пропонують на етапі стендових випробувань, контролювати значення температури у місці ковзного контакту, визначати зразки накладок, які мають мінімальне значення цієї температури і тим самим рекомендувати зразки які забезпечують передачу енергії д споживача (транспортного засобу) з мінімальними втратами, тим самим підвищуючи коефіцієнт корисної дії електротранспортного засобу.

2. Серед досліджених зразків мінімальні втрати енергії при передачі енергії за допомогою ковзного контакту, тобто мають найбільшу енергоефективність, забезпечують накладки з матеріалу "Романіт-УВЛШ", а найгірші показники мають класичні вугільно-графітні накладки (витрати енергії на власні потреби більше на 88% ніж у базового зразку).

Список літератури

1. ГОСТ 32680-2014 "Токоъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия". Межгосударственный стандарт.
2. Большаков, Ю. Л. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка» / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6(60), С. 35–44.
3. Большаков, Ю. Л. Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4(58), С. 57–70.
4. Горобец, В.Л. Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава / В.Л. Горобец, Н.А. Бабяк, А.Я. Ярмач, А.М. Бондарев // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – №1(218), С. 297-302.
5. Устименко, Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях / Д. В. Устименко // Електрифікація транспорту. – 2016. – №12, С.71-75.
6. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин В.В. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника. 1986.
7. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system / G. Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao [et al.] // Journal of Modern Transportation. – June 2016. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 132–138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1.
8. Гершман И.С. Токоъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта / И.С. Гершман, Н.В. Миронос, М.А. Мельник, Е.И. Гершман, – М.: Вестник ВНИИЖТ, Вип. 4, 2012. – с. 3-10.
9. Берент, В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта [Текст] В.Я. Берент. – М.: Интекст. 2005. – 408 с.
10. Тартаковский, Э. Д. Токоъемные вставки из нового фуллерено-углеродного материала «Романит-УВЛШ» [Текст] / Э.Д. Тартаковский, С.М. Романов, Д.С. Романов // Залізничний транспорт України. - 2007. - № 3. - С. 41-44.
11. Пат. на корисну модель 109205 Україна, МПК7 B22F 7/00, B22F 9/00, C22C 1/04, F16C 33/04. Матеріал струмознімального елемента РОМАНІТ-УВЛШ / Романов С.М., Давлекутаєв Р.М., Давлекутаєв А.А., Себієв Т.Х., Романов Д.С.; заявник і власник Романов С.М., Давлекутаєв Р.М., Давлекутаєв А.А., Себієв Т.Х., Романов Д.С.. – № u201603430; заяв. 04.04.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

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

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Азюковський Олександр Олександрович	Канд. техн. наук, професор кафедри електропривода Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	19
Алексєєв Михайло Олександрович	Д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Програмного забезпечення комп'ютерних систем» Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	40
Алексєєв Олексій Михайлович	Канд. техн. наук, доцент кафедри системного аналізу і управління Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	40
Балийчук Олексій Юрійович	Канд. техн. наук, завідувач лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	116
Бердник Владивлав Валерійович	Науковий співробітник Ройтлінгенського технічного університету, Німеччина	10
Бобров Олексій Володимирович	Канд. техн. наук, викладач електротехнічних та спеціальних дисциплін Колледжу ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара, м. Дніпро, Україна	50
Бубліков Андрій Вікторович	Канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	103
Волков Володимир Олександрович	Докторант кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	52
Жарко Ярослав Костянтинович	Магістр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	108
Жежеленко Ігор Володимирович	Д-р техн. наук, професор кафедри електрифікації промислових виробництв Державного вищого навчального закладу «Приазовський технічний університет», м. Маріуполь, Україна	25
Житник Микола Явтухович	Науковий співробітник відділу систем керування транспортними засобами Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	73
Заславський Олександр Михайлович	Канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Казачковський Микола Миколайович	Канд. техн. наук, завідувач кафедри "Електропривод" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	69
Карпенко Олег Вікторович	Асистент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Ковальов Олександр Робертович	Старший викладач кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	10

Відомості про авторів

Козлов Володимир Петрович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	30
Кольцов Ігор Борисович	Старший викладач кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	10
Кошеленко Євген Валерійович	Асистент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	3; 95
Кузнецова Аліса Віталіївна	Студентка 2 курсу спеціальності Системний аналіз факультету прикладної математики Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна	85
Кузнецов Віталій Вадимович	Канд. техн. наук, доцент каф. електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	85
Кузнецов Дмитро Олександрович	Магістр кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	3
Кузнецова Євгенія Валеріївна	Старший викладач кафедри гуманітарних, фундаментальних та загально - інженерних дисциплін Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	85
Куриленко Олена Яківна	Старший викладач кафедри "Електротехніка та електромеханіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	116
Левченко Руслана Юріївна	Інженер 2 кат. відділу систем керування транспортними засобами Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	73
Лисенко Олександра Генадіївна	Канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	25
Луценко Іван Миколайович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	3; 95
Манко Геннадій Іванович	Канд. Техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно – інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету» м. Дніпро, Україна	35
Мартиненко Андрій Анатолійович	Старший викладач кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	30
Мещеряков Леонід Іванович	Д-р техн. наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	108
Моня Андрій Григорович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Вища математика" Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	46

Відомості про авторів

Муха Андрій Миколайович	Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Електротехніка та електромеханіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	116
Папаїка Юрій Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	25
Плаксін Сергій Вікторович	Д-р фіз.-мат. наук, ст. н. с., завідувач відділу систем керування транспортними засобами Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	73
Проценко Станіслав Миколайович	Доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Романовський Олександр Михайлович	Канд. техн. наук, Директор Коледжу ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара, м. Дніпро, Україна	50
Соснін Костянтин Володимирович	Канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Суворкін Олександр Олександрович	Аспірант кафедри відновлюваних джерел енергії Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	14
Тараненко Юрій Карлович	Д-р. техн. наук, професор кафедри «Комп'ютерно - інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету», м. Дніпро, Україна	35
Титова Олена Василівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету», м. Дніпро, Україна	35
Ткачов Віктор Васильович	Д-р техн. наук, професор завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Трифонов Володимир Данилович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	10
Трифонов Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, директор з перспективного розвитку ТОВ МБК "Сінергія", Україна	10
Устименко Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри "Електротехніка та електромеханіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	116
Холоменюк Михайло Васильович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гірничої механіки" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	99
Циган Павло Сергійович	Аспірант кафедри "Системи електропостачання" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	3

Відомості про авторів

Ципленков Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	14, 108
Чернецький Євгеній Вячеславович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету», м. Дніпро, Україна	35
Чумаков Лев Дмитрович	Д-р. техн. наук, професор кафедри «Комп'ютерно - інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету», м. Дніпро, Україна	35
Швачка Олександр Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегровані технології і метрології» ДВНЗ «Український державного хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна	35
Шевцова Ольга Сергіївна	Асистент кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	30
Шевченко Владислав Іванович	Доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78
Шедловський Ігор Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпро, Україна	78

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Приймаються статті українською, російською або будь-якою іноземною мовою.

Стаття повинна бути оформлена з чітким виділенням структурних частин:

- індекс УДК;
- повний список авторів із зазначенням в дужках повної назви організації;
- назва статті;
- анотація на трьох мовах (українська, російська, англійська);
- ключові слова трьома мовами (українська, російська, англійська);
- основний текст статті з назвами структурних частин, наприклад: Вступ, Постановка задачі дослідження, Рішення задачі, ..., Висновки; і т.п.
- список джерел посилань
- відомості про авторів українською мовою.

Параметри сторінки: формат А4, всі поля по 2,5 см; колонтитули – по 1,6 см.

УДК - шрифт Times New Roman 10 pt, відступ першого рядка - немає, міжрядковий інтервал одинарний; вирівнювання – зліва

А.А. Іванов, д-р (канд.) техн. наук – шрифт Times New Roman 10 pt, напівжирний курсив (Країна, Місто, Назва організації) - шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - зліва.

**ЗАГОЛОВОК СТАТТІ: ШРИФТ TIMES NEW ROMAN 11 PT,
НАПІВЖИРНИЙ, ПРОПИСНІ БУКВИ, ВІДСТУПИ ДО: 1 СТРОКА,
ВІДСТУПИ ПІСЛЯ: 1 СТРОКА, ВИРІВНЮВАННЯ - ПО ЦЕНТРУ**

Анотація подається об'ємом 75-100 слів. Повинна структуруватися за логікою опису результатів в статті і мати такі елементи: цілі і завдання роботи, результати, їх наукова новизна, практичне значення. Анотація не повинна повторювати назву статті. Анотація повинна бути представлена на 3-х мовах (українська, російська, англійська) за таким зразком: Шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, відступ першого рядка 0,75 см, вирівнювання - по ширині, розстановка переносів автоматична.

Основний текст статті повинен бути набраний в форматі файлу текстового редактора Microsoft Word: Основний текст: шрифт Times New Roman 10 pt, відступ першого рядка - 0,75 см, вирівнювання - по ширині. Стиль: Звичайний. Розстановка переносів автоматична, ширина зони переносів слів - 0,5 см.

Основні підзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, напівжирний, малі літери, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - зліва, до підзаголовка залишати один порожній рядок.

Другорядні підзаголовки: шрифт Times New Roman 10 pt, курсив, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - зліва, до підзаголовка залишати один порожній рядок

Таблиці розташовувати в абзаці зі стилем: Звичайний. Номер таблиці: стиль Звичайний, вирівнювання по правому краю. Одиниці виміру, бажано в "шапці" таблиці, а не в самій таблиці. Таблиця повинна бути розташована по можливості ближче до першої посиланням на неї.

Таблиця 1. шрифт Times New Roman 10 pt,
**Короткий заголовок таблиці: шрифт Times New Roman 9 pt,
напівжирний, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - по центру**

Тема всередині таблиці (шапка): шрифт Times New Roman 9 pt, напівжирний, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - по центру. До і після заголовка відступати рядок не треба.	Довжина, м
Текст таблиці: шрифт Times New Roman 9 pt, відступ першого рядка - немає, вирівнювання - по лівому краю. До і після тексту всередині таблиці відступати рядок не треба	250

Формули: вирівнювання - праворуч. Нумерація формул - в круглих дужках. До і після формул залишати один порожній рядок. Між формулами залишати порожній рядок не треба

$$c^2 = a^2 + b^2. \quad (1)$$

Вимоги до формул:

Розмір символів в формулах: Звичайний - 10 pt.; Великий індекс - 8 pt.; Дрібний індекс - 7 pt.; Великий символ - 12 pt.; Дрібний символ - 8 пунктів.

Стиль формул: Функція - похилий; Змінна - похилий; Дужки - прямі; Цифри - прямі.

Всі позначення - латинськими символами !!! Кирилиця в формулах - неприпустима !!!

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Рисунки. На все рисунки повинні бути посилання в тексті, пронумеровані арабськими цифрами (1, 2, 3 ..) в порядку їх згадування в тексті (наприклад: рис. 1, а). Рисунки в тексті розташовуються по центру. Написи на рисунках повинні бути виконані, по можливості, шрифтом розміру не менш як 10 або 9 pt. Товщина ліній на рисунках повинна бути не менше 0,75 pt.

Підписуочний підпис (Рис. 1 Схема...) обов'язковий: шрифт Times New Roman 9 pt, напівжирний відступ першого рядка - немає, вирівнювання - по центру.

Після підпису ілюстрації відступати один рядок.

Рисунки **повинні бути згруповані** та вставлені в текст. Фотографії - вставлені в текст статті як об'єкт. Обтікання - "в тексті". Допускаються кольорові зображення.

Список джерел посилань

(Шрифт Times New Roman 9 pt, напівжирний, вирівнювання по центру, до і після заголовка відступати рядок)

Посилання на літературу (джерела) повинні слідувати в порядку їх появи в тексті, номер посилання в квадратних дужках повинен слідувати за будь-яким твердженням, положенням або за прізвищем автора.

Список джерел посилань повинен відповідати ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Вирівнювання по лівому краю. Нумерація - автоматична. шрифт Times New Roman 9 pt.

Відомості про авторів:

Відомості про авторів надаються окремим файлом в довільній формі. Обов'язково вони повинні включати в себе повні прізвище, ім'я та по батькові (українською мовою), науковий ступінь, вчене звання, посада, місце роботи (в т.ч. назву кафедри, відділу), контактні телефони, e-mail (якщо є) .

Порядок надання матеріалу до редколегії

1. **Умови публікації:** статті російською або українською мовами - **50 грн**; іноземною мовою - **40 грн**. за кожен сторінку оформленого відповідно до вимог тексту. Оплата - при здачі матеріалу до друку.
2. **Обсяг статті** від 4 до 10 сторінок формату А4. Стаття повинна бути оформлена відповідно до вищезазначених вимог. **Заповнення останньої сторінки - не менше 80%.**
3. **Стаття** повинна бути представлена **в друкованому вигляді в 1 примірнику** і в електронному вигляді на будь-якому носії або електронною поштою за адресою:

shkrabetsF@nmu.org.ua або **Tsyplenkov.d.v@nmu.one**

4. Матеріали приймаються тільки **при наявності експертного висновку, рецензії та заяви на публікацію статті.**
5. **Рішення** про опублікування статті **приймає** редакційна колегія.
6. Прийняті до друку матеріали авторам не повертаються.
7. **У разі невідповідності зазначеним вимогам, матеріал статті до публікації не приймається.**

Редколегія збірника "Гірничя електромеханіка та автоматика"

49005, Україна, м Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, Національний технічний університет університет "Дніпровська політехніка", кафедра "Відновлювальні джерела енергії".

Сайт: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php>

У науково-технічному збірнику **"Гірничя електромеханіка та автоматика"** публікуються роботи за наступними напрямками: електрифікація гірничих робіт; електрообладнання гірничої промисловості; електромеханіка; енергозбереження та енергоефективність; математичне моделювання та автоматизація виробничих процесів і проектних робіт гірничої промисловості; контроль технологічних процесів; механізація гірничого виробництва; гірничі машини та комплекси; технічні прилади забезпечення рудничної аерології і охорони праці; наукова і виробнича реклама.

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**

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.	Длина, м
Текст таблицы: шрифт Times New Roman 9 pt, отступ первой строки – нет, выравнивание – по левому краю. До и после текста внутри таблицы отступать строку не надо	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 формулам:

Размер символов в формулах: Обычный – 10 пт.; Крупный индекс – 8 пт.; Мелкий индекс – 7 пт.; Крупный символ – 12 пт.; Мелкий символ – 8 пт.

Стиль формул: Функция – наклонный; Переменная – наклонный; Скобки – прямые; Цифры – прямые.

Все обозначения – латинскими символами!!! Кириллица в формулах – недопустима!!!

Рисунки. На все рисунки должны иметься ссылки в тексте, пронумерованные арабскими цифрами (1, 2, 3..) в порядке их упоминания в тексте (например: рис. 1, а). Рисунки в тексте располагаются по центру. Надписи на рисунках должны быть выполнены, по возможности, шрифтом размера не менее 10 или 9 pt. Толщина линий на рисунках должна быть не менее 0,75 pt.

Подрисуночная подпись (Рис. 1 Схема...) обязательна: шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный отступ первой строки – нет, выравнивание – по центру.

После подрисуночной подписи отступать одну строку.

Рисунки - должны быть **сгруппированы и вставлены в текст**. Фотографии – вставлены в текст статьи как объект. Обтекание – "в тексте". Допускаются цветные изображения.

Ссылки на литературу должны следовать в порядке их появления в тексте, номер ссылки в квадратных скобках должен следовать за каким-либо утверждением, положением или за фамилией автора.

Список использованных источников

(шрифт Times New Roman 9 pt, полужирный, выравнивание по центру, до и после заголовка отступать строку)

Список литературы должен соответствовать ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Выравнивание по левому краю. Нумерация – автоматическая. шрифт Times New Roman 9 pt.

Сведения об авторах:

Сведения об авторах предоставляются отдельным файлом в произвольной форме. **Обязательно** они должны включать в себя полные фамилию, имя и отчество (**на украинском языке**), ученную степень, ученное звание, должность, место работы (в т.ч. название кафедры, отдела), контактные телефоны, *e-mail* (если есть).

Порядок предоставления материала в редколлегию

1. **Условия публикации:** статьи на русском или украинском языках - **50 грн**; на иностранном языке – **40 грн**. за каждую страницу оформленного в соответствии с требованиями текста. Оплата - при сдаче материала в печать.
2. **Объем статьи** от 4 до 10 страниц формата А4. Статья должна быть оформлена в соответствии с вышеуказанными требованиями. **Заполнение последней страницы – не менее 80 %.**
3. Статья должна быть представлена в печатном виде в 1 экземпляре и в электронном виде на любом носителе или по электронной почте по адресу:
shkrabetsF@nmu.org.ua или Tsyplenkov.d.v@nmu.one
4. Материалы принимаются только при наличии **экспертного заключения, рецензии и заявления на публикацию статьи.**
5. Решение об опубликовании статьи принимает редакционная коллегия.
6. Принятые в печать материалы авторам **не возвращаются.**
7. В случае несоответствия указанным требованиям, материал статьи к публикации **не принимается.**

Редколлегия сборника "Горная электромеханика и автоматика"

49005, Украина, г. Днепрпетровск, просп. К.Маркса, 19, Национальный горный университет, кафедра "Возобновляемые источники энергии".

Сайт: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php>

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.*

REQUIREMENTS TO THE DESIGN OF ARTICLES

The articles should be written in Ukrainian, Russian or any foreign language.

The article should contain the following elements:

- index UDC;
- a full list of authors, the full name of the organization (in brackets);
- article title;
- abstract and keywords in three languages (Russian, Ukrainian, English);
- the main text of the paper with the names of the elements, for example: Introduction, Statement of the Problem, Solution, ..., Conclusions, etc.;
- A list references;
- information about the authors in Ukrainian.

Page specification: format A4, all margins - 2,5 cm; footers –1,6 cm.

UDC (font Times New Roman, left-aligned, 10 pt, indentation of the first line - no, single line spacing)

A.A Ivanov, Doctor of Engineering Sciences (font Times New Roman, left-aligned, bold, italic 10 pt),
(Country, City, Name of organization) – font Times New Roman left-aligned, 10 pt, italics, single line spaced.

TITLE OF AN ARTICLE (FONT TIMES NEW ROMAN 11 PT, CENTERED, BOLD, CAPITAL LETTERS., SPACE BEFORE: 1 LINE, SPACE AFTER 1 LINE)

The abstract should consist of 75-100 words. It must be structured according to the logics of results description in the ARTICLE and contain the following elements: goals and objectives, results, their scientific novelty, practical significance. The abstract mustn't repeat the title of the article. The abstract should be submitted in 3 languages (Russian, Ukrainian, English), formatting guidelines: font Times New Roman 10 pt, italics, first line indentation 0.75 cm, justification according to width, automatic hyphenation.

The main text of the article should be typed in text editor file format Microsoft Word: Main text: font Times New Roman 10 pt, first line indentation 0.75 cm, justification according to width. Style: Normal. Automatic hyphenation, the width of the hyphenation zone is 0.5 cm.

The main sub-headings: font Times New Roman left-aligned, 10 pt, bold, lower case, indentation of the first line - no, before the subtitle one blank line left.

Secondary headings: font Times New Roman left-aligned, 10 pt, italics, indentation of the first line - no, before the subtitle one line left blank.

Tables should be placed in a paragraph with the following style: Normal. Table number: style is Normal, right-aligned. Measurement units should rather be provided in the heading of the table, than in the table. The table must be located as close as possible to the first reference on it.

Table 1. font Times New Roman 10 pt,
Summary table headline: font Times New Roman, centered 9 pt,
Bold, indentation of the first line - no

Title in the table (heading): font Times New Roman, centered 9 pt, bold, indentation of the first line - no Before and after the header line it is not necessary to retreat.	Length, M
The text of the table: font Times New Roman, left aligned 9 pt, indentation of the first line - not. It is not necessary to leave a line before and after hedging.	250

Formula: right aligned. Formulae number - in parentheses. Before and after formulae leave one line blank. In the formulae it is not necessary leave a blank line.

$$c^2 = a^2 + b^2 . \quad (1)$$

Formulae formatting:

The size of the symbols in formulas: Normal – 10 pt.; Large index – 8 pt.; Small index - 7 pt. ; large symbol - 12 pt. ; Small character - 8 pt.

Formula Style: Function - sloping; Variable - sloping; Brackets - straight; The figures - straight.

All designations are in Latin characters !!! Cyrillic is non acceptable in the formulas !!!

Figures. All Figures must have references in the text in Arabic numbers (1, 2, 3..) in order of their appearance in the text (for example: Fig. 1, *a*). The drawings in the text located as centered. Inscriptions in the figures must be, if possible, in font size not less than 10 or 9 pt. The thickness of the lines in the pictures should not be less than 0,75 pt.

Caption (Fig. 1. Scheme ...) obligatory: font Times New Roman centered 9 pt, bold, indentation of the first line - no. After a caption leave one line blank.

Figures should be grouped together and inserted into the text. Photos are inserted in the text as an object. Wrapping is "in the text". Color images allowed.

References should follow in the order they appear in the text, the reference number in square brackets should follow any statement or position of the author's name.

List of sources used

(font Times New Roman centered 9 pt, bold, before and after heading a blank line left)

References must comply with SSOU(state standards of Ukraine)GOST 7.1:2006. Font Times New Roman, left aligned 9 pt. Numbering - Auto. .

Information about authors:

Information about authors is provided in a separate file in any form. It is obvious that it includes the surname, name and patronymic (in Ukrainian), a degree, academic title, position, affiliation (including name of the department), contact phone numbers, *e-mail*.

The submission procedure

1. Terms of publication: article in Russian and Ukrainian languages 50 UAH fee; in a foreign language 40 UAH fee per each page issued in accordance with the requirements to the text. Payment is made when submitting material for publication.

2. The articles length is from 4 to 10 A4 pages. Article shall be formatted in accordance to the above mentioned requirements. **Filling of the last page is at least 80 %.**

3. The article must be submitted in printed form in one copy and in electronic form, using any medium or by e-mail, the following address:

shkrabetsF@nmu.org.ua or Tsyplenkov.d.v@nmu.org.ua

4. Materials will only be accepted if there are an expert statement, review and application for publishing of an article (blank file is available for download on the website <http://gea.nmu.org.ua/> or <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php> section "Requirements for publication").

5. The decision on the publication of the article is taken by the editorial board.

6. Submitted printed papers are not returned.

7. In the case of non-specified requirements, paper is not accepted for publication.

The editorial board of the book "Mining Electrical and Automation":

State HEI "National Mining University", Department "Renewable energy sources"

19, D. Yavornitskiy Ave., Dnipro, Ukraine, 49005.

Site: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php>

Fields: electrification of mining operations; mining electrical equipment; electromechanics; math modeling, automation of production processes and mining industry design works; control of technological processes; mechanization of mining production; mining machines and systems; technical devices to ensure the mine aerology, fire safety and occupational safety in the mining industry; issues of energy conservation and efficiency; scientific and industrial advertising.

З М І С Т

Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

І.М. Луценко, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган, Д.О. Кузнецов. Проблеми ефективності роботи розподільчих електричних мереж 6-10 кВ міст	3
В.Д.Трифонов, Д.В.Трифонов, О.Р.Ковальов, І.Б.Кольцов, В.В.Бердник. Економіко-математична модель ефективності функціонування підземних електричних мереж вугільних шахт	10
Д.В. Цыпленков, А.А. Суворкин, А.Ю. Жеребцов, В.Б. Спирса, П.В. Руснак, Е.С. Шкаран, И.В. Назаренко Проблемы электрических систем с распределенной генерацией	14
О.О. Азюковський. Визначення струму стікання з підземного трубопроводу з врахуванням основних джерел збурень для підземних металевих комунікацій	19
І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка, О.Г. Лисенко. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності	25

ЧАСТИНА II. АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

В. П. Козлов, А. А. Мартыненко, О.С. Шевцова. Некоторые аспекты байесовского подхода в линейном регрессионном анализе	30
А.И. Швачка, Е.В. Титова, Ю.К. Тараненко, Г.И. Манко, Е.В. Чернецкий, Л.Д. Чумаков. Розробка нового підходу к аналізу динаміки автоматической системи регулювання	35
А.М. Алексеев, М.А. Алексеев. Экспериментальное исследование методов контроля вибропараметров объектов управления с использованием нейронных сетей	40

ЧАСТИНА III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

A.G. Monia. Long braking of the mine locomotive on bias at the pulsing brake moment	46
А.В. Бобров, А.М. Романовский, А.Ю. Жеребцов, В.Б. Спирса, П.В. Руснак, Е.С. Шкаран, И.В. Назаренко Анализ результатов моделирования электромеханической системы "электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть"	50
В.А. Волков. Энергосберегающее управление тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая	52
Н.Н. Казачковский. Сопоставление законов частотного управления на примере преобразователя частоты Altivar 21	69

ЧАСТИНА IV. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. В. Плаксин. Моделирование процесса отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя при низких уровнях освещенности	73
О.М. Заславський, В.В.Ткачов, С.М.Проценко, І.А.Шедловський, К.В.Соснін, В.І.Шевченко, О.В.Карпенко. Дослідження роботи експериментального зразку системи децентралізованого керування обігрівачами з використанням теорії колективної поведінки за умови різних ситуацій при обігріві	78

В.В. Кузнецов, Е.В. Кузнецова, А.В. Кузнецова, Д.В. Галушко, М.А. Лобко, Д.А Чернишов, О.А. Ровенский. Оценка влияния качества электроэнергии на эффективность электропотребления	85
І.М. Луценко, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган. Оцінка енергетичної ефективності огорожувачих конструкцій будівель	95
М.В. Холоменюк. Термодинамічний аналіз внутрішніх процесів у детандері пересувного пневмoeлектричного кондиціонера	99
А.В. Бубліков. Створення бази правил для системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат	103
Л.І. Мещеряков, Д.В. Ципленков, Я.К. Жарко. Програмне забезпечення інформаційної системи розрахунку основних параметрів сонячних установок	108
А.М. Муха, Д.В. Устименко, О.Ю. Балійчук, О.Я. Куриленко Порівняння теплових показників сильноточових ковзних контактів електротранспорту, як критерій їх енергоефективності	116
Відомості про авторів	121
Вимоги до оформлення статей	125

Науково-технічний збірник

Гірнича електромеханіка та автоматика

Випуск 100

Технічний редактор
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 11.12.18. Формат 30х42/4. Папір Captain.
Ризографія. Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. .
Тираж 70 пр.

ISSN 0201-7814

Видано
у Державному Вищому навчальному закладі
"Національний гірничий університет»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від
11.06.2004. 49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.