ISSN 0201-7814

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА та АВТОМАТИКА

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Заснований у 1965 р.

101

Дніпро
2019

Засновник – Національний гірничий університет

Рекомендовано до видання вченою радою Національного технічного університету "Дніпровська політехніка"

(протокол № 10 від 27 червня 2019 р.)

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 Електротехніки, національний технічний університет "Дніпровська політехніка",
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна
Тел: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Факс: (056) 370-13-92
E-mail: ShcrabetsF@D nmu.org.ua; tsyplenkov.d.v@nmu.one
Сайт: http://gea.nmu.org.ua

Editorial office adress

Department of Electrical Engineering, Dnipro University of Technology,
19 D. Yavornytsky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine
Tel: (056) 370-13-92, (056) 373-07-42. Fax: (056) 370-13-92
E-mail: ShcrabetsF@nmu.org.ua; tsyplenkov.d.v@nmu.one
Website: http://gea.nmu.org.ua

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

УДК 621.365

І.В. Жежеленко, д-р. техн. наук
(Україна, м. Маріуполь, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський технічний університет»)
Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, канд. техн. наук, К.С. Родна
(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ЗАСТОСУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ГРАФІКІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЗАДАЧАХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. *У статті вперше запропоновано використовувати індивідуальні графіки вищих гармонік, які генеруються перетворювачами енергії (випрямлячі, перетворювачі частоти) для оцінки «індивідуального сліду» перешкоди в системі електропостачання гірничого підприємства. В результаті моделювання та практичного експерименту були розроблені наукові основи розрахунку даних показників, які будуть враховуватися при розрахунках додаткових втрат при несинусоїдальності напруги для забезпечення енергетичної ефективності роботи підприємств.*

Проаналізовано типові схемні рішення систем електропостачання вугільних шахт з потужними нелінійними навантаженнями, з огляду на характерні вимоги до надійності і якості електропостачання споживачів при підземному видобутку вугілля.

Виконано розрахунок параметрів типових і еквівалентних схем заміщення гірничих підприємств, на основі яких виконано моделювання і отримані взаємозв'язки показників надійності і якості електропостачання при децентралізованій системі живлення.

Ключові слова: *якість напруги, система електропостачання, надійність електрообладнання, графіки вищих гармонік, втрати електроенергії.*

Аннотация. *В статье впервые предложено использовать индивидуальные графики высших гармоник, которые генерируются преобразователями энергии (выпрямители, преобразователи частоты) для оценки «индивидуального следа» помехи в системе электроснабжения горного предприятия. В результате моделирования и практического эксперимента были разработаны научные основы расчета данных показателей, который будут учитываться при расчетах дополнительных потерь при несинусоидальности напряжения для обеспечения энергетической эффективности работы предприятий.*

Проанализированы типовые схемные решения систем электроснабжения угольных шахт с мощными нелинейными нагрузками, учитывая характерные требования к надежности и качеству электроснабжения потребителей при подземной добыче угля.

Выполнен расчет параметров типовых и эквивалентных схем замещения горных предприятий, на основе которых выполнено моделирование и получены взаимосвязи показателей надежности и качества электроснабжения при децентрализованной системе питания.

Ключевые слова: *качество напряжения, система электроснабжения, нажность электрооборудования, графики высших гармоник, потери электроэнергии.*

Abstract. *The article first proposes to use individual graphs of higher harmonics that are generated by energy converters (rectifiers, frequency converters) to assess the "individual trace" interference in the power supply system of a mining enterprise. As a result of modeling and practical experiment, the scientific basis for the calculation of these indicators was developed, which will be taken into account when calculating the additional losses at non-sinusoidal voltage to ensure the energy efficiency of enterprises.*

Analyzed typical circuit solutions for power supply systems of coal mines with powerful non-linear loads, taking into account the typical requirements for the reliability and quality of power supply for consumers in underground coal mining.

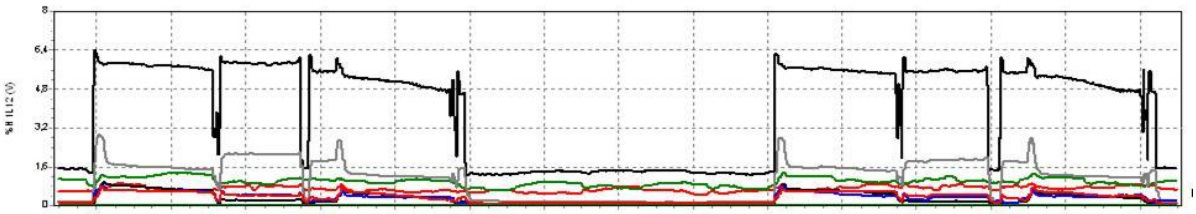
The parameters of the standard and equivalent replacement schemes of mining enterprises were calculated, on the basis of which modeling was performed and the interrelationships of the indicators of reliability and quality of power supply were obtained under a decentralized power supply system.

Keywords: *quality of voltage, electrical supply system, electrical equipment reliability, graphics of higher harmonic, loss of electric energy.*

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями

За останні роки розвитку науково-технічного прогресу відбулися значні зміни у формуванні електричних режимів приймачів електричної енергії. Всі види виробництва все частіше застосовують електричну енергію в перетвореному вигляді навіть на технологічних ланках, де раніше в цьому не було потреби. Так, у металургійній та машинобудівній промисловості, частка використання перетвореної енергії досягає 100% [1-4]. Тобто, як свідчать дослідження відомих авторів [2, 5, 6, 10], масово використовується частотно-керований електропривод для управління частотою обертання АД, а також пристрої плавного пуску. На підприємствах гірничо-видобувної промисловості за останнє десятиліття з'явились потужні перетворювачі частоти на вентиляторах головного провітрювання (ВГП), підйомних машина (ПМ), видобувних комбайнах та транспортних системах. Все це призвело до системного погіршення якості напруги та порушило електромагнітну сумісність систем електропостачання підприємств та енергетичної мережі [1, 5, 8]. Для дослідження електричних режимів систем електропостачання вугільних шахт при вказаних особливостях та розробки наукових основ забезпечення енергетично-ефективних режимів їх роботи виконаємо аналіз характеристик типових електроприймачів шахти з моделюванням показників електромагнітної сумісності.

Глибокий аналіз характеру пульсацій при роботі випрямляча показав залежність рівнів вищих гармонік струму та напруги на шинах підстанції від циклічних операцій підйомних машин, що доводить подібність діаграм швидкості та експериментальних графічних залежностей вищих гармонік (рис. 1). Експеримент з дослідження рівнів вищих гармонік проводився на різних віддаленостях від шахти для отримання закономірностей затухання електромагнітних перешкод від електричного опору мережі [1].



а)

б)

Рис. 1. Часова еволюція вищих канонічних гармонік при роботі вугільного підйома (а) та швидкісна діаграма підйомної машини (б)

Результати дослідження

Результати, отримані при дослідженні графіків вищих гармонічних складових, дозволили отримати важливі наукові результати у вигляді запровадження коефіцієнтів графіків вищих гармонік, які будуть покладені в основу нової методики визначення додаткових втрат електроенергії в системі електропостачання шахти при несинусоїдальності напруги.

Для отримання середніх значень коефіцієнтів були виведені наступні залежності:

- середнє значення загального коефіцієнту THD за зміну/добу

$$THD_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} THD_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{m} t_{пауза\ i}}, \qquad (1)$$

де THD_i - значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги в і-му циклі роботи підйомної машини; t_i - тривалість і-го циклу.

- середньоквадратичне значення THD за зміну/добу

$$THD_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} THD_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i}}\ ; \qquad (2)$$

- коефіцієнт використання

$$K_{B\,THD} = \frac{THD_{ср}}{THD_{ном}}, \qquad (3)$$

де $THD_{ном}$ - значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, отриманий розрахунково, виходячи з номінальної потужності перетворювача.

- коефіцієнт увімкнення

$$K_{У\,THD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{m} t_{пауза\,i}}\ ; \qquad (4)$$

- коефіцієнт максимуму

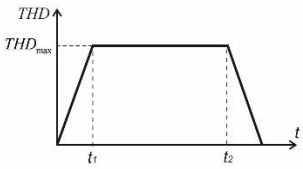
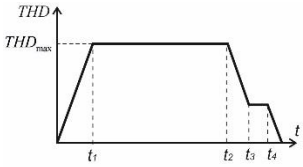
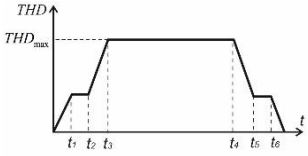
$$K_{M\,THD} = \frac{THD_{\max}}{THD_{ср}}, \qquad (5)$$

де $THD_{\max}$ - максимальне значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги, отримане з реальних графіків.

Результати експериментальних досліджень показників якості напруги вугільних шахт [1, 7, 8] були оброблені за допомогою методів статистичного аналізу та виведені значення коефіцієнтів гармонік струму та напруги, які наведені в таблиці 1-2.

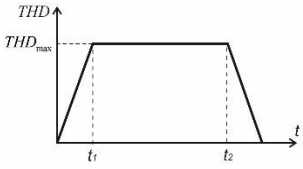
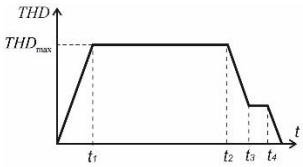
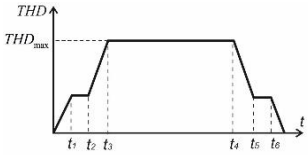
Таблиця 1.

Значення коефіцієнтів вищих гармонік струму

Профіль гармоніки	**Потужність перетворювача, МВА**					
		1,0	**2,0**	**3,0**	**4,0**	**5,0**
	***THDср***	0,026	0,056	0,09	0,117	0,146
	THDск	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	KB THD	0,44	0,51	0,52	0,51	0,52
	KУTHD	0,50	0,53	0,56	0,56	0,56
	KM THD	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
						
	THDср	0,025	0,054	0,08	0,111	0,131
	THDск	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	KB THD	0,42	0,49	0,49	0,48	0,47
	KУTHD	0,48	0,51	0,53	0,53	0,50
	KM THD	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
						
	THDср	0,024	0,051	0,08	0,109	0,128
	THDск	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	KB THD	0,39	0,47	0,47	0,47	0,46
	KУTHD	0,45	0,49	0,51	0,52	0,49
	KM THD	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03

Таблиця 2.

Значення коефіцієнтів вищих гармонік напруги

Профіль гармоніки	Потужність перетворювача, МВА				
		1,0	**2,0**	**3,0**	**4,0**	**5,0**
	$THD_{ср}$	0,026	0,056	0,09	0,117	0,146
	$THD_{ск}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{В\ THD}$	0,44	0,51	0,52	0,51	0,52
	$K_{УTHD}$	0,50	0,53	0,56	0,56	0,56
	$K_{М\ THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
						
	$THD_{ср}$	0,025	0,054	0,08	0,111	0,131
	$THD_{ск}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{В\ THD}$	0,42	0,49	0,49	0,48	0,47
	$K_{УTHD}$	0,48	0,51	0,53	0,53	0,50
	$K_{М\ THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
						
	$THD_{ср}$	0,024	0,051	0,08	0,109	0,128
	$THD_{ск}$	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{В\ THD}$	0,39	0,47	0,47	0,47	0,46
	$K_{УTHD}$	0,45	0,49	0,51	0,52	0,49
	$K_{М\ THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03

Подібний алгоритм має уніфікований характер та може застосовуватися для оцінки надійності систем електропостачання будь-яких промислових підприємств, сільських та міських електричних мереж. Враховуючи стратегічне значення вугільних шахт для забезпечення енергетичної незалежності України оцінимо показники надійності електрообладнання на прикладі підприємств «ДТЕК Павлоградвугілля» (рис. 2).

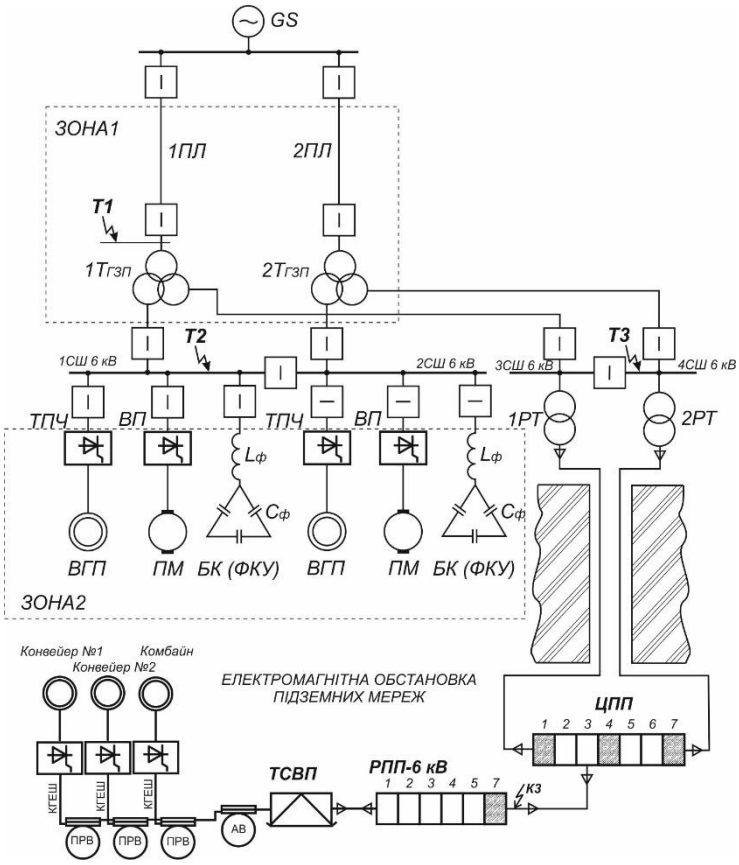
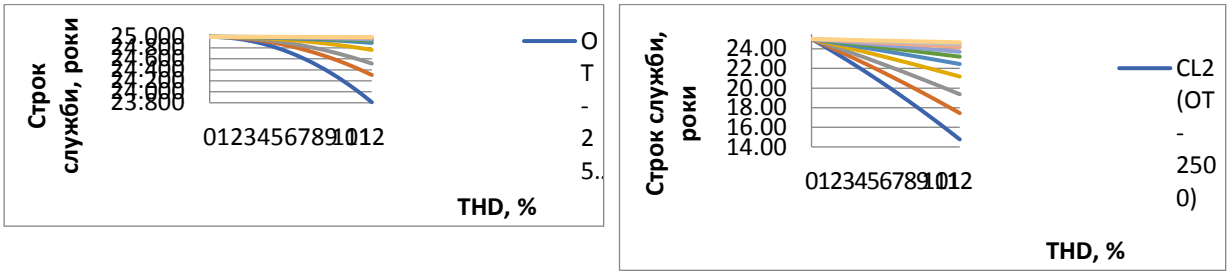


Рис. 2. Принципова схема електропостачання вугільної шахти

Результати моделювання показників, що пов’язують надійність та якість напруги показані на рис.3.



а) б)

Рис. 3. Залежності терміну служби від коефіцієнта викривлення синусоїдальності:
а) силові трансформатори; б) кабельні лінії

Несинусоїдальність напруги викликає значні зміни показників надійності кабельних ліній, як ми можемо зробити висновок з графіки вище. Збиток для надійності електропостачання у середньому складає 30-50 %. Ситуація значно погіршується, якщо послідовно з'єднані дві або більше системи електропостачання, які можуть бути пошкоджені вищими гармоніками. Досліджуючи різні варіації електричних мереж гірничих підприємств були отримані середні значення показників надійності електрообладнання. Залежно від параметрів ці значення досягають 60%, що є неприпустимим для нормального функціонування підприємства.

Надійність системи електропостачання при децентралізованому живленні.

Даний режим роботи системи електропостачання означає значне скорочення вимог до централізованого електропостачання. Зазвичай кожна система електропостачання стикається з дефіцитом електроенергії щорічно. Тому відновлювальні джерела впроваджуються бурхливими темпами.

У нашому випадку для мінімального режиму живлення система електропостачання шахти потребує в три рази менше значення потужності КЗ. Результати моделювання показників надійності елементів системи електропостачання при обмеженнях енергосистеми показали збільшення впливу якості напруги на надійність, що ще погіршує показники.

Підсумовуючи результати розрахунку, можна сказати, що трансформатори не є надзвичайно чутливими до впливу вищих гармонік. В середньому зменшення строку служби трансформатора складає 1,5-2 роки. Крім того, на проникнення вищих гармонік впливає зміна опору енергосистеми при обмеженнях електропостачання.

Висновки

1. При комплексній оцінці енергетичного балансу вугільної шахти було визначено, що основними технологічними ланками процесу видобутку вугілля, де встановлюються тиристорні перетворювачі частоти, є потужні стаціонарні установки вентилятора головного провітрювання, підйомні установки та системи транспорту. При поєднанні впливу негативних наслідків від порушення електромагнітної сумісності з технічними і технологічними обмеженнями енергосистеми, які пов’язані з переходом до децентралізованих джерел живлення, були виявлені нові наукові питання оптимізації електропостачання. Для поглиблення наукових основ теорії електромагнітної сумісності та розробці методик пошуку енергетично ефективних режимів системи електропостачання вугільних шахт, були запропоновані індивідуальні графіки вищих гармонік (IGH).
2. Циклічність роботи підйомних установок вугільного та породного підйомів, що є визначною особливістю електроспоживання вугільних шахт, дає змогу отримати науково обгрунтовані та практично доведені коефіцієнти графіків вищих гармонік, що може бути покладено в основу алгоритму пошуку енергетично ефективних режимів роботи за критерієм втрат потужності в електричних мережах.
3. Отримані залежності, що пов’язують надійність та якість електропостачання дозволяють оцінити зниження строку служби електрообладнання гірничих пітприємств при застосуванні характерних для даного об’єкту дослідження співвідношень уніфікованих схем заміщення. Середнє значення зменшення строку служби при коефіцієнті викривлення синусоїдальності 10% складає 5-10 років в залежності від комбінації режимних параметрів.

Список використаних джерел

1. Півняк Г.Г. Енергетична ефективність систем електропостачання [монографія] / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка ─ Д.: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. ─ 149 с.
2. Pivnyak G. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Yu. Papaika // “Energy Efficiensy improvement of geotechnical systems”, Taylor&Francis Group (A Balkema Book). – 2013. – P. 11-18.

3. Papaika Yu. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads / Yu. Papaika, G. Kosobudzki, A.Lysenko // Advanced engineering forum, Trans Tech Publication, Switzerland, 2017, pp. 143-150.
4. 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.
5. Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А., Лысенко О.И. Интергармоники в системах электроснабжения – Научный словарь НГУ, 2017 – №6.
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.
8. Жежеленко И.В. Оценочные методы определения экономического эквивалента реактивной мощности / И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 98. – С. 3-6.
9. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, Ю.С. Саенко, Н.А. Нойбергер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
10. G. Pivnyak, M. Rogoza, Yu. Papaika A. Lysenko. Traction and energy characteristics of no-contact electric mining locomotives with AC current thyristor converters. - CRC Press/Balcema – Tailor & Francis Group: Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. - Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – p. 1-6.

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

УДК 652.1:586.24

О.О. Азюковський, канд. техн. наук
(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ЗАХИСНИЙ ПОЛІГАРМОНІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПІДЗЕМНИХ МЕТАЛЕВИХ КОМУНІКАЦІЙ

Анотація. *В роботі виконано аналіз захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. Звернута увага, що зміна в часі захисного потенціалу за умови одночасної роботи декількох станцій катодного захисту відрізняється від очікуваного. Наведені осцилограми свідчать про наявність значних збурень, що впливають на електротехнічні процеси в електротехнічної системі «станція катодного захисту - підземний трубопровід - грунт». Доведено, що середнє значення захисного потенціалу не є вичерпною характеристикою корозійної ситуації. Зроблено висновок, що покращення корозійної ситуації забезпечується шляхом мінімізації коливань значень потенціалу за довжиною трубопроводу й, одночасно, за часом в наслідок встановлення залежностей між електротехнічними параметрами системи «станції катодного захисту – підземний металевий трубопровід – грунт» і її режимами роботи.*

Ключові слова: *електрохімічна корозія, електрохімічний захист; підземний сталевий трубопровід; полігармонійний сигнал.*

Аннотация. *В работе выполнен анализ защитного потенциала подземного стального трубопровода. Обращено внимание, что изменение во времени защитного потенциала при условии одновременной работы нескольких станций катодной защиты отличается от ожидаемого. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о значительных возмущающих воздействиях, влияющих на электротехнические процессы в электротехнической системе «станция катодной защиты – подземный трубопровод – грунт». Доказано, что среднее значение защитного потенциала не является исчерпывающей характеристикой коррозионной ситуации. Сделан вывод, что улучшение коррозионной ситуации возможно путем минимизации колебаний значений потенциала по длине трубопровода и, одновременно, по времени на основе установления зависимостей между электротехническими параметрами системы «станция катодной защиты - подземный металлический трубопровод - почва» и ее режимами работы.*

Ключевые слова: *электрохимическая коррозия, электрохимическая защита; подземный стальной трубопровод; полигармонический сигнал.*

Abstract. *In the paper the analysis of protective potential of the underground steel pipeline is executed. It is noted, that the law of change in the protective potential in the time under the condition of simultaneous operation of several cathodic protection stations is different from the expected one. The given oscillograms testify to significant disturbing influences affecting the electrical processes in the electrotechnical system "cathodic protection station - underground pipeline - ground". It is proved that the average value of the protective potential is not an exhaustive characteristic of the corrosion situation. It was concluded that improvement of the corrosion*

situation is possible by minimizing fluctuations of the potential values both: along the pipeline length and in the time, on the based on the establishment of dependencies between the electrical parameters of the "cathodic protection station - underground metal pipeline - soil" system and its operating modes.

Keywords: *electrochemical corrosion, electrochemical protection; underground steel pipeline; polyharmonic signal*

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладним задачами

Електрохімічний захист підземних сталевих трубопроводів забезпечує їх цілісність. Трубопровідний транспорт є одним за найбільш ефективних транспортних систем. Єдиною особливістю такої системи є той фактор, що будь яке порушення цілісності у будь якому місті унеможливлює транспортування речовини. Втрата речовини, що транспортується є неприйнятною не стільки через економічні збитки, скільки через шкоду, що наноситься навколишньому середовищу. Сталеві підземні трубопроводи мають багаторічний ресурс за умови належної роботи системи електрохімічного захисту. Саме електрохімічна корозія є тим фактором негативного впливу, що зумовлює надійність та термін роботи сталевого трубопровідного транспорту. В Україні трубопровідними системами транспортуються газ, вода, аміак тощо. Всі ці речовини є або агресивними по відношенню до навколишнього середовища та небезпечними для життя людини (аміак, природній газ), або такими, що формують потенційно небезпечні техногенні гідрологічні ситуації – зсуви ґрунту тощо. Сьогодні практично відсутні системи підземних сталевих газопроводів, що не мають протикорозійного захисту. У домінуючої кількості випадків це активні системи електрохімічного захисту. Ці системи складаються із джерела живлення постійного струму, анодного пристрою та контактного вузла, що з'єднує джерело живлення із підземним трубопроводом. Сьогоденні підходи розрахунку системи протикорозійного захисту оперують струмами та напругами, що розглядаються як постійні. Водночас, системи високочастотних силових перетворювачів, що входять до складу систем катодного захисту мають на своєму виході сигнал, який відрізняється від постійного. Визначення ступеню впливу сучасних схемотехнічних підходів до створення станцій катодного захисту на формування потенціалу захисту підземного сталевого трубопроводу є важливою на актуальною задачею.

Результати досліджень. Газопровідна система як цілісна мережа трубопроводів підземного та надземного розташування складається із ділянок з різним віком експлуатації – від понад 50 років до сьогоденних. За тиском класифікують газопроводи:

- низького тиску – до 0,05 кг/см2;
- середнього тиску – від 0,05 до 3 кг/см2;
- високого тиску – від 3 до 6 кг/см2.

Газопроводи низького тиску є найбільш поширеними. Живлення переважної більшості споживачів невеликих домогосподарств здійснюється саме газом низького тиску. Середній тиск використовується для газопостачання багатоквартирних високоповерхових будинків та промислових об'єктів. Високий тиск переважною більшістю використовується у магістральних газогонах для транспортування знаних об'ємів газу. Для магістральних газопроводів високого тиску окрім здатності витримувати тиск газу, що транспортується є важливим забезпечення механічних вимог щодо міцності та стійкості до можливих рухів середовища закладання трубопроводу. Для мережі середнього тиску газу також є актуальним подібні вимоги. Мережа низького тиску, як зазвичай складається із тонкостінних сталевих трубопроводів. Вимоги до механічних характеристик подібних систем транспортування не є високими. Це зумовлюється тією обставиною, що топологія газогонів низького тиску складається ділянок, довжина яких від однієї точки розгалуження до іншої є від декількох десятків метрів до декількох кілометрів кожна. Головним матеріалом для виготовлення труб є сталь. Сталеві трубопроводи є більш стійкими до механічних та температурних навантажень, на них значно меншою мірою впливає сонячне світло (ультрафіолет). Для систем високого тиску та трубопроводів, що розташовані на поверхні землі сталеві труби є практично безальтернативними. Головні недоліки сталевих трубопроводів це складність їх монтажу, низька корозійна стійкість та невисока гнучкість (останнє компенсується здатністю витримувати високі механічні навантаження).

Широке використання отримують поліетиленові труби, особливо у мережі газопроводів низького тиску. Головними перевагами таких трубопроводів є висока корозійна стійкість, гнучкість, здатність витримувати високодинамічні зміни тиску (але не механічні навантаження вздовж осі лінії газогону), вища (до 30 відсотків) пропускна здатність внаслідок більш гладкої внутрішньої поверхні труб. Головним недоліком, що значно обмежує їх використання являється низька резистентність до впливу ультрафіолету – це ускладнює перехід поверхнею землі. Крім того, для підземних газопроводів є необхідним контроль цілісності газопровідної системи. Це важливо зважаючи на небезпеку повітряно-газової суміші, що здатна до горіння та вибуху. Системи комплексного приладного обстеження розраховані на використання засад теоретичних основ електротехніки й спираються на результати вимірювання електричних величин. Результати вимірювання цих значень характеризують корозійну небезпеку.

Результати досліджень. Формування захисного потенціалу забезпечується струмом, що натікає на трубопровід. Щільність струму обмежується задля уникнення процесів перекомпенсації, що супроводжуються руйнуванням ізоляційного покриття. Це у свою чергу зумовлює обмеженість зони впливу однієї стації катодного захисту (рис. 1). Під час розрахунку системи протикорозійного захисту прийнято вважати, що потенціал захисту є сталою величиною, яка змінюється за законом $\begin{matrix} u(x) = u_0 e^{-\gamma x} \\ i(x) = i_0 e^{-\gamma x} \end{matrix}$, де $\gamma = \sqrt{rg}$ - потенціал по відношенню до віддаленої точки, i_0 - струм в підземній споруді в місці підключення катодної установки, $u_0 = i_0 \sqrt{\frac{r}{g}}$ - напруга безпосередньо на виході станції катодного захисту і яка є рішенням системи рівнянь $\begin{matrix} -\frac{du}{dx} = ri \\ -\frac{di}{dx} = gu \end{matrix}$, де, у свою чергу r - повздовжній опір підземної споруди; g - провідність ізоляції зовнішнього покриття підземної споруди; u та i - потенціал відносно до віддаленої точки землі та струм споруди [1].

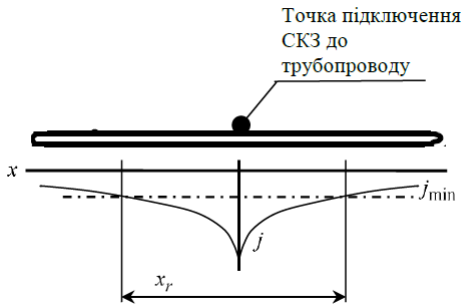


Рис. 1 Розподіл потенціалу за довжиною трубопроводу

Мінімальне значення щільності струму зумовлене необхідністю забезпечення зсуву потенціалу підземного трубопроводу по відношенню до потенціалу навколишнього середовища у негативному напряму. Під час розрахунку системи протикорозійного захисту оперують зі сталими значеннями потенціалу або струму у будь якій точці вздовж трубопроводу. Під час розрахунку систем катодного захисту зважають на мінімальне припустиме значення захисного потенціалу $E_m = u_0 e^{-\gamma l_1}$, ($l_1 =$ довжина ланки, що захищається в одну сторону від точки підключення станції катодного захисту, тобто вся довжина ланки, що захищається - $L = 2l_1$, $u_0 = E_m e^{\gamma l_1}$). Мінімальний струм захисту i_0 визначається $i_0 = \frac{E_m}{\sqrt{\frac{r}{g}}} e^{\gamma l_1} = \frac{\gamma}{r} E_m e^{\gamma l_1}$ [1].

Однак, випадки, в яких для захисту підземної металевої споруди (особливо підземних трубопроводів) використовують тільки одну станцію катодного захисту (СКЗ) – є досить унікальними. Зазвичай, через значну довжину підземних комунікацій використовують декілька станцій катодного захисту (рис. 2). Захисні величини в даному випадку розраховують як $i = i_0 \frac{sh\left[\gamma\left(l_2 - x\right)\right]}{sh\gamma l_2}$; $u = u_0 \frac{ch\left[\gamma\left(l_2 - x\right)\right]}{ch\gamma l_2}$. Величини напруги та струму прийнято розглядати як незмінними, постійними. Стала розповсюдження розраховується за виразом $\gamma = 0.0116\sqrt{\frac{g_1}{T}}$, де g_1 - провідність покриття; T - товщина стінки труби [1].

У загальному випадку (рис. 2), при довільній кількості станцій катодного захисту зміна за довжиною підземної споруди захисного потенціалу, що сформований станціями, носить більш складний характер, що повинно враховуватись під час розрахунку системи захисних заходів [1,2]. Сьогоденний підхід спирається на розгляд струмів, що протікають та напруги СКЗ як сталих, незмінних за часом. Вважається, що потенціал трубопроводу змінюється за довжиною трубопроводу, але в кожній точці є незмінним за часом (рис. 3).

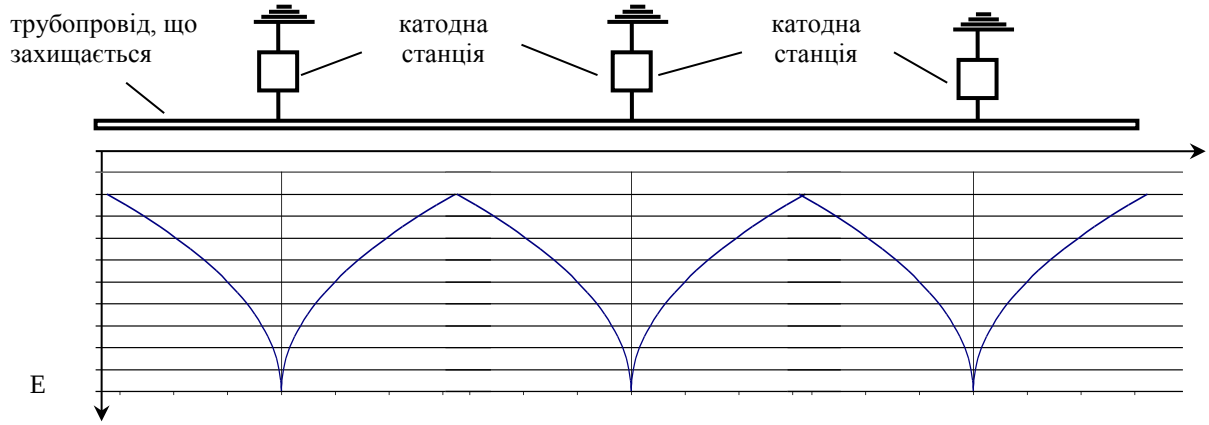


Рис. 2 Зміна захисного потенціалу вздовж лінійного металевого об'єкту, що захищається при наявності декількох станцій катодного захисту

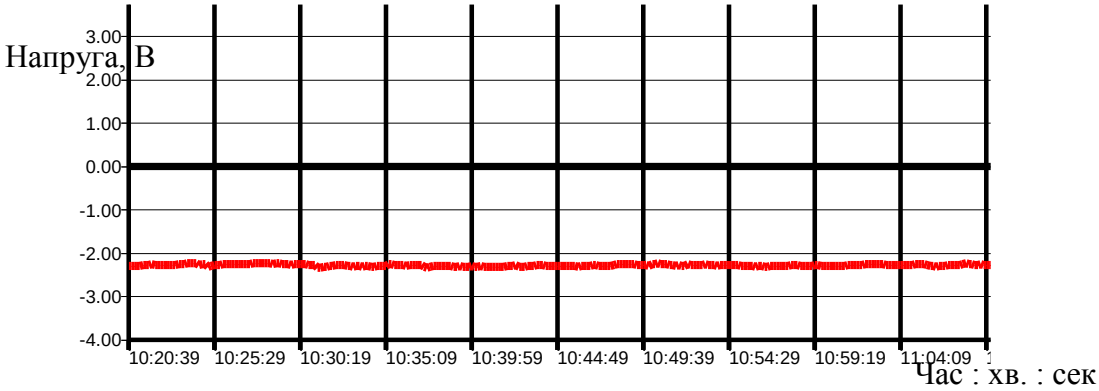


Рис. 3 Потенціал захисту трубопроводу сформований СКЗ за класичною схемою за умов відсутності впливів струмів, що блукають та суміжних СКЗ

Але випадки, коли підземний сталевий трубопровід не знаходиться під впливом струмів, що блукають та захищається однією станцією катодного захисту є досить рідкісними.

У загальному вигляді потенціал підземного трубопроводу по відношенню до нескінченно віддаленої точки (1) та струм трубопроводу у цій точці (2) визначаються рівняннями, що надають у результаті фіксоване значення електротехнічних величин [1,2].

$$u = \frac{r}{\gamma\, sh\left[\gamma(a+b)\right]}\left(ch\gamma(b-x)\sum_{k=-p}^{k=s} I_k\, ch\gamma(a+l_k) + ch\gamma(a+x)\sum_{k=s+1}^{q} I_k\, ch\gamma(b+l_k)\right) B \quad (1)$$

$$i = \frac{1}{sh\gamma(a+b)}\left(sh\gamma(b-x)\sum_{r=-p}^{s} I_k ch\gamma(a+l_k) - sh\gamma(a+x)\sum_{k=s+1}^{q}(b-l_k)\right) a \quad (2)$$

Однак вирази (1 – 2) та інші наведені вирази не враховують змінну складову сигналів сучасних СКЗ, які містять високочастотні перетворювачі [3]. Полігармонічний сигнал сучасних станцій катодного захисту зумовлює зміну потенціалу захисту як за часом так й за довжиною трубопроводу, який визначається струмами стікання з трубопроводу. Широке розповсюдження СКЗ із високочастотною перетворювальною ланкою зумовлене покращеними масо-габаритними характеристиками вузла живлення. Однак цей фактор впливу викликає зміни у характеристиках електротехнічних сигналів у системі «система протикорозійного захисту – підземний сталевий трубопровід – грунт».

Виміряний захисний потенціал підземного трубопроводу (рис. 4) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем. Мінімальне значення потенціалу дорівнює -3,46 В., максимальне значення дорівнює 0,001 В. Середнє значення дорівнює -2,54 вольта. Саме середнє значення й приймається до уваги під час розрахунку системи протикорозійного захисту за загальноприйнятним підходом. Величина -2,54 В є цілком прийнятною та такою, що свідчить про наявність захисту проти корозії.

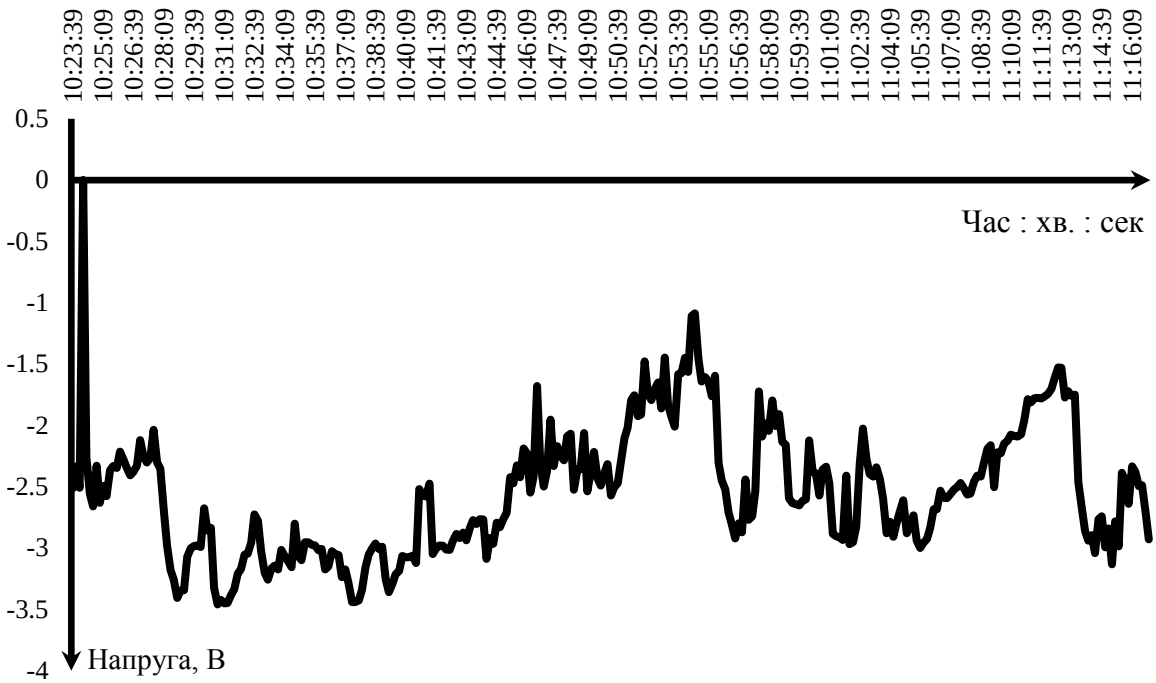


Рис. 4. Потенціал підземного трубопроводу, який є результатом сумісної роботи декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем

Але, якщо взяти до уваги мінімальне значення потенціалу (-3,46 В.) - то воно свідчить про надлишкову перекомпенсацію та нераціональну витрату електричної енергії і матеріалу анодного заземлювача. До того ж сам сигнал є полігармонійним, а не постійним. Нерівномірність розподілення значень потенціалу за часом сягає досить значних величин, й можуть містити не тільки перевищення рівня -0,55 В., а й навіть позитивні значення (рис. 5,6). Частота зміни потенціалу за часом належить діапазонові від низкочастотно-модульованого сигналу у 10 Гц. до високочастотної складової, яка сягає 18 кГц. До того ж, як зазвичай напруга на виході випрямляча є пульсуючою, та за умови активного навантаження форма струму повторює форму зміни за часом напруги. Але сучасні підземні трубопроводи, що покритий ізоляційною оболонкою має дещо іншу схему заміщення, яка містить реактивні елементи [4-6]. У такому випадку, електромагнітні процеси (перехідні процеси) обумовлюють відхилення сигналу, яке сягає позитивного значення. У ті проміжки часу, коли захисний потенціал перевищує мінімально припустиме значення підземний трубопровід лишається захисту та, навпаки, металева споруда є джерелом струмів, що блукають та руйнується. Таким чином навіть за відсутністю широкоамплітудних коливань фактичний корозійний стан відрізняється від очікуваного та запланованого.

Практика експлуатації сучасних систем протикорозійного захисту свідчить, що навіть за умови прийнятного середнього значення полігармонійного сигналу, наприклад -1,166 В., фактичний корозійний стан не є задовільним (рис. 5, 6). Спостерігаються не тільки коливання значної амплітуди в діапазоні від -3,379 В. до +0,951 В., а й значне за часом (до 15 відсотків від загального часу виміру) знаходження значення потенціалу захисту більше, ніж мінімально припустиме значення, що дорівнює -0,8В.

Зміна за часом потенціалу захисту від корозії підземного трубопроводу (рис. 6) свідчить не тільки про відсутність протикорозійного захисту, а й про наявність каталітичного фактору, що прискорює процеси електрохімічної корозії змінним струмом. Невраховування особливостей зміни потенціалу захисту за часом, особливо того факту, що певні проміжки часу підземний сталевий трубопровід лишається без протикорозійного захисту призводить до погіршення корозійного стану газопроводів. Наявність знакозмінних потенціалів взагалі свідчить про те, що трубопроводи знаходяться у анодній зоні, тобто є джерелом виносу металу.

Криві напруги на підземному газопроводі (рис. 7), що сформовані СКЗ з класичною схемою із діодним випрямлячем свідчать про спотворення форми сигналу в наслідок як нерезистивного опору навантаження, так й в наслідок впливів збурень (крива 1 рис. 7). Захисний полігармонійний потенціал підземного трубопроводу (крива 2 рис. 7) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту, неідеального сигналу на газопроводі внаслідок подання до нього напруги декількох СКЗ (крива 1 рис. 7) тощо. Наведені осцилограми сигналів СКЗ, захисного потенціалу

трубопроводу, демонструють той факт, що розгляд тільки сталої складової електротехнічних процесів у системи електрохімічного захисту трубопроводів призводить до погіршення корозійної ситуації. Якщо

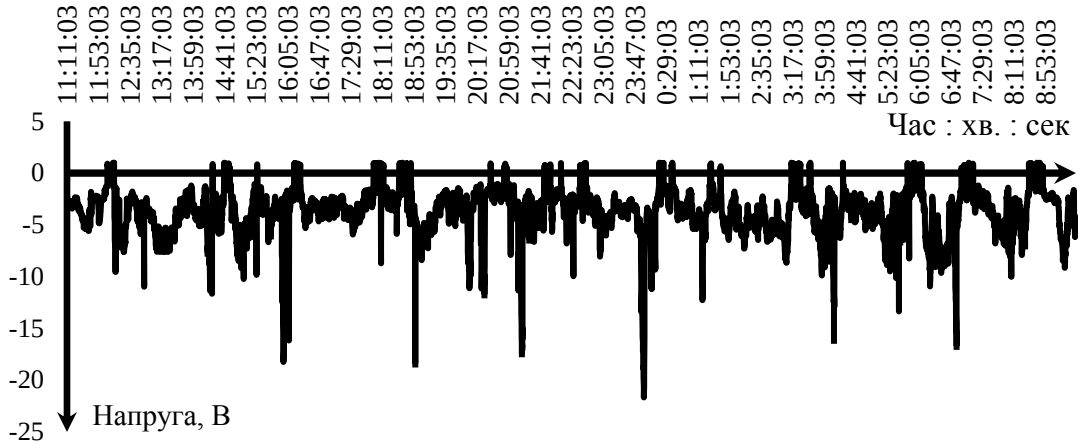


Рис. 5 Потенціал підземного трубопроводу сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем

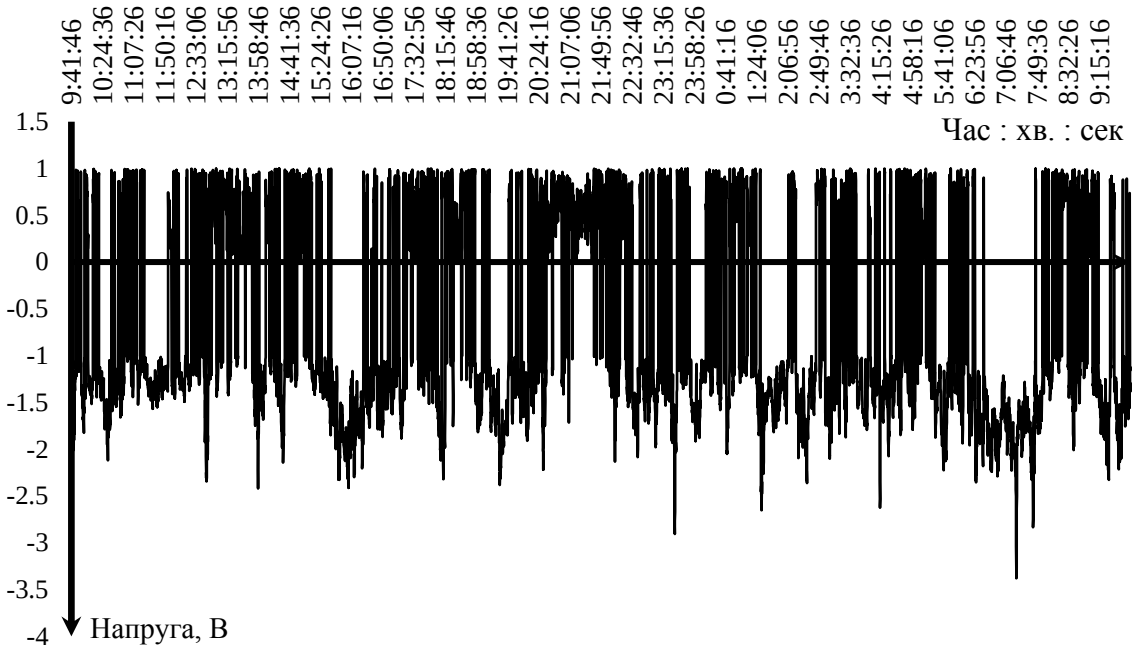


Рис. 6 Потенціал підземного трубопроводу сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем із явновираженими позитивними значеннями

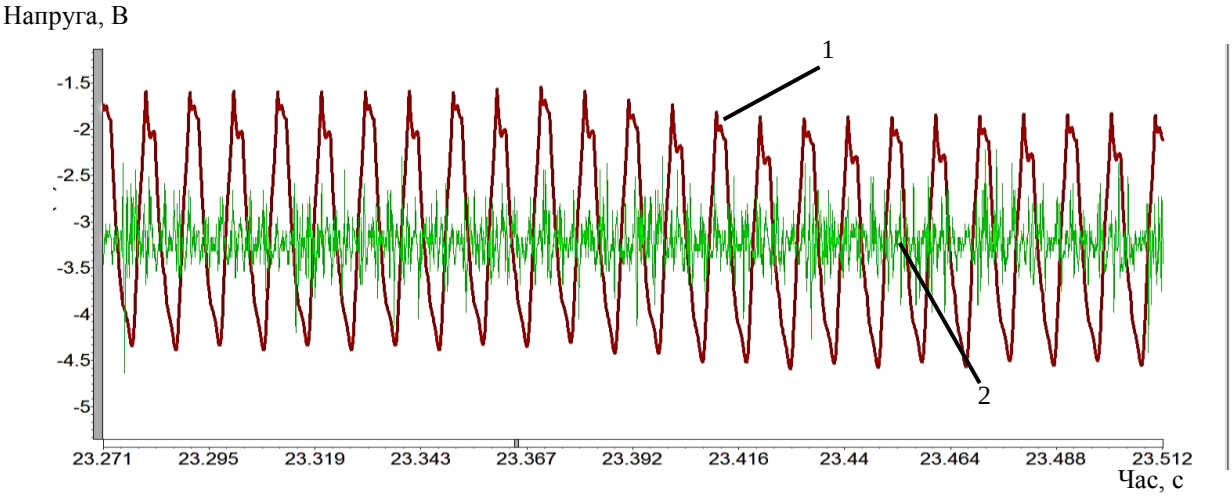


Рис. 7 Напруга у точці підключення СКЗ (крива 1) та захисний потенціал (крива 2)

звернути увагу на факт сумісної роботи декількох СКЗ з різними схемотехнічними рішеннями керованих випрямлячів, то сповільнення корозійних процесів можливе тільки на основі сумісного керування станціями катодного захисту за певним законом керування на основі встановлення взаємозв'язку між параметрами електротехнічної системи «станція катодного захисту – підземний сталевий трубопровід – грунт» та режимами роботи станцій катодного захисту.

Висновки. Використання постійних значень струму та напруги у розрахунках та експлуатації системи протикорозійного захисту без врахування того, що:

– сигнал виході СКЗ та потенціал захисту є полігармонійними сигналами;

– реактивна складова опору під впливом полігармонійних струмів, що протікають трубопроводом є змінною;

призводить до некоректної оцінки протикорозійного стану, спотворення розподілення потенціалу захисту вздовж трубопроводу, що зумовлює надмірне використання електричної енергії та нераціональні витрати матеріалів анодного заземлювача.

Покращення корозійної ситуації можливо забезпечити шляхом мінімізації коливань значень потенціалу за довжиною трубопроводу й, одночасно, за часом в наслідок встановлення залежностей між електротехнічними параметрами системи «станції катодного захисту – підземний металевий трубопровід – грунт» і її режимами роботи.

Список використаних джерел

1.Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

2.Азюковський О.О. Потенціал підземного металевого трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. / О.О.Азюковський // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 18-22.

3.Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.

4.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.

5.Азюковський О.О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту . / О.О. Азюковський // Електрифікація транспорту. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. № 10, 2015. с. 98-106

6.Азюковський О. О. Визначення струму стікання з підземного трубопроводу з врахуванням основних джерел збурень для підземних металевих комунікацій / О.О. Азюковський // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2018. – Вип. 100. – С. 19 - 24.

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

УДК 621.311.25: 621.311.29

С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповская
(Украина, Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИВОДА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Анотація *Запропоновано комбінований накопичувач енергії для гарантованого безперебійного електропостачання електроприводу системи орієнтації сонячних батарей фотоелектростанцій, що враховує особливості функціонування електроприводу в умовах нештатної експлуатації. Накопичувач являє собою комбінацію трьох видів взаємопов'язаних і функціонально узгоджених накопичувачів, а саме – електрохімічного накопичувача енергії на основі хімічних джерел струму, активного накопичувача кінетичної енергії і ємнісного накопичувача на основі суперконденсаторів, об'єднаних загальною системою управління. Розроблено його схемотехнічне рішення і наведені основні розрахункові співвідношення для визначення енергетичних параметрів активного накопичувача кінетичної енергії.*

Ключові слова: *комбінований накопичувач енергії, електропривід, фотоелектростанція, активний накопичувач кінетичної енергії.*

Аннотация *Предложен комбинированный накопитель энергии для гарантированного бесперебойного электроснабжения электропривода системы ориентации солнечных батарей фотоэлектростанций, учитывающий особенности функционирования электропривода в условиях нештатной эксплуатации. Накопитель представляет собой комбинацию трех видов взаимосвязанных и функционально согласованных накопителей, а именно – электрохимического накопителя энергии на основе химических источников тока, активного накопителя кинетической энергии и емкостного накопителя на основе суперконденсаторов, объединенных общей системой управления. Разработано его схемотехническое решение и приведены основные расчетные соотношения для определения энергетических параметров активного накопителя кинетической энергии.*

Ключевые слова: *комбинированный накопитель энергии, электропривод, фотоэлектростанция, активный накопитель кинетической энергии.*

Abstract *The combined energy storage unit is proposed for the guaranteed uninterrupted power supply to the electric drive of the solar cell orientation systems of photoelectric power station, considering features of functioning of the electric drive in the conditions of emergency operation. The store is a combination of three types of interconnected and functionally consistent stores, namely, the electrochemical energy storage based on chemicals that provide kinetic energy and energy storage based on supercapacitors, united by a common control system. Its circuitry research is developed and the main settlement ratios for determination of power parameters of the active storage of kinetic energy are received.*

Keywords: *combined energy storage, electric drive, photoelectric power station, active storage of kinetic energy.*

Введение

Создание высокоэффективных фотоэлектростанций (ФЭС) невозможно без использования систем ориентации солнечных батарей (СБ). Применение систем слежения за Солнцем обеспечивает наибольший приход солнечного излучения на поверхность СБ, что способствует увеличению выходной мощности ФЭС и интервала генерирования электрической энергии. Основным потребителем энергии в системе слежения является электропривод опорно-поворотных механизмов трекерных комплексов ФЭС. Несмотря на сравнительно большое количество имеющихся публикаций, посвященных системам ориентации солнечных батарей, недостаточное внимание уделяется вопросам рационального выбора типа и состава накопителя для бесперебойного гарантированного электропитания привода следящей системы ФЭС.

Цель работы

Повышение надежности электроснабжения электропривода следящей системы ФЭС.

Постановка задачи

Обоснование состава и разработка схемотехнического решения накопителя энергии для обеспечения гарантированного бесперебойного электроснабжения электропривода следящей системы ФЭС.

Основная часть

Практически отслеживание положения Солнца осуществляется путем циклического поворота солнечной батареи на 2,5° каждые десять минут. При пуске электродвигатель привода потребляет достаточно большой ток в течение сравнительно короткого промежутка времени, что является серьезной нагрузкой для блока электропитания на базе аккумулятора. Учитывая то обстоятельство, что химические источники тока относятся к инерционным системам в силу особенностей протекания электрохимических процессов, использование аккумуляторов для питания импульсных нагрузок значительно уменьшает их эффективность и сокращает срок эксплуатации.

Для иллюстрации работы электропривода в одном цикле поворота солнечных батарей в качестве примера на рис. 1 приведена диаграмма режима работы электропривода с использованием шагового двигателя (ШД) [1].

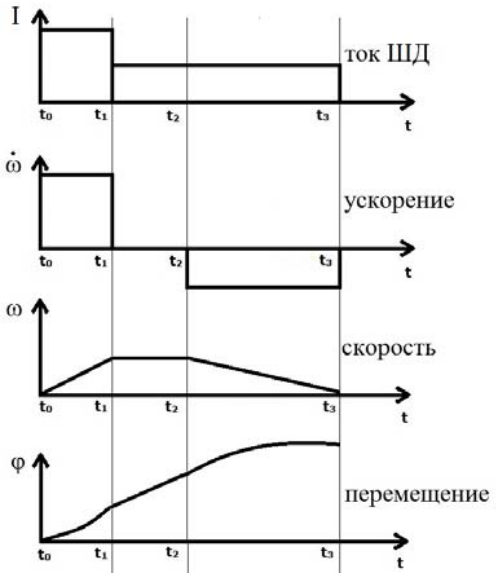


Рис. 1. Диаграмма режима позиционирования

В приведенном примере при пуске ШД с механизмом поворота необходимо преодолеть пусковой

момент двигателя, зависящий от величины нагрузки, и нелинейный момент сухого трения механизма поворота, который меняется в силу изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления. В этом режиме целесообразно в электроприводе увеличить амплитуду тока ШД (теоретически пусковой ток необходимо увеличить до 1,5 от номинального значения). После преодоления пускового момента и начального момента сухого трения можно снизить амплитуду тока ШД (рабочий ток уменьшить до 0,8 от номинального значения). Это позволяет исключить сбои при пуске ШД и в целом уменьшить потребление тока двигателем во время поворота. Увеличение пускового тока в ШД целесообразно в режиме позиционирования при положительном значении ускорения, как это следует из рис. 1.

Для обеспечения эффективного использования электрической энергии, генерируемой солнечными батареями и, в то же время, обеспечения эффективной работы системы ориентации СБ авторы [2] предлагают использовать гибридный накопитель энергии на базе аккумулятора и блока суперконденсаторов. Функцию основного источника питания в таком гибридном накопителе выполняет химический источник тока, или аккумулятор, но при высоком уровне импульсного тока нагрузки в момент включения электропривода для уменьшения падения напряжения на аккумуляторе функцию источника питания выполняет суперконденсатор. Это связано с тем, что плотность энергии у аккумулятора высокая, а плотность мощности низкая, тогда как у суперконденсатора, наоборот – плотность энергии низкая, а плотность мощности высокая.

Как показывает опыт эксплуатации ФЭС в условиях влияния нагрузок, превышающих допустимые расчетные величины, вызванными внешними факторами, такими, например, как повышенные ветровые нагрузки, увеличенный снежный покров и другие возможные неучтенные нагрузки [3], время выхода электропривода на штатный режим поворота СБ может превысить время разряда блока суперконденсаторов, которое составляет от 10^{-3} секунд до единиц секунд. В таких условиях нагрузка на аккумулятор при повороте СБ возрастает, что приводит к сокращению срока службы аккумулятора.

Одним из вариантов увеличения временного интервала разряда накопителя является включение в состав гибридного накопителя маховикового накопителя кинетической энергии, который позволит расширить временной диапазон разряда накопителя, соответствующий временным характеристикам компенсируемых воздействий в цепи электроснабжения электропривода в процессе цикла поворота солнечной батареи.

Авторами настоящей работы предложен вариант комбинированного накопителя энергии, который включает в себя электрохимический накопитель (ЭХНЭ) на основе химического источника тока, емкостной накопитель электрической энергии (ЕНЭ) на основе батарей суперконденсаторов и активный накопитель кинетической энергии (КНЭ) с совмещенными функциями двигателя-генератора на основе буферного накопителя кинетической энергии, подробное описание которого приведено в [4].

Блок-схема ФЭС с комбинированным накопителем энергии приведена на рис. 2, на которой электрическая схема накопителя кинетической энергии представлена в развернутом виде.

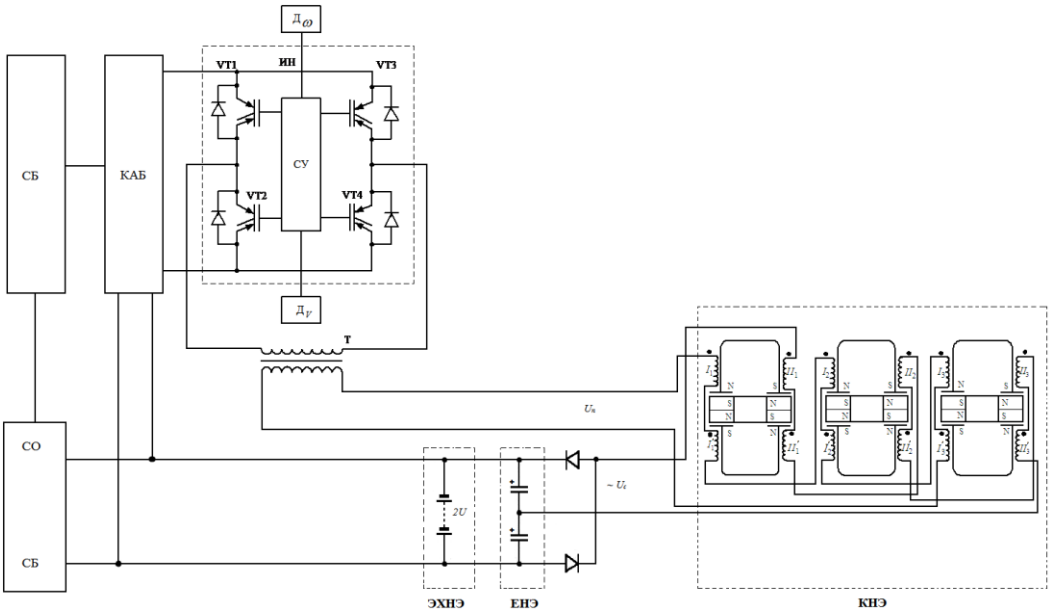


Рис. 2. Блок-схема комбинированного накопителя энергии:
СБ – солнечная батарея; КАБ – контроллер аккумуляторной батареи; СУ – система управления;
СО СБ – система ориентации солнечной батареи; ЭХНЭ – электрохимический накопитель энергии;
ЕНЭ – емкостной накопитель энергии; КНЭ – кинетический накопитель энергии

При реализации комбинированного накопителя энергии значения параметров электрохимического и емкостного накопителей определяются с использованием известных выражений в зависимости от параметров конкретного типа электропривода.

В виду относительной сложности активного накопителя кинетической энергии вкратце опишем его конструктивные особенности, принцип действия и выведем основные расчетные соотношения для определения его энергетических параметров.

Для наглядности на рис. 3 приведена конструкция активного накопителя кинетической энергии.

Основными элементами накопителя являются размещенные в корпусе 1 статоры 2 и 3, выполненные в виде U-образных магнитопроводов с расположенными на них двигательной обмоткой 4 и генераторной обмоткой 5. В зазоре между магнитопроводами на вертикальном валу 6 вращается массивный ротор-маховик 7 с вмонтированными в нем аксиально по окружности радиусом R постоянными дискообразными магнитами 8. Расстояния между геометрическими центрами рядом расположенных постоянных магнитов 8 равны расстояниям между геометрическими центрами полюсных наконечников 10 магнитопроводов.

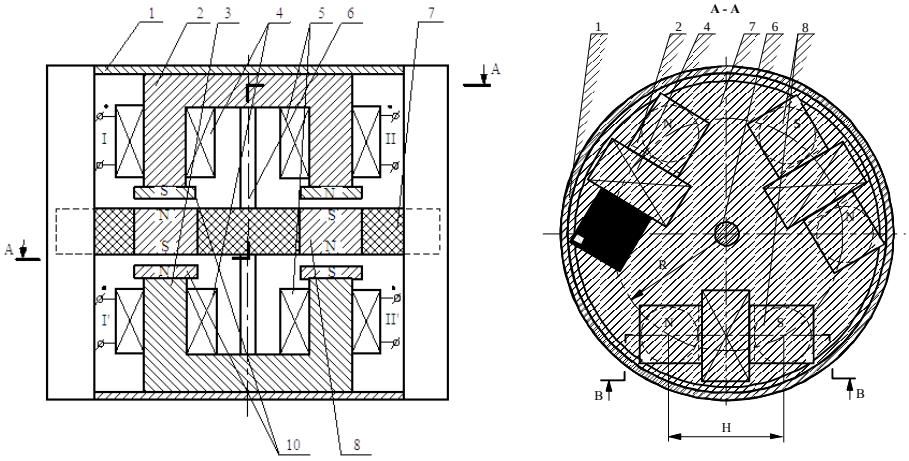


Рис. 3. Конструкция активного накопителя кинетической энергии

Принцип функционирования активного накопителя кинетической энергии состоит в следующем.

Двигательная обмотка 4 подключается к источнику переменного тока малой мощности, в качестве которого используется аккумуляторная батарея и инвертор. При этом в магнитопроводах статоров 2 и 3 наводится магнитный поток, который взаимодействует с постоянными магнитами 8, размещенными в диске ротора-маховика 7. Так как постоянные магниты 8 расположены с чередование полюсов, то при смене направления индукции магнитного потока в зазоре между статорами и роторам-маховиком за период колебания синусоидального напряжения в обмотке 4 постоянные магниты, находящиеся в зоне взаимодействия с полюсными наконечниками 10 статоров, выталкиваются из этой зоны при совпадение полюсов магнитов и полюсных наконечников магнитопроводов статоров, а следующие за ними по ходу вращения ротора-маховика постоянные магниты с противоположными полюсами втягиваются в зону взаимодействия с полюсными наконечниками магнитопроводов статоров, приводя диск ротора-маховика во вращение со скоростью, определяемой частотой внешнего источника тока, то есть вращение ротора-маховика осуществляется за счет втягивания в зону взаимодействия части постоянных магнитов с разноименными по отношении к наконечникам магнитопроводов полюсами при одновременном выталкивания из зоны взаимодействия другой части постоянных магнитов, имеющих одноименные полюса по отношении к наконечникам магнитопроводов статоров.

Такой механизм взаимодействия постоянных магнитов ротора-маховика с магнитопроводами статора повышает интенсивность магнитного потока в зазоре между полюсными наконечниками магнитопроводов статоров и ротором-маховиком, а, следовательно, и коэффициент полезного действия активного накопителя кинетической энергии. При вращении ротор-маховик приобретает запас кинетической энергии. Одновременно при этом магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами 8, вмонтированными в диск ротора-маховика, замыкается через магнитопроводы статоров 2 и 3 и наводит в обмотках 4 и 5 электродвижущую силу. Вследствие того, что постоянные магниты 8 расположены с чередующейся полярностью магнитных полюсов, наводимая в обмотках 4 и 5 электродвижущая сила будет иметь синусоидальную форму, частота которой определяется скоростью вращения ротора-маховика. В итоге кинетическая энергия, запасенная в массивным роторе-маховике во время вращательного движения, преобразовывается в электрическую энергию путем наведения электродвижущей силы в обмотках статоров маг-

нитным потоком, создаваемым постоянными магнитами ротора при их движении в зазоре между полюсными наконечниками магнитопроводов статоров.

Приведем расчетные соотношения для определения основных параметров активного накопителя кинетической энергии, выраженных через массогабаритные и магнитные параметры вращающейся магнитной системы ротора-маховика.

Расчетная модель ротора-маховика буферного накопителя кинетической энергии приведена на рис. 4, на которой введены следующие обозначения: 1 – диск ротора-маховика, выполненный из немагнитного материала толщиной h, 2 – постоянные магниты, 3 – магнитопровод катушки возбуждения статора, D_D – диаметр диска ротора, D_M – диаметр маховика, δ – воздушный зазор.

Общее уравнение движения маховика с моментом инерции J имеет вид:

$$M - M_C = J\frac{d\omega}{dt}, \tag{1}$$

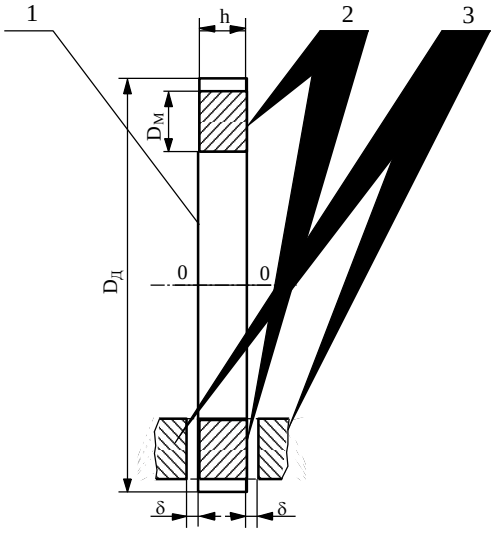


Рис. 4. Расчетная модель ротора-маховика активного накопителя кинетической энергии

где M_C – момент сопротивления (трение в подшипниках, аэродинамическое трение и т.д.), ω – угловая скорость.

Время рекуперации определяется из уравнения (1) и в общем виде может быть выражено соотношением [5]:

$$t = \int_{\varphi_{\omega'}}^{\omega} -\frac{Jd\omega}{M+M_C}, \tag{2}$$

где φ – глубина реализуемого разряда маховика, обычно $\varphi \cong (1/2 \div 1/3)W$.

Для накопительной системы с маховиком считается оптимальным такой режим рекуперации, при котором отдается половина запасенной в маховике энергии, то есть $\varphi = 1/2\,W$. В этом случае $W' = 1/2\,W$, следовательно $J\frac{\omega'^2}{2} = 0{,}5J\frac{\omega^2}{2}$, откуда

$$\omega' = \omega\sqrt{0{,}5} \cong 0{,}71\omega, \tag{3}$$

где ω' – угловая скорость маховика при глубине реализуемого разряда $\varphi = 1/2\,W$ на момент окончания времени рекуперации.

Из (3) следует, что при $\varphi = 1/2\,W$ угловая скорость маховика снижается примерно на 29 %, а при угловой скорости $\omega < \omega'$ запасенная в маховике энергия остается нереализуемой.

Для практических расчетов удобно выразить момент M маховика через активную мощность P, отдаваемую потребителю. В предположении, что во время рекуперации величина активной мощности P неизменна [6], выражение для момента M маховика примет вид:

$$M = \frac{P}{\omega}, \tag{4}$$

Подставив (3) и (4) в выражение (2), получим:

$$t = \int_{\omega}^{\omega'} -\frac{Jd\omega}{M+M_C} = J\int_{\omega}^{\omega'} \frac{d\omega}{P/\omega+M_C} = \frac{J}{M_C}\int_{\omega}^{\omega'} \frac{\omega d\omega}{P/M_C+\omega}. \quad (5)$$

После соответствующих преобразований получим выражение для времени рекуперации в виде

$$t = 0{,}29\frac{J\omega}{M_C} + \frac{JP}{M_C^2} ln\frac{P+0{,}29\omega M_C}{P+\omega M_C}. \quad (6)$$

Для перехода к массогабаритным параметрам маховика выразим момент инерции J через его массу и радиус:

$$J = \frac{m \cdot R_д^2}{2}, \quad (7)$$

где $m = \pi R_д^2 h \cdot \rho_д$– масса ротора-маховика, $R_д$ – радиус диска ротора, h – толщина диска ротора, $\rho_д$ – плотность материала диска.

С учетом массы магнитной системы выражение для массы ротора - маховика примет вид:

$$m = \pi R_д^2 h \cdot \rho_д + nR_M^2 h \cdot \rho_M - n\pi R_M^2 h \cdot \rho_д = \pi h\left[R_д^2 \cdot \rho_д + nR_M^2\left(\rho_M - \rho_д\right)\right], \quad (8)$$

где R_M – радиус постоянного магнита, ρ_M– плотность материала магнита, n – количество постоянных магнитов в системе.

После соответствующих преобразований получим значение момента инерции ротора-маховика, выраженное через его массогабаритные параметры:

$$J = \frac{\pi R_д^2 \cdot h}{2}\left[R_д^2 \cdot \rho_д + nR_M^2\left(\rho_M - \rho_д\right)\right]. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что основной вклад в величину M_C вносит сила притяжения постоянного магнита ротора к магнитопроводу катушки возбуждения статора, момент сопротивления M_C можно определить через произведение намагничивающей силы F_M на плечо, равное радиусу диска ротора

$$M_C = F_M \cdot R_д. \quad (10)$$

Намагничивающая сила F_M может быть определена из выражений для магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом в зазоре магнитопровода

$$\Phi_\delta = F_M \cdot \frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu}, \quad (11)$$

где Φ_δ – магнитный поток в зазоре; F_M – намагничивающая сила постоянного магнита; λ_δ – магнитная проводимость зазора; κ_μ – коэффициент насыщения, равный $1{,}05 \div 1{,}2$, откуда:

$$F_M = \frac{\Phi_\delta \cdot \kappa_\mu}{\lambda_\delta}. \quad (12)$$

Суммарный поток рассеяния между магнитами ротора при их расположении с чередующейся полярностью равен:

$$\Phi_\sigma = F_M \cdot \lambda_{\sigma M}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\sigma M}$ – суммарная магнитная проводимость путей рассеяния.

В общем виде поток магнитной индукции Φ постоянного магнита определяется как

$$\Phi = kB \cdot S_M, \quad (14)$$

где B – магнитная индукция; S_M – площадь сечения полюса магнита; k – коэффициент пропорциональности.

В конкретном случае, если предположить, что зависимость магнитной индукции от коэрцитивной силы магнитного материала $B_r = f(H_c)$ линейна, что имеет место в случае использования высококоэрци-

тивных постоянных магнитов на основе NdFeB, то создаваемый ими магнитный поток можно представить выражением [7]:

$$\Phi_M = B_r \cdot S_M - \mu_0 \mu_M \cdot F_M \cdot S_M / h, \tag{15}$$

где B_r – остаточная магнитная индукция; $S_M = \pi R_M^2$ – площадь полюса постоянного магнита; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\mu_M = B_r / \mu_0 H_c$ – магнитная проницаемость материала постоянного магнита; H_c– коэрцитивная сила магнита по индукции (паспортные данные).

С учетом приведенных выше выражений определим намагничивающую силу в зазоре δ:

$$F_M = \frac{B_r \cdot S_M}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}, \tag{16}$$

а, следовательно, и момент сопротивления M_C, созданный этой силой

$$M_C = \frac{B_r \cdot S_M \cdot R_д}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}. \tag{17}$$

В результате дальнейших преобразований выражение для определения времени рекуперации с учетом того, что при отдаче половины запасенной энергии скорость вращения ротора-маховика станет равной 0,71ω, примет вид:

$$t = \frac{\pi h \left[R_д^2 \cdot \rho_д + n R_M^2 (\rho_M - \rho_д)\right] \cdot \left(\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}\right)}{2 B_r \cdot S_M} \times$$
$$\times \left[0{,}29\omega + \frac{P\left(\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}\right)}{B_r \cdot S_M} \cdot \frac{ln \frac{P + 0{,}29\omega \cdot B_r \cdot S_M \cdot R_д}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}}{P + \frac{B_r \cdot S_M \cdot R_д \cdot w}{\frac{\lambda_\delta}{\kappa_\mu} + \lambda_{\sigma M} + \frac{\mu_M \cdot S_M}{h}}}\right]. \tag{18}$$

Выражение (18) позволяет определить зависимость времени рекуперации активного накопителя кинетической энергии от величины мощности, отдаваемой потребителю. При этом в качестве расчетных величин используются массогабаритные и магнитные параметры ротора-маховика.

Необходимые значения параметров активного накопителя кинетической энергии определяются в зависимости от параметров конкретного типа электропривода.

Алгоритм разделения мощности за время одного цикла поворота описывается следующим образом:

1) при всех режимах работы основным источником энергии является химический источник тока;

2) в момент пуска двигателя электропривода энергия подводится от маховикового накопителя;

3) после завершения импульса пускового тока энергия подводится от суперконденсатора;

4) после набора постоянной скорости вращения поворотного механизма источником энергии является химический источник тока;

5) при снижении запаса энергии суперконденсатора до критического уровня происходит его полная зарядка постоянной мощностью от химического источника тока.

6) после завершения цикла поворота кинетическая энергия рекуперируется в суперконденсаторе и частично в химический источник тока для восстановления степени его заряженности.

Выводы

Разработан комбинированный накопитель, представляющий собой комбинацию трех видов взаимосвязанных и функционально согласованных накопителей, а именно – электрохимического накопителя энергии на основе химических источников тока, активного накопителя кинетической энергии и емкостного накопителя на основе суперконденсаторов, объединенных общей системой управления. Предложен алгоритм его работы. На основании полученных результатов можем сделать вывод, что разработанное схемотехническое решение комбинированного накопителя энергии способно обеспечить надежное бесперебойное энергообеспечение электропривода следящей системы фотоэлектростанции.

Список использованных источников

1. Шиняков, Ю. А. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка [Текст] / Ю. А. Шиняков, Ю. А. Шурыгин, В. В. Аржанов, О. А. Теущаков, А. В. Осипов, К. В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 133–138.

2. Изотов, В. Ю. Гибридный источник питания для системы ориентации солнечных батарей [Текст] / В. Ю. Изотов, Н. И. Клюй, А. В. Макаров, и др. // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1 (84). – С. 44–48.

3. Кувшинов, В. В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 [Текст] / В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина, А. Г. Косий // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т.3. – №3. – С. 73–78.
4. Патент України по заявці № а2006 06729, МПК 7 Н02 К 1/12, Буферний накопичувач кінетичної енергії / М. Я. Житник, Ю. І. Ліпський, С. В. Плаксін, Л. М. Погоріла, І. І. Соколовський; власник Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг». – від 16.06.2006.
5. Будник, В. С. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы [Текст] / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, В. Н. Кузнецов и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 176 с.
6. Накопители энергии: Учебное пособие для вузов [Текст] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. // Под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
7. Белый, П. Н. Моментный магнитоэлектрический двигатель дисковой конструкции [Текст] / П. Н. Белый. // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 4. – С. 74–77.

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

УДК 621.311.004

А. А. Колб, Ант. А. Колб, Д.В. Ципленков канд-ти техн. наук
(*Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"*)
А.В. Бобров кан-т техн. наук
(*Україна, Дніпро, Коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара*)

ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ І ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НА ДИНАМІКУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Анотація. *Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і моменту двигуна дозволяє реалізувати швидкодіючі приводи з високою точністю регулювання в сталому і перехідному режимах. Отримано рівняння асинхронного двигуна в обертовий з синхронною швидкістю системою координат x,y, дійсна вісь якої орієнтована по потокозчепленню ротора. На основі наведених рівнянь наведена структурна схема асинхронного двигуна з синхронно обертовою системою координат, орієнтованою по вектору потокозчеплення ротора. Розроблена функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна на основі АІН з ШІМ та структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН-ШІМ.*
Ключові слова: *асинхронний електропривод, потокозчеплення, частотне регулювання.*

Аннотация. *Возможность регулирования мгновенных значений потокосцепления и момента двигателя позволяет реализовать быстродействующие приводы с высокой точностью регулирования в установившемся и переходном режимах. Получены уравнения асинхронного двигателя во вращающейся с синхронной скоростью системой координат x, y, действительная ось которой ориентирована по потокосцеплению ротора. На основе приведенных уравнений получена структурная схема асинхронного двигателя в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Разработана функциональная схема регулирования момента и потока асинхронного двигателя на основе АИН с ШИМ и структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе АИН-ШИМ.*
Ключевые слова: *асинхронный электропривод, потокосцепление, частотное регулирование.*

Abstract. The ability to control the instantaneous values of the flux linkage and the motor torque makes it possible to realize high-speed drives with high control accuracy in the steady state and transient modes. The equations of an asynchronous engine are obtained in a coordinate system x, y rotating at a synchronous speed, whose real axis is oriented along the rotor flux linkage. Based on the above equations, a structural diagram of an asynchronous motor in a synchronously rotating coordinate system oriented along the rotor flux linkage vector is obtained. A functional scheme for controlling the moment and flow of an asynchronous motor based on AVI with PWM and a block diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive based on AVI-PWM has been developed.
Keywords: *asynchronous electric drive, linkage, frequency regulation.*

Актуальність роботи. Тенденція розвитку частотно-регульованих приводів така, що область їх застосування постійно розширюється. Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і мо-

менту двигуна дозволяє реалізувати швидкодіючі приводи з високою точністю регулювання в сталому і перехідному режимах.

Основною областю застосування векторного управління є приводи з напруженими динамічними режимами роботи, які вимагають великого діапазону регулювання швидкості і високої швидкодії.

Метою роботи є дослідження впливу чотирьох внутрішніх і перехресних зв'язків, три з яких є нелінійними, на динамічні показники асинхронного електроприводу на основі АІН з ШІМ.

Матеріали і результати досліджень. В обертовій з синхронною швидкістю системі координат x, y дійсна вісь x може бути орієнтована по одному з основних векторів: $\bar{U}_1,\ \bar{I}_1,\ \bar{I}_2,\ \bar{\psi}_1,\ \bar{\psi}_2$, а уявна вісь y випереджає вісь x на 90°. Оскільки в усталеному режимі просторові вектори взаємно нерухомі (при синусоїдальній напрузі живлення), то система координат, орієнтована по одному з вказаних векторів, придатна для синтезу регуляторів та оптимізації приводу.

Додаткові переваги, з погляду простоти уявлення асинхронного двигуна як об'єкту регулювання й синтезу регуляторів, одержуються в синхронно обертовій системі координат, вісь x якої орієнтована по потокозчепленню ротора. Це зумовлено тим, що при будь-якій іншій орієнтації системи координат потокозчеплення ротора визначається як сума проекцій векторів струмів статора і ротора на напрям вектора потокозчеплення ротора. Лише у тому випадку, коли як опорний вектор вибрано потокозчеплення ротора, проекція струму ротора на цю вісь буде дорівнювати нулю. Внаслідок цього потокозчеплення ротора залежить тільки від проекції струму статора на вісь x (потокостворююча складова), а інша проекція на вісь y є при цьому моментостворюючою складовою. При записі рівнянь у системі координат x, y асинхронний двигун описується такими ж рівняннями, як і двигун постійного струму. При цьому складова струму статора i_{1x} виконує роль струму збудження. Складова i_{1y} аналогічно струму якоря взаємодіє з потокозчепленням ротора і створює електромагнітний момент. Це надає можливості роздільного керування потокозчепленням і моментом двигуна. Керування асинхронним двигуном стає таким же, як і машиною постійного струму, з тією лише різницею, що обидві регульовані змінні є проекціями i_{1x} і i_{1y} одного і того ж струму статора.

Для отримання рівнянь асинхронного двигуна в обертовий з синхронною швидкістю $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ (де – ω_1 кутова частота напруги живлення або швидкість ідеального холостого ходу двополюсної узагальненої машини) системою координат x,y, дійсна вісь якої орієнтована по потокозчепленню ротора, використовуються початкові рівняння (1-5) [1, 2].

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt}; \tag{1}$$

$$O = \bar{I}_2 R_2' + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt}; \tag{2}$$

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_2 L_m = \bar{\psi}_m + L_{1\sigma}\bar{I}_1 = k_2\bar{\psi}_2 + \bar{I}_1 L_{1n}; \tag{3}$$

$$\bar{\psi}_2 = \bar{I}_2 L_2 + \bar{I}_1 L_m = \bar{\psi}_m + L_{2\sigma}\bar{I}_2 = k_1\bar{\psi}_1 + \bar{I}_2 L_{2n}; \tag{4}$$

$$\bar{\psi}_m = \bar{\psi}_1 - L_{1\sigma}\bar{I}_1 = k_2(\bar{\psi}_2 + \bar{I}_1 L_{2\sigma}), \tag{5}$$

де $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ – узагальнені вектори струмів статора і ротора; $\bar{\psi}_1$, $\bar{\psi}_2$ – узагальнені вектори потокозчеплення статора і ротора; $L_1 = L_m + L_{1\sigma}$, $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$ – повна індуктивність статора і ротора в результаті дії трьох фаз; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора; $L_m = \frac{3}{2}L_{1.2}$ – еквівалентна взаємна індуктивність статора і ротора в результаті дії трьох фаз, яка у півтора рази більше взаємної індуктивності $L_{1.2}$ окремо взятої фази.

Згідно виразів (3) та (4) маємо:

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_{1n} + K_2\bar{\psi}_2; \tag{6}$$

$$\bar{I}_2 = K_2(\bar{\psi}_2/L_m - \bar{I}_1), \tag{7}$$

де $L_{1n} = L_1 - L_m^2/L_2$ – перехідна індуктивність кола статора; $K_2 = L_m/L_2$ – коефіцієнт зв'язку обмоток ротора.

З спільного вирішення наведених виразів отримаємо після перетворень

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= \bar{I}_1 R_1'(1 + pT_1') + j\bar{I}_1 L_{1n}\omega_1 + jK_2 Z_n \omega\bar{\psi}_2 - K_2\frac{\psi_2}{T_2}; \\ 0 &= \frac{\bar{\psi}_2 R_2'}{L_2} - K_2 R_2'\bar{I}_1 + p\bar{\psi}_2 + j(\omega_1 - Z_n\omega)\cdot\bar{\psi}_2, \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

де $T_1' = L_{1n}/R_1'$– перехідна стала часу; $R_1' = R_1 + R_2' K_2^2$.

Розкладаючи (8) на дійсну і уявну складові, отримаємо з урахуванням $\psi_{2y} = 0$:

$$\left.\begin{aligned} U_{1x} &= i_{1x}R_1'(1+pT_1') - i_{1y}L_{1n}\omega_1 - \frac{K_2}{T_2}\psi_{2x,} \\ U_{1y} &= i_{1y}R_1'(1+pT_1') + i_{1x}L_{1n}\omega_1 + K_2Z_n\omega\psi_{2x,} \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

$$\left.\begin{aligned} &\psi_{2x}(1+pT_2) = L_m i_{1x}; \\ &\psi_{2x}\omega_2 = i_{1y}R_2'K_2 \quad \textit{або} \quad \psi_{2x}(\omega_1 - Z_n\omega) = i_{1y}R_2'K_2, \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

де $\omega_2 = \omega_1 - Z_n\omega$ – частота струму ротора; $T_2 = \frac{L_2}{R_2'}$ стала часу кола ротора.

На основі наведених рівнянь на рис.1 наведена структурна схема асинхронного двигуна з синхронно обертовою системою координат, орієнтованою по вектору потокозчеплення ротора.

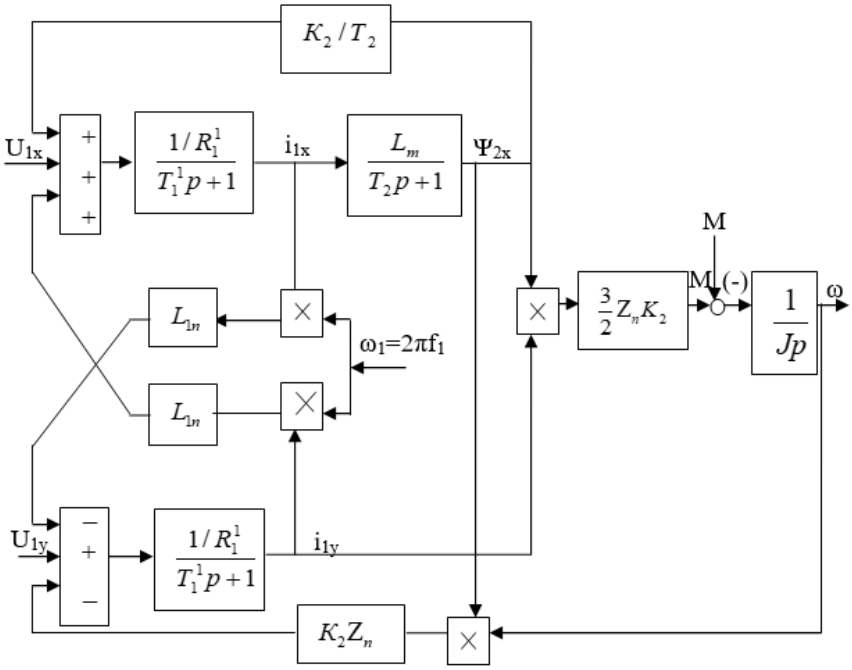


Рис. 1. Структурна схема асинхронного двигуна в синхронно обертовій системі координат, орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора

Структурна схема асинхронного двигуна в синхронно обертовій системі координат, орієнтованій по потокозчепленню ротора, має найменшу кількість перехресних зв'язків, простий вираз для моменту двигуна, відсутні нелінійності в прямому каналі регулювання. Головною перевагою цієї структурної схеми є те, що вона містить лише одну складову потокозчеплення. Передаточні функції регуляторів є найпростішими, хоча через наявність перехресних зв'язків не вдається їх синтезувати класичним способом.

Отже, в обертових та орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора осях x, y реальні напруги, що прикладені до обмоток статора, перетворюються в постійну напругу $U_{1x} = U_{ф.max}$, прикладену лише до обмотки по осі x. До обмотки, розташованої по осі y, прикладена напруга дорівнює нулю. Це пояснюється тим, що обертове магнітне поле в обертовій системі координат може створюватися постійним струмом.

На рис. 2 наведена функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна. Відповідно до принципу підпорядкованого регулювання координат САР містить два канали керування (потоку та моменту). Внутрішніми регуляторами обох каналів є регулятори струмів i_{1X} і i_{1Y}, на виході яких здійснюється компенсація основних перехресних зв'язків. Аналогічним чином компенсуються внутрішні зворотні зв'язки по ψ_2. Зовнішнім контуром регулятора моменту є регулятор швидкості.

На рис. 3 наведена структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН-ШІМ.

Передаточні функції регуляторів з урахуванням позначень рис.3 мають вигляд:

– регулятори струму по осях x і y

$$W_{pc} = \frac{T_1'p+1}{a_cT_\mu K_{np}K_c(1/R_1')p};$$

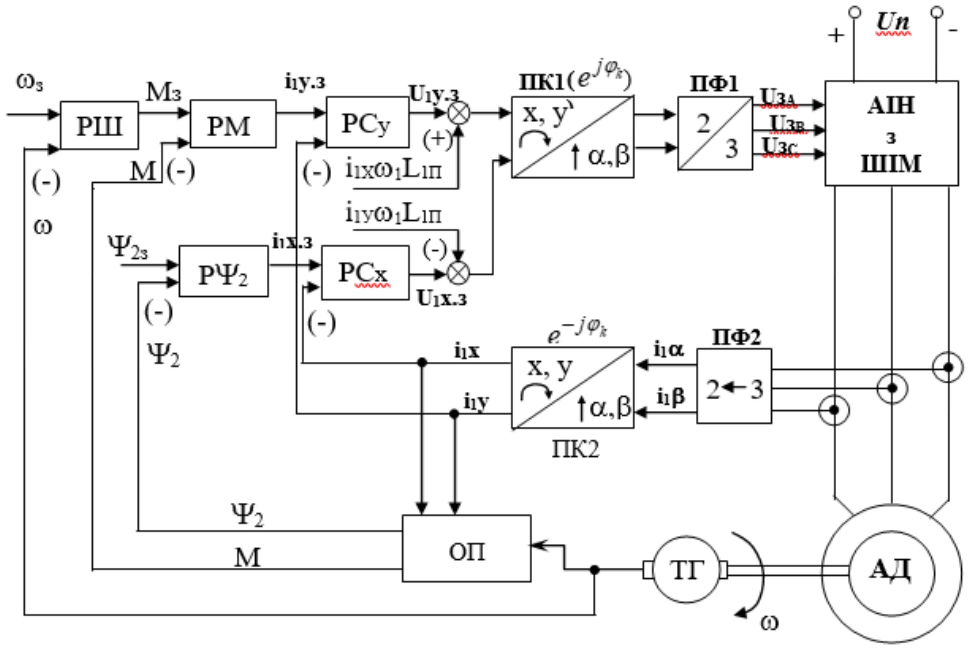


Рис. 2. Функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна на основі АІН з ШІМ: ОП – обчислювальний пристрій; $i_{1x}\omega_1 L_{1п}$, $i_{1y}\omega_1 L_{1п}$ – компенсація перехресних зв'язків; ПК1…ПК2 – перетворювачі координат; ПФ1...ПФ2 – перетворювачі фаз

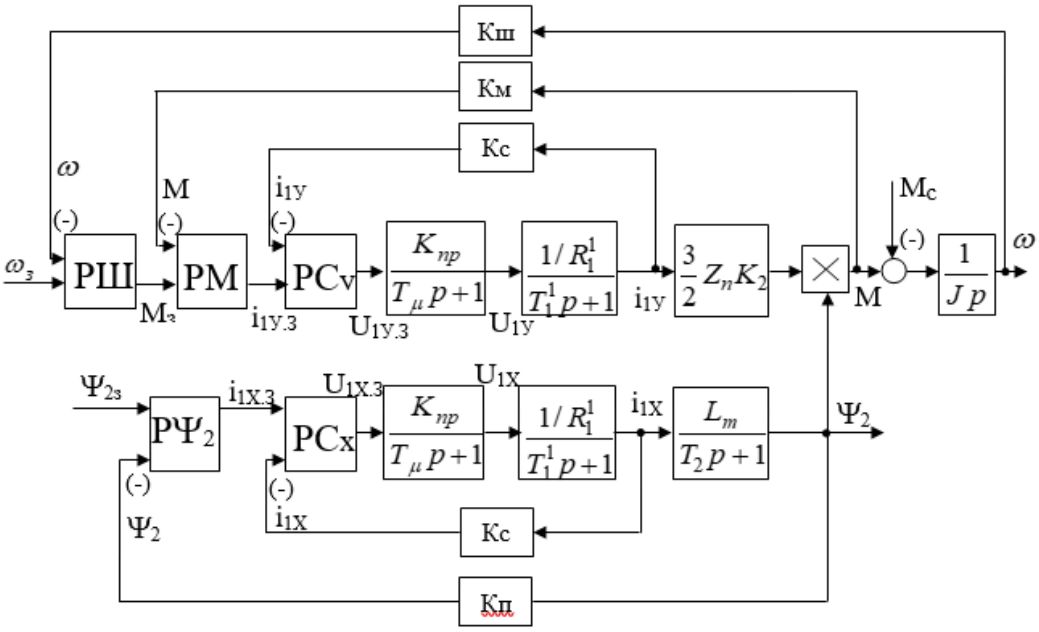


Рис. 3. Структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН з ШІМ

– регулятор моменту

$$W_{р.м} = \frac{К_с}{a_с a_м T_\mu K_м K\ р}; \text{ де } K = \frac{3}{2} Z_n \psi_2 К_2;$$

– регулятор швидкості (пропорційний)

$$W_{р.ш} = \frac{J}{a_ш a_с a_м T_\mu K_ш (1/K_м)} = К_{рш};$$

– ПІ-регулятор швидкості

$$W_{\text{р.ш}} = K_{\text{рш}} \frac{4T_{\mu\text{ш}}p+1}{T_{\mu\text{ш}}p};$$

– регулятор потоку ψ_2

$$W_{p\psi} = \frac{T_2 p+1}{a_{\text{с}} a_{\psi} T_{\mu}(1/K_c) L_m K_{\text{п}}\text{р}},$$

де $K_{np} = U_{\text{кн}}/U_d$ – коефіцієнт передачі перетворювача; $U_{\text{кн}}, U_d$ – номінальна напруга керування й у ланці постійного струму; $T_{\mu\ \text{ш}} = a_{\text{ш}}\text{a}_c\text{a}_{\text{м}}T_{\mu}$. Для розглянутої схеми некомпенсована мала стала часу внутрішнього контуру струму приймається $\text{T}_{\mu} = 0{,}001 \ldots 0{,}002$с.

Висновки.

Комп'ютерне моделювання динаміки асинхронного електроприводу на підставі структурної схеми рис.3 показало:

1. Задовільна компенсація перехресних зворотних зв'язків вимагає високої швидкодії як вимірювань цих сигналів, так і внутрішніх контурів регулювання.
2. Найбільший вплив на характер перехідних процесів роблять перехресні зворотні зв'язки.
3. При високій швидкодії внутрішніх контурів ($\text{T}_{\mu} = 0{,}001 - 0{,}002$ с) і достатній резерв напруги в колі постійного струму вплив перехресних зв'язків на динамічні процеси стає незначним.

Список використаних джерел

1. Колб Ант. А. Теорія електроприводу [Текст]: навч. посібник / Ант. А. Колб, А.А. Колб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Д., Національний гірничий університет, 2011. – 565 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер.с нем.-М.-Л.:Госэнергоиздат, 1963. – 744с.

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

УДК 621-926

В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.О. Боровик, Д.О. Шепетько
(Україна, Дніпро, Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”)

РАЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЗБУДЖЕННЯ З НЕПРЯМИМ РОЗЩЕПЛЕННЯМ І КОНДЕНСАТОРАМИ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ПРИВОДІВ З ГАРАНТОВАНИМ ЗАПУСКОМ

Анотація. *Запропоновано результати пошуку раціонального схемного рішення системи збудження із непрямим розщепленням і однаковими ємностями при регулюванні числа вільних від конденсаторів полюсів, що забезпечить гарантований запуск і синхронізацію потужних синхронних приводів механізмів з важким пуском за умови одночасного зниження масо-габаритних показників зосереджено-розподілених реактивних компонентів.*

Ключові слова: *механізми з важким пуском, потужний синхронний привід, система збудження із непрямим розщепленням і однотипними конденсаторами, резонансні режими роботи збудження, раціональна схема системи збудження.*

Аннотация. *Предложены результаты поиска рационального схемного решения системы возбуждения с косвенным расщеплением и одинаковыми емкостями при регулировании числа свободных от конденсаторов полюсов, что обеспечит гарантированный запуск и синхронизацию мощных синхронных приводов механизмов с тяжелым пуском при условии одновременного уменьшения массо-габаритных показателей сосредоточенно-распределенных реактивных компонентов.*

Ключевые слова: *механизмы с тяжелым пуском, мощный синхронный привод, система возбуждения с косвенным расщеплением и однотипными конденсаторами, резонансные режимы работы возбуждения, рациональная схема системы возбуждения.*

Abstract. *The results of studies on the search for a rational circuit design of the excitation system with indirect splitting and equal capacitance when regulating the number of capacitor-free poles are shown to ensure guaranteed start and synchronization of powerful synchronous drives of heavy start mechanisms under the conditions of simultaneous reduction of mass-distributed reactive components.*

Keywords: *heavy start mechanisms, powerful synchronous drive, excitation system with indirect splitting and capacitors of the same type, resonant operation modes of excitation, rational scheme of the excitation system.*

Відомо, що гірничо-металургійна промисловість характеризується наявністю механізмів із важкими умовами запуску. До таких слід віднести [1]:

- потужні щокові дробарки із моментом зрушення 2...2,5 від номінального, для яких гарантований запуск можливий за значного коефіцієнта запасу встановленої потужності привідного двигуна при одночасному погіршені енергетичних характеристик сталого режиму. Енергоефективність сталого режиму роботи головного приводу досягається за рахунок залучення додаткового розгінного двигуна, якій працює лише під час запуску;
- конусні дробарки, де при їх вмиканні запуск супроводжується заклинюванням валків кусками руди. Зазвичай проблема вирішуєтьсь шляхом підвищення на 30...50 % встановленої потужності приводу;
- барабанні млини, для яких вдалий запуск за зниженої напруги живлення через високі пускові струми можливий при кратності пускового моменту двигуна на рівні не менше ніж 1,4...1,5 для стрижневих і 1,2...1,3 для кульових млинів. Гарантований запуск млинів забезпечується вибором привідного двигуна із запасом потужності в 15…25 %;
- довгі стрічкові конвеєри, де необхідна кратність пускового моменту повинна бути не нижче 1,4…1,5 номінального, а при тривалих зупинках обладнання необхідна кратність пускових моментів суттєво збільшується.

Таким чином, для більшості розглянутих механізмів привідний синхронний двигун має забезпечити пусковий асинхронний момент на рівні не менше 1,5 від номінального (рис. 1).

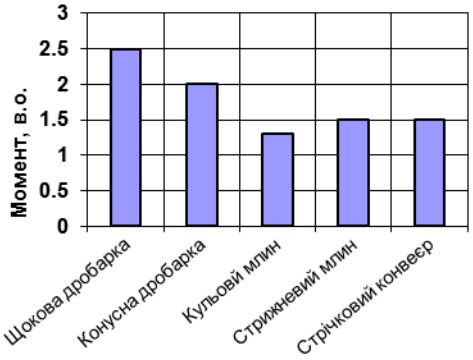


Рис. 1. Діаграма бажаних пускових моментів енергоємного обладнання

Розглянемо покращення пускових властивостей приводу на прикладі потужного синхронного двигуна барабанного млина самоподрібнення типу ММС-90х30, в якому із-за тривалого простою з причини планової або позапланової зупинки виникає ущільнення внутрішньо-барабанного завантаження. Наслідок – підвищення моменту інерції механізму, що сприяє понад обмеженому зростанню часу запуску двигуна, а демпферна обмотка при цьому може розігріватися до неприпустимої температури. Крім того, класична конструкція двигунів СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4, за таких умов, не завжди гарантує синхронізацію приводу, що вимагає повторного запуску машини. Зазвичай завод-виробник таких двигунів лімітує не більше двох запусків поспіль, після чого потрібне охолодження машини впродовж шести годин. Очевидно, що така тривалість простою при продуктивності млина в 600 тон на годину супроводжується значними втратами. Виходячи із наданого обґрунтування актуальність роботи, щодо покращення пускових властивостей синхронного приводу не викликає сумніву.

Світова тенденція до ресурсозбереження спонукає промисловість комплектувати енергонапружене обладнання синхронними приводами, які традиційно запускають методом прямого асинхронного пуску. Разом з простотою і надійністю такого методу для нього є характерним значний пусковий струм, який може сягати дев’яти номінальних, та обмежена приєднувальна маса, що спричиняє перегрів демпферної обмотки двигуна.

Усунення таких недоліків досягається за рахунок застосування реакторного або автотрансформаторного пуску, що поряд із зниженням пускового струму зменшує і пусковий момент. Розгін у межах перевантажувальної здатності двигуна забезпечує частотний пуск, однак це вимагає застосування розгінного перетворювача на повну потужність двигуна.

Одним із методів покращення пускових властивостей синхронного приводу є використання додаткового пускового моменту, який генерується обмоткою збудження, що працюють у резонансних режимах. Існуючі нині наукові роботи стосуються обмоток збудження з безпосереднім розщепленням кожної полюсної котушки [2] і неоднаковими конденсаторними групами (рис. 2), що дозволяють створити необхідний вигляд пускової характеристики. За усіх переваг такої конструкції її головний

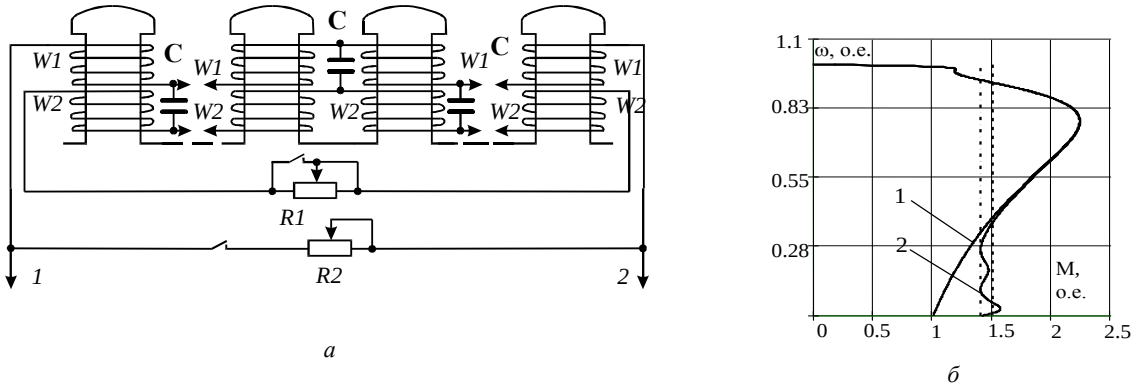


Рис. 2. Система збудження з безпосереднім розщепленням і різними конденсаторними групами:
а **-** *W1,W2* **– верхні і нижні напівкотушки;** *R1,R2* **– розрядний опір; *C* – конденсатори;**
1,2 – клеми приєднання живлення;
б **- пускова характеристика з класичним (1) та розщепленим (2) збудженням**

недолік – розділ полюсної котушки навпіл, що не задовольняє технологію їх виготовлення. Більш технологічною у цьому плані є конструкція обмотки збудження з непрямим методом розщеплення [3] та одним типом зосереджених конденсаторів рис. 3. Остання схема індуктора має більш гладкі пускові характеристик при вдвічі зменшеній кількості конденсаторів у порівнянні з попередньою [2] конструкцією, а величина їх ємності знижується за рахунок зростання індуктивності полюсних котушок.

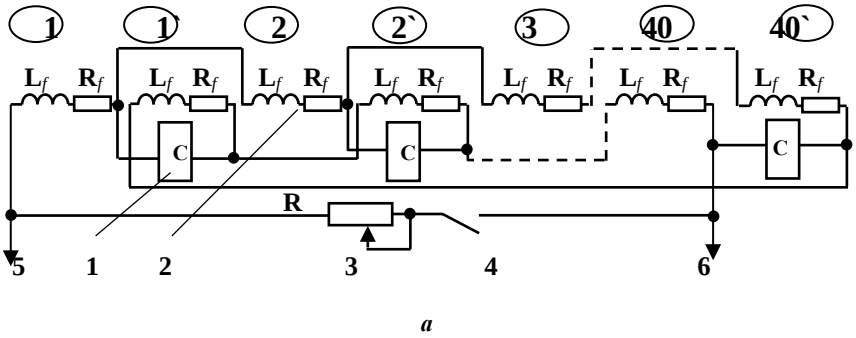
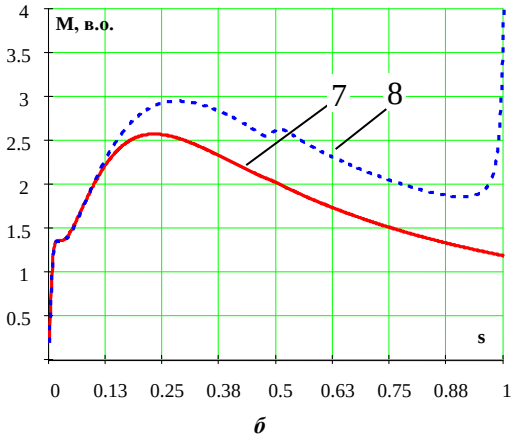


Рис. 3. Схема резонансного збудження (*а*) і пускові характеристики (*б*) синхронного двигуна:

1 – полюсні конденсатори;
2 – полюсні котушки;
3 – розрядний опір;
4 – ключ перемикання опору;
5, 6 – клеми подачі живлення
7 – класичне збудження;
8 – розщеплене з конденсаторами

– нумерація умовно верхнього і нижнього ряду котушок



На жаль, конструкція викладена в роботі [3], також має досить велику кількість полюсних конденсаторів, що зрештою стримує застосування такого електропривода у промисловості.

Метою даної роботи є подальше вдосконалення схеми збудження з непрямим методом розщеплення за рахунок монтажу конденсаторів не на кожній парі полюсів і пошук їх раціональної кількості за умови отримання не гірших пускових характеристик. Крім того, є очевидним, що зниження кількості полюсних конденсаторів зменшить їх масо-габаритні показники і відповідно покращить інертні властивості системи.

Для здійснення досліджень пропонується універсальна схема, яка відображає спосіб регулювання числа вільних від конденсаторів полюсів (рис. 4), на якій параметр ***n*** та ***n`*** показують граничну кількість

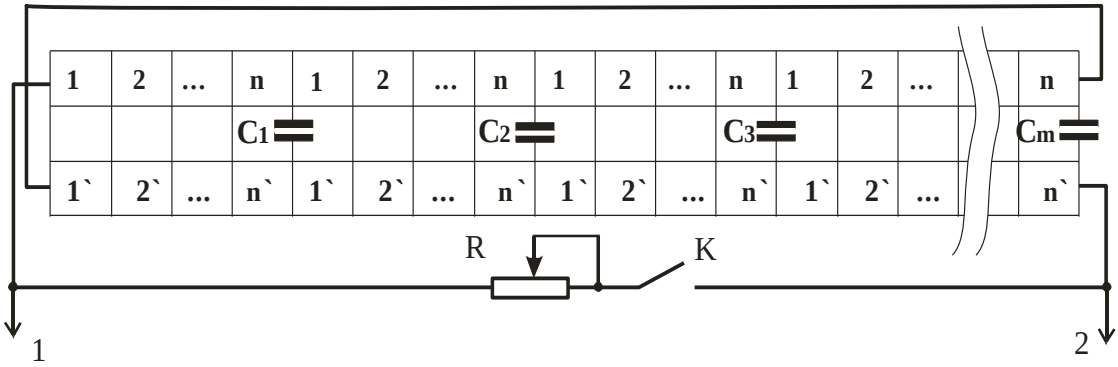


Рис. 4. Вигляд схеми, що ілюструє метод дослідження системи збудження

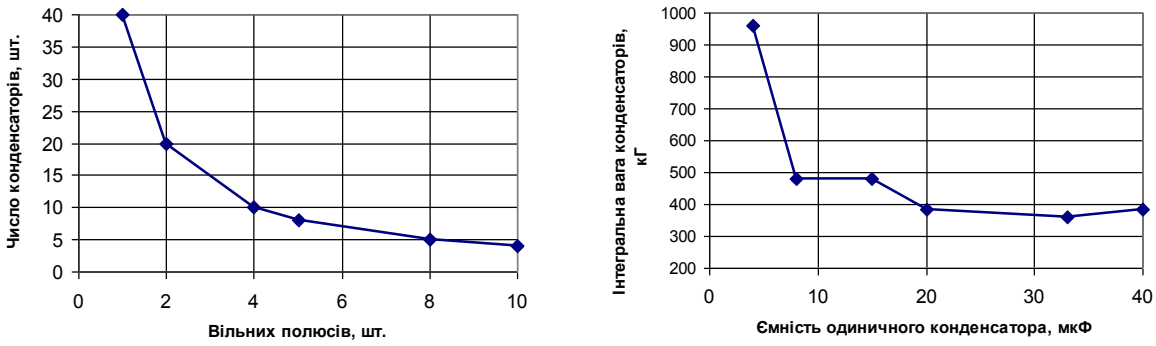
послідовно увімкнутих умовно верхніх та нижніх полюсів, що розташовані між поперечно приєднаних конденсаторів відповідно до схеми рис. 3, *а*. Параметр **m** відповідає максимальному номеру конденсатора, який приєднують до останньої пари полюсів у загальному ряді умовно верхніх та нижніх полюсів. Алгоритм для розрахунку та метод побудови пускових характеристик описані в роботі [3]. Програмою експериментів передбачено зміну кількості вільних полюсів за планом таблиці. Резонансна ємність підбирається за умови забезпечення асинхронного пускового моменту на рівні значення 1,5 від номінального, що відповідно має задовольняти вимогам більшості гірничо-металургійних механізмів із важкими умовами запуску.

В процесі дослідження був задіяний млиновий синхронний двигун СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4.

Програма досліджень

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
n1 – кількість полюсів умовно верхнього ряду котушок	1	2	4	5	8	10
n1` – кількість полюсів умовно нижнього ряду котушок	1	2	4	5	8	10
m – кількість конденсаторів	40	20	10	8	5	4

Результати впливу регулювання числа вільних полюсів обмотки збудження із непрямим розщепленням і однаковими конденсаторами на пускові властивості синхронного привода і параметри конденсаторів, за умови фіксації пускового моменту на рівні 1,5 в.о. та дотримання показників таблиці, наведені на рис. 5.



а *б*

Рис. 5. Залежності впливу числа вільних полюсів на параметри конденсаторів

Користуючись довідковими матеріалами джерела [4] отримана оцінка інтегральної ваги конденсаторів для різних схемних варіацій системи розщепленого збудження (рис. 5, *б*). В результаті стало очевид-

ним, що раціональний варіант схеми збудження може бути забезпечений за наявності восьми вільних полюсів та п'яти полюсних конденсаторів з індивідуальною ємністю в 33 мкФ, де їх загальна вага становить приблизно 360 кілограмів. При вазі індуктора в 65 тон вага навісних зосереджено-розподілених реактивних елементів практично не впливає на інертні властивості синхронного двигуна, а суттєве зменшення їх числа безумовно спростить конструкцію системи розщепленого збудження, що, як наслідок, надасть нових якісних переваг синхронним двигунам.

Отже, отримані результати досліджень дозволяють зробити такі висновки:

- гірничо-металургійна промисловість має значний клас механізмів із важкими умовами пуску, для яких є характерним забезпечення пускового моменту не менше 1,5 від номінального;
- ущільнення внутрішньо-барабанного завантаження підвищує інертність механізму, що затягує запуск і не гарантує синхронізацію;
- невдалий запуск класичних синхронних приводів призводить до тривалих простоїв, які ведуть до значних економічних втрата;
- розщеплені обмотки збудження створюють бажані форми пускових характеристик, але складність конструкції обмежує їх впровадження;
- встановлено, що за будь-якої композиції схеми розщепленої обмотки збудження сумарна ємність для неї залишається на рівні близько 160 мкФ;
- монотонний характер зміни параметрів модернізованого збудження (рис. 5, *а*) дає можливість стверджувати, що його раціональна схема може бути реалізована за наявності восьми вільних полюсів та п'яти полюсних конденсаторів, що зрештою спрощує конструкцію і не суттєво впливає на інертні властивості приводу за умови одночасного збереження не гірших пускових показників двигуна у порівнянні з варіантом, який наведений у роботі [3].

Список літератури

1. Грейсух М.В. Выбор способа пуска синхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей / М.В. Грейсух // Электричество. – 1959. – №9 – С. 19–23.
2. Патент України UA 31044 A, 6 B 02K 19/36 Синхронний двигун. / В.І.Кириченко, В.С. Гомілко, В.А. Бородай; Заяв. 03.07.1998; Опубл. 15.12.2000. Бюл. №7-II. – 3 с.: ил.
3. Borodai V. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms [Text] / V. Borodai, R. Borovyk, O. Nesterova. //Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2017. –Vol.8. – No.8. – P. 133-142.
4. http://www.elektrosnab.su/catalog/43/202/.

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

УДК 681.518.54

Л.І. Мещеряков, д-р техн. наук, О.М. Галушко, О.І. Сироткіна, канд. техн. наук, С.Д. Приходченко
(Україна, Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

АНАЛІТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ГІРНИЧИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ МОМЕНТНИХ ФУНКЦІЙ

Анотація. *Показана аналітична сутність розроблених числових оцінок тісноти статистичних моментних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів систем виміру за структурами "вхід-вихід", які являються у визначеній формі знаннями, що можуть бути використані в якості інформаційних сутностей при формуванні предметних галузей систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень для задач інформаційного забезпечення автоматизованих систем керування гірничими комплексами в умовах невизначенності стану останніх.*

Ключові слова: *моментні функції, умовне математичне очікування, асиметрія, ексцес.*

Аннотация. *Показано аналитическое содержание разработанных числовых оценок тесноты статистических моментных связей случайных значений энергоинформационных сигналов систем измерения по структуре «вход-выход», которые являются в определенной форме знаниями, и могут быть использованы в качестве информационных сущностей при формировании предметных областей систем интеллектуальной поддержки принятия решений для задач информационного обеспечения автоматизированных систем управления горными комплексами в условиях неопределенности состояния последних.*

Ключевые слова: *мометные функции, условное математическое ожидание, асимметрия, эксцесс.*

Abstract. *The analytical maintenance is shown of the developed number estimations of crowd conditions of statistical momentnih communications of accidental values of energoinformatsionnih signals of the systems of measuring on structure «entrance-return», which are knowledges in the definite form, and can be used as informative essences at forming of subject domains of the systems of intellectual support of acceptance of decisions for the tasks of the informative providing of the automated systems of management by the mountain complexes in the conditions of vagueness of state of the last.*

Keywords: *mometnie functions, conditional expected value, asymmetry, excess*

Вступ. Важливою проблемою сучасної теорії та практики керування являється достовірність спостереження оперативного стану і синтез достовірних моделей технологічних комплексів, що цілком обумовлено наявністю якісного інформаційного забезпечення. На базі інформаційних характеристик об'єктів керування визначаються структури і параметри, закони керування, вибираються відповідні технічні засоби реалізації автоматизованих систем керування технологічних процесів. Ефективним методом побудови ефективних моделей гірничих комплексів являється ідентифікація. При цьому постійно існуюча модернізація об'єктів автоматизації вимагає розширення та поглиблення обсягу інформаційного забезпечення, удосконалення на основі цього методів синтезу моделей з основною метою підвищення точності та надійності реального відображення гірничих електромеханічних комплексів, що моделюються. Проблема отримання якісних моделей виникає для гірничих комплексів, де розробляються автоматизовані системи керування технологічними процесами при дуже обмеженій апріорній інформації. Відсутність адекватного інформаційного забезпечення відповідно гальмує використання нових теоретичних досліджень та засобів автоматизованого керування, і в значній мірі ліквідувати це можна з допомогою ідентифікації на основі енергоінформаційних характеристик, які виділяються в робочих режимах гірничих електромеханічних комплексів.

Постановка задачі. Енергетична діагностика та відповідна ідентифікація на її основі полягає в тому, що можна останню застосувати на кожнім етапі життєвого циклу гірничих комплексів, що обумовлено як різним характером виникаючих дефектів, і відображенням їх в сигналах, і розмаїтістю умов роботи комплексів, і вимогами цільових функцій діагностування. В результаті виконання процедур цих функцій формується словник характерних діагностичних ознак, що ймовірно відбиває виникнення визначених несправностей. При відсутності характерних діагностичних ознак розпізнавання станів гірничих комплексів може бути виконане за сукупністю ознак. Найважливішим у переліку вимог, що застосовуються до діагностичних ознак, є вимога про виконання необхідної глибини діагнозу за інтегрованим критерієм максимуму простоти використовуваного для розпізнавання алгоритму і мінімальної вартості системи ідентифікації. Для збільшення контрастних розпізнавальних характеристик можна застосувати вищі моменти розподілів ймовірностей миттєвих значень енергоінформаційних сигналів. При цьому використання чисельних характеристик, через необхідність спрощення розпізнавальних алгоритмів, є більш переважна в порівнянні з багатомірними кореляційними або спектральними характеристиками.

Основний зміст роботи. Враховуючи загальні інформаційні властивості моментних функцій за аналогією з характеристиками дисперсії оцінка параметра асиметрії функції розподілу вихідної змінної $A(Y)$ для структури "вхід-вихід" буде дорівнювати сумі інформаційних характеристик асиметрії умовного математичного очікування $AM(Y|U)$, математичного очікування умовної асиметрії $MA(Y|U)$ та складової корекції за виразом

$$A(Y_u) = AM(Y|U) + MA(Y|U) + \frac{3M\left\{\left[Y - M(Y|X)\right]^2\left[M(Y|X) - MY\right]\right\}}{\sigma_Y^3}, \tag{1}$$

Відповідно інформаційні характеристики четвертого центрального моменту (ексцес) в цілому відображають протяжність спадів розподілення, і змінюється від 1 до ∞ для різних законів розподілення, тому цілком доцільно використати оцінку, що дорівнює зворотній величині з його кореня (контрексцес), яка змінюється в стандартному інтервалі 0 – 1. Таким чином оцінку ексцесу доцільно здійснювати через оцінку контрексцесу. В результаті сформована моментна характеристика ексцесу вихідної змінної *A(Y)* буде відображатися через суму інформаційних характеристик ексцесу умовного математичного очікування $EM(Y|U)$, математичного очікування умовного ексцесу $ME(Y|U)$ і додаткової корекції до структури "вхід-вихід" за виразом

$$E(Y_u) = EM(Y|U) + ME(Y|U) + \frac{4M\left\{\left[Y - M(Y|X)\right]^3\left[M(Y|X) - MY\right]\right\}}{\sigma_Y^4} + , \\ + \frac{6M\left\{\left[Y - M(Y|X)\right]^2\left[M(Y|X) - MY\right]^2\right\}}{\sigma_Y^4} \tag{2}$$

Сформовані залежності (1) – (2) відкривають можливість підвищення якості діагностичного інформаційного забезпечення, яке будується на інформаційних властивостях енергоінформаційних сигналів гірничих електромеханічних комплексів. Так як $AM(Y|U)$ та ексцес $EM(Y|U)$ умовного математичного очікування відображають ту частину із сукупних флуктуацій сигналу вихідної змінної *Y*, що цілком визначається тільки інформаційною динамікою вхідної змінної *U*. У той же час математичні очікування умовної асиметрія $MA(Y|U)$ та ексцесу $ME(Y|U)$ характеризують другу складову частину загальних асиметрії *A(Y)* та ексцесу *E(Y)* вихідної змінної *Y*, котра цілком визначається динамікою множини інших вхідних змінних або змінних стану, що не спостерігаються. Таким чином, при використанні інформаційних властивостей даних умовних чисельних характеристик вимірюваних сигналів можна здійснити глибоку цілеспрямовану фільтрацію використовуваного діагностичного сигналу, що несе в собі інформаційний вплив значної сукупності змінних. Крім того асиметрію $AM(Y|U)$ та ексцес $EM(Y|U)$ умовного математичного очікування можливо використати і як якісні характеристики ступеня зв'язку вхідних *U* та вихідних змінних *Y*. А в якості характеристик ступеня невизначеності, неадекватності синтезованої інформаційної моделі до оригіналу гірничого комплексу можна використовувати математичне очікування умовної асиметрії $MA(Y|U)$ та математичне очікування умовного ексцесу $ME(Y|U)$, що відображають оцінки множини невизначених впливів на об'єкт керування.

Тіснота нелінійного зв'язку випадкових величин виходу *Y* і входу U визначається оцінкою дисперсійного відношення $\eta^2_{y|u}$ випадкової величини *Y* відносно U [1, 3, 4, 5], для системи структури "вхід-вихід"

$$\eta^2_{My|u} = \frac{DM(Y|U)}{DY}, \tag{3}$$

де відповідно характеристика дисперсії умовного математичного очікування $DM(Y|U)$ визначається завідомими виразами [1, 5]. Класично дисперсійне відношення $\eta_{y|u}$ інтерпретується як кількісна характеристика міри визначеності стохастичного зв'язку вихідної величини *Y* за значеннями вхідної величини U.

Значне поліпшення інформаційного забезпечення автоматизації процесів керування гірничими комплексами можна здійснити за рахунок вводу нових структур дисперсійних відношень вибірок випадкових величин систем виходу *Y* і входу *U* об'єктів керування, як відношення відповідно дисперсій умовних дисперсій, умовних асиметрій та умовних ексцесів до дисперсії генеральної вибірки випадкової величини виходу *Y*, що дозволяє відповідно підвищити точність оцінки нелінійних зв'язків технічних та технологічних параметрів гірничих комплексів.

$$\eta^2_{Dy|u} = \frac{DD(Y|U)}{DY}, \qquad \eta^2_{Ay|u} = \frac{DA(Y|U)}{DY}, \qquad \eta^2_{Ey|u} = \frac{DE(Y|U)}{DY}, \tag{4}$$

де $DD(Y|U)$ – інформаційна оцінка дисперсії умовної дисперсії випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $DA(Y|U)$ – інформаційна оцінка дисперсії умовної асиметрії випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $DE(Y|U)$ – інформаційна оцінка дисперсії умовного ексцесу випадкової функції вибірки сигналу виходу Y відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; DY – дисперсія генеральної вибірки випадкового сигналу виходу *Y*.

Для підвищення точності та достовірності інформаційного і програмного забезпечення автоматизованих систем керування технологічними процесами в гірничих комплексах, як перспективні виступають в якості діагностичних оцінок нелінійного зв'язку між випадковими інформаційними сигналами виходу Y і входу U характеристики асиметрійних відношень $\lambda_{My|u}$, $\lambda_{Dy|u}$, $\lambda_{Ay|u}$, $\lambda_{Ey|u}$ випадкової вихідної величини Y відносно тільки вхідної змінної U для структури "вхід-вихід" (5)

$$\lambda^3_{My|u} = \frac{AM(Y|U)}{AY}, \qquad \lambda^3_{Dy|u} = \frac{AD(Y|U)}{AY},$$
$$\lambda^3_{Ay|u} = \frac{AA(Y|U)}{AY}, \qquad \lambda^3_{Ey|u} = \frac{AE(Y|U)}{AY}, \tag{5}$$

де $AM(Y|U)$ – інформаційна оцінка асиметрії умовного математичного очікування випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно функції вибірки сигналу входу U; $AD(Y|U)$ – інформаційна оцінка асиметрії умовної дисперсії випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $AA(Y|U)$ – інформаційна оцінка асиметрії умовної асиметрії випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $AE(Y|U)$ – інформаційна оцінка асиметрії умовного ексцесу випадкової функції вибірки сигналу виходу *Y* відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; AY – асиметрія генеральної вибірки випадкового сигналу виходу Y.

Також для розширення і поглиблення інформаційного забезпечення автоматизації процесів керування гірничими комплексами доцільно застосування нових оцінок тісноти нелінійного зв'язку між випадковими вибірками значень сигналів виходу *Y* і входу *U* об'єктів керування, які здійснюються за допомогою характеристик ексцесійних відношень $\zeta_{My|u}$, $\zeta_{Dy|u}$, $\zeta_{Ay|u}$, $\zeta_{Ey|u}$, що аналітично визначаються як відношення відповідно локальних ексцесів умовного математичного очікування, умовної дисперсії, умовної асиметрії та умовного ексцесу до ексцесу генеральної вибірки випадкової величини виходу *Y* (6).

$$\zeta^4_{My|u} = \frac{EM(Y|U)}{EY}, \qquad \zeta^4_{Dy|u} = \frac{ED(Y|U)}{EY},$$
$$\zeta^4_{Ay|u} = \frac{EA(Y|U)}{EY}, \qquad \zeta^4_{Ey|u} = \frac{EE(Y|U)}{EY}, \tag{6}$$

де $EM(Y|U)$ – інформаційна оцінка ексцесу умовного математичного очікування випадкової функції вибірки сигналу виходу Y відносно функції вибірки сигналу входу U; $ED(Y|U)$ – інформаційна оцінка ексцесу умовної дисперсії випадкової функції вибірки сигналу виходу Y відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $EA(Y|U)$ – інформаційна оцінка ексцесу умовної асиметрії випадкової функції вибірки сигналу виходу Y відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; $EE(Y|U)$ – інформаційна оцінка ексцесу умовного ексцесу випадкової функції вибірки сигналу виходу Y відносно випадкової функції вибірки сигналу входу U; EY – ексцес генеральної вибірки випадкового сигналу виходу Y.

Комплекс інформаційних оцінок у множині асиметрії умовного математичного очікування $AM(Y|U)$, асиметрії умовної дисперсії $AD(Y|U)$, асиметрії умовної асиметрії $AA(Y|U)$ і асиметрії умовного ексцесу $AE(Y|U)$, та також ексцесу умовного математичного очікування $EM(Y|U)$, ексцесу умовної дисперсії $ED(Y|U)$, ексцесу умовної асиметрії $EA(Y|U)$ та ексцесу умовного ексцесу $EE(Y|U)$ відображаються за формулами

$$AM(Y|U) = \frac{1}{\sigma^3} M[M(Y|U) - M(Y)]^3 \qquad AD(Y|U) = \frac{1}{\sigma^3} M[D(Y|U) - D(Y)]^3$$

$$AA(Y|U) = \frac{1}{\sigma^3} M[A(Y|U) - A(Y)]^3 \qquad AE(Y|U) = \frac{1}{\sigma^3} M[E(Y|U) - E(Y)]^3$$

$$EM(Y|U) = \frac{1}{\sigma^4} M[M(Y|U) - M(Y)]^4 - 3 \qquad ED(Y|U) = \frac{1}{\sigma^4} M[D(Y|U) - D(Y)]^4 - 3 \tag{7}$$

$$EA(Y|U) = \frac{1}{\sigma^4} M[A(Y|U) - A(Y)]^4 - 3 \qquad EE(Y|U) = \frac{1}{\sigma^4} M[E(Y|U) - E(Y)]^4 - 3$$

Так як реальні технологічні процеси в гірничих комплексах являються суттєво нелінійними та гетероскедастичними відповідно складної конструктивної побудови та дією суттєвої множини змінних, що ускладнює процеси ідентифікації і керування та зменшує їх швидкодію, тому у ряді практичних випадків, наприклад при використанні моделі для обмежених режимних умов або для вузького діапазону значень змінних, можливе обмеження ідентифікованої моделі гірничого комплексу лінійним описом. Доцільність опису реального гірничого комплексу лінійною чи нелінійною моделлю, і визначення меж достовірності цього опису, пов'язано з науковою задачею автоматизованих систем керування технологічними процесами для вирішення якої і застосовується сформована діагностична модель. Відповідь на це питання дає саме ідентифі-

кація у широкому розумінні, тому що значення, які відповідають заданому інтервалу довіри, лінійних оцінок коефіцієнта кореляції та нелінійних оцінок дисперсійних відношень $\eta_{y|u}$, оцінок асиметрійних відношень $\lambda_{y|u}$ та оцінок ексцесійних відношень $\zeta_{y|u}$ і обумовлює дозвіл на достовірність використання лінійної моделі та відповідні параметричні межі цієї моделі. При цьому необхідно відмітити, що кількісні характеристики стохастичних зв'язків випадкових сигналів входу і виходу, які визначені через відношення $\eta_{y|u}$, $\lambda_{y|u}$, $\zeta_{y|u}$, можуть мати значення більше нуля і у випадку коли коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, так як вони враховують саме нелінійні зв'язки в інформаційних сигналах, що вимірюються. З огляду на те, що дисперсійні відношення $\eta_{y|u}$ можна інтерпретувати як кількісну характеристику міри визначеності випадкової величини сигналу виходу Y за значеннями випадкової величини сигналу входу U то аналогічно визначаються і сформовані інформаційні оцінки асиметрійних відношень $\lambda_{y|u}$ та інформаційні оцінки ексцесійних відношень $\zeta_{y|u}$. Умовні характеристики нормального розподілення взаємозалежностей вибіркових значень енергоінформаційних сигналів гірничих комплексів кількісно через інформаційні оцінки асиметрійних відношень $\lambda_{y|u}$ здійснюють оцінку градієнтних змін умовного розподілу по вертикалі відносно горизонтального розташування реалізацій сигналів, що вимірюються, а інформаційні оцінки ексцесійних відношень $\zeta_{y|u}$ забезпечують оцінку градієнтних змін умовного розподілу по горизонталі при тих же умовах розташування реалізацій сигналів.

Множина можливих відносин характеристик законів розподілу умовних математичних очікувань щодо законів розподілу можливих значень сигналів вихідної величини Y дозволяє сформувати представлений у табл. 1 розширений комплекс інформативних статистичних числових характеристик ідентифікації для керування в автоматизованих системах керування технологічними процесами гірничих комплексів для структур "вхід-вихід". де по строках відповідно визначено параметри чисельника кореляційних відношень: 1 – математичне очікування умовного математичного очікування, 2 – дисперсія умовного математичного очікування, 3 – середньоквадратичне відхилення умовного математичного очікування, 4 – асиметрія нормального розподілу умовного математичного очікування, 5 – ексцес нормального розподілу умовного математичного очікування. В табл. 1 представлені статистичні числові оцінки ідентифікації тільки відносно умовного математичного очікування. Для вищих моментів формуються аналогічні за структурою оцінки [2, 3, 4].

Базова блок-схема програми розрахунку основних безумовних та умовних моментних числових інформаційних оцінок ідентифікації парних статистичних зв'язків діагностичних сигналів технологічних процесів в гірничих комплексах за структурою "вхід- вихід", що одержуються в стратегічному ідентифікаторі відповідно схемі дворівневої адаптивної автоматизованої системи керування гірничими комплексами з ідентифікатором наведена на рис. 1, а основні форми програмного забезпечення представлено на рис. 2. Використання для розширення інформаційного забезпечення автоматизованих систем керування представлених моментних статистичних оцінок ідентифікації внутрішніх нелінійних зв'язків випадкових сигналів технологічних агрегатів дозволяє підвищити точність та достовірність формалізації завдань автоматизованного керування технологічними процесами та гірничими комплексами. Апаратно та програмно інформативність моментних статистичних оцінок ідентифікації об'єктів керування при рішенні задач розпізнавання можна застосовувати в ієрархічних структурах як стратегічного, так і оперативноого ідентифікаторів.

Аналіз представлених в табл. 1 числових оцінок тісноти нелінійних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів за структурами "вхід-вихід" виявляють їх специфічні ознаки, що в системах штучного інтелекту характеризують знання, як формалізовану інформацію на яку посилаються та використовують в процесі логічних висновків. І першою ознакою виступає тут внутрішня інтерпретуємость, так як імена стовбців в таблицях є атрибутами відносин, імена яких вказані в строчках, як в реляційних базах даних. Внутрішня інтерпретуємість обумовлює можливість формування для елемента таблиць зв'язаної з ним системи ідентифікаторів. Ця система ідентифікаторів включає в себе індивідуальний ідентифікатор, що присвоєно даній інформаційній одиниці. Наявність системи надлишкових ідентифікаторів в таблицях дозволяє використовувати їх в системах штучного інтелекту в якості баз знань де можна формувати відповіді на нечіткі запитання до змісту бази знань. Другою ознакою являється структурованість, що можна розглядати як властивість декомпозиції складних інформаційних сигналів, як об'єктів, на більш прості оцінки та встановлення зв'язків між останніми. Третя ознака є зв'язність в змісті структури, що відображає закономірність відносно фактів, процесів, явищ та причинно-наслідкові відносини між ними. Зв'язність характеризує можливість встановлення між інформаційними одиницями (оцінками) самих різноманітних відносин (чітких, нечітких, бінарних та інших), котрі визначають зв'язок явищ та фактів, а також відносин, які обумовлюють функцію системи в цілому. І нарешті четверта ознака знань –

Таблиця 1

Числові оцінки тісноти нелінійних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів за структурою“вхід – вихід”

		Параметр знаменника кореляційного відношення				
		Математичне очікування вихідної величини	Дисперсія вихідної величини	Середньоквадратичне відхилення вихідної величини	Асиметрія нормального розподілу вихідної величини	Ексцес нормального розподілу вихідної величини
Параметр чисельника кореляційного відношення	Математичне очікування умовного математичного очікування	$\theta_{1(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{MY}$	$\eta^2_{1(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{DY}$	$\tau_{1(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{\sigma Y}$	$\lambda^3_{1(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{AY}$	$\zeta^4_{1(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{EY}$
	Дисперсія умовного математичного очікування	$\theta_{2(y\|u)} = \frac{DM(Y\|U)}{MY}$	$\eta^2_{2(y\|u)} = \frac{DM(Y\|U)}{DY}$	$\tau_{2(y\|u)} = \frac{DM(Y\|U)}{\sigma Y}$	$\lambda^3_{2(y\|u)} = \frac{DM(Y\|U)}{AY}$	$\zeta^4_{2(y\|u)} = \frac{DM(Y\|U)}{EY}$
	Середньоквадратичне умовного математичного очікування	$\theta_{3(y\|u)} = \frac{\sigma M(Y\|U)}{MY}$	$\eta^2_{3(y\|u)} = \frac{\sigma M(Y\|U)}{DY}$	$\tau_{3(y\|u)} = \frac{\sigma M(Y\|U)}{\sigma Y}$	$\lambda^3_{3(y\|u)} = \frac{\sigma M(Y\|U)}{AY}$	$\zeta^4_{3(y\|u)} = \frac{MM(Y\|U)}{EY}$
	Асиметрія розподілу умовного математичного очікування	$\theta_{4(y\|u)} = \frac{AM(Y\|U)}{MY}$	$\eta^2_{4(y\|u)} = \frac{AM(Y\|U)}{DY}$	$\tau_{4(y\|u)} = \frac{AM(Y\|U)}{\sigma Y}$	$\lambda^3_{4(y\|u)} = \frac{AM(Y\|U)}{AY}$	$\zeta^4_{4(y\|u)} = \frac{AM(Y\|U)}{EY}$
	Ексцес нормального розподілу умовного математичного очікування	$\theta_{5(y\|u)} = \frac{EM(Y\|U)}{MY}$	$\eta^2_{5(y\|u)} = \frac{EM(Y\|U)}{DY}$	$\tau_{5(y\|u)} = \frac{EM(Y\|U)}{\sigma Y}$	$\lambda^3_{5(y\|u)} = \frac{EM(Y\|U)}{AY}$	$\zeta^4_{5(y\|u)} = \frac{EM(Y\|U)}{EY}$

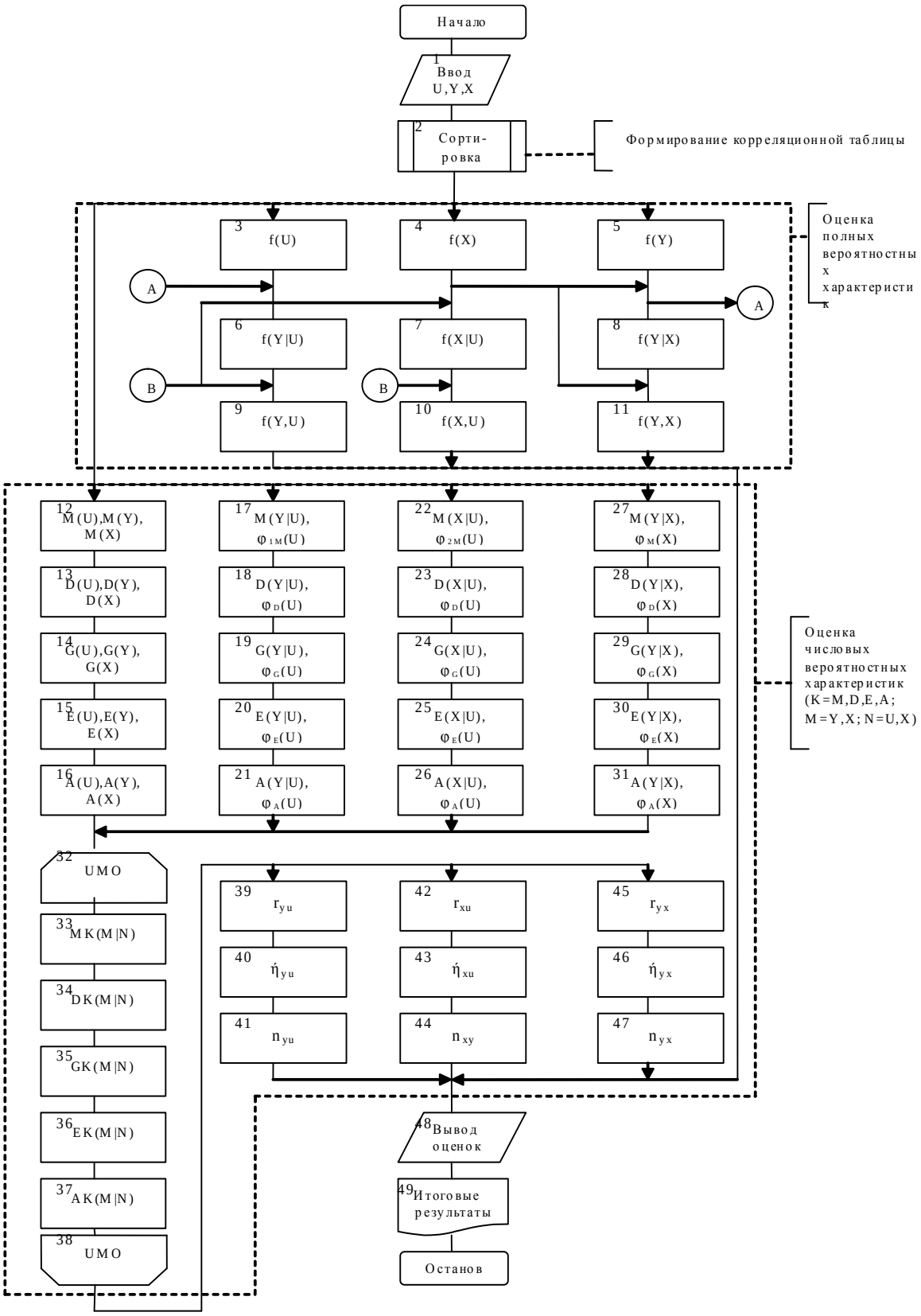


Рис. 1. Блок-схема програми ідентифікації в стратегічному ідентифікаторі парних діагностичних оцінок ТП і ГЕМК за системою “вхід-стан-вихід”

активність теж має місце, так як представлені в таблицях нові моментні оцінки можуть породжувати нові знання через вияви протиріч або неповноту знань, тобто являються стимулом активності.

а.

б.

Рис. 2. Форми інтерфейсу програмного забезпечення ідентифікації в стратегічному ідентифікаторі парних діагностичних оцінок ТП і ГЕМК:
а – автохарактеристики дисперсії, б – дисперсійне відношення

Висновки. Таким чином, показано, що розроблені і представлені нові числові оцінки тісноти статистичних моментних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів систем виміру за структурами “вхід-вихід” являються у визначеній формі знаннями, що можуть бути використані в якості інформаційних сутностей при формуванні предметних галузей систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень для задач інформаційного забезпечення автоматизованих систем керування гірничими комплексами в умовах невизначенності стану останніх.

Список використаної літератури

1. Дудля М.А., Мещеряков Л.І. Діагностика та проектування бурових машин і механізмів. – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – 268 с.
2. Мещеряков Л.И. Основы адаптивной дисперсионной идентификации горных электромеханических систем // Сб. науч. трудов. НГАУ. – Днепропетровск, 2002. – Т. 1. – №13. – С. 173–177
3. Імовірностно-моментні оцінки процесу діагностування гірничих електромеханічних систем // Сб. науч. трудов НГАУ. – Днепропетровск, 2003. – № 18. – С. 195–201
4. Мещеряков Л.І. Ідентифікація параметрів об’єктів автоматизованого управління в задачах АСУТП ексцесійними моделями // Сб. науч. трудов НГАУ. – Днепропетровск, 2006. – № 24. – С. 182–186.
5. Дисперсионная идентификация / Под редакцией Н.С. Райбмана. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

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

УДК – 004.312.466:621.316.925

А. Н. Гребенюк, канд. техн. наук.
Укрина, г. Днепр, Национальный технический университет «Днепровская политехника»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА СХЕМНОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗНОГО ПРОВОДА

Анотація. *Метою даного дослідження є виключення появи в кар'єрних розподільних мережах аварійних режимів, пов'язаних з обривом фазного проводу повітряної ЛЕП і запобігання подальшого розвитку аварії за допомогою пристрою захисного відключення Для якого була розроблена функціональна схема логічного блоку пристрою захисту повітряної лінії при обриві фазного проводу, а також розроблений алгоритм роботи даного пристрою.*
Ключові слова: *обрив фазного проводу, повітряна ЛЕП, функціональна схема, алгоритм роботи.*

Аннотация. *Целью данного исследования является исключения появления в карьерных распределительных сетях аварийных режимов, связанных с обрывом фазного провода воздушной ЛЭП и предотвращения дальнейшего развития аварии с помощью устройства защитного отключения Для которого была разработана функциональная схема логического блока устройства защиты воздушной линии при обрыве фазного провода, а также разработан алгоритм работы данного устройства.*
Ключевые слова: *обрыв фазного провода, воздушная ЛЭП, функциональная схема, алгоритм работы.*

Abstract. *The purpose of this study is to exclude the occurrence of emergency modes in open-pit distribution networks associated with a broken phase wire of an overhead power line and prevent the further development of an accident using a residual current circuit breaker. the algorithm of this device.*
Keywords: *phase wire breakage, overhead power line, functional diagram, operation algorithm.*

Обрыв фазного провода в воздушных карьерных распределительных сетях напряжением 6 кВ заканчивается аварийным режимом - одним из трех (рассмотренных в разделе 2) видов замыкания на землю (на грунт). Выполненные на кафедре электрических машин при участии автора исследования процессов и характеристик аварийных токов при замыканиях на землю при обрыве провода карьерных ЛЭП, а также анализ результатов исследований работоспособности средств защиты показали, что вероятно несрабатывание штатных и даже наиболее перспективных устройств защиты от замыканий на землю при определенных аварийных режимах. К таким аварийным режимам можно отнести замыкания на землю со стороны электроприемника, которые характеризуются уменьшением практически в два раза по сравнению с классическим видом замыкания напряжения и токов нулевой последовательности при прочих равных условиях. Если при этом учесть переходное сопротивление в точке замыкания (особенно в сухую или морозную погоду), то вероятность несрабатывания устройств защиты резко возрастает [1, 2, 5].

Длительное существование однофазного замыкания на землю (не отключение аварийного режима), как правило, сопровождается появлением более тяжелых для оборудования систем электроснабжения и более опасных для технологического персонала аварийных режимов. Исходя из этого, в общем случае основной целью защиты от замыканий на землю в распределительных сетях систем электроснабжения предприятий с передвижными электроустановками является предотвращение дальнейшего развития аварии и появления, наиболее опасных для обслуживающего персонала, двойных замыканий на землю [5].

Обеспечить необходимый уровень электробезопасности в карьерных сетях в рассматриваемых условиях представляется возможным исключив появления опасных процессов. Для исключения появления в карьерных распределительных сетях аварийных режимов, связанных с обрывом фазного провода воздушной ЛЭП и предотвращения дальнейшего развития аварии, предлагается использовать принцип защитного (опережающего) отключения. Указанное мероприятие при соответствующей его реализации способно предотвратить появления режима замыкания на землю при обрыве фазного провода воздушной ЛЭП за счет отключения линии от источника питания до момента касания оборванным проводом земли [13].

Один из предполагаемых способов обнаружения обрыва фазного провода воздушной ЛЭП является исчезновение тока в поврежденной фазе. Для обеспечения выполнения требования надежности действия (исключения ложного срабатывания) предлагаемого устройства защитного отключения при обрыве фазного провода необходимо проанализировать следующие возможные причины кратковременного отсутствия рабочих токов в одной из фаз в линии:

– - обрыв провода одной фазы ЛЭП;
– - одновременный обрыв проводов двух фаз ЛЭП;
– - несимметричное отключение линии силовым выключателем (разновременность размыкания контактов);
– - несимметричное включение нагруженной линии (разновременность замыкания контактов);
– - неполнофазный режим распределительной сети.

Обозначим возможные логические состояния воздушной линии распределительной сети карьера в виде функции f_i с устойчивыми значениями переменных x_1 , x_2 , x_3 , которые отражают состояние соответствующих фаз ЛЭП и принимают значения 0 или 1, где 1 - наличие тока в соответствующей фазе; 0 - отсутствие тока в соответствующей фазе. Три переменных x_1, x_2, x_3, отражающих состояние могут иметь двенадцать наборов значений единиц и нулей, которые представлены в таблице 1.

На основе таблицы имеем следующие логические состояния линии и выключателя в начале линии:

- f_1 *(1,1,1)* - наличие тока во всех трех фазах одновременно, выключатель включен;
- f_2 *(0,1,1)*, f_3 *(1,0,1)*, f_4 *(1,1,0)* - отсутствие тока соответственно в фазах *A*, *B* и *C*, выключатель включен;
- f_5 *(0,0,1)*, f_6 *(0,1,0)*, f_7 *(1,0,0)* - отсутствие тока в двух фазах соответственно в фазах *A*, *B* и *C* выключатель включен;
- f_8 *(0,0,0)* - отсутствие тока во всех трех фазах линии одновременно, выключатель включен;
- f_9 *(0,0,0)* - отсутствие тока во всех трех фазах линии одновременно, выключатель отключен;
- f_{10} *(0,0,1)* - отсутствие тока в фазах *A* и *B* при наличии тока в одной фазе *C*, выключатель отключен;
- f_{11} *(0,1,0)* - отсутствие тока в фазах *A* и *C* при наличии тока в одной фазе В, выключатель отключен;
- f_{12} *(1,0,0)* - отсутствие тока в фазах *B* и *C* при наличии тока в одной фазе А, выключатель отключен.

Таблица 1.

Таблица состояний воздушной ЛЭП и ее выключателя

Состояние линии f_i	x_1	x_2	x_3	**Состояние выключателя *F***
f_1	1	1	1	*Включен*
f_2	0	1	1	
f_3	1	0	1	
f_4	1	1	0	
f_5	0	0	1	
f_6	0	1	0	
f_7	1	0	0	
f_8	0	0	0	
f_9	0	0	0	*Отключен*
f_{10}	0	0	1	
f_{11}	0	1	0	
f_{12}	1	0	0	

Функция f_1 реализует нормальный режим работы линии и наличие нагрузки в каждой фазе (отсутствие разрыва). Состояния f_2, f_3, f_4 воздушной ЛЭП, которым соответствует замкнутое состояние силового выключателя, являются рабочими, а отсутствие тока в одной из фаз возможно при обрыве (разрыве) фазного провода или разновременность замыкания контактов выключателя при включении линии.

Функциям состояния f_5, f_6, f_7, и f_8 соответствует замкнутое состояние силового выключателя при одновременном обрыве проводов двух фаз карьерной линии сопровождающееся, как правило, двухфазным коротким замыканием.

Функциям состояния f_9, f_{10}, f_{11}, и f_{12} соответствует разомкнутое состояние силового выключателя или режим несимметричного отключения линии силовым выключателем (разновременность размыкания контактов).

Защита от обрыва фазного провода карьерной ЛЭП должна срабатывать при отсутствии тока в одной из фаз линии или его резком уменьшении, что соответствует обрыву провода одной фазы. Одновременный обрыв проводов двух фаз карьерной линии сопровождается, как правило, двухфазным коротким замыканием, при котором действует на отключение максимальная токовая защита или токовая отсечка. Несимметрия токов в фазах, обусловленная работой силовых коммутационных аппаратов (как при включении, так и при отключении выключателя), составляет не более двадцати миллисекунд и устройство защитного отключения при обрыве фазного провода должно отстраиваться от таких режимов.

Основным функциональным элементом устройства защитного отключения является логический блок, в котором непрерывно производится контроль целостности фазных проводов карьерной ЛЭП с учетом появления возможных помех и формирование, по результатам мониторинга процессов в линии, соответствующей команды.

Функциональная блок-схема логического блока устройства защитного отключения представлена на рис. 1. Устройство содержит согласующие элементы 1, 2 и 3, подключенные к первичным датчикам тока каждой фазы; схему совпадения *И* на три входа (4); логический элемент *ИЛИ* (5); логический элемент *И-НЕ* (6); элемент задержки сигнала (7); логическую схему совпадения *И* на два входа (8) и выходной блок (9).

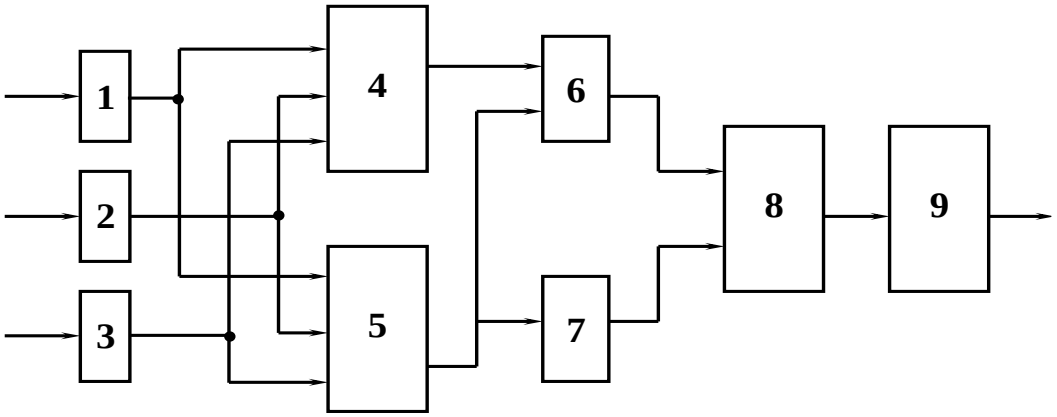


Рис. 1. Функциональная блок-схема логического блока устройства защитного отключения

Работает устройство защитного отключения при обрыве провода воздушной ЛЭП в соответствии с приведенной на рис. 1 блок-схеме. В нормальном режиме при подключенном к ЛЭП электроприемнике на входы согласующих элементов 1 – 3 логического блока устройства защитного отключения поступают ЭДС от соответствующих трансреакторов. Поступившие сигналы ограничиваются по величине, выпрямляются и в виде непрерывной логической единицы поступают на три входа схемы совпадения *И* (4) и логического элемента *ИЛИ* (5) соответственно. На выходах элементов 4 и 5 появляются сигналы логической единицы, которые поступают на два входа логического элемента *И-НЕ* (6), при этом с его выхода сигнал логического нуля поступает на первый вход схемы совпадения *И* (8). На второй вход этой схемы с выхода элемента *ИЛИ* (5) через элемент задержки 7 поступает сигнал логической единицы. В этом случае на вход выходного блока сигнал не поступает, и команда на отключение выключателю *Q* не формируется. Элемент 7 задержки сигнала (на время 20–30 мс) исключает ложную работу устройства от разновременности замыкания контактов силового выключателя при включении линии в работу.

При обрыве провода одной из фаз карьерной воздушной ЛЭП исчезнет сигнал на одном из входов схемы совпадения *И* (4) и логического элемента *ИЛИ* (5). В результате, на выходе элемента 4 сигнал логической единицы исчезнет, а на выходе элемента 5 - останется. При этом на обратный поменяется сигнал на выходе логического элемента *И-НЕ* (6), совпадут сигналы на входах схемы совпадения *И* (8), запустится выходной блок 9, который и сформирует команду на отключение силового выключателя и, соответственно, снятие напряжения поврежденной (аварийной) линии до момента касания оборванным проводом земли. Этим действием обеспечивается предотвращение однофазного замыкания на землю в карьерной распределительной сети.

При оперативном отключении линии исчезают сигналы на всех входах схемы совпадения *И* (4) и схемы *ИЛИ* (5), на их выходах появляются сигналы, соответствующие логическому нулю, и работа последующих элементов схемы защиты блокируется.

Для реализации цифровой части схемы возможно использование двух подходов, принципа программной и схемной логики [8, 9, 11]. Поскольку при реализации устройства защитного отключения при обрыве провода воздушной ЛЭП стоит задача высокого быстродействия при меньших затратах лучшим вариантом будет использование принципа схемной логики так как микроконтроллеры, которые из-за программного способа реализации алгоритмов медленнее программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) [8, 9].

Работа системы описывается алгоритмом, приведенным на рис. 2. На вход системы подается сигнал с датчиков тока пропорциональных токам фаз, а также сигнал контроля работы выключателя (блок 2, блок 3). Блок 4 контролирует работу выключателя. Если выключатель выключен, то осуществляется кон-

троль токов в фазах (блоки 14, 15, 16). При присутствии тока в одной или нескольких фазах для предотвращения ложного срабатывания через задержку времени (блок 17) подается сигнал оператору, информирующий о поломке выключателя.

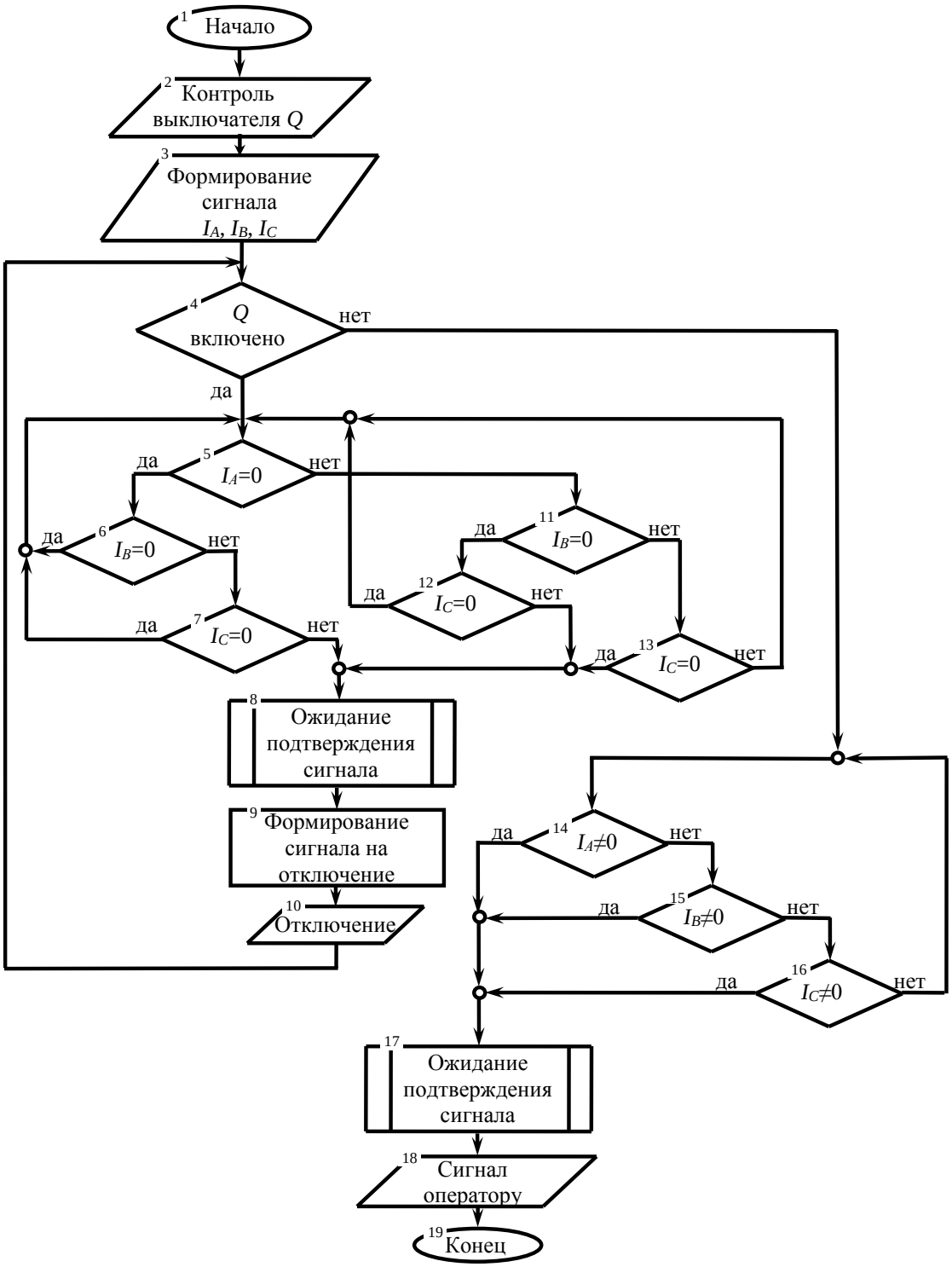


Рис. 2 Блок-схема алгоритма работы системы защиты от обрыва одной из фаз трехфазной линии

Если выключатель включен, то производится проверка тока фазы А (блок 5); если ток равен нулю производится проверка тока фаза В (блок 6); если ток равен нулю, то возвращаемся к точке контроля фазы А (блок 5). Это отвечает строке состояния f5 (таблица 1). Если ток фазы В (блок 6) не равен нулю, то проверяем наличие тока в фазе С (блок 7). Если ток равен нулю, это соответствует строке состояния f6 (таблица 1). При возникновении режимов, соответствующих состоянию линии f5, f6, f7, f8 (таблица 1)

система бездействует, так как при данных аварийных режимах существуют свои защиты. Если токи в фазах В, С (блок 6, блок 7) не равны нулю, то такой режим отвечает строке состояния f2. При этом подается сигнал через задержку времени (блок 8) для предотвращения ложного срабатывания на блок 9 который формирует сигнал на отключение. После отключения (блок 10) система снова контролирует, в каком положении находится выключатель.

Если выключатель включен, то производится проверка тока фазы А (блок 5); если ток не равен нулю – производится проверка тока фазы В (блок 11); если ток равен нулю, то проверяем ток в фазе С (блок 12); если ток равен нулю это соответствует строке состояния f7 (таблица 1) – система должна бездействовать, происходит возврат к контролю фазы А. Если ток в фазе С (блок 12) не равен нулю, то такой режим отвечает строке состояния f3 (таблица 1) – при этом полученный сигнал подается на блок задержки времени и далее формируется сигнал на отключение.

Если ток фазы В (блок 11) не равен нулю, то проверяем ток в фазе С (блок 13); если ток равен нулю, то это соответствует строке состояния f4 (таблица 1) необходимо отключить выключатель. Если ток фазы С (блок 13) не равен нулю, то это соответствует строке состояния f1 (таблица 1) – происходит возврат к контролю фазы А.

Когда выключатель выключен происходит контроль наличия тока в фазах А, В, С (блоки соответственно 14, 15, 16); если в какой либо фазе при выключенном выключателе появляется ток, то это соответствует строке состояния f10, f11, f12, (таблица 1), что возможно при поломке выключателя то через блок задержки времени (блок 17), который позволяет отстроится от ложных срабатываний – формируется сигнал оператору о присутствии напряжения на одной из фаз. Когда тока в фазах А, В, С нет, то это соответствует строке состояния f9 (таблица 1) – система должна бездействовать и происходит возврат к контролю фаз.

Выводы:

Для исключения появления в карьерных распределительных и тяговых сетях аварийных режимов, связанных с обрывом фазного провода воздушной ЛЭП или контактного провода и предотвращения дальнейшего развития аварии, предлагается использовать принцип защитного (опережающего) отключения. В соответствии с Блок-схемой алгоритма работы системы защиты от обрыва одной из фаз трехфазной линии возможно реализовать отключения линии от источника питания до момента касания оборванным проводом земли и способны предотвратить появление режима замыкания на землю при обрыве провода за счет отключения линии от источника питания до момента касания оборванным проводом земли.

Список литературы

1. Бухтояров В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / В.Ф. Бухтояров, А.В. Маврицын. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
2. Вайштейн Р.А. Защита от замыканий в компенсированных сетях 6-10 кВ / Р.А. Вайштейн, С.И. Головко, В.С. Григорьев, Е.Д. Коберник, В.Н. Максимов, С.М. Юдин // Электрические станции. – 1998. – №7. – С.26- 31.
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
4. Домрачеев В.Г. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справочное пособие / В.Г. Домрачеев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
5. Дударев Л.Е. Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электричество. – 1979. – № 2. – С. 8–12.
6. Калебяков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи / Б.А. Калебяков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 336 с.
7. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты. / под ред. Морозкина В.П. – М.: Энергоиздат, 1988. – 240 с.
8. Ленк Дж. Электронные схемы. Практическое руководство. – перевод с английского / Ленк Дж. – М.Н. Микшиса; – М.: Мир,1985. – 344 с.
9. Назаренко В.М. Принципы построения и структура микропроцессорных систем защиты и автоматики / В.М. Назаренко, В.В. Рогоза, Б.С. Стогний, Ю.И. Холоденко // Электротехника. – 1985. – № 5. – С.46–48.
10. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебн. для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 768с.
11. Титце У., Шенк К. Полупровадниковая схемотехника.-перевод с немецкого / У. Титце, К. Шенк под ред. А.А. Алексеенко. – М.: Мир, 1982 –512 с.
12. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника / Е.П Угрюмов. – СПБ.: БХВ – Петербург, 2002. – 528с.
13. Фигурнов Е.П. Релейная защита Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей транспортных и других вузов / Е.П. Фигурнов. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 565с.

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

УДК 622.232.72:004.942

А.В. Бубліков, канд. техн. наук
(Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка")

СТВОРЕННЯ БАЗ ПРАВИЛ ДЛЯ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ВИДОБУВНОГО КОМБАЙНА

Розглянуто новий принцип побудови системи автоматичного керування режимами роботи видобувного комбайна на основі нечіткої логіки. Виконано обґрунтування режимів роботи видобувного комбайна та їх характеристик з точки зору автоматизації процесу керування комбайном. Описано один із етапів алгоритму нечіткого виводу – формування бази правил нечітких продукцій. Обґрунтовано алгоритми прийняття рішень щодо зміни висоти підняття виконавчого органу та швидкості різання видобувного комбайна для системи нечіткого керування. Рішення щодо зміни висоти підняття виконавчого органу та швидкості різання приймаються на основі ситуативного аналізу з метою забезпечення ефективного режиму роботи видобувного комбайна. На основі цих алгоритмів сформовано переліки правил нечітких продукцій та створено бази правил систем нечіткого керування режимами роботи видобувного комбайна.

***Ключові слова**: видобувний комбайн, система нечіткого автоматичного керування, експертні системи.*

Рассмотрен новый принцип построения системы автоматического управления режимами работы добычного комбайна на основе нечеткой логики. Выполнено обоснование режимов работы добычного комбайна и их характеристик с точки зрения автоматизации процесса управления комбайном. Описан один из этапов алгоритма нечеткого вывода − формирование базы правил нечетких продукций. Обоснованы алгоритмы принятия решений касательно изменения высоты подъема исполнительного органа и скорости резания добычного комбайна для системы нечеткого управления. Решения по изменению высоты подъема исполнительного органа и скорости резания принимаются на основе ситуационного анализа с целью обеспечения эффективного режима работы добычного комбайна. На основе этих алгоритмов сформированы списки правил нечетких продукций и созданы базы правил систем нечеткого управления режимами работы добычного комбайна.

***Ключевые слова:** добычной комбайн, система нечеткого автоматического управления, экспертные системы.*

The new principle of synthesis of system of automatic control by operation modes of a coal-combine based on fuzzy logic is considered. The substantiation of the operation modes of the coal-combine and their characteristics from the point of view of automation of the process of controlling the coal-combine has been carried out. 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 algorithms for changing the lifting height of the executive body and cutting rate of the coal-combine for the fuzzy control system has been carried out. The decisions to change the lifting height of the executive body and cutting rate are taken on the basis of a situational analysis in order to ensure the efficient operation mode of the coal-combine. On the basis of these algorithms the bases of rules of systems of fuzzy control by the operation modes of coal-combine have been created.

***Keywords**: coal-combine, system of fuzzy automatic control, expert systems.*

Вступ

Вугільний видобувний комбайн сучасного покоління є високотехнологічною гірничою машиною, що характеризується складним характером взаємопов'язаних фізичних процесів у її конструктивних вузлах, а також складним характером взаємодії із зовнішнім середовищем. Це є причиною того, що нині на видобувних комбайнах відсутні системи керування так званого верхнього рівня, які в режимі реального часу на основі аналізу інформаційних сигналів здатні приймати рішення щодо керування комбайном у різних ситуаціях в автономному режимі замість оператора. У роботах [1-3] описані 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 керування ними [4-6]. 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 [4-6]. Та-

ким чином, розгляд алгоритму керування комбайном для системи верхнього рівня у вигляді бази незмінних правил нечітких продукцій є цілком прийнятним.

Постановка задачі

У статті поставлена задача формування переліку можливих ситуацій за умови керування видобувним комбайном та проведення класифікації даних ситуацій на основі введення понять режимів роботи комбайна та їх характеристик. Також, з оглядом на відомий підхід щодо формування бази правил у рамках створення алгоритму нечіткого виводу [7], поставлена задача встановлення причинно-наслідкових зв'язків за умови прийняття рішень у різних ситуаціях при керуванні видобувним комбайном з метою створення баз правил для систем нечіткого автоматичного керування певними режимами роботи комбайна.

Рішення задачі

Пропонується універсальний підхід щодо класифікації можливих ситуацій за умови керування видобувним комбайном. Згідно з ним існує перелік характеристик режимів роботи видобувного комбайна, кожна з яких відповідає унікальній комбінації фізичних процесів як усередині конструктивних вузлів машини, так і за умови взаємодії конструктивних вузлів із зовнішнім середовищем. Таким чином, робота видобувного комбайна розглядається як послідовна зміна у часі характеристик режимів роботи за певною траєкторією, причому кожна з характеристик спостерігається деякий час. Завданням керування у такому випадку є пошук та забезпечення траєкторії зміни характеристик режимів роботи гірничої машини, за умови якої маємо економічні, технічні та технологічні показники ефективності роботи машини, що близькі до оптимальних.

Виділення певних режимів роботи видобувного комбайна базується на аналізі поведінки людини-оператора у багатьох ситуаціях за умови керування видобувним комбайном у забої в ручному режимі. Протягом аналізу насамперед виділялися ті особливості роботи конструктивних вузлів комбайна, на які оператор передусім звертав увагу при прийнятті рішень щодо керування комбайном. Матеріалом для аналізу є інформація щодо експлуатації та випробувань видобувних комбайнів різних типів на вугільних шахтах України, Казахстану та Росії, яка у значній мірі накопичена за декілька десятиліть [4-6]. Нижче у табличній формі як результат аналізу наведений перелік дій оператора щодо керування неперервними параметрами комбайна (швидкістю подачі та положенням виконавчих органів) в середній частині забою у нормальному режимі роботи, а також перелік відповідних причин, які зумовили ці дії, та їх ознак.

Результати аналізу поведінки оператора видобувного комбайну

Дія оператора комбайна	Причина дії та її ознака	Мета дії
Зменшення швидкості подачі	Нестабільне переміщення видобувного комбайна із-за нерівності ґрунту, перекосів риштачного поставу забійного конвеєра, заштибовки його навісного обладнання у зоні опорних елементів комбайна. Оператор безпосередньо візуально фіксує заштибовку навісного обладнання конвеєра або перекіс його риштачного поставу, або помічає суттєві вібрації та кутові переміщення корпуса комбайна ("галопування", "притоптування", розворот)	Зменшити вібрацію та кутові переміщення корпуса комбайна
Зменшення швидкості подачі	Перевантаження двигуна приводу різання за причиною підвищення міцності вугілля, наявності міцного прошарку породи або значної кількості мінеральних включень. Оператор фіксує підвищений шум двигуна та (або) значне зменшення швидкості обертання виконавчого органу	Усунути перевантаження двигуна приводу різання
Зменшення швидкості подачі	Заштибовка виконавчого органу комбайна із-за перевищення його навантажувальної продуктивності. Оператор безпосередньо візуально фіксує накопичення вугілля й породи у робочому об'ємі виконавчого органу	Усунути заштибовку виконавчого органа комбайна
Зменшення швидкості подачі	У зоні виконавчих органів комбайна відбувається накопичення вугілля у жолобі риштачного поставу забійного конвеєра. Оператор безпосередньо візуально фіксує накопичення вугілля	Усунути накопичення вугілля у жолобі конвеєра
Зменшення швидкості подачі	Секції механізованого кріплення не встигають закріплювати "оголений" простір забою за комбайном. Оператор безпосередньо візуально фіксує відставання секцій кріплення	Усунути відставання секцій кріплення
Зменшення швидкості подачі	Оператор не встигає за комбайном	Синхронне переміщення з комбайном

Продовження

Дія оператора комбайна	Причина дії та її ознака	Мета дії
Збільшення швидкості подачі	Відсутня будь-яка з перелічених вище причин зменшення швидкості подачі	Підвищити продуктивність комбайна
Підняття виконавчого органу біля покрівлі	Біля покрівлі залишається пачка вугілля. Фіксується безпосередньо оператором візуально	Забезпечити хід виконавчого органа по межі “порода – вугілля”
Опускання виконавчого органа біля покрівлі	Біля покрівлі руйнується пачка породи. Фіксується безпосередньо оператором візуально	Забезпечити хід виконавчого органа по межі “порода – вугілля”

Як бачимо, рішення оператора в основному залежать від:

- режиму роботи двигуна приводу різання (оператор за звуковим сигналом розпізнає перевантаження двигуна);
- режиму руйнування масиву вугілля й породи виконавчими органами, який визначається структурою масиву (оператор фіксує наявність залишкової пачки вугілля біля покрівлі або присікання породи зубками). Також матеріал, що руйнується зубками виконавчого органа, визначає навантаження на валу двигуна приводу різання, тобто його режим роботи;
- режиму транспортування та навантаження зруйнованого матеріалу виконавчим органом на забійний конвеєр (оператор фіксує накопичення вугілля у робочому об’ємі виконавчого органа).

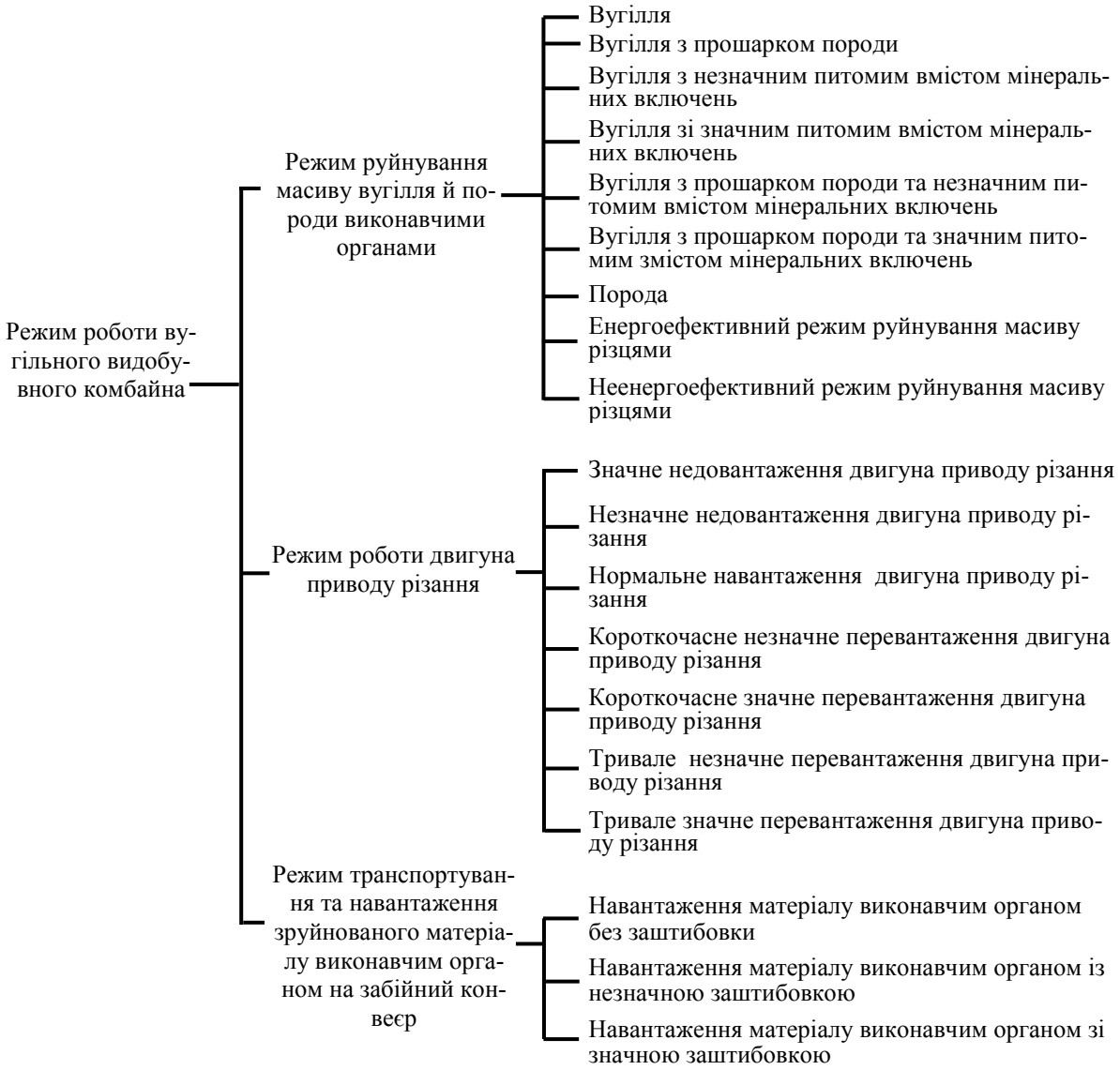


Рис. 1. Схема режимів роботи вугільного видобувного комбайна та характеристики цих режимів

Кожний з трьох перелічених режимів роботи видобувного комбайна, що визначають дії оператора, є комплексним поняттям, яке може розглядатися як сукупність більш деталізованих характеристик, що уточнюють режим роботи комбайна (рис.1).

За умови створення бази правил нечітких продукцій перелічені у правій частині рис.1 характеристики режимів роботи видобувного комбайна приймаються за вхідні лінгвістичні змінні системи нечіткого керування комбайном та, відповідно, за підумови правил нечітких продукцій бази правил системи.

У свою чергу, дії оператора комбайна у наведеній вище таблиці приймаються за висновки правил нечітких продукцій з можливістю подальшого уточнення дії (незначне зменшення швидкості подачі тощо) на основі аналізу комбайна як об'єкта керування.

Використаємо описаний підхід для створення баз правил нечітких продукцій для систем нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля й породи виконавчими органами видобувного комбайна.

Відомо, що залежно від значення товщини стружки, яка знімається різцем виконавчого органа комбайна, протікає різний за своїм характером фізичний процес різання різцем масиву вугілля (повторний, переривчасто-повторний, щілинний тощо) [8]. Серед перелічених видів різання різцями вугілля й породи можна виділити неенергоефективний вид різання (щілинний), коли маємо підвищені питомі енерговитрати на руйнування масиву вугілля, та енергоефективні види різання (повторний, переривчасто-повторний), коли питомі енерговитрати близькі до свого мінімального значення. Проведемо аналіз, як означені види різання зв'язані з величиною товщини стружки, що знімається різцем, на основі статичної робочої характеристики видобувного комбайна (рис.2), яка отримана за допомогою комплексної імітаційної моделі комбайна [9].

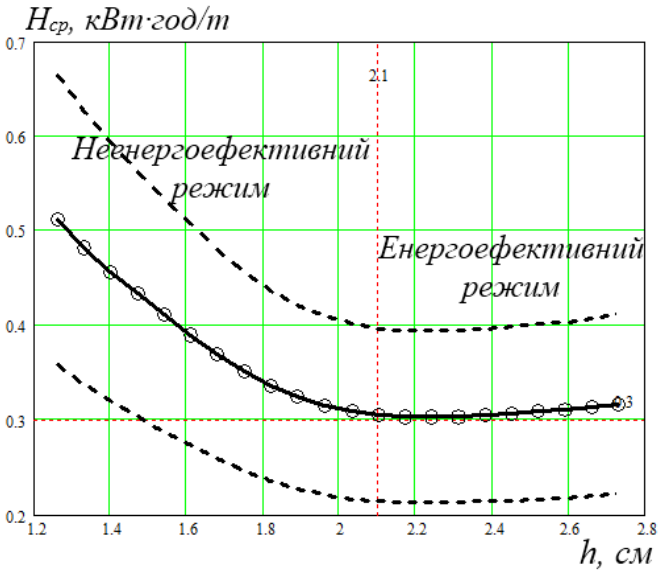


Рис. 2. Статичні залежності питомих енерговитрат на різання вугілля від товщини стружки вугілля

Статична залежність питомих енерговитрат від товщини стружки вугілля є суттєво несиметричною відносно мінімального екстремуму (рис.2). Якщо до екстремуму питомі енерговитрати за умови збільшення товщини стружки з 0,25 до 2,5 см зменшуються на 43,3 %, то після екстремуму за умови збільшення товщини стружки з 2,5 до 5 см питомі енерговитрати збільшуються на 4,3 %. Це пояснюється характером процесу різання різцем масиву вугілля – до мінімального екстремуму за умови високих питомих енерговитрат маємо суттєво неенергоефективний щілинний вид різання різцями масиву вугілля. По мірі збільшення товщини стружки поступово щілинний вид різання стає переривчасто-повторним, а потім – повторним. Обидва види різання за ступенем енергоефективності розрізняються незначно (до 10%), тож частина графіку на рис.2, де питомі енерговитрати суттєво не змінюються та відрізняються від мінімального значення не більше ніж на 5-7 %, відповідає саме цим видам різання.

За результатом аналізу статичної робочої характеристики комбайна (рис.2) за неенергоефективний режим різання приймаємо щілинний вид різання різцем масиву вугілля. При цьому для даного режиму характерне суттєве зменшення питомих енерговитрат за умови збільшення товщини стружки.

Відповідно, за енергоефективний режим різання приймаємо переривчасто-повторний та повторний види різання різцем масиву вугілля. При цьому для даного режиму різання характерна несуттєва зміна питомих енерговитрат за умови збільшення товщини стружки (рис.2).

Залежність середніх питомих енерговитрат на різання вугілля від товщини стружки є нестаціонарною – зміна опірності вугілля різанню вздовж забою зміщує статичну характеристику вверх або вниз без суттєвої зміни її форми (пунктирні лінії на рис.2). Але значення товщини стружки вугілля, що відповідає межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, при цьому є незмінним, та в основному залежить від конструктивних параметрів різців та виконавчих органів видобувного комбайна. Тож, це значення товщини стружки змінюється несуттєво у процесі роботи комбайна. Це дозволяє за умови створення бази правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування використати алгоритм пошуку межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом, згідно з яким відбувається послідовна зміна товщини стружки вугілля на постійну величину з ідентифікацією після кожної зміни товщини стружки режиму руйнування масиву виконавчим органом. В залежності від результату ідентифікації напрям зміни товщини стружки залишається таким самим, або змінюється. Даний алгоритм можна представити такими правилами:

- товщина стружки вугілля збільшується на незначну величину, якщо за результатами двох поспіль проведених процедур ідентифікації характеристик режиму руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна зафіксовано неенергоефективний режим руйнування;
- товщина стружки вугілля зменшується на незначну величину, якщо за результатами двох поспіль проведених процедур ідентифікації характеристик режиму руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна зафіксовано енергоефективний режим руйнування.

Як видно з опису запропонованого алгоритму пошуку межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, до нього додане правило, згідно з яким товщина стружки змінюється, тільки якщо певна характеристика режиму зафіксована за результатом ідентифікації два рази поспіль. Введення даного правила збільшує час пошуку межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом на декілька кроків прийняття рішення системою (приблизно на 20-30 с), але при цьому дозволяє зменшити вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування масиву виконавчим органом й запобігти відхиленню від межі у режимі її відстеження системою. З оглядом на практичну незмінність товщини стружки вугілля, що відповідає межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, режим відстеження системою даної межі є основним, тож застосування правила зміни товщини стружки тільки за умови ідентифікації певної характеристики режиму два рази поспіль є доцільним.

Представимо описаний алгоритм керування режимом руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна у вигляді діаграми станів кінцевого автомату (графу переходів), прийнявши характеристики режиму за вершини графа (рис.3). Дуги графа (рис.3) описують переходи від одної характеристики режиму руйнування до іншої, причому незмінність характеристики приймається як окремий перехід з відповідним лінгвістичним смислом.

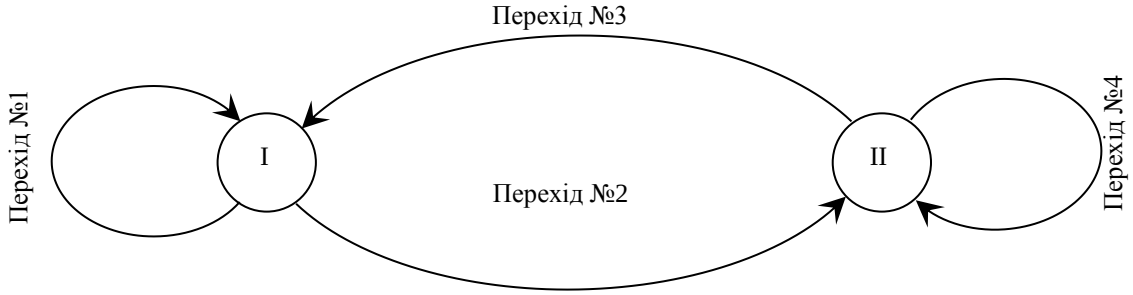


Рис. 3. Алгоритм прийняття рішень щодо зміни товщини стружки для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна

Стан I системи на рис.3 відповідає енергоефективному режиму руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, стан II – неенергоефективному режиму руйнування. Між переходами із стану в стан (рис.3) існує часова затримка з метою проведення збору даних для розрахунку інформативного критерію, що визначає умови переходів.

Умовами переходу №1 на рис.3 є перебування у стані I та ідентифікація характеристики режиму роботи “Енергоефективний режим руйнування масиву різцями”, а дією – зменшення товщини стружки через збільшення швидкості обертання виконавчого органа.

Перехід №2 (рис.3) здійснюється за умови перебування у стані I та ідентифікації характеристики режиму роботи “Неенергоефективний режим руйнування масиву різцями”. При цьому швидкість обертання виконавчого органа комбайна суттєво не змінюється.

Перехід №3 відбувається за умови перебування у стані II та ідентифікації характеристики режиму роботи “Енергоефективний режим руйнування масиву різцями”. При цьому швидкість обертання виконавчого органа суттєво не змінюється.

Умовами переходу №4 (рис.3) є перебування у стані II та ідентифікація характеристики режиму роботи “Неенергоефективний режим руйнування масиву різцями”, а дією – збільшення товщини стружки через зменшення швидкості обертання виконавчого органу.

На основі запропонованого алгоритму прийняття рішень щодо зміни швидкості обертання виконавчого органа комбайна сформуємо перелік правил нечітких продукцій, що складуть основу бази правил системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля виконавчим органом. Для цього у контексті нечіткої логіки введемо такі лінгвістичні нечіткі вислови стосовно умов правил нечітких продукцій (при цьому для спрощення у висловах під режимом роботи мається на увазі його характеристика):

- відбувається енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом (*P1*);
- відбувається неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом (*P2*);
- до цього відбувалося енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом (*P3*);
- до цього відбувалося неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом (*P4*).

Також у контексті нечіткої логіки введемо такі лінгвістичні нечіткі вислови стосовно висновків правил нечітких продукцій:

- швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна збільшується (*Z1*);
- швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється (*Z2*);
- швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна зменшується (*Z3*).

Перелік правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування режимом руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна:

1. ЯКЩО “відбувається енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” ТА “до цього відбувалося енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом”, ТО “швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна збільшується”.
2. ЯКЩО “відбувається неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” ТА “до цього відбувалося енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом”, ТО “швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється”.
3. ЯКЩО “відбувається енергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” ТА “до цього відбувалося неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом”, ТО “швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється”.
4. ЯКЩО “відбувається неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом” ТА “до цього відбувалося неенергоефективне руйнування масиву виконавчим органом”, ТО “швидкість обертання виконавчого органа видобувного комбайна зменшується”.

Також використаємо описаний вище підхід щодо створення бази правил нечітких продукцій для системи нечіткого автоматичного керування виконавчим органом видобувного комбайна за гіпсометрією вугільного пласта, яка використовує такі характеристики режиму руйнування масиву вугілля й породи виконавчими органами видобувного комбайна, як «Руйнування виконавчим органом вугілля біля покрівлі пласта» та «Руйнування виконавчим органом породи біля покрівлі пласта».

Аналіз інформації стосовно поведінки операторів видобувних комбайнів в умовах їх експлуатації на шахтах України, Казахстану та Росії з тонкими вугільними пластами на основі інформації, яка у значній мірі накопичена за декілька десятиліть [4-6], дозволив виявити певні закономірності у діях операторів щодо ручного режиму керування виконавчим органом комбайна за гіпсометрією пласта. Спочатку оператор комбайна циклічно підіймає виконавчий орган на значну величину з витримкою паузи між підійманнями для візуального оцінювання, де знаходиться межа порода-вугілля за виконавчим органом. Якщо оператор помічає присікання породи біля покрівлі виконавчим органом, він починає циклічно опускати виконавчий орган на незначну величину з витримкою пауз між опусканнями, доки присікання породи стане незначним або повністю буде відсутнім. Після фіксування межі порода-вугілля, оператор виконує знову циклічні й східчасті підіймання та опускання виконавчого органа, але постійно на незначну величину та з набагато більшим періодом циклу, що пов’язано з повільною зміною у просторі гіпсометрії пласта.

З оглядом на описані закономірності у діях операторів щодо ручного режиму керування виконавчим органом комбайна за гіпсометрією пласта пропонується за умови створення бази правил нечітких продукцій для системи використати такий алгоритм керування виконавчим органом:

- виконавчий орган підіймається на незначну величину, якщо присікання породи біля покрівлі виконавчим органом не зафіксовано за результатами двох поспіль проведених процедур ідентифікації характеристик режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта;

- виконавчий орган опускається на незначну величину, якщо присікання породи біля покрівлі виконавчим органом зафіксовано за результатами двох поспіль проведених процедур ідентифікації характеристик режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта.

Як видно з опису запропонованого алгоритму керування виконавчим органом комбайна за гіпсометрією пласта, до нього введена умова зміни положення виконавчого органа, тільки якщо присутність або відсутність унікальної закономірності в інформаційному сигналі, що властива лише процесу присікання породи біля покрівлі пласта виконавчим органом, фіксується два рази поспіль. Це зменшує вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта, та не позначається на якості відстеження системою межі порода-вугілля, оскільки гіпсометрія пласта змінюється у просторі значно повільніше у порівнянні з часом, необхідним для ідентифікації присікання породи виконавчим органом.

Представимо описаний алгоритм керування виконавчим органом за гіпсометрією пласта у вигляді діаграми станів кінцевого автомата (графа переходів), прийнявши характеристики режиму руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі за вершини графа. З урахуванням кількості характеристик структура графу буде повністю ідентичною структурі графа на рис.3 тож, прийнявши рис.3 за основу, виконаємо описання графа для випадку керування виконавчим органом за гіпсометрією пласта.

Дуги графа (рис.3) описують переходи від однієї характеристики режиму руйнування прошарку матеріалу біля покрівлі до іншої, причому незмінність характеристики приймається як окремий перехід з відповідним лінгвістичним смислом.

Стан I системи (рис.3) відповідає режиму відсутності присікання породи безпосередньої покрівлі пласта виконавчим органом, стан II – режиму наявності присікання породи біля покрівлі пласта.

Умовами переходу №1 (рис.3) є перебування у стані I та ідентифікація характеристики режиму роботи “Присікання породи відсутнє”, а дією – незначне збільшення висоти підняття виконавчого органа.

Перехід №2 здійснюється за умови перебування у стані I та ідентифікації характеристики режиму роботи “Присікання породи присутнє”. При цьому висота підняття виконавчого органа суттєво не змінюється.

Перехід №3 відбувається за умови перебування у стані II та ідентифікації характеристики режиму роботи “Присікання породи відсутнє”. При цьому висота підняття виконавчого органа суттєво не змінюється.

Умовами переходу №4 є перебування у стані II та ідентифікація характеристики режиму роботи “Присікання породи присутнє”, а дією – незначне зменшення висоти підняття виконавчого органа.

На базі запропонованого алгоритму прийняття рішень щодо зміни положення виконавчого органа комбайна сформуємо перелік правил нечітких продукцій, що складуть основу бази правил системи нечіткого автоматичного керування комбайном за гіпсометрією пласта. Для цього у контексті нечіткої логіки введемо такі лінгвістичні нечіткі вислови стосовно умов правил нечітких продукцій (при цьому для спрощення у висловах під режимом роботи мається на увазі його характеристика):

- присікання породи відсутнє (*P1*);
- присікання породи присутнє (*P2*);
- до цього не спостерігалося присікання породи (*P3*);
- до цього спостерігалося присікання породи (*P4*).

Також у контексті нечіткої логіки введемо такі лінгвістичні нечіткі вислови стосовно висновків правил нечітких продукцій:

- відбувається збільшення висоти підняття виконавчого органа видобувного комбайна (*Z1*);
- висота підняття виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється (*Z2*);
- відбувається зменшення висоти підняття виконавчого органа видобувного комбайна (*Z3*).

Перелік правил нечітких продукцій для системи нечіткого керування комбайном за гіпсометрією пласта:

1. ЯКЩО “присікання породи відсутнє” ТА “до цього не спостерігалося присікання породи”, ТО “відбувається збільшення висоти підняття виконавчого органа видобувного комбайна”.

2. ЯКЩО “присікання породи відсутнє” ТА “до цього спостерігалося присікання породи”, ТО “висота підняття виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється”.

3. ЯКЩО “присікання породи присутнє” ТА “до цього не спостерігалося присікання породи”, ТО “висота підняття виконавчого органа видобувного комбайна суттєво не змінюється”.

4. ЯКЩО “присікання породи присутнє” ТА “до цього спостерігалося присікання породи”, ТО “відбувається зменшення висоти підняття виконавчого органа видобувного комбайна”.

Висновки

1. На основі аналізу інформації щодо поведінки операторів видобувних комбайнів в умовах їх експлуатації на шахтах України, Казахстану та Росії з тонкими вугільними пластами виділено три режими

роботи комбайна, які впливають на прийняття рішень оператором: режим роботи двигуна приводу різання, режим руйнування масиву вугілля й породи виконавчими органами та режим транспортування і навантаження зруйнованого матеріалу виконавчим органом на забійний конвеєр. За умови створення баз правил нечітких продукцій для систем нечіткого автоматичного керування режимами роботи комбайна характеристики цих режимів прийняті за підумови правил нечітких продукцій, а дії оператора комбайна – за висновки правил нечітких продукцій з можливістю подальшого уточнення дії.

2. Незмінність у процесі роботи комбайна товщини стружки вугілля, що відповідає межі між енергоефективним та неенергоефективним режимами руйнування масиву вугілля виконавчим органом комбайна, дозволяє системі нечіткого автоматичного керування за умови прийняття рішення враховувати результат ідентифікації характеристик режиму руйнування на попередніх кроках, що зменшує вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування. Для цього використані додаткові терми для вхідної лінгвістичної змінної системи та підумови у базі правил нечітких продукцій системи.

3. Завдяки тому, що гіпсометрія пласта змінюється у просторі значно повільніше у порівнянні з часом, необхідним для ідентифікації присікання породи виконавчим органом, є можливість в алгоритмі прийняття рішень системою нечіткого автоматичного керування органом за гіпсометрією пласта забезпечити прийняття рішення щодо зміни положення виконавчого органу за умови появи відповідної унікальної закономірності в інформаційному сигналі не один, а декілька разів поспіль. Це забезпечується введенням окремих термів для вхідної лінгвістичної змінної системи “до цього перебували у режимі …” та складних умов у базі правил нечітких продукцій системи на кшталт “до цього перебували у режимі руйнування породи” ТА “наразі перебуваємо у режимі руйнування породи”. Завдяки цьому зменшується вірогідність неточної ідентифікації режиму руйнування матеріалу біля покрівлі пласта.

Список літератури

1. Стадник Н. И. Мехатроника в угольном машиностроении // Н. И. Стадник, А. В. Сергеев, В. П. Кондрахин / Горное оборудование и электромеханика. – М.: Новые технологии, 2007. − № 4. – С. 20 – 29.
2. Стадник Н.И. Мехатронный подход при анализе движущихся горных комплексов // Н. И. Стадник / Енергетика, контроль та діагностика об’єктів нафтогазового комплексу. − 2013. – № 1(19). – С. 91 − 98.
3. Бубліков А. В. Створення бази правил для системи нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном за критерієм мінімальних питомих енерговитрат / А. В. Бубликов // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2018. – Вип. 100. – С. 103 – 108.
4. Проведение испытаний работы очистного комбайна УКД300 в условиях шахты «Павлоградская»: Отчет о научно-исследовательской работе / [науч. рук. Н. И. Стадник]. — Донецк : Донгипроуглемаш, 2004. − 35 с.
5. Топорков А. А. Машинист горных выемочных машин / А. А. Топорков. − М. : Недра, 1991. − 334 с.
6. Крестовоздвиженский П. Д. Некоторые результаты наблюдений за работой очистных комбайнов на шахтах Кузбасса / П. Д. Крестовоздвиженский // Горный информационно-аналитический бюллетень. − 2009. − № 6. − С. 120−123.
7. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. − 736 с.
8. Позин Е. З. Разрушение углей выемочными машинами / Е. З. Позин, В. З. Меламед, В. В. Тон. − М. : Недра, 1984. − 288 с.
9. Бубліков А. В. Експертна система нечіткого автоматичного керування видобувним комбайном як частина мехатронної системи / А. В. Бубліков // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 97. – С. 41 – 48.

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

УДК 622.489:658.012.011

А.В. Малієнко , Л.С. Коряшкіна, С.В. Козир
(Україна, Дніпро, НТУ «Дніпровська політехніка»)

НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ, ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ВИРОБНИЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ШАХТИ

Анотація. *Розглянуто задачу оптимізації плану видобутку вугілля за певний період часу в межах однієї шахти з урахуванням трьох типів обмежень: технологічних – за вмістом золи, сірки і вологи у загальному обсязі видобутого вугілля; виробничих – на планову потужність лав і поточний стан сховища вугілля поверхні (СВП); енергетичних – на максимально можливе електричне навантаження по вугільному підйому, транспорту і водовідлив. Критерієм оптимізації є мінімальна сумарна собівартість ви-*

добутого вугілля по всім лавам за період T, у тому числі мінімізація штрафу за перевищення ліміту витраченої електроенергії і витрат, пов'язаних із зміною поточного стану СВП. Запропоновано математичну модель, яка є задачею мінімізації нелінійної функції за лінійних обмежень.

Ключові слова: *математична модель, видобування вугілля, технологічний процес видубутку вугілля, оптимізація роботи гірничого підприємства.*

Анотация*. Рассмотрена задача оптимизации плана добычи угля за определенный период времени в пределах одной шахты с учетом трех типов ограничений: технологических − по содержанию золы, серы и влаги в общем объеме добытого угля; производственных − на плановую мощность лав и текущее состояние хранилища угля поверхности (ХУП), энергетических − на максимально допустимую электрическую нагрузку, связанную с подъемом угля, его транспортировкой, а также с водоотливом. Критерием оптимизации является минимальная суммарная себестоимость добытого угля по всем лавам шахты за период T, в том числе минимизация штрафа за превышение лимита затраченной электроэнергии и расходов, связанных с изменением текущего состояния ХУП. Предложена математическая модель указанной задачи, которая является задачей минимизации нелинейной функции при линейных ограничениях.*

Ключевые слова: *математическая модель, добычи угля, технологический процесс видубутку угля, оптимизация работы горного предприятия.*

Abstract*. The problem of optimizing the coal production plan for a certain period of time within the same mine has been considered, taking into account three types of constraints: technological − on ash, sulfur and moisture content in the total volume of coal mined; production − at the planned capacity of the lavas and the current state of the surface coal storage (SCS), energy − at the maximum allowable electrical load associated with the lifting of coal, its transportation, and also with the drainage. The optimization criterion is the minimum total cost of coal mined in all lavas for a period T, including minimizing the penalty for exceeding the limit of electricity consumed and the costs associated with changing the current state of the SCS. It is proposed a mathematical model of this problem, which consists of minimizing a nonlinear function under linear constraints.*
Key words*: mathematical model, coal mining, the technological process of coal mining, optimization of the mining enterprise.*

Вступ.

Гірничовидобувна промисловість є однією з найважливіших галузей як світової, так і вітчизняної економіки, оскільки мінерально-сировинний потенціал держави обумовлює не тільки ефективність функціонування інших галузей промисловості, а і рівень розвитку соціальної сфери, визначаючи місце країни у світовій економічній системі. Галузь традиційно відносять до числа найскладніших з точки зору управління. Це пов'язано із необхідністю постійних і значних інвестицій, високими витратами на операційну діяльність, сильним впливом біржових цін на ресурси, проблемами захисту навколишнього середовища, здоров'я та гарантування безпеки. Крім того, на розвиток галузі значно впливають різні регулюючі органи. Серед найбільш пріоритетних завдань компаній галузі є: оптимізація/інтеграція виробничих операцій, підвищення ефективності ланцюжка поставок, інновації для управління ростом, раціоналізація бізнес-одиниць, управління енергетичними затратами, управління цінами на сировину, управління витратами, підвищення продуктивності.

Не зменшуючи важливість фінансової підтримки і значущості дії зовнішніх обставин на функціонування вуглевидобувних підприємств, слід зазначити, що вагомою складовою в процесі пошуку стратегій розвитку як самих гірничих підприємств, так і галузі в цілому, є більш раціональне використання наявних внутрішніх резервів шахт. Збитковість багатьох вугледобувних підприємств частіше за все обумовлена недостатньо ефективним управлінням, необґрунтованим зростанням витрат на видобуток вугілля, відсутністю механізмів, що дозволяють максимально використовувати наявний потенціал. Ніяка ні фінансова, ні інвестиційна підтримка не дозволить забезпечити ефективний видобуток вугілля і не поліпшить економічні показники роботи шахт при низькому рівні управління і безгосподарності.

Одним з напрямків підвищення ефективності управління вуглевидобувними підприємствами є реалізація таких найважливіших інструментів господарювання, як планування і контроль, а отже, й використання математичних моделей і методів в плануванні та управлінні.

Об'єктом досліджень є технологічний процес видобутку вугілля.

Предметом дослідження є математична модель задачі пошуку такого плану видобутку вугілля, який за наявних виробничих і технологічних обмежень забезпечував би зниження собівартості видобутку, транспортних витрат і штрафу за перевищення ліміту витраченої електроенергії.

Метою роботи є розробка математичної моделі задачі оптимізації обсягів вудобування вугілля з усіх лав деякої шахти за певний період часу з урахуванням виробничих потужностей шахти, а також технологічних і

енергетичних обмежень, реалізація якої дозволить скоротити час і підвищити ефективність прийняття рішення диспетчером вугільної шахти щодо плану роботи гірничого підприємства.

Постановка задачі. На шахтах обсяг видобутку, який визначається за планом, щомісяця розподіляється між окремими діючими ділянками так, щоб забезпечувалася мінімальна собівартість одиниці видобутого вугілля при обов'язковому дотриманні технологічних вимог і умов виробництва. Процес видобутку має нерівномірний характер, що не може не позначатися на роботі всієї вугільної шахти. Нерівномірність обсягів видобутку пов'язана в першу чергу з характером залягання вугільного масиву, режимами роботи обладнання, попитом на продукцію підприємства. Для стабілізації обсягів видобутку, згладжування нерівномірності видобутку, транспортування, а головне зменшення простоїв обладнання технологічних комплексів гірничого підприємства необхідно впровадження та модернізація існуючих систем диспетчерського управління, удосконалення математичних моделей системи оперативно-диспетчерського управління (СОДУ).

Огляд наукових публікацій. Питанням підвищення ефективності управлінських рішень щодо функціонування і розвитку підприємств гірничодобувної галузі в сучасних ринкових умовах присвячена велика кількість наукових публікацій. Розглянемо деякі з них, де надаються рекомендації, отримані за рахунок використання економіко-математичного моделювання.

Так, у роботі [1] запропонована модель розвитку вугільної галузі країни, яка враховує ринкові умови функціонування галузі шляхом додавання до переліку виробників вугільної продукції джерел постачання імпортованого палива і запровадження таким чином конкурентних засад функціонування власних виробників – суб’єктів внутрішніх ринків вугілля. У результаті реалізації такої моделі визначаються обсяги видобутку вітчизняних шахтних підприємств, а також відповідні обсяги надходження імпортованого вугілля у порівнюваних варіантах спрямування капіталовкладень у галузь при заданих потребах економіки країни на вугільну продукцію.

Максимізація річного прибутку шахтного підприємства за рахунок оптимальної довжини комплексно-механізованого очисного забою розглянута в роботі [2]. Отримані аналітичні розв'язки цієї задачі показують нелінійні залежності оптимальної довжини лави від гірничо-геологічних, технологічних і техніко-економічних показників (марки, зольності, товарної ціни вугілля, опірності пласта різанню, наявності породних прошарків та ін.). У роботі також зазначено, що оскільки в більшості випадків шахта відпрацьовує не один пласт, а свиту вугільних пластів з різною якістю, задачу визначення оптимальної довжини лави (навіть при використанні того ж самого комплексу) необхідно вирішувати в кожному випадку заново при переході від відпрацювання одного пласта до іншого, тобто, не існує однозначної відповіді щодо обґрунтування оптимальної довжини лави для даного виду комплексу, а довжина лави має оптимізуватися для кожного вугільного пласта і навіть для окремих виїмкових стовпів, якщо гірничо-геологічні умови їх залягання істотно розрізняються. Розкрій шахтного поля на панелі, яруси, видобувні стовпи, а також календарний план їх відпрацювання в значній мірі змінюватимуться відповідно до розв'язку задачі оптимізації довжин очисних вибоїв для кожного пласта свити.

Економіко-математична модель розкриття і підготовки шахтного поля, яка запропонована в роботі [3], розроблена з використанням елементів теорії графів. В даній моделі виконується мінімізація обсягів проведення підготовчих робіт.

Важливим показником ефективності роботи гірничого об’єднання є собівартість видобутку. Моделювання (математичний опис) цієї величини дозволяє здійснити економічне обґрунтування проектів відпрацювання запасів, вибір оптимальної системи розробки, визначити та оптимізувати витрати основних ресурсів. Можливість урахування специфіки розробки запасів на гірничовидобувному підприємстві, яка значним чином впливає на вартісні показники і може значно відрізнятися для різних проектів відпрацювання руд, розглянуто в роботі [4] під час розрахунку витрат основних ресурсів. У цій роботі проведена формалізація економіко-математичної моделі визначення собівартості видобутку запасів гірничодобувного підприємства в умовах підземної розробки родовищ. Тут зазначено, що під час побудови моделі визначення собівартості необхідно забезпечити можливість диференційованого врахування гірничо-геологічних і технологічних параметрів різних проектів розробки запасів. Проведене дослідження показало, що за умов підземної розробки залізних руд основними із цих параметрів є такі: обсяг запасу, що підлягає відпрацюванню, розподіл міцності у видобувному блоці, обсяг нарізних, підготовчих робіт та очисного виймання, час відпрацювання запасів, продуктивність обладнання, місячна продуктивність блока з руди. Ці параметри обумовлюють витрати основних ресурсів та впливають на величину собівартості видобутку.

У роботі [5] розглянуто етапи керування гірничим підприємством, а також моделі і методи, що застосовуються для формалізації таких задач. У цих задачах гірничо-промислові системи розглядаються як природно-технологічні комплекси. Проаналізовані такі важливі для управління особливості процесів гірничого виробництва, як їх перебіг у нестаціонарному якісно і кількісно неоднорідному природному сере-

довищу, багаторівневість і комплексна взаємозалежність задач управління ними. Виділений мішаний дискретно-неперервний характер задач керування щодо змінних, стану і часу, обґрунтовано застосування формалізму гібридних систем і декомпозиційного підходу щодо побудови методів оптимізації. Розглянуто досвід вирішення проблем керування потоками надходження повітря на шахтах, перспективного і оперативного планування відкритих гірничих робіт.

Відомо, що існують і широко застосовуються деякі спеціальні методи постановки задач оптимізації та шляхи їх розв'язання. Це, наприклад, оптимізаційні методи визначення кінцевих границь відкритої розробки на базі застосування спеціалізованих варіантів динамічного програмування до блокових моделей родовища і кар'єра. Дані методи мають високий рівень обґрунтування. Велика кількість методів розв'язання оптимізаційних задач, що виникають на гірничих підприємствах, належать області інженерної математики та є лише евристиками. Незважаючи на те, що евристичні алгоритми відображають прийнятні результати при розв'язанні окремих задач, вони не можуть бути перенесені на інші, оскільки різноманітність таких завдань дуже велика. Разом з тим можна відзначити той сприятливий факт, що комбінаторна природа деяких задач керування в гірничій галузі не потребує дуже великої кількості допустимих варіантів, які мають місце, наприклад, в задачах теорії розкладів.

Як зазначено в роботі [5], в розроблених на даний момент промислових програмних комплексах моделювання і планування гірничого виробництва оптимізаційні моделі та методи застосовуються дуже обмежено. За допомогою таких програмних засобів реалізований переважно низькорівневий діалог, тобто по суті метод проб і помилок, часто в дуже обтяжному для користувачів вигляді. Причиною тут є насамперед складність розв'язання нелінійних задач в порівнянні з лінійними. Крім того, необхідно реалізувати для їх розв'язання цілий арсенал методів нелінійної оптимізації (в порівнянні з перевіреним симплекс-методом) і забезпечити зручні засоби для вибору методу, або цілої низки методів. Іншою причиною обмеженого застосування оптимізаційних моделей є їх недостатня адекватність або недостатня універсальність, неврахування ряду істотних умов складного і різноманітного гірського виробництва. Необхідність вносити вручну поправки до планових рішень, розрахованим формальними методами, але на основі грубих моделей, знецінює практичне значення оптимізаційних методів. На думку авторів, найкращим шляхом поступового подолання цієї проблеми є вдосконалення моделей, які більш точно відображають дискретно-неперервний характер процесів у неоднорідному просторово-часовому середовищі, і не настільки складних, щоб неможливо було вирішувати на їх основі задачі керування.

Отже, актуальним напрямком наукових досліджень є розвиток спеціалізованих методів теорії управління на основі модифікації або комбінації методів більш універсального характеру, орієнтованих на розв'язання цілих класів задач, що виникають з урахуванням їх принципових особливостей.

У роботі [6] наведена система оперативно диспетчерського керування, яка дозволить підвищити ефективність прийняття відповідальних рішень диспетчером вугільних шахт. Розроблена імітаційна модель визначення ємності накопичувальних бункерів вугільної шахти при розрахунку навантажень на лави, яка дозволяє враховувати нерівномірність роботи лав, лінійних ділянок транспортної мережі шахти і при цьому регулювати вантажопотік та оптимізувати прийняття рішень відповідальними співробітниками диспетчерських служб вугільних шахт.

У системі планових показників особливе місце займає обсяг видобутку вугілля, який в значній мірі формує величину багатьох інших показників, і в першу чергу − собівартості видобутку вугілля. План видобутку вугілля безпосередньо пов'язаний з планом по праці і заробітної плати, планами виробничих витрат, а також фінансових та інвестиційних планів. На відміну від моделей, запропонованих у вказаних вище роботах, представлена в даній роботі математична модель задачі оптимізації плану видобутку вугілля враховує одночасно наявні технологічні, виробничі й енергетичні потужності гірничого підприємства і забезпечує мінімальну собівартість видобутку, у тому числі й штрафи за можливі невиконання зазначених умов.

Матеріали дослідження. Нехай планується видобуток вугілля на період часу T з усіх лав шахти, що працюють у штатному режимі. Тут і надалі T вимірюється в годинах. Добуте вугілля з кожної лави може бути направлене частково – в загальну ємність (контейнер) для задоволення попиту, частково – на поповнення запасів вугля у СВП шахти. Якщо кількість добутого вугілля недостатня для задоволення потреб споживача (наприклад, у разі реалізації нештатної ситуації на деякій лаві), то решту можна відвантажити із сховища. При цьому мають бути враховані обмеження на використання електроенергії, на технологічні характеристики отриманої суміші, а також розміри СВП і номінальну кількість вугля, який має залишатися у сховищі на кінець періоду, що розглядається.

Задача розрахунку оптимальних навантажень на лави вугільної шахти за певний період часу складається з мінімізації сумарної собівартості видобутого вугілля по всім лавам за період T, у тому числі штрафу за перевишення ліміту витраченої електроенергії і витрат, пов’язаних із зміною поточного стану СВП, з урахуванням трьох типів обмежень: технологічних – за вмістом золи, сірки і вологи у загальному обсязі видобутого вугілля; виробничих – на планову потужність лав і поточний стан СВП; енергетичних

– на максимально можливе електричне навантаження вугільного підйому, транспорту, водовідливу та ін [7, 8].

Для побудови математичної моделі введемо такі позначення величин, що вважаються відомими:

n – кількість працюючих лав;

D_{pl} – плановий (узгоджений з попитом) обсяг видобутку вугілля шахти в цілому, т;

$C_i, i=\overline{1,n}$, – собівартість тонни вугілля з i – тої лави, грн/т;

$X_i^{\min}$, $X_i^{\max}$, $i=\overline{1,n}$, – відповідно мінімально і максимально можлива кількість вугілля, яке можна отримати з i – тої лави, і яка визначається технологічними характеристиками лави, т;

$0 \le p_i \le 1$, $i=\overline{1,n}$, – ймовірність роботи i-тої лави в штатному режимі протягом періоду часу T (визначається за допомогою графу станів) ;

Z_i – вміст золи у вугіллі i -го забою, %;

S_i – вміст сірки у вугіллі i -го забою, %;

W_i – вміст вологи у вугіллі i -го забою, %;

B_1, B_2, B_3 – граничні значення за змістом золи, сірки і вологи у суміші вугілля з усіх лав, %;

γ_0 – питомі (розраховані на тону) витрати, пов'язані із зберіганням надлишкової кількості вугілля на СВП, грн/т ;

γ_1 – розрахований розмір штрафу за перевищення ліміту на одиницю енергоносія, грн/(кВт*год);

γ_2 – вартість відвантаження тони вугілля з СВП, грн/т;

β_i, $i=\overline{1,n}$, – вартість транспортування (або зберігання) на СВП надлишкової однієї тони вугілля, видобутого з i-тої лави, грн/т;

V_T – поточна кількість вугілля на СВП, т;

V_H – номінальний обсяг вугілля на СВП, т;

$V_{\max}$ – максимальний обсяг вугілля на СВП, т;

P_z – потужність, що відповідає заявленому ліміту на інтервалі часу T, кВт*год;

P_p – електричне навантаження вугільного підйому, кВт*год;

P_{tr} – електричне навантаження локомотивного транспорту, кВт*год;

P_{kt} – електричне навантаження конвеєрного транспорту, кВт*год;

P_v – електричне навантаження водовідливу, кВт*год;

P_{vs} – сумарна встановлена потужність обладнання, що відповідає можливостям підстанції, кВт*год.

Для формалізації математичної моделі оптимізації плану видобутку вугілля введемо тепер такі змінні:

z_i, $i=\overline{1,n}$, – обсяг вугілля, який планується видобувати з i – тої лави за одиницю часу, тобто поточна продуктивність i –ї лави, т/год;

y_i, $i=\overline{1,n}$, – обсяг видобутого з i -го забою вугілля, для поповнення запасів СВП шахти, т;

$z=(z_1, z_2, \ldots, z_n)$, $y=(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ – вектори відповідних змінних;

Y – обсяг вугілля, який забирається з СВП шахти на покриття запланованого попиту D_{pl} у разі недостатньої кількості видобутого вугілля, т.

Проміжними шуканими величинами, які характеризують роботу шахти протягом періоду T, є:

$\bar{D}_f$ – фактичний обсяг видобутку по шахті в цілому, т:

$$\bar{D}_f = \sum_{i=1}^{n} p_i T z_i;$$

ΔP – можливе перевищення ліміту споживаної електроенергії за період часу T, кВт*год:

$$\Delta P = \begin{cases} P_s - P_z, \text{ якщо } P_s > P_z \\ 0, \text{ якщо } P_s \le P_z \end{cases}$$

де

$$\boldsymbol{P_s = (P_p + P_{tr} + P_{kt} + P_к + P_v) \cdot \sum_{i=1}^{n} p_i T z_i;}$$

ΔV – зміна обсягу вугілля в СВП, [т]:

$$\Delta V = (\sum_{i=1}^{n} y_i - Y)^{\bullet}$$

Отже, математична модель задачі оптимізації плану видобутку вугілля з мінімальною собівартістю при всіх зазначених вище обмеженнях має вигляд:

$$G \to \min_{z,y,Y},$$

де

$$G = \sum_{i=1}^{n} C_i p_i T z_i + \gamma_1 \Delta P + \left(\gamma_2 Y + \sum_{i=1}^{n} \beta_i y_i \right),$$

за умов, що:

$$\sum_{i=1}^{n} Z_i \left(p_i T z_i - y_i \right) \le B_1 \sum_{i=1}^{n} \left(p_i T z_i - y_i \right), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n} S_i \left(p_i T z_i - y_i \right) \le B_2 \sum_{i=1}^{n} \left(p_i T z_i - y_i \right), \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i \left(p_i T z_i - y_i \right) \le B_3 \sum_{i=1}^{n} \left(p_i T z_i - y_i \right), \quad (3)$$

$$X_i^{\min} \le p_i T z_i \le X_i^{\max}, i = \overline{1,n}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{n} (p_i T z_i - y_i) + Y \ge D_{pl}, \quad (5)$$

$$\left(\boldsymbol{P_p} + \boldsymbol{P_{tr}} + \boldsymbol{P_{kt}} + \boldsymbol{P_\kappa} + \boldsymbol{P_v} \right) \cdot \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{p_i T z_i} \le \boldsymbol{P_{vs}}; \quad (6)$$

$$V_H \le V_T + \sum_{i=1}^{n} y_i - Y \le V_{\max}; \quad (7)$$

$$0 \le Y \le V_T, \quad (8)$$

$$0 \le y_i \le p_i z_i, \; i = \overline{1,N}. \quad (9)$$

Отже, цільова функція G має такі складові: перший доданок визначає собівартість вугілля, добутого з усіх лав за період часу T; другий доданок – штраф за можливе перевищення ліміту витраченої електроенергії; третій доданок враховує витрати, пов'язані зі зміною стану СВП.

Група умов (1) – (3) відповідає вимогам щодо вмісту золи, сірки та вологи у загальному обсязі вугілля, що видобувається; умова (4) враховує виробничі потужності самих лав шахти. Обмеження (5) означає, що кількість видобутого вугілля відповідної якості з урахуванням можливого відвантаження певної кількості на СВП (сховище вугілля поверхні шахти), і, поповнення його за рахунок вугілля із сховища, має бути не меншим за заплановану величину D_{pl}. Умова (6) носить енергетичний характер і відображає той факт, що споживання електроенергії не може перевищувати встановлений підстанцією ліміт. Умова (7) пов'язана із зміною кількості вугілля у СВП: на кінець періоду, що розглядається, обсяг вугілля у сховищи має бути не менше бажаного, але й не більше максимально можливого. Умови (8) – (9) очевидні.

Сформульована задача не є типовою задачею ЛП (лінійного програмування), оскільки доданок за перевищення ліміту електроенергії може бути відсутнім. Для її розв'язання можуть бути задіяні евристичні алгоритми, які дозволяють за прийнятний час встановити прийнятний розв'язок.

Висновки

Реалізація розробленої математичної моделі задачі оптимізації плану видобутку вугілля на всіх лавах шахти за певний період дозволить удосконалити систему оперативного диспетчерського керування, за допомогою якої особа, яка приймає рішення, швидко і без залучення інших експертів розраховуватиме планові показники по шахті з урахуванням наявних виробничих потужностей, енергетичних навантажень і технологічних вимог щодо вугілля, яке видобувається і відвантажується або на сховища, або безпосередньо до споживачів.

Список літератури

1. Математична модель розвитку вугільної промисловості України в умовах міжнародної конкуренції // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – Вип. 1 (36). – С. 24 – 32
2. Ордин А. А. К вопросу об оптимизации длины и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты / А. А. Ордин, А. А. Метельков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. РАН. Сибирское отделение. – 2003.– № 2. – С. 100 – 112
3. Вагонова А.Г. Оптимізація витрат на спорудження підготовчих виробок вугільних шахт / А.Г. Вагонова, Т.А. Ерохина, О.О. Шашенко // Науковий вісник НГУ. − 2010. − № 3. − С. 21 − 25

4. Максимова І.І. Економіко-математична модель формування собівартості видобутку запасів гірничодобувного підприємства / І.І. Максимова // Глобальні та національні проблеми економіки. Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського. – 2014. – Вип. 2. – С. 1334 – 1338
5. Валуев А.М. О моделях методах оптимизации в задачах управления процессами горного производства/ А.М. Валуев // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва 16-19 июня 2014 г. – С. 4264 – 4275
6. Новицкий И.В., Малиенко А.В. Принципы построения математической модели системы оперативно диспетчерского управления угольных шахт / И.В. Новицкий , А.В. Малиенко // Материалы XII-ї международной научно-практической конференции "Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности" (Днепропетровск, 23-24 ноября 2016г.) – Д.: НГУ. – 2016. – С. 51 – 54
7. Малієнко А.В. Принципи побудови імітаційної моделі визначення ємності накопичувальних бункерів транспортної системи при оперативно диспетчерському управлінні вугільних шахт/ А.В. Малієнко// Материалы XIII международной научно-практической конференции "Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности" (Днепро, 23-24 ноября 2017г.) – Д.: НГУ. – 2017. - С. 113-115.
8. Малиенко А.В. Моделирование оценки надежности системы технического обслуживания оборудования угольных шахт. / А.В. Малієнко // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук. техн. зб. – 2011.– Вип. 86. – С. 96 – 99

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф Мещеряковим Л.І.

УДК 681.5.033.2

О.І Швачка, Г.І. Манко, канд-ти техн. наук,
(Україна, Дніпро, ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет")

РОЗВИТОК МЕТОДІВ НАЛАТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА З ДОДАТКОВОЮ ДІЄЮ ДИФЕРЕНЦІАТОРУ

Анотація. *Розглянуто структуру пропорціонального - інтегрально - диференціального регулятора з додатковим впливом диференціатора за пропорційною і диференціальною складовими для управління істотно інерційними об'єктами в умовах дії неконтрольованих збурень досить великої величини і режимах експлуатації близьким до критичних. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів регулятора, що поєднує в собі принципи ітеративної настройки за показниками якості та експериментально-статистичні методи аналізу при варіюванні динамічних характеристик об'єкта. На підставі модельного експерименту експлуатації автоматичної системи з класичним ПІД- регулятором налаштованим інструментальними засобами і регуляторів з додатковим впливом диференціатора налаштованих експериментально-статистичним методом показано, що в другому випадку більш ефективна настройка при відпрацюванні збурень і встановленні параметрів процесу.*

Ключові слова: *ПІД- регулятор, диференціатор, настройка, рівняння регресії, коефіцієнт кореляція, статистика, якість.*

Аннотация. *Рассмотрена структура пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора с дополнительным воздействием дифференциатора по пропорциональной и дифференциальной составляющим для управления существенно инерционными объектами в условиях действия неконтролируемых возмущений достаточно большой величины и режимах эксплуатации близким к критическим. Предложен подход к расчету настроек регулятора, объединяющий в себе принципы итеративной настройки по показателям качества и экспериментально-статистические методы анализа при варьировании динамических характеристик объекта. На основании модельного эксперимента эксплуатации автоматической системы с классическим ПИД- регулятором настроенным инструментальными средствами и регуляторов с дополнительным воздействием дифференциатора настроенных экспериментально-статистическим методом показано, что во втором случае более эффективная настройка при отработке возмущений и установлении параметров процесса.*

Ключевые слова: *ПИД- регулятор, дифференциатора, настройка, уравнение регрессии, коэффициент корреляции, статистика, качество.*

Abstract. *The structure is considered in proportion to the integral - differential controller with the additional influence of the differentiator on the proportional and differential components to control substantially in-*

ertial objects under conditions of uncontrolled disturbances of a sufficiently large size and operating conditions close to critical. An approach to calculating the controller settings is proposed, combining the principles of iterative tuning in terms of quality indicators and experimental-statistical analysis methods when varying the dynamic characteristics of an object. On the basis of a model experiment of operating an automatic system with a classical PID controller adjusted by instrumental means and regulators with an additional effect of a differentiator tuned by an experimental statistical method, it was shown that in the second case, more effective tuning is when processing disturbances and setting process parameters.

Keywords: *PID-regulator, differentiator, tuning, regression equation, correlation coefficient, statistics, quality.*

Вступ

Інтенсифікація процесів видобутку та збагачення корисних копалин, зростаючі вимоги до екологічної безпеки та якості цільового продукту при мінімальних витратах додаткових ресурсів та енергії потребує створення більш ефективних та надійних автоматичних систем регулювання (АСР). Характерними особливостями багатьох об’єктів гірничо-металургійного комплексу є наявність великої кількості неконтрольованих збурень, велика інерційність, значне запізнювання, а також нелінійність в каналах управління та обмежений діапазон зміни інших параметрів [1].

Одним зі складових факторів комплексної проблеми завдання управління є автоматична підтримка параметрів на заданому рівні з використанням пропорціонально–інтегрально–диференціальних (ПІД) – регуляторів. Такі регулятори не забезпечує необхідної якості регулювання технологічних параметрів в умовах виробництв що розглядаються. А, од же проблема підвищення ефективності АСР на основі зміни структури ПІД- регуляторів, розширення функціональних можливостей, розробки способів їх реалізації та методів розрахунку є складною та незавершеною задачею [2].

Аналіз досліджень та публікацій

Проведені дослідження якості роботи 100 тис. контурів регулювання, що знаходяться в експлуатації не менше п'яти років на 350 підприємствах в різних галузях промислового виробництва, виявили, що на різних підприємствах від 49 до 63% контурів працюють зі "слабкими" (наближеними до розмикання контуру) налаштуваннями. В середньому приблизно третина контурів працює з нормальними налаштуваннями, третина - з "ослабленими", третина - практично розімкнені "слабкими" налаштуваннями. Це ставить задачу вдосконалення методів управління з використанням складніших математичних моделей, що дозволяють оптимізувати управління, а використання ускладнених моделей породжує проблему вдосконалення алгоритмів їх налаштування [3].

Питанням проектування систем управління з ПІД-регуляторами присвячена значна кількість наукових публікацій. Наприклад, у роботі [4] розглянуті питання якості процесу регулювання, теорії та практики налаштування ПІД- регуляторів, включаючи інструментальні та програмні засоби. У продовж теми, автори [5] підкреслюють, можливе зашумлення вимірювальної інформації різними шумами, в тому числі і тими, що не підкоряються закону розподілу Гауса. Запропонований ними фільтр може бути використаний при обробці даних систем контролю параметрів стану, забезпечуючи підвищення якості АСР при використанні ПІД- регулятору.

Останнім часом значна увага приділяється використанню програмних засобів при проектуванні регуляторів. Ряд авторів, зокрема корифей у галузі розрахунку налаштувань промислових регуляторів В.Я. Ротач, пропонує використовувати середовище Mathcad [6]. Проте в таких роботах або показане розв’язування окремих етапів задачі синтезу системи регулювання, або ж дається переказ положень документації інструментального середовища. Використання методів, що пропонуються, не надто прискорює процес синтезу системи регулювання. Тим більше це стосується регуляторів з нестандартними структурами і ускладненими законами управління.

На сьогоднішній день значна увага приділяється розробці ПІД-регуляторів з додатковою керуючою дією диференціатора [7, 8], що дозволяють покращити якість управління в умовах змінних збурень та підвищують мобільність процесу налаштування регулятору. У структурі таких регуляторів додатково використовують блок диференціювання, на вхід якого подають вихідний сигнал, пропорційний сумі вихідних сигналів однієї або кількох складових класичного ПІД- закону регулювання. Вихідний сигнал додаткового блока диференціювання додають до вихідного керуючого сигналу стандартного ПІД-регулятора і використовують як додаткову керуючу дію.

Таким чином, не викликає сумнівів необхідність удосконалення структури ПІД- регуляторів та розробка алгоритмів для визначення параметрів налаштування вдосконалених регуляторів. На сьогоднішній день запропонована велика кількість методів розрахунку параметрів регуляторів. Але більшість з них вимагають суттєвих витрат часу і не завжди дають задовільний результат, який би забезпечував бажану якість управління. В окремих випадках спроектована систем може виявитись нестійкою.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розрахунок налаштувань ПІД- регулятору з додатковою дією диференціатору по пропорційній та диференціальним складовим при управлінні суттєво інерційними технологічними процесами в умовах дії неконтрольованих обурень достатньо великого значення, а також у режимах експлуатації, що близькі до гранично допустимих.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

– аналіз структури регулятору з пропорціональним – інтегрально – диференційним законом регулювання за умови введення диференціатору та сукупних ефектів функціонування.

– розробка загального підходу до налаштування ПІД- регулятору з додатковою дією диференціатору по пропорційній та диференційній складовим з урахуванням динаміки об'єкту;

– проведення експериментально-статистичних досліджень запропонованої структури регулятору з отриманням параметрів налаштування методами регресійного аналізу;

– дослідження структури регулятору з додатковою дією диференціатору у порівнянні з регуляторами-аналогами та класичною структурою в умовах суттєвих обурень.

Структура ПІД- регулятора з додатковою керуючою дією диференціатора

Стандартний ПІД- регулятор виробляє сигнал управління, що є сумою трьох складових: пропорціональної, інтегральної та диференціальної. Пропорціональна складова залежить від розузгодження між завданням і поточним значенням регульованої величини і відповідає за реакцію на миттєву помилку регулювання. Інтегральна складова містить в собі накопичену помилку, яка дозволяє добитися максимальної швидкості досягнення уставки за відсутності перерегулювання. Диференціальна складова залежить від швидкості зміни параметра, що викликає реакцію регулятору на різку зміну вимірюваного параметра, що виникла, наприклад, в результаті зовнішньої збурюючої дії.

Передатна функція ПІД- регулятора представляється у двох формах: стандартній і паралельній. Стандартна форма виглядає так:

$$C(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right), \tag{1}$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора, T_i – стала часу інтегральної складової або час ізодрому, T_d – стала часу диференціальної складової або час передування.

Формула ПФ у паралельній формі має вигляд:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \tag{2}$$

де K_p, K_i та K_d – коефіцієнти передачі пропорціональної, інтегральної та диференціальної складових.

При розгортанні структури від класичної форми ПІД- регулятору було відібрано сигнали пропорціональної та диференціальної складових, що потрапляють на вхід додаткового диференціатору (рис. 1.1). Цей пристрій отримав назву ПІД-ПД- регулятор [8].

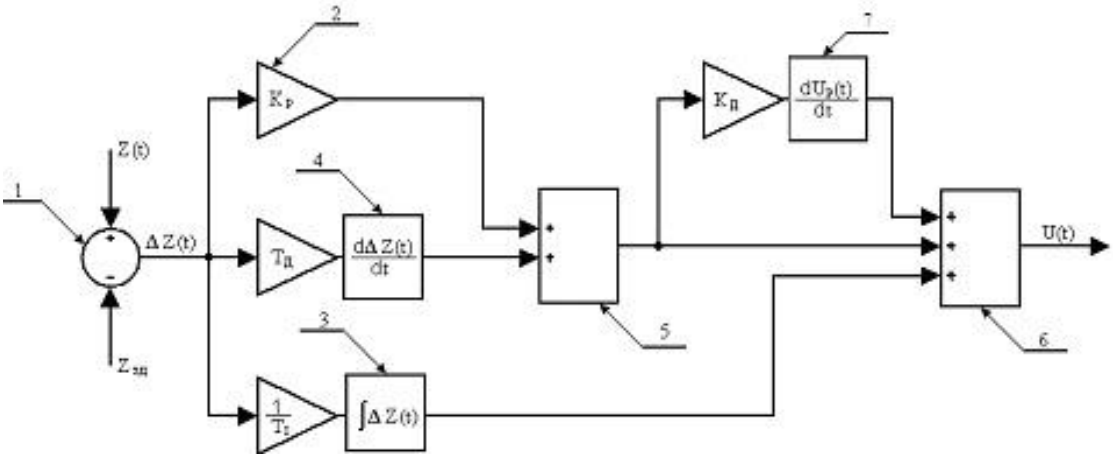


Рис. 1. Структурна схема ПІД-ПД- регулятору

Передатна функція цього регулятора має вигляд:

$$W_0(s) = k_p + \frac{1}{T_s s + s} + (T_Д + k_p \cdot k_Д) \cdot s + T_Д \cdot k_Д \cdot s^2. \quad (3)$$

На вхід додаткового диференціатора 7 подається вихідний сигнал суматора 5, який підсумовує вихідні сигнали блоку пропорціонального перетворювання 2 та блоку диференціювання 4 стандартного ПІД- регулятора. Додаткова керуюча дія диференціатора 7 додається до основного керуючого сигналу ПІД- регулятора в суматорі 6, вихідний сигнал якого є загальним сигналом цього регулятора.

Викладення основних результатів дослідження

Найбільш розповсюдженими в промисловості є моделі об'єктів регулювання першого порядку з запізненням в каналі управління як з самовирівнюванням (α= 1 – інерційний об'єкт), так і без нього (α= 0 – інтегральний об'єкт). Передатна функції моделі об'єкта представлена у вигляді:

$$W_0(s) = \frac{k_0}{T_0 p + \alpha} \cdot e^{-\tau_0 p}, \quad (4)$$

де k_0 - коефіцієнт передачі; T_0 - постійна часу, с; τ_0 - час повного запізнювання.

Модель об'єкта (при α= 1) прийнята як типова (базової) для налаштування та дослідження ПІД-регулятору з додатковою дією диференціатору. Її використання суттєво спрощує вивчення динамічних властивостей АСР та дозволяє виконати дослідження у загальному вигляді.

Проведений аналіз статистичних даних [9] по промисловому теплообмінному устаткуванню дозволив встановити наступні межі коливання параметрів настройки об'єкту:

$$k_0 = 0{,}4 \div 4;\ T_0 = 4 \div 50\,c;\ \tau_0 / T_0 = 0{,}1 \div 0{,}8. \quad (5)$$

Як параметри, що безпосередньо впливають на динаміку об'єкта та відображують його інерційність та вплив збурень, прийнято τ_0 та T_0, а точніше відношення (τ_0 / T_0). Постійна часу об'єкту незмінна, $T_0 = 18{,}64c$ і визначається як базовий показник. Для впливу на час повного запізнювання (τ_0) будемо змінювати чисте (транспортне) запізнювання ($\tau_ч$), що є складовою показника що розглядається.

Основна ідея визначення налаштувань запропонованої структури регулятору з додатковою дією диференціатору полягає у проведенні класичного однофакторного експерименту шляхом варіювання параметром ($\tau_ч$). За отриманим поточним варіантом стану об'єкту проведено ручне налаштування регулятору у відповідності до правил, що було викладено вище для класичного ПІД- регулятору. Останнім параметром, що підлягає налаштуванню, є коефіцієнт додаткового диференціатору(табл. 1).

Таблиця 1

Експериментально-статистичні дослідження параметрів налаштувань ПІД-ПД- регулятору

Налаштування об'єкту ($k_0 = 1, T_0 = 18{,}64c$)			Налаштування регулятору			
$\tau_ч$	τ_0	τ_0/T_0	$k_п$	T_i	T_d	K_d
0,36	1,86	0,1	13,0	0,45	0,4	4
1,29	2,79	0,15	7,0	0,7	1,25	3,3
2,23	3,73	0,2	5,3	1,15	2,0	2,75
3,16	4,66	0,25	4,5	1,7	2,7	2,3
4,09	5,59	0,3	4,0	2,4	3,3	2,0
5,96	7,45	0,4	2,3	5,8	3,3	1,8
7,82	9,32	0,5	2,18	7,1	4,5	1,6
9,68	11,18	0,6	1,9	8,0	6,2	1,5
11,55	13,05	0,7	1,6	10,1	7,25	1,32
13,41	14,91	0,8	1,25	13,5	7,2	0,65

При опрацюванні статистичних даних з метою отримання більш точних розрахунків застосовано метод кусочно-нелінійної апроксимації, тобто виділено два діапазони настроювань: *(τ_0/T_0) <= 0,3* та *(τ_0/T_0)> 0,3* і для кожної групи отримали окремі рівняння регресії (табл. 2).

Таблиця 2

Рівняння регресії параметрів налаштувань ПІД-ПД- регулятору

Характеристика залежності	Коефіцієнт регресії
(τ_0/T_0) < = 0,3	
$k_p(\tau_0/T_0) = \dfrac{-5{,}0949 - 36{,}8114\cdot(\tau_0/T_0)}{1 - 16{,}7543\cdot(\tau_0/T_0)}$	$R^2 = 0{,}9999$
$T_i(\tau_0/T_0) = 0{,}32 - 1{,}6286\cdot(\tau_0/T_0) + 28{,}5714\cdot(\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0{,}999$
$T_d(\tau_0/T_0) = -1{,}52 + 20{,}7857\cdot(\tau_0/T_0) - 15{,}7143\cdot(\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0{,}9999$
$k_d(\tau_0/T_0) = 5{,}77 - 20{,}2857\cdot(\tau_0/T_0) + 25{,}7143\cdot(\tau_0/T_0)^2$	$R^2 = 0{,}9999$
(τ_0/T_0) > 0,3	
$k_p(\tau_0/T_0) = 0{,}4953 + 11{,}0226\cdot(\tau_0/T_0) - 19{,}9286\cdot(\tau_0/T_0)^2 + 9{,}1667\cdot(\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0{,}999$
$T_i(\tau_0/T_0) = -16{,}7357 + 120{,}297\cdot(\tau_0/T_0) - 216{,}428\cdot(\tau_0/T_0)^2 + 141{,}666\cdot(\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0{,}999$
$T_d(\tau_0/T_0) = 17{,}79 - 101{,}917\cdot(\tau_0/T_0)^2 - 133{,}333\cdot(\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0{,}999$
$k_d(\tau_0/T_0) = 10{,}0619 - 45{,}2655\cdot(\tau_0/T_0) + 81{,}2143\cdot(\tau_0/T_0)^2 - 49{,}1667\cdot(\tau_0/T_0)^3$	$R^2 = 0{,}999$

Контроль якості процесу регулювання виконано по показникам: час регулювання, перерегулювання. Ступінь досягнення мети регулювання характеризується порівнянням показників якості досліджуваної структури регулятору зі структурою ПІД- регулятору з додатковим керуючим впливом диференціатору по пропорційній складовій (так званий ПІД-П- регулятор), для якого параметри налаштування отримано раніше [9] та який в поточний час проходить промислову апробацію. Отримані данні підлягають статистичному аналізу з подальшим отриманням рівняння регресії параметрів налаштування регулятору від динамічних характеристик об'єкту.

На підставі модельного експерименту (рис. 2) експлуатації автоматичної системи з класичним ПІД-регулятором налаштованим інструментальними засобами і регуляторів з додатковим впливом диференціатора налаштованих експериментально-статистичним методом показано, що в другому випадку більш ефективна настройка при відпрацюванні збурень і встановленні параметрів процесу.

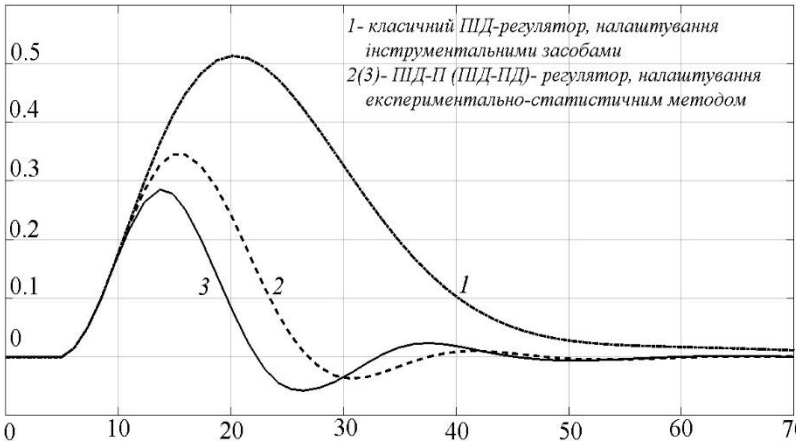


Рис. 2. Порівняльний аналіз якості регулювання

Висновки

1. В умовах значної інерційності, запізнювання та при наявності нелінійностей об'єкту, що знаходиться під дією змінних збурень покращити якість керування можливо за рахунок введення дода-ткового диференціювання по пропорційній та дифе-ренційних складових (ПІД-ПД) для ліквідації миттєвого значення помилки в перехідних режимах.

2. Налаштування регулятору запропонованої структури проведено з залученням інструменту регресійного аналізу та імітаційного моделювання при виконанні ітеративної настройки у відповідності на обмеження по якості процесу та зниження кожної майбутньої позитивної амплітуди коливань.

3. Регулятори з додатковим диференціатором дозволяють отримати біль розгорнуто інформацію по процесу управління, знизити похибку, збільшити швидкодію. Справедливість запропонованих рішень підтверджено в модельному експерименті з регулятором налаштованим інструментальними засобами.

Список літератури

1. Подгородецкий А.В. Настройка ПИД-регулятора инерционных объектов горно-металлургического комплекса/ А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка // Гірнича електромеханіка та автоматика. 2017 –Вип. 99. – С. 65 – 70.
2. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
3. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a proportal-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.
4. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2008. №1. С. 86–99.
5. Oliynyk O. Examining the Kalman filter in the field of noise and interference with the non-Gaussian distribution / O. Oliynyk, Y. Taranenko, D. Losikhin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. 4/4 (94) 2018. pp. 36-42.
6. Ротач В. Я. Алгоритмы и программы расчетов настройки ПИ и ПИД- регуляторов по переходным характеристикам системы / В. Я. Ротач, В. Ф. Кузищин, С. В. Петров // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 12–16.
7. Пат. 95197 Україна, МПК (2006.01) G05B 11/36. Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор з додатковою керуючою дією / Блонський С. Д., Петрова Н.С., Шуть О.Ф. (Україна); заявник та патентовласник держ. вищ навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т". – № а 2010 07914; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.
8. Пат. 101992 Україна, МПК (2006.01) G05B 11/36. Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор з додатковою керуючою дією / Петрова Н.С., Блонський С. Д. (Україна); заявник та патентовласник держ. вищ навч. заклад „Укр. держ. хім.-технол. ун-т". – № а 2011 06467; заявл. 23.05.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10.
9. Довгополий Я.О. Аналіз корисних структурних схем ПІД-регуляторів з додатковою керуючою дією / Я.О. Довгополий, О.В. Лещенко, С.Д. Блонський // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 3. – С. 191-194.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф Мещеряковим Л.І.

УДК 519.2(075)

В. П. Козлов, С. Д. Приходченко, кандидаты техн. наук, И. А. Гненный
(Украина, Днепр, Национальный технический университет "Днепровская политехника")

БАЙЕСОВСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Анотація. *Показано, що байєсовські методи є засобами аналізу даних, які при малих обсягах вибірки дозволяють оцінити параметри статистичної моделі більш повно і точно в порівнянні з класичними статистичними методами.*

Ключові слова: *байєсівський підхід, статистична модель, апріорні параметри, багатовимірний нормальний розподіл.*

Аннотация. *Показано, что байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить параметры статистической модели более полно и точно по сравнению с классическими статистическими методами.*

Ключевые слова: *байесовский подход, статистическая модель, априорные параметры, многомерное нормальное распределение.*

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

Keywords: *Bayesian approach, statistical model, a priori parameters, multidimensional normal distribution.*

Введение. Байесовские методы являются более прогрессивными средствами анализа данных по сравнению с традиционными статистическими подходами [1]. Рассмотрим это на примере статистической оценки доли перспективных газовых скважин в регионе от общего их количества.

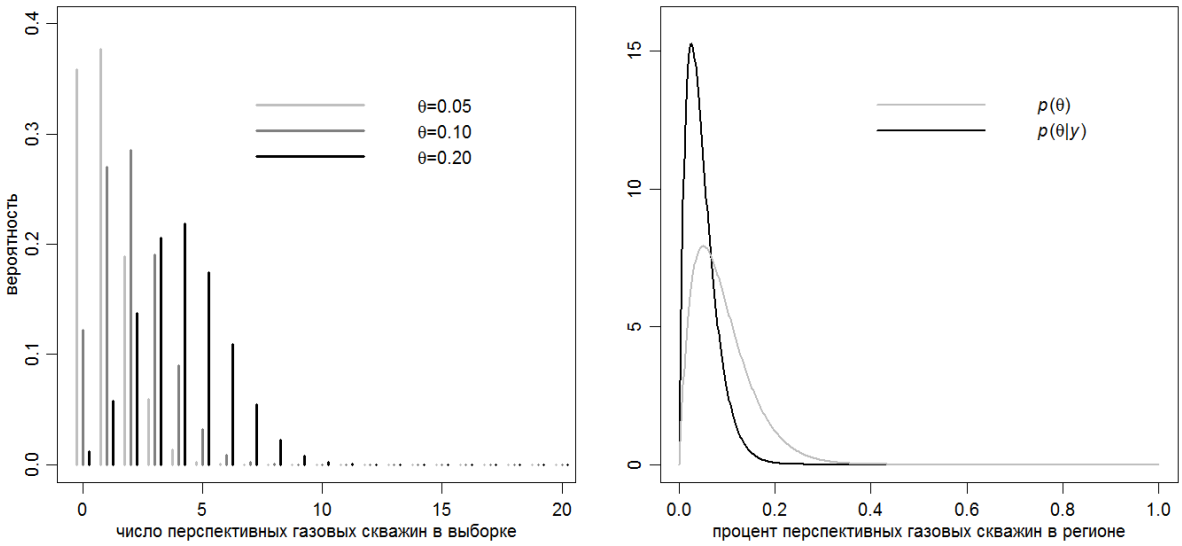
Постановка задачи. Практический интерес представляет знание количества газовых скважин в регионе, пригодных для промышленного использования (с дебитом более 1 тысячи кубометров газа в сутки), по отношению к общему их количеству. На основе байесовского подхода оценить долю перспективних газовых скважин в регионе от общего их количества. Показать, что байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить параметры статистической модели более полно и точно по сравнению с классическими статистическими методами.

Модель выборки. Пусть небольшая случайная выборка из 20 скважин в регионе будет проверяться на предмет целесообразности их разработки. Предположим, θ − процент перспективних газовых скважин от общего их количества в регионе. Очевидно, данный параметр может принимать значения от нуля до единицы; y − общее количество скважин в выборке, которые являются перспективными. Таким образом, параметр θ и рассматриваемое выборочное пространство имеют вид: $\theta = [0,1]$; $Y = \{0,1,\ldots,20\}$.

Перед получением выборки число перспективних газовых скважин в ней не известно. Пусть переменная Y обозначает величину, которая должна быть определена. Если значение θ известно, то адекватной моделью выборки для Y должно быть биномиальное распределение вероятностей

$$Y|\theta = \sim\text{binomial}(20, \theta).$$

На график рис. 1, а изображено распределение binomial(20, θ) для θ, равного 0.05, 0.10 и 0.20. Если, например, истинный уровень перспективних скважин составляет 0.05, то вероятность того, что в регионе будет нуль перспективних скважин (Y = 0) − 36%. Если истинный уровень для θ составляет 0,10 или 0.20, то вероятность того, что Y = 0 − 12% и 1% соответственно.



а б

Рис. 1. Модель выборки, априорное и апостериорное распределения вероятностей для рассматриваемого примера. Графики на рис. 1, а представляют binomial(20, θ)-распределения для трех значений θ. Графики на рис. 1, б − априорная (серая линия) и апостериорная (черная линия) плотности θ.

Априорное распределение. Пусть результаты исследований, полученных из различных регионов страны, показывают, что процент перспективних газовых скважин колеблется от 0,05 до 0,20, со средним значением 0.10. Предварительная информация свидетельствует о том, что используется априорное распределение $p(\theta)$, которое дает значительную вероятность для интервала (0.05, 0.20), и что ожидаемая величина θ в соответствии с $p(\theta)$ находится недалеко от 0,10. Однако существует бесконечное количество вероятностных распределений, удовлетворяющих этим условиям, и не известно, как различать их при ограниченном объеме априорной информации. Поэтому мы будем рассматривать априорное распределение $p(\theta)$, которое имеет характеристики, описанные выше, но чья конкретная математическая модель выбирается из соображений удобства вычислений. В частности, мы будем кодировать априорную информацию, используя одно из бета-распределений, которое имеет два параметра a и b. Если θ имеет beta(a, b) распределение, то математическое ожидание θ равно $a/(a + b)$ и наиболее вероятным значением θ будет $(a - 1)/(a - 1 + b - 1)$.

Для нашей задачи, где θ − процент перспективних газовых скважин, мы будем представлять априорную информацию о θ с помощью beta (2, 20)-распределения вероятностей. Тогда запишем

$$\theta \sim \text{beta}(2,20).$$

Это распределение изображено серой линией на рис. 1, б. Ожидаемое значение θ для этого априорного распределения составляет 0,09. Кривая априорного распределения имеет наибольшую высоту при θ = 0,05 и примерно две трети площади под кривой находятся между 0.05 и 0.20. Априорная вероятность

того, что процент перспективних газовых скважин менее 0,10, равна 64%, т. е., $E[\theta] = 0.09$; $mode[\theta] = 0.05$; $\Pr(\theta < 0.10) = 0.64$; $\Pr(0.05 < \theta < 0.20) = 0.66$.

Апостериорное распределение. Если $Y|\theta \sim \text{binomial}(n, \theta)$, $\theta \sim \text{beta}(a, b)$ и имеем числовое значение y из Y, то апостериорное распределение − это beta($a + y$, $b + n - y$)-распределение [2]. Предположим, что для нашего исследования наблюдается значение $Y = 0$, т. е. ни одна из скважин выборки не является перспективной. Тогда, апостериорное распределение в этом случае следующее: $\theta|\{Y = 0\} \sim \text{beta}(2,40)$. Плотность этого распределения − черная линия на рис. 1, б. Эта плотность − левее априорного распределения и имеет более пикообразный вид. Она находится левее $p(\theta)$, так как наблюдение того, что $Y = 0$ является свидетельством малости значения θ. Она более пикообразная по сравнению с $p(\theta)$, поскольку объединяет информацию из данных и априорного распределения и, таким образом, содержит больше информации, чем только в $p(\theta)$. Пик этой кривой наблюдается при 0,025 и апостериорное математическое ожидание − 0,048. Апостериорная вероятность того, что $\theta < 0.10$ составляет 93%, т. е. $E[\theta|Y = 0] = 0.048$; $mode[\theta|Y = 0] = 0.025$; $\Pr(\theta < 0.10|Y = 0) = 0.93$.

Апостериорное распределение $p(\theta|Y = 0)$ дает нам модель для доли перспективних газовых скважин θ. С практической точки зрения, если мы принимаем beta(2,20)-распределение в качестве разумной меры априорной информации, то мы рассматриваем beta(2,40)-распределение как разумную меру апостериорной информации.

Анализ чувствительности. Предположим, нам предстоит обсудить результаты исследования с группой специалистов газодобывающей отрасли. Обсуждение результатов нашего исследования среди неоднородной группы специалистов должно принести пользу в результате анализа апостериорных убеждений, соответствующих многообразию априорных распределений. Предположим, что мы должны были считать убеждения, представленные beta(a, b)-распределениями для значений (a, b), отличных от (2,20). Как упоминалось выше, если $\theta \sim \text{beta}(a, b)$, тогда при $Y = y$ апостериорным распределением θ будет beta($a + y$, $b + n - y$). Апостериорное матожидание

$$E[\theta|Y = y] = \frac{a+y}{a+b+n} = \frac{n}{a+b+n}\frac{y}{n} + \frac{a+b}{a+b+n}\frac{a}{a+b} = \frac{n}{w+n}\bar{y} + \frac{w}{w+n}\theta_0,$$

где $\theta_0 = a/(a + b)$ есть априорное матожидание θ, а $w = a + b$. Из этой формулы видно, что апостериорное матожидание − взвешенное среднее выборочного среднего $\bar{y}$ и априорного матожидания θ_0. В плане оценки θ, θ_0 представляет априорную оценку истинного значения θ, а w представляет нашу уверенность в этой оценке, выраженную в таких же масштабах, как размер выборки.

Если известны предварительное значение θ_0 и степень доверия w, тогда мы можем аппроксимировать их априорные представления о θ с помощью бета-распределения с параметрами $a = w\theta_0$ и $b = w(1-\theta_0)$. Их приблизительные апостериорные представления тогда сформулированы распределением beta($w\theta_0 + y$, $w(1 - \theta_0) + n - y$). Мы можем вычислить такое апостериорное распределение для широкого круга θ_0 и w значений при выполнении *анализа чувствительности* − исследовании того, как различия в априорной оценке влияют на апостериорную информацию. На рис. 2 рассмотрено влияние θ_0 и w на апостериорное распределение с помощью графиков двух апостериорных величин. Первый график дает контуры апостериорных матожиданий $E[\theta|Y=0]$, а второй − апостериорные вероятности $\Pr(\theta < 0.10|\ Y = 0)$. Расчеты выполнены в среде R.

Сравнение с небайесовскими методами. Стандартная оценка θ является средним выборки $y = y/n$ − доля перспективних газовых скважин в регионе. Для выборки, в которой $y = 0$, оценка равна нулю. Таким образом, с помощью $\bar{y}$ мы можем оценить, что количество перспективних газовых скважин в регионе при $y = 0$ составляет нуль. Если нужно сообщить об этой оценке группе специалистов, мы должны включить оговорку, что эта оценка является субъектом выборочной неопределенности. Один из способов описания выборочной неопределенности оценки − использование доверительного интервала. Популярным 95%-ным доверительным интервалом для доли генеральной совокупности θ является *интервал Вальда*, определяемый как

$$\bar{y} \pm 1.96\sqrt{\bar{y}(1-\bar{y})/n}.$$

Этот интервал имеет *правильное асимптотическое частотное покрытие.* Это означает, что, если n велико, то с вероятностью, приблизительно равной 95%, Y примет значение y такое, что указанный интервал содержит θ. К сожалению, этого нельзя полагать для небольших n. Для n около 20 вероятность того, что интервал содержит θ, составляет лишь около 80% [2]. Несмотря на это, для нашей выборки, в которой $y = 0$, доверительный интервал Вальда вырождается в нуль. Действительно, 99.99% интервал Вальда также вырождается в нуль. Существуют различные альтернативы интервалу Вальда.

Один вид доверительного интервала, который хорошо работает с небайесовскими критериями, это “скорректированный” интервал Вальда [2], который задается системой уравнений

$$\hat{\theta} \pm 1.96\sqrt{\hat{\theta}(1-\hat{\theta})/n}\,;$$

$$\hat{\theta} = \frac{n}{n+4}\bar{y} + \frac{4}{n+4}\frac{1}{2}.$$

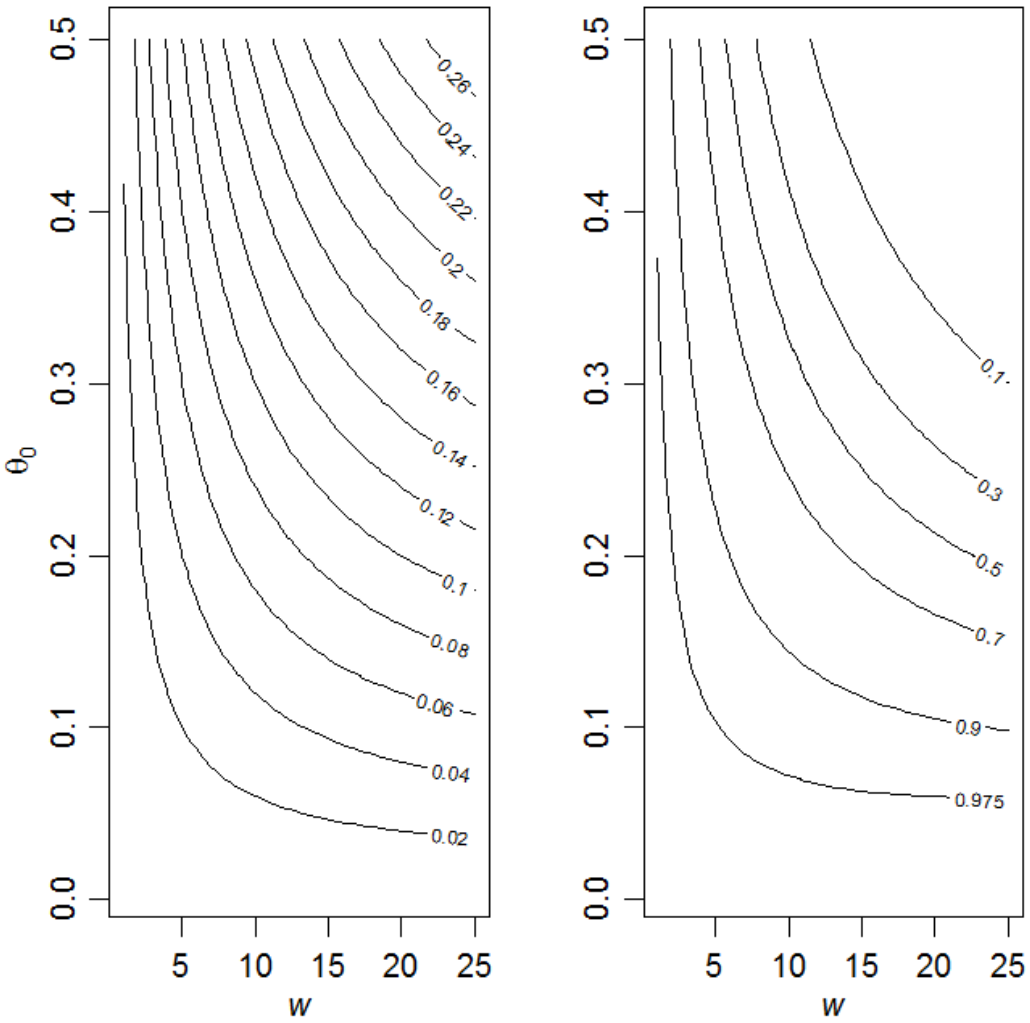


Рис. 2. Апостериорные величины для разных априорных бета-распределений. Левая и правая панели представляют контурные графики E[θ |*Y* = 0] и Pr(θ < 0 .10 | *Y* = 0) соответственно

Значение $\hat{\theta}$ здесь эквивалентно апостериорному среднему для θ при beta (2,2) априорном распределении, которое представляет собой слабую априорную информацию, сосредоточенную около θ = 1/2.

Общая оценка среднего генеральной совокупности. Имея случайную выборку из *n* наблюдений, стандартной оценкой среднего генеральной совокупности θ является выборочное среднее $\bar{y}$. В то время как $\bar{y}$ является в целом надежной оценкой для больших выборок, как мы видели в примере она может быть статистически недостоверной при небольших *n*. В этом случае она служит скорее обобщением выборочных данных, чем как точная оценка θ. Если нас интересует больше получение оценки θ, чем обобщение выборочных данных, мы можем записать

$$\hat{\theta} = \frac{n}{n+w}\bar{y} + \frac{w}{n+w}\theta_0,$$

где θ_0 представляет собой “наилучшее предположение” истинного значение θ, а *w* представляет собой степень уверенности в этом предположении. Если объем выборки большой, то $\bar{y}$ − достоверная оценка θ.

Оценка $\hat{\theta}$ приближается к единице и нулю, соответственно, с возрастанием n. В результате, статистические свойства $\bar{y}$ и $\hat{\theta}$ совершенно одинаковы для больших n. Однако при небольших n изменчивость $\bar{y}$ может быть больше, чем неопределенность θ_0. Эти свойства $\hat{\theta}$ как для больших, так и малых n, свидетельствуют о том, что данная оценка θ является полезной для широкого диапазона значений n. Можно подтвердить это, показав, что при определенных условиях $\hat{\theta}$ превосходит $\bar{y}$ в качестве оценки θ для всех значений n [2]. Как мы увидели, величина $\hat{\theta}$ является байесовской оценкой, использующей определенный класс априорных распределений.

Даже если конкретное априорное распределение $p(\theta)$ не точно отражает нашу априорную информацию, соответствующее апостериорное распределение $p(\theta|y)$ может быть полезным средством обеспечения надежного вывода и оценки для ситуаций, в которых размер выборки является малым.

Выводы. Таким образом, байесовские методы являются средствами анализа данных, которые при малых объемах выборки позволяют оценить параметры статистической модели более полно и точно по сравнению с классическими статистическими методами.

Список литературы

1. Press S. J. Subjective and Objective Bayesian Statistics: Principles, Models, and Applications / S. J. Press. – Second Edition. – New York: John Wiley @ Sons, 2003. – 591 p.
2. Agresti A, Coull BA. Approximate is better than “exact” for interval estimation of binomial proportions / Agresti A, Coull BA // Amer Statist. – New York, 1998. – Vol. 52(2). – P. 119–126.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Морозом Б.І.

УДК 378.147

С.С. Худолій, канд. техн. наук
(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ДИДАКТИЧНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З МЕХАТРОНІКИ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

Анотація. *Стаття присвячена аналізу можливостей сучасного дидактичного устаткування для підготовки фахівців з мехатроніки та робототехніки. Розглянуті базові компоненти дидактичних систем на прикладі продукції компанії Festo Didactic (ФРН).*
Ключові слова*: Мехатроніка, Робототехніка, Дидактичні системи, Індустрія 4.0.*

Аннотация. Статья посвящена анализу возможностей современного дидактического оборудования в процессе подготовки специалистов по мехатронике и робототехнике. Рассмотрены базовые компоненты дидактических систем на примере продукции компании Festo Didactic (ФРГ).
Ключевые слова*: Мехатроника, Робототехника, Дидактические системы, Индустрия 4.0.*

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the capabilities of modern didactic equipment in the process of training specialists in mechatronics and robotics. The basic components of didactic systems are considered on the example of products of the company Festo Didactic (Germany).*
Keywords: *Mechatronics, Robotics, Didactic systems, Industry 4.0.*

Вступ.

Інженерна освіта є одним з головних рушіїв для економічного розвитку країни. Наразі, все більше інвестицій зосереджено на новому технологічному устаткуванні промисловості, але поряд з цим інвестицій в підготовку нового наукового покоління дуже замало. Конкурентна спроможність компаній можлива лише при умові комплексного підходу до інвестицій у модернізацію виробництва та й у підготовку науково-технічних спеціалістів. Сучасне виробництво має відповідати всім вимогам нового технічного напряму розвитку ІНДУСТРІЯ 4.0 і це вже наявний факт.

Особливо слід звернути увагу на нові напрямки технологічного розвитку: мехатроніка та робототехніка, як ключові особливості сучасного виробництва.

Мехатро́ніка (англ. mechatronics) – галузь науки і техніки, заснована на синергетичному об’єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними і комп’ютерними компонентами, що забезпечують проектування і виробництво якісно нових модулів, систем і машин з інтелектуальним управлінням їх функціональними рухами. Мехатроніка є своєрідною сучасною філософією проектування складних керованих технічних об’єктів [1].

Напрям з давньою історією, мехатроніка, виступає як специфічна сфера знань, як окремий функціональний підрозділ, з конкретною метою - забезпечення нової функціональності. Це можливо досягти лише в тісному контакті з робототехнікою, яка орієнтована на створення роботів і робототехнічних систем, призначених для автоматизації складних технологічних процесів і операцій, у тому числі таких, що виконуються в недетермінованих умовах, для заміни людини під час виконання важких, утомливих і небезпечних робіт [2].

Мехатронні системи набувають важливого значення, формують ключові технології майбутнього. Тому, важливо забезпечити гідну освіту майбутніх інженерів з мехатроніки. Промисловість вже зацікавлена та потребує високоосвічених фахівців, щоб виживати в умовах жорсткої конкуренції та стрімкого розвитку технологій.

Основна частина.

Сучасний інженер повинен готуватися в мультидисциплінарному середовищі, а в подальшому працювати в міждисциплінарних командах з урахуванням специфіки конкретного виробництва. Класична схема підготовки інженера передбачає теоретичну та практичну підготовку згідно з обраною спеціалізацією, у випадку підготовки з мехатроніки такий підхід малоефективний. Недостатньо лише надати знання з механіки, електроніки, електромеханіки чи автоматизації, необхідно забезпечити розуміння взаємозв'язків між цими дисциплінами та їх взаємну інтегрованість. Тому, лабораторне (дидактичне) устаткування повинне забезпечувати одночасне моделювання, тестування та візуалізацію всієї технологічної системи з мехатронними та роботизованими механізмами. Як приклад, розглянемо можливості продукції компанії Festo Didactic (ФРН) одного з світових лідерів дидактичних систем.

Festo Didactic пропонує широкий спектр навчальних систем - від малих настільних систем до повноцінних навчальних заводів - які підтримують розвиток навичок та набуття знань у всіх аспектах мехатроніки та автоматизації. Навчальні комплекти побудовані за модульним принципом: пневматика, гідравліка, електромеханіка, автоматизація.

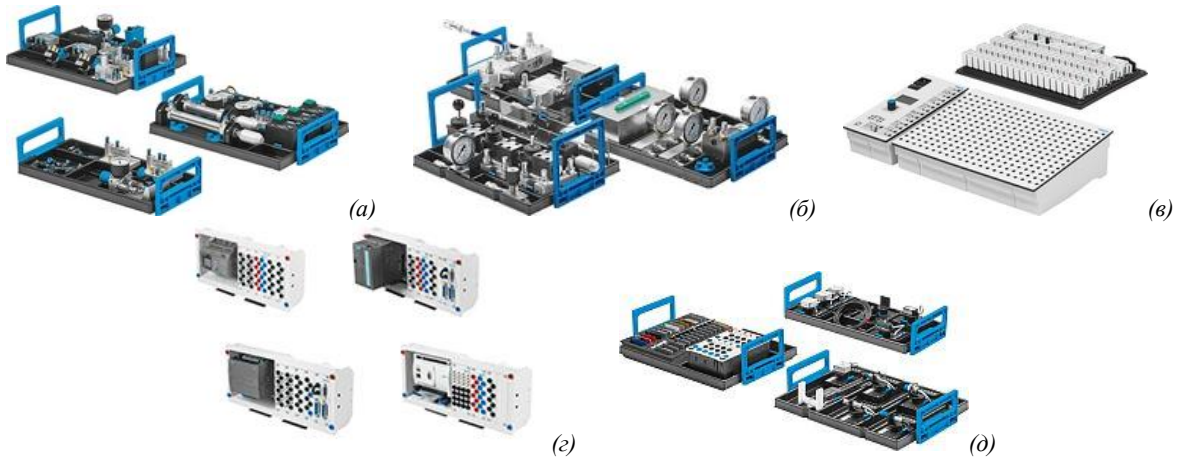
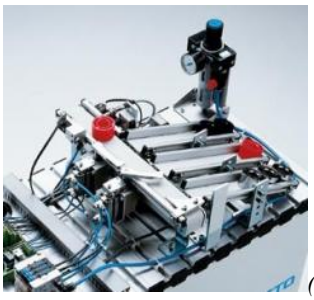


Рис. 1. Базові навчальні набори: пневматика (а), гідравліка (б), електротехніка (в), автоматизація (г), датчики (д)

Під час роботи з кожним учбовим набором вивчається конструкція елементів, принцип дії, правила підключення та функціональні особливості елементів. За допомогою системи швидкого підключення енергетичних потоків можливо швидко провести практичне моделювання будь-якої схеми. Універсальність навчальних наборів дозволяє поєднувати елементи з різних наборів. Таким чином можливо вивчати електропневматичні схеми або ж системи електро-гідроавтоматики. Для цього достатньо мати відповідні з'єднувальні провідники та кабелі. Елементи учбових наборів представлені з використанням реальних продуктів Festo. Мають цифровий ідентифікатор, тому можливо легко знайти технічну документацію на обраний тип. Підключення каналів керування та контролю реалізовано за допомогою швидкоз'ємних конекторів. Безпека від уражень електричним струмом забезпечується за рахунок вдалої конструкції та посиленої ізоляції відповідних з'єднувальних частин. Елементи навчальних наборів розміщуються та закріплюються на профільних плитах за допомогою системи кріплення Quick-Fix. Подача стислого повітря здійснюється за допомогою гнучких полімерних патрубків з штуцерами Quick Star (QS) [3].

Від базових навчальних модулів та наборів дидактичного обладнання перейдемо до більш складних автоматизованих систем. Виробнича лінія на підприємстві, як правило, складається з багатьох окремих виконавчих модулів. Кожен з цих модулів виконує свою функцію – транспортування, розподілення, пе-

ревірка, обробка, складання, сортування, складування. Для навчання роботи з такими лініями розроблені комплектні дидактичні системи MPS® рис. 2.

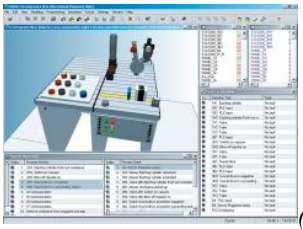

(а)


(б)

Рис. 2. Модульні дидактичні системи на базі MPS®:
окрема станція сортування (а), комбінована технологічна лінія (б)

На сьогодні розроблені наступні типи станцій: станція розподілення та транспортування; станція перевантаження (Pick&Place); станція з роботом; станція розподілення; станція перевірки; станція обробки; станція переміщення матеріалів - пневматична; станція переміщення матеріалів - електрична; станція пневматичного пресу; станція пробивання отворів; станція розділення; станція складування; станція сортування. Всі окремі станції можливо комбінувати одну з одною, утворюючі цілісні системи. За рахунок цього можливо досягнути різні навчальні цілі. При цьому об'єднанні системи можливо підключити в одну сітку керування або ж забезпечити автономну роботу за допомогою зовнішнього програмованого логічного контролера (ПЛК). Завдяки універсальності дидактичних систем можливо використовувати ПЛК будь-якого виробника, це дозволяє вивчати мови програмування популярних контролерів і не тільки. Всі станції MPS® змонтовані на окремих візках, повністю автономні забезпечені джерелом живлення та мають модулі підключення до пневмосистеми [4].

Станції MPS® надають широкі можливості в освітньому процесі, але вони можуть бути фізично недоступні в закладах освіти. Саме тому ці станціє є у віртуальному світі у вигляді 3Д моделей рис.3.


(а)

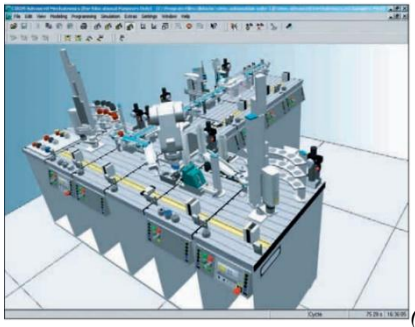

(б)

Рис. 3. Віртуальні моделі станцій MPS®: режим розробки (а), режим моделювання роботи (б)

Розробка віртуальних моделей здійснюється за допомогою спеціалізованої програмної системи трьохвимірного моделювання CIROS®. Дана система моделювання дозволяє розробляти 3Д-моделі об'єктів, забезпечувати налагодження окремих вузлів та механізмів, створювати цифрові аналоги фабрик та заводів, моделювати технологічний процес всього виробництва в режимі реального часу. Поведінка віртуальних станцій в системі CIROS® повністю відповідає поведінці реальних станцій, тому дуже легко проводити процедуру налагодження та пошуку несправностей. Також, від віртуального тренування помилки є найбільш безпечнішими чим під час невдалого налагодження реальної системи. Перевагами віртуального моделювання є й ще той факт - не потрібен фізичний ПЛК, в бібліотеках CIROS® вже є база сучасних серійних моделей. Тому під час проектування та розробки програмного коду для технологічного процесу вже не потрібно мати реальний ПЛК.

Висновки

1. Мехатроніка та робототехніка є базовими технічними напрямками освітнього процесу підготовки спеціалістів сучасного виробництва в новому технологічному розвитку Індустрії 4.0. Саме міждисциплінарність та комплексність цих напрямків підготовки відповідають вимогам розвитку сучасних технологій.

2. Базові навчальні лабораторії потребують оновлення, на сьогодні є достатня кількість виробників дидактичного обладнання, серед яких лідируючі позиції займає компанія Festo Didactic. Саме завдяки комплексності підходу та орієнтації на реальне виробництво продукція компанії є популярною.

3. Дидактичні набори та станції є максимально реальними та безпечними, навички роботи з лабораторним устаткуванням легко трансформуються до реальних об'єктів на виробництві.

4. Віртуальні моделі та засоби моделювання відкривають можливості до навчання широкому колу споживачів знань. Досвід роботи у віртуальному середовищі цілком відповідає роботі з реальними об'єктами завдяки структурній та візуальній ідентичності.

Список використаних джерел

1. Вільна Енциклопедія (Wikipedia: The Free Encyclopedia) Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Мехатроніка (дата звернення 10.06.2019) – Назва з екрана.
2. Вільна Енциклопедія (Wikipedia: The Free Encyclopedia) Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Робототехніка (дата звернення 10.06.2019) – Назва з екрана.
3. Учебные системы 2012 Актуальные предложения Festo Didactic/ Festo Didactic GmbH & Co. KG– 2011. – 412.
4. Веб-портал www.festo-didactic.com Режим доступу: www.festo-didactic.com/ua-ua/ (дата звернення 10.06.2019) – Назва з екрана.

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

УДК 625.622:689.21

A.G. Monia, PhD, associate professor
(Ukraine, Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukraine)

FINDING AND ANALYZING THE ROLLING CHARACTERISTICS OF THE WHEEL ON THE RAIL IN THE PRESENCE OF A VISCOUS INCOMPRESSIBLE INTERMEDIATE MEDIUM

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

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

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

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

Abstract. *Article purpose – the development, solution and analysis of a mathematical model of the movement of a wheel along a rail in the presence of an intermediate medium in the contact zone. To determine the wheel rolling characteristics along the rail in the presence of an intermediate medium in the acceleration and deceleration modes, the equations of motion of a viscous incompressible fluid are solved. The satisfaction of the boundary conditions was carried out by the method of weighted residuals in the form of pointwise collocation. Based on the calculations and analysis carried out, it was found that in the presence of an intermediate medium in acceleration and deceleration modes, the relative slip affects the coefficient of adhesion of wheels to rails in different ways. The calculation results are in good agreement with the experimental data.*

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

Steel wheels have relatively stable friction properties and are widely used in rail vehicles and in lifting and transport equipment. The kinematic and dynamic properties of a wheel-rail friction pair are determined by their geometrical parameters, external loads and the presence of an intermediate medium. The rail track in the mines is covered with a significant contaminating fine-dispersed layer, which is a mixture of rock, wear particles of brake pads and wheels in the soil waters. When braking a locomotive, a liquid or multi-dispersed medium located on rails significantly affects the coefficient of adhesion of the wheel to the rail and the rolling resistance force. Currently, the process of interaction of the wheel with the rail in the presence of an intermediate medium has not been studied enough.

In work [1] changes in pressure in the zone of contact between the wheel and the rail were established for various characteristics of the intermediate medium. It is shown that when the load on the wheel of a locomotive moving along a track covered with an intermediate medium changes, the carrying capacity of a viscoplastic medium can reduce the coefficient of adhesion to the magnitude of the internal friction of the medium. In this case, the wheel will be in hydroplaning mode. In work [2] on the basis of the equations of the hydrodynamic theory of

greasing interaction of a brake shoe wheel-block brakes with a wheel in the presence of the intermediate environment in the form of dispersion of products of wear of lubricants and inorganic pollution in contact zones a block - a wheel and a wheel - a rail is considered.

Article purpose - development, solution and analysis of a mathematical model of the movement of the wheel along the rail in the presence of an intermediate medium in the contact zone.

These studies are a continuation of [3, 4]. Here, in addition to previous studies, the process of wheel acceleration in the presence of an intermediate medium was considered and a comparative analysis of the friction characteristics in acceleration and deceleration modes was performed. To improve the quality of modeling and refine the results, the number of collocation points was increased to 15, which led to a larger number of equations in the system.

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

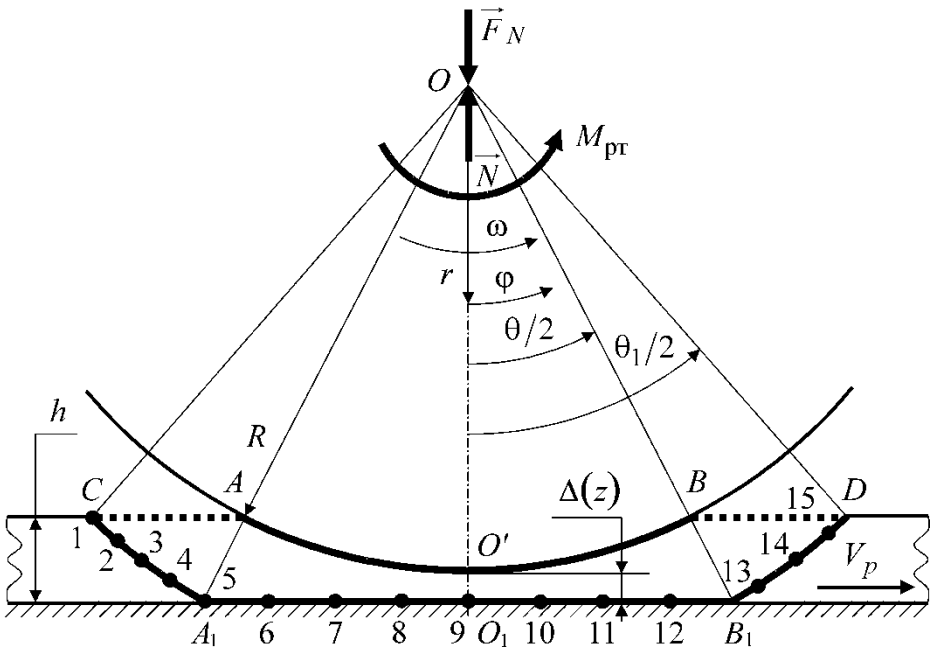


Fig. 1. The rated scheme of the movement of a wheel in the presence of the intermediate environment

In fig. 1 the following designations are accepted: R – radius of a circle of driving of a wheel; ω – angular speed of a wheel; $\vec{F}_N$ – normal force; $\vec{N} = \vec{F}_n + \vec{F}_p$; $\vec{F}_n$ - lifting force of the intermediate environment; $\vec{F}_p$ - reaction of a rail; r – current radius; φ – current angular coordinate; h – thickness of a layer of the intermediate environment; $\Delta(z)$ – the gap between a wheel and a rail in the plane $z = const$ (the axis of *Oz* is directed perpendicularly to the drawing plane in such a way that if to look from its end, then positive values of angular movements φ are represented occurring against the course of an hour hand) filled with the intermediate environment; V_p – the speed of a rail of rather geometrical center of a wheel equal on absolute value of speed of the locomotive; 1,2,3,…, 15 – collocation points; θ, θ_1 – the corners defined geometrically

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

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

Neglecting "end effects" and believing that the wheel and a rail have infinite length in the direction of a wheel pivot, we will consider that the movement of the intermediate environment in a gap between a wheel and a rail is flat. Thus, the task is reduced to consideration of the movement of viscous incompressible liquid between

the wheel rotating with angular speed ω which geometrical center is not mobile and is a pole O of polar system of coordinates, and the rail moving progressively concerning a pole O in the direction of rotation of a wheel with a speed V_p. Rail speed in the mode of dispersal is less than circumferential speed of a wheel, and in the braking mode - exceeds it. Thus, between working surfaces of a wheel and a rail slipping takes place.

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

$$\frac{\partial V_r}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_r}{\partial r}+\frac{V_\varphi}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \varphi}-\frac{V_\varphi^2}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}+\nu\left(\nabla^2 V_r-\frac{V_r}{r^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}\right);$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_\varphi}{\partial r}+\frac{V_\varphi}{r}\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}+\frac{V_r V_\varphi}{r}=-\frac{1}{\rho}\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \varphi}+\nu\left(\nabla^2 V_\varphi+\frac{2}{r^2}\frac{\partial V_r}{\partial \varphi}-\frac{V_\varphi}{r^2}\right);$$

$$\frac{\partial\left(rV_r\right)}{\partial r}+\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}=0;\qquad \nabla^2\equiv\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2},$$

where V_r – a velocity vector projection in the direction of the current radius; V_φ – a velocity vector projection in the direction of the current angular coordinate; t – time; ρ – liquid density; p – pressure; ν – kinematic coefficient of viscosity.

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

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

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

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

$$V_\varphi >> V_r;\quad \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2}>>\frac{1}{r}\frac{\partial V_\varphi}{\partial r},\ \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2},\ \frac{1}{r^2}\frac{\partial V_r}{\partial \varphi},\ \frac{V_\varphi}{r^2};$$

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2}>>\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial r},\ \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2},\ \frac{1}{r^2}\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi},\ \frac{V_r}{r^2};\quad \frac{\partial V_r}{\partial r}>>\frac{V_r}{r};\quad \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2}<<\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2}.$$

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

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

It allows to accept further

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$V_\varphi = V_p\, cos\,\varphi, \quad V_r = V_p\, sin\,\varphi; \tag{5}$$

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

$$V_\varphi = V_p\, cos\,\varphi, \quad V_r = V_p\, sin\,\varphi, \quad p = 0. \tag{6}$$

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

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

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

We will also define unknown coefficients a_i and b_i so that the chosen approximation of the decision met boundary conditions (5), (6). For satisfaction of functions V_φ and V_r to boundary conditions (5) and (6), and also function p to a boundary condition (6) we will use method of the weighed discrepancies in the form of a

pointwise collocation [6]. We will choose points of a collocation on the CA_1B_1D line asymmetrically rather direct $\varphi = 0$.

From system of the equations (7) we have

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

where $K_{ji} = cos\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $M_{ji} = sin\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $L_j = \frac{V_p\left(cos\,\varphi_j - S - 1\right)}{a\zeta_j - \zeta_j^2}$ – for the first equation of system (7); $K_{ji} = -i\,sin\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $M_{ji} = i\,cos\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $L_j = \frac{R\theta_1\left(V_p\,sin\,\varphi_j - f\left(\varphi_j\right)\right)}{2\pi\left(\frac{\zeta_j^3}{3} - \frac{a\zeta_j^2}{2}\right)}$ – for the second equation of system (7); $K_{ji} = \frac{1}{i}sin\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $M_{ji} = -\frac{1}{i}cos\frac{2i\varphi_j\pi}{\theta_1}$, $L_j = 0$ – for the third equation of system (7); $\zeta_j = \frac{R + \Delta(z)}{cos\,\varphi_j} - R$ on the line A_1B_1; $\zeta_j = \frac{R + \Delta(z)}{cos\,(\theta/2)} - R$ on lines CA_1 и B_1D; $j = 1, 2, 3, ..., m$ (m – total quantity of the equations of system (8)).

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

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

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

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

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

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

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

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

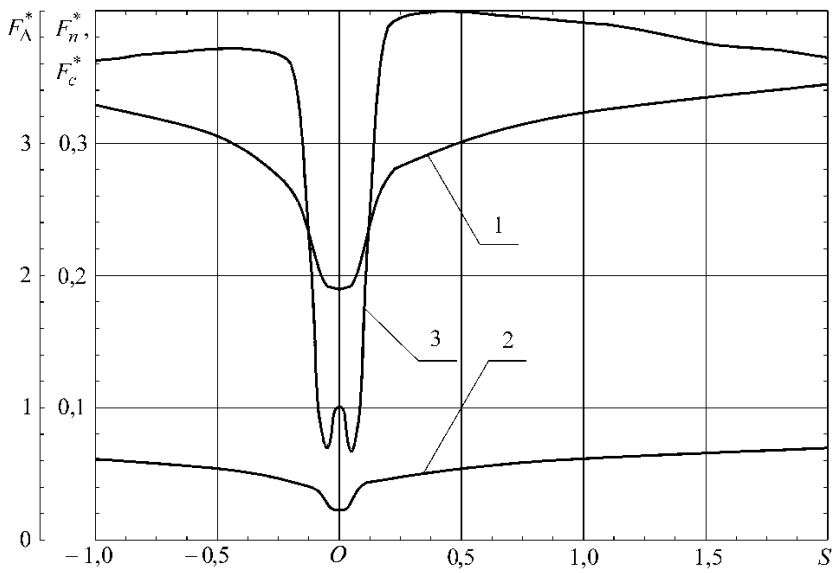


Fig. 2. Dependences of relative carrying power and relative force of viscous resistance on relative sliding: 1 – relative carrying power F_n^* ; 2 – relative force of viscous resistance F_c^* ; 3 – relation of increase in relative carrying power to increase in relative force of viscous resistance F_Δ^*

Conclusions

1. On the basis of the carried-out calculations and the analysis it is established that in the presence of the intermediate environment in the modes of dispersal and braking relative sliding differently influences coefficient of coupling of wheels with rails;

2. For stabilization of coefficient of coupling ψ during dispersal and braking in the presence between a wheel and a rail of the intermediate environment it is necessary to limit absolute value of relative sliding of 8,5%.

References

1. Сердюк, А.А. Качение колеса по рельсу с разделяющей их промежуточной средой / А.А. Сердюк // Науковий вісник НГА України. – 1999. – №2. – С.77-79.
2. Таран, И.А. Влияние промежуточной среды на взаимодействие тормозной колодки и колеса / И.А. Таран // Металлургическая и горнорудная промышленность (специальный выпуск). – 1997. – № 1-2. – С. 33-35.
3. Monia A.G. Analytical definition of the wheel rolling characteristics on the rail in the presence of the intermediate medium / Monia A.G. // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Дніпро, 2016. – Вип. 96. – С. 53-59.
4. Моня, А.Г. Математическая модель качения колеса по рельсу при наличии разделяющей их промежуточной среды / А.Г. Моня, И.А. Таран // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2006. – №24. – С. 97-105.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
6. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

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

УДК: 621.3.078.4: 621.512

А.В. Бобров канд.техн.наук
(*Украина, Днепр, Колледж ракетно-космического машиностроения Днепровского национального университета имени Олеся Гончара)*
А. А. Колб, Д.В. Ципленков канд-ти техн. наук
(Украина, Днепр, Национальный технический университет "Днепровская политехника")
А.Ю. Жеребцов,
(Украина, Днепр, ТОВ "Акта-сервіс")
В.Б. Сприса, П.В. Руснак
(Національний університет «Львівська політехніка)
Є.С. Шкаран, І.В. Назаренко
(Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ «ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ – ПРИВОД – КОМПРЕССОР – ПНЕВМОСЕТЬ» РАЗЛИЧНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Анотація. *В роботі проведено порівняльний аналіз результатів моделювання математичної моделі, що дозволяє визначати оптимальний режим роботи системи виробництва і розподілу стислого повітря, що складається з наступних елементів "електрична мережа - привід - компресор - пневмомережа". Проведений аналіз показав, що пропонований варіант регулювання з «плаваючим» верхнім рівнем тиску, для систем різної продуктивності, забезпечує скорочення витрат електричної енергії, що споживаються розглянутими електромеханічними системами. Економія може досягати 13,5% в залежності від значень витрати стислого повітря, споживаного пневмоприймачів, продуктивності компресора і параметрів електромеханічної системи.*
Ключові слова: *електропривод, регулювання, компресор, електромеханічна система.*

Аннотация. *В работе проведен сравнительный 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, для систем различной производительности, обеспечивает сокращение расхода электрической энергии, потребляемыми рассматриваемыми электромеханическими системами. Экономия может достигать 13,5 % в зависимости от значений расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, производительности компрессора и параметров электромеханической системы.*
Ключевые слова: *электропривод, регулирование, компрессор, электромеханическая система.*

Abstract. *A comparative analysis of the simulation results of a mathematical model, which allows to determine the optimal mode of operation of the compressed air production and distribution system, consisting of the following elements "electric network - drive - compressor - pneumatic network", is carried out. The analysis showed that the proposed control option with a "floating" upper pressure level, for systems of various capacities, provides a reduction in the electrical energy consumption consumed by the electromechanical systems under consideration. Savings can reach 13.5% depending on the values of compressed air consumption consumed by pneumatic receivers, compressor performance and parameters of an electromechanical system.*
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 (Pmin ÷ Pmax).

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 номинальным рядом производительностей воздушных поршневых компрессоров с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором – 2,5; 5; 10; 11; 12; 20; 24; 27, м^3/мин. В процессе работы были отобраны такие электромеханические системы, параметры которых аналогичны параметрам базовой модели с учетом номинальной производительности компрессоров.

Постановка задачи. По методике, описанной в [4] проведены испытания для определения реальной производительности компрессоров и потерь сжатого воздуха в пневмосистеме. Параметры рассмотренных комплексов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 Параметры электромеханических систем.

№	Производительность, м^3/мин	Мощность привода, кВт	Удельное сопротивление, Ом/м	Объем рессивера и пневмосети, м^3	Расчетные коэффициенты производительности	Расчетные коэффициенты потерь сжатого воздуха
1	2,5	18,5	0,0055	1,0375	-8,895	-91,662
					11,517	91,559
				2,625	70,484	362,864
2	5	40	0,0033	2,075	-31,072	191,512
					36,333	-191,617
				5,25	112,513	-391,009
3	10	75	0,00095	4,15	204,785	-437,075
					-194,31	437,056
				10,5	-312,504	432,365
4	11	75	0,00095	4,565	-54,439	-126,398
					65,972	126,187
				11,55	91,185	111,071
5	12	75	0,00095	4,98	-63,993	-214,163
					76,58	213,955
				12,6	98,437	175,222
6	20	200	0,00035	8,3	212,745	315,714
					-190,778	-315,714
				21	-153,934	-162,804
7	24	160	0,000276	9,96	-55,921	-178,215
					81,565	178,893
				25,2	58,305	69,498
8	27	200	0,000276	11,205	16,462	283,046
					11,688	-282,829
				28,35	7,444	-109,997

Исходя из необходимости сравнительного анализа результатов, исходный параметр – расход сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, для всех комплексов задавался в относительных величинах, приведенных к номинальной производительности воздушных компрессоров. Необходимость заранее задаваться определенными дискретными значениями расхода сжатого воздуха возникает потому, что $Q_{потр}$ является независимым параметром, поскольку он определяется режимами работы пневмоприемников и не контролируется системой управления поршневой компрессорной установки. Наибольший расход сжатого воздуха для всех электромеханических систем ограничен значением 55% - наименьшим максимальным расходом сжатого воздуха рассматриваемых комплексов.

При моделировании параметров их режима работы последовательно задавались фиксированные значения расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками при длительности работы один час. Результаты моделирования представлены на рис.1.

Решение задачи. Следует отметить, что при иных значениях рассматриваемых параметров результаты моделирования могут отличаться от представленных. Однако в общем виде зависимость между расходом сжатого воздуха $Q_{потр}$, и экономией электрической энергии будет аналогична. Рассчитаны три варианта потребления электрической энергии: при классическом двухпозиционном регулировании производительности воздушного поршневого компрессора, при двухпозиционном регулировании производительности с оптимальным верхним уровнем давления без ограничений по количеству пусков и двухпозиционном регулировании производительности с оптимальным верхним уровнем давления с ограничением по количеству пусков в час приводного асинхронного двигателя. При сравнении первого и второго вариантов регулирования видно, что экономия электрической энергии, потребляемой рассматриваемыми комплексами, существует при всех задаваемых значениях расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, и может достигать 13,5 %.

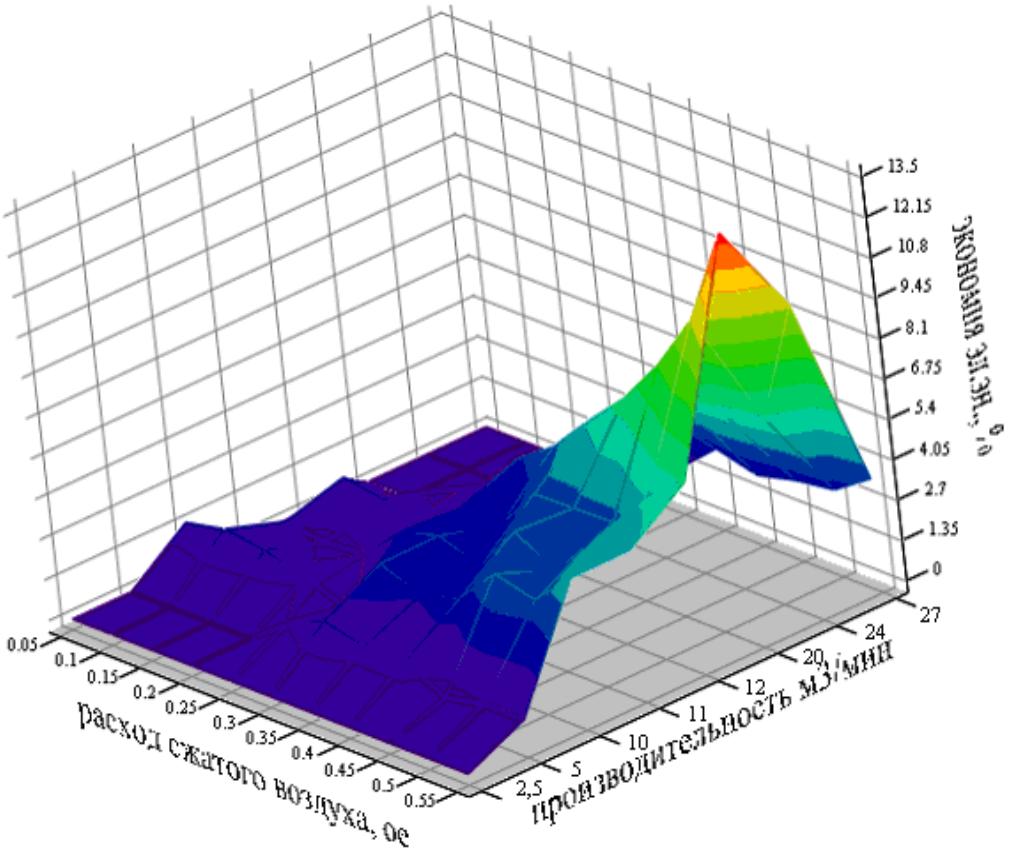


Рис. 1 График экономии электрической энергии в зависимости от расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, для компрессоров различной производительности

Выводы. Однако при рассмотрении первого и третьего вариантов экономия будет не так значительна, особенно при малых расходах сжатого воздуха. Это объясняется влиянием ограничения по количе-

ству пусков в час асинхронного привода. Поэтому предлагаемая система управления электропотреблением (третий вариант) наиболее эффективна при больших расходах сжатого воздуха. Учет результатов моделирования при отсутствии ограничения по количеству пусков в управлении электропотреблением воздушных поршневых компрессоров с асинхронным приводом с короткозамкнутым ротором на стадии проектирования подобных комплексов позволит увеличить паспортное количество числа пусков в час, и тем самым существенно повысить потенциальную экономию электрической энергии.

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

УДК 622.673.1[043.5]

В.І. Самуся, д-р техн. наук, І.С. Ільїна, канд. техн. наук, Д.Л. Колосов, д-р техн. наук, Ю.О. Коміссаров
(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЪЕМНЫХ СОСУДОВ С АРМИРОВКОЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Анотація. *Метою роботи є розробка методики та порядку проведення динамічних випробувань в системі «підйомна посудина - армування» при запобіжному гальмуванні шахтних підйомних установок. У статті викладена методика та окремі результати експериментальних досліджень взаємодії шахтних підйомних посудин в режимі гальмування з провідниками жорсткого армування вертикальних стволів у промислових умовах.*

Ключові слова: *шахтна підйомна установка, безпека шахтного підйому, армування шахтного стовбура, система «посудина – армування», шахтні провідники.*

Аннотация. *Целью работы является разработка методики и порядка проведения динамических испытаний в системах «подъемный сосуд - армировка" при аварийном торможении шахтных подъемных установок. В статье представлена методика и отдельные результаты експериментальных исследований взаимодействия шахтных подъемных сосудов в режиме торможения с проводниками жосткой армировки вертикальных стволов в промышленных условиях.*

Ключевые слова*: шахтная подъемная установка, безопасность шахтного подъема, армировка шахтного ствола, система «сосуд - армировка», шахтные проводники.*

Abstract. *The purpose of the article is the development of the methodology and the application of the dynamic tests in the systems "lifting vessel - reinforcement" in case of emergency braking of mine lifting installations. The methodology and some specific findings of experimental researches of interaction of mine lifting vessels in a mode of braking with conductors of rigid reinforcement of vertical wells in industrial conditions are presented in the article.*

Keywords*: mine winding (hoisting) plants, safety of mining hoist, mine shaft reinforcement, system «vessel – reinforcement», mine guides.*

Динамический процесс взаимодействия сосудов с проводниками при торможении имеет многочастотный характер и является суперпозицией пространственных колебаний сосуда как твердого тела по шести степеням свободы (поступательные движения вдоль трех главных центральных осей инерции и повороты вокруг этих трех осей). Кроме того, спектр колебаний сосуда вдоль вертикальной оси содержат в себе ряд высших гармоник, вызванных влиянием распределенной массы канатов (головных и уравновешивающих). Наибольший по энергетике вклад в движение сосуда имеют первые 3-5 гармоник. Анализ данных исследований, проведенных ранее в представительных условиях действующих подъемов на рабочих режимах движения сосудов, показал, что основную энергетическую нагрузку несут на себе колебания подъемных сосудов с частотой 5-7 Гц [1].

При анализе контактных усилий, действующих на проводники со стороны предохранительных башмаков было определено, что их длительность лежит в пределах 0.1-0.3 сек [2]. Следовательно, для надежной регистрации сигналов динамических датчиков целесообразно определять частоту среза измерительной аппаратуры в 30-60 Гц, (для варианта измерения ускорений, так как собственные изгибные колебания корпуса сосуда, которые так же присутствуют в спектре колебаний измерительных датчиков ускорений направляющих и являются помехой на фоне исследуемых сигналов, имеют гораздо более высокие значения) или 100-200 Гц (для варианта измерения контактных усилий),

Исходные требования к аппаратуре для измерения динамических параметров подъемных сосудов в режиме торможения.

Амплитудные значения динамических параметров для подавляющего большинства подъемных отделений отечественных шахтных стволов лежат в следующих диапазонах: линейных *горизонтальных* ускорений направляющих (0-10 м/с^2); линейных *вертикальных* ускорений направляющих (0-5, м/с^2); контактных усилий (0-90 кН).

Следовательно, измерительный диапазон аппаратуры для измерения ускорений должен быть не менее ±10 м/с^2, а контактных усилий 0-100 кН. Характеристики погрешности аппаратуры по амплитуде измерительных величин должны быть не более: для ускорений $\delta \le \pm 10 - 15\%$; для усилий $\Delta \le \pm 300 - 600$ кН; для датчика скорости подъемной машины $\delta \le \pm 10 - 15\%$; для таймера аппаратуры $\Delta \le \pm 0.05$ сек. Все блоки аппаратуры должны быть аттестованы и своевременно метрологически поверены.

Размещение датчиков на подъемной установке

Во время проведения динамических измерений первый (подземный) измерительный комплекс устанавливается на подъемном сосуде. При максимальной схеме измерений динамические датчики горизонтальных ускорений (D1, D2, D3, D4, D5, D6) закрепляются с помощью навесных узлов крепления на направляющих подъемного сосуда и ориентируются измерительными осями вдоль боковой и лобовой плоскостей проводников на верхнем и нижнем поясах сосуда, а акселерометр D7 закрепляется на корпусе сосуда измерительной осью вдоль вертикальной оси сосуда (рис. 1). Так же в ряде случаев допускается применение укороченной схемы измерений без использования датчиков нижнего пояса D4, D5 и D6

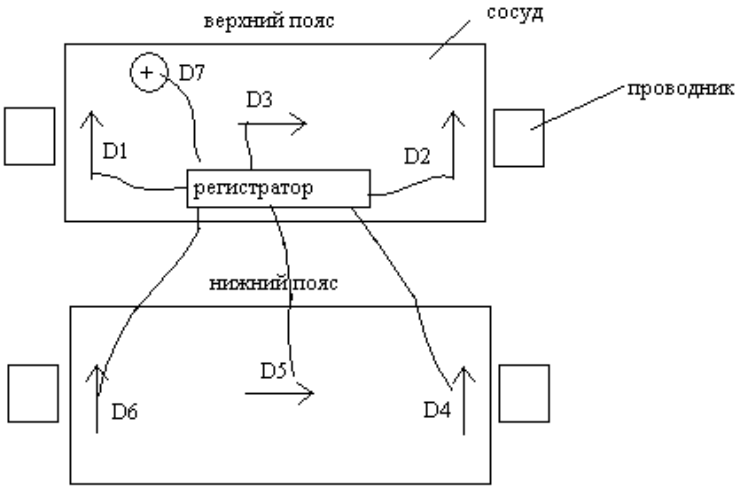


Рис. 1. Схема размещения датчиков ускорений при динамических испытаниях в режиме предохранительного торможения сосудов

При проведении динамических испытаний в режиме предохранительного торможения с использованием контактных силоизмерительных датчиков, датчики монтируются в специальных измерительных башмаках, которые устанавливаются на сосуде на место рабочих по три датчика в каждом (по 2 боковых и 1 лобовой) на верхнем поясе сосуда. При этом датчик - акселерометр D7 крепится на сосуде аналогич-

но тому, как показано на предыдущей схеме (рис. 2). Вместо акселерометра D7 может использоваться датчик натяжения головного каната, навешиваемый на канат на расстоянии 0.5-1 м выше коуша или встроенный в подвесное устройство.

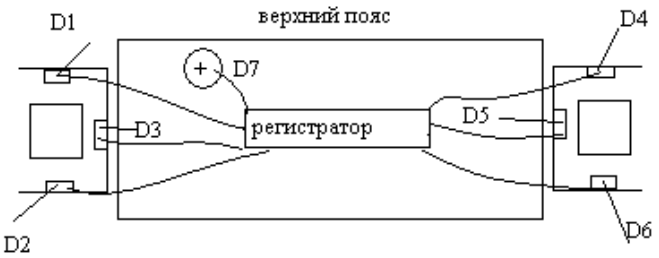


Рис. 2. Схема размещения датчиков контактных усилий при проведении динамических испытаний в режиме предохранительного торможения

Второй (наземный) измерительный комплекс устанавливается в машинном здании. В его состав входит датчик (канал информационной цепи подъемной машины) окружной (угловой) скорости вращения барабана подъемной машины, датчик сигнала в цепи включения предохранительного тормоза (ТП), регистратор со встроенным таймером, канал ввода сигнала с указателя глубины подъемной машины.

Измерения производятся следующим образом:

- при проведении экспериментов методом измерения мгновенных горизонтальных ускорений направляющих сосуда в боковой плоскостях проводников выходные сигналы с датчиков-акселерометров через аналого-цифровой преобразователь поступают и записываются во встроенный компьютер аппаратуры;
- при проведении экспериментов методом измерения контактных нагрузок, действующих на проводники, сигналы с силоизмерительных датчиков, встроенных в башмаки подъемного сосуда, через тензоусилитель и аналого-цифровой преобразователь поступают и записываются во встроенный компьютер аппаратуры;
- параллельно с записью данных со всех типов датчиков ведется запись текущего времени с таймера компьютера на его жесткий диск;
- параллельно на осциллограф в здании подъемной машины ведется запись диаграммы скорости вращения барабана подъемной машины, из соответствующей информационной ячейки системы управления;
- после окончания измерений данные с компьютера и пропущенные через систему аппаратно-программной оцифровки данные с осциллографа поступают в стационарный компьютер для последующей математической обработки.

Порядок проведения динамических измерений.

Динамические измерения с любым описанным выше набором датчиков (акселерометров, силоизмерителей) проводится в 2 этапа. На первом этапе подъемный сосуд, с включенными в режим записи обоими комплектами аппаратуры (наземный и подземный), совершает в рабочем режиме, принятом для данного ствола, 3-5 полных рабочих циклов спуска – подъема (для скиповых подъемов спуск порожнего – подъем груженного скипов). Данные записываются на регистраторы комплексов и сохраняются для последующей обработки.

На втором этапе производится аналогичный цикл измерений и регистрации данных но в режиме последовательного срабатывания предохранительного тормоза при прохождении сосудом специально назначенных контрольных точек, находящихся по глубине ствола в его верхней трети, в средней части и нижней трети. Торможение осуществляется в одних и тех же точках при спуске и подъеме сосуда (для скипов при спуске порожнего и подъеме груженого скипов).

Для получения наиболее полной картины следует контрольные точки расположить с достаточной густотой по глубине ствола. Однако такие испытания создают экстремальные циклические нагрузки на канат, механическую часть подъемной машины, армировку и могут привести к снижению их циклической прочности и снижению эксплуатационного ресурса оборудования, ремонт и замена которого связаны со значительными материальными затратами. В условиях сверхнормативного износа оборудования они могут вызвать спонтанное разрушение его элементов и аварийную ситуацию на подъеме, поэтому, число экспериментов такого типа должно быть минимальным, а ТП производится с соблюдением всех необходимых требований обеспечения безопасности.

Этап обработки данных, полученных при экспериментах, является не менее важным и трудоемким в сравнении с этапом проведения измерений

Цель обработки и анализа данных измерений состоит в определении качественных и количественных отличий процесса динамического взаимодействия сосуда с армировкой во время торможения от такого же процесса во время прохождения сосудом участка торможения с постоянной скоростью в рабочем режиме. Количественно эти отличия могут быть охарактеризованы с достаточной для практической точки зрения полнотой, «коэффициентом динамической перегрузки».

Качественная характеристика процесса взаимодействия сосуда с армировкой в процессе торможения состоит в определении закона изменений максимальных амплитуд динамических параметров горизонтальных колебаний сосуда во времени и того, является ли это изменение убывающей, возрастающей, возрастающе-убывающей или постоянной во времени функцией и от каких параметров системы это зависит.

Как показано в работе [3], процесс горизонтального взаимодействия сосуда с армировкой на рабочих режимах движения носит случайный, стационарный, эргодический характер. То есть количественные значения динамических параметров взаимодействия сосуда с армировкой на различных циклах спуска – подъема могут отличаться друг от друга, но средние показатели сохраняют приблизительно одинаковые значения от цикла к циклу. В связи с этим, в качестве базы сравнения для определения степени перегрузки армировки при торможении выберем усредненные по всем выборкам контрольных циклов спуска и подъема сосуда по каждому участку предохранительного торможения с постоянной скоростью, значения показаний динамических датчиков отдельно для лобовой и боковой плоскостей проводников.

Процесс приложения тормозного усилия к барабану подъемной машины (и ее замедление) по своей технической сути является детерминированным процессом, происходящим одинаково для всех циклов подъема. Его параметры зависят только от масс подъемных сосудов, распределения масс и жесткостей ветвей канатов подъемной установки, определяемых длиной головного каната в момент торможения.

В исследуемом нами процессе взаимодействия подъемного сосуда с армировкой главным возмущающим фактором, который носит детерминированный характер во время предохранительного торможения, являются его вертикальные колебания на упругом канате. Поэтому, для снижения количества экстремальных потенциально – опасных для безопасности подъема динамических воздействий на систему при динамических испытаниях, с достаточной для практики точностью можно ограничиться срабатываниями предохранительного тормоза в стволе во время одного цикла спуска и одного цикла подъема сосуда для каждой контрольной точки; для последующей обработки результатов измерений нужно взять максимальные значения зарегистрированных во время этих торможений динамических параметров перегрузки проводников армировки.

Данный принцип обработки результатов измерений является основным и определяет все последующие операции.

Исходя из этого, обработка данных, записанных на регистраторы обоих комплексов аппаратуры (наземного - на подъемной машине и подземного – на подъемном сосуде) производится в следующем порядке:

1. Подготовительная обработка данных

1.1 данные первого этапа измерений при движении сосуда с постоянной скоростью разделить на блоки записей, каждый из которых соответствует только спуску или только подъему сосуда;

1.2 начала записей наземного и подземного комплексов, относящихся к одному и тому же спуску или подъему синхронизировать по времени начала движения либо по показаниям встроенных таймеров абсолютного времени либо путем совмещения путевых датчиков и/или датчиков скорости соответственно на сосуде и подъемной машине;

1.3 произвести расшифровку записей и перевод данных в значения физических параметров, регистрируемых датчиками на основании индивидуальных тарировочных характеристик, проставить относительные по времени (с момента начала движения) и абсолютные (по глубине ствола) отметки;

1.4 на расшифрованных записях нанести глубинные координаты контрольных точек, в которых производилось предохранительное торможение на втором этапе измерений, определенные по показаниям указателя глубины подъемной машины;

1.5 для каждого спуска и подъема сосуда в контрольных точках ствола определить максимальные значения динамических параметров для показаний каждого установленного на сосуде датчика (ускорений или контактных усилий);

1.6 для записей второго этапа измерений (срабатывания ТП) выделить записи регистраторов наземного и подземного комплексов аппаратуры отдельно для каждой контрольной точки ствола отдельно на спуске и подъеме сосуда, синхронизировать записи наземного и подземного регистраторов по временным отметкам для одного и того же цикла торможения и произвести расшифровку записей и перевод данных в значения физических параметров, регистрируемых датчиками на основании индивидуальных тарировочных характеристик, представить относительные (временные с момента начала движения) и абсолютные (по глубине ствола) отметки;

2. Математическая обработка данных

2.1 вычислить средне-взвешенные значения максимальных динамических параметров, определенных на этапе обработки 1.3 – 1.6, для каждой контрольной точки торможения на этапе движения с постоянной скоростью для каждого датчика за все контрольные спуски и все подъемы отдельно;

2.2 все средние значения динамических параметров разделить на две группы: лобовые и боковые;

2.3 выбрать максимальные значения параметров отдельно для лобовых и боковых датчиков; эти максимальные значения присвоить параметрам в качестве базы сравнения: $A_{\max,rab}^{lob(bok)}$ и $F_{\max,rab}^{lob(bok)}$;

2.4 для каждой контрольной точки на записях, сделанных при срабатывании ТП, выбрать максимальные значения отдельно для лобовых и боковых датчиков;

2.5 рассчитать для каждой контрольной точки отдельно для спуска и подъема сосуда значения коэффициентов динамической перегрузки: $K_{din,a}^{lob(bok)}$ и $K_{din,F}^{lob(bok)}$;

2.6 на основании показаний датчиков скорости и таймера наземного комплекта аппаратуры рассчитать мгновенные (с шагом 0.05 с) и среднее (до остановки) окружные замедления барабана подъемной машины; построить графики мгновенных замедлений для каждого торможения;

2.7 с шагом ≈ 0.1 с выполнить операции пунктов 2.4 – 2.6; построить совмещенные графики $K_{din,a}^{lob(bok)}$ и $K_{din,F}^{lob(bok)}$ и $W(t)$ в развертке по времени; выполнить анализ вида полученных кривых;

2.8 выполнить анализ зависимости коэффициентов динамической перегрузки от координаты контрольной точки срабатывания ТП отдельно для лобовой и боковой плоскостей проводников на спуске и подъеме сосуда.

2.9 для каждой точки торможения провести спектральный анализ выходных сигналов динамических датчиков отдельно для лобовой и боковой плоскостей; рассчитать низшие собственные частоты колебаний сосуда отдельно в лобовой и боковой плоскостях $\lambda_{lob(bok)}$.

Определить средние для ствола суммарные жесткости направляющих для лобовой и боковой плоскостей проводников $H_{lob(bok)}$ по формуле $H_{lob(bok)} = 4 \cdot \pi^2 \cdot \lambda_{lob(bok)}{}^2 \cdot I_{lob(bok)}$, где $I_{lob(bok)}$ - центральные моменты инерции сосуда, соответственно в лобовой и боковой плоскостях проводников. Данные расчетов можно использовать для определения уточненных по глубине координат зон параметрического возбуждения системы «сосуд - армировка» в стволе.

Данная методика позволяет определять участки армировки, на которых предохранительное торможение может привести к аварийно-опасным ситуациям. Анализ данных исследований позволит установить допустимые нагрузки при прохождении данных участков для соблюдения всех норм и правил безопасности работы горного подъемного оборудования

Список использованных источников

1. Ильин С.Р., Гавруцкий А.Е. Повышение безопасности работы шахтных подъемов путем применения компьютерных технологий и средств электронного контроля за состоянием оборудования стволов в Приднепровском регионе //Геотехническая механика: Межвед. науч.- техн. сб. – Дн-ск. -1998. - №6. – С. 169-173
2. Лопатін В.В. Методи і технічні пристрої експрес-діагностики динамічного стану системи „підйомна посудина-жорстка арміровка”: Автореф. діс… канд. техн. наук: 05.05.06 / ИГТМ НАН Украины.- Дніпропетровськ, 2001. - 18с.
3. Гавруцкий А.Е., Мусиенко В.Д., Осадчая Л.С. Исследование горизонтальных нагрузок на армировку в скиповом стволе ЗЖРК № 1 // Шахтное строительство. - 1981. – №7. – С. 19-21.

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

УДК 621.336

А.М. Муха, д-р. тех. наук, Д.В. Устименко, О.О. Карзова, М.М. Кедря, канд-ти техн. наук, О.Я. Куриленко
(*Україна, Дніпро, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна)*

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ НАКЛАДОК ДЛЯ СИЛЬНОСТРУМОВИХ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Анотація. *В представленій статті надано порівняльний аналіз накладок полозів для струмоприймачів електровозів та електропоїздів постійного струму із різних матеріалів. Серед яких два типи на-*

кладок, які зараз знаходяться в експлуатації - перший тип композиційна, а другий - вугільнографітна, а третій тип - сучасна високотехнологічна накладка з матеріалу «Романіт-УВЛШ». Розрахунки проведено для Львівської залізниці. Розрахунки виконувались без урахування зростання цін на матеріальні та трудові ресурси, без урахування зміни вартості грошей у часі. Отримані відносні одиниці при зміни інших умов не будуть мати суттєвих коливань. Представлені розрахунки дозволили підтвердити високі техніко-економічні показники накладок полозів струмоприймачів з матеріалу «Романіт-УВЛШ», а саме зменшення витрат на заміну накладок у порівнянні з першим та другим типом накладок приблизно в 3 рази. З точку зору витрат нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів електровозів та електропоїздів впровадження накладок з матеріалу «Романіт-УВЛШ» дозволить зменшити цей час в 14 раз у порівнянні за накладками першого типу та в 58 раз у порівнянні з накладками другого типу.

Ключові слова: *ковзний контакт, контактний провід, накладка струмоприймача, кількість замін накладок, нормований час заміни накладок.*

Аннотация. *В представленной статье дан сравнительный анализ накладок полозьев для токоприемников электровозов и электропоездов постоянного тока из разных материалов. Среди них два типа накладок, которые сейчас находятся в эксплуатации - первый тип композиционная, а второй - угольнографитные, а третий тип - современная высокотехнологичная накладка из материала «Романит-УВЛШ». Расчеты проведены для Львовской железной дороги. Расчеты выполнялись без учета роста цен на материальные и трудовые ресурсы, без учета изменения стоимости денег во времени. Полученные относительные единицы при изменения других условиях не будут иметь существенных колебаний. Представленные расчеты подтвердили высокие технико-экономические показатели накладок полозьев токоприемников из материала «Романит-УВЛШ», а именно уменьшение затрат на замену накладок по сравнению с первым и вторым типом накладок примерно в 3 раза. С точки зрения затрат нормированного времени на смену полозьев токоприемников электровозов и электропоездов внедрения накладок из материала «Романит-УВЛШ» позволит уменьшить это время в 14 раз по сравнению с накладками первого типа и в 58 раз по сравнению с накладками второго типа.*

Ключевые слова: *скользящий контакт, контактный провод, накладка токоприемника, количество замен накладок, нормированное время замены накладок.*

Annotation. *In the present article, a comparative analysis is given of skid plates for current collectors of electric locomotives and direct-current electric trains of different materials. Among them are two types of linings, which are now in operation - the first type of composition, and the second - carbon-graphite, and the third type - the modern high-tech lining of the material "Romanit-UVLSh." The calculations were carried out for the Lviv railway. Calculations were carried out without taking into account price increases for material and labor resources, without taking into account changes in the value of money over time. The resulting relative units when changing other conditions will not have significant fluctuations. The presented calculations confirmed the high technical and economic indicators of the slips of the runners of the current collectors from the "Romanit-UVLSh" material, namely, the reduction of the costs for replacing the slips compared to the first and second types of slips by about 3 times. From the point of view of the cost of the normalized time to replace the runners of electric current collectors of electric locomotives and electric trains, the introduction of linings of the "Romanit-UVLSh" material will reduce this time by 14 times compared to the linings of the first type and 58 times compared to the linings of the second type.*

Keywords: sliding contact, contact wire, current collector lining, number of lining replacements, normalized lining replacement time.

Вступ

Перевагами електричного транспорту, у порівнянні з іншими тяговими транспортними засобами залізниць є висока екологічність, енергетична ефективність та майже необмежена встановлена потужність, яка дозволяє реалізовувати високі швидкості руху та ведення «важких» поїздів, що обумовлюється фактом живлення від енергосистеми, яка має встановлену потужність значно вище ніж потужність електровозу або електропоїзду. Передача потужності виконується за допомогою ковзного контакту від контактної мережі до рухомої одиниці. Існують різноманітні конструкції струмоприймачів, але всі вони мають так звану «накладку струмоприймача», яка є тим елементом системи передачі потужності на борт транспортного засобу, який зношується найбільш інтенсивно в порівнянні з контактним проводом, що має значно вищу вартість та складність монтажу. Таким чином, контактну накладку струмоприймача «віддають у жертву» забезпечуючи живучість більш складній системі контактного проводу.

Аналіз існуючих досягнень та публікацій

Проблемні питання струмознімання на електрорухомому складі залізниць, міського транспорту тощо розкриті в багатьох наукових працях вчених різних країн, які охоплюють питання створення новітніх

матеріалів, дослідження режимів роботи ковзного контакту та інше. Серед таких праць виділяємо [1-6] вітчизняних та [7-11] закордонних вчених, які акцентують увагу не лише на трибологічних та електричних властивостях, а також розкривають експлуатаційні показники ковзного контакту. Вчені Дніпровського національного університету залізничного транспорту також мають значну кількість наукових праць у цьому напрямку, які базуються на лабораторних та експлуатаційних випробуваннях, серед цих робот виділяємо наступні [12-16].

Мета досліджень

Метою досліджень є проведення порівняльного аналізу експлуатаційних показників використання накладок струмоприймачів різних типів, з подальшим визначення накладок, які б забезпечували максимальних економічний ефект у разі їх впровадження в умовах залізниць України.

Основна частина

Вихідні дані для проведення досліджень наступні. Досліджено три типи накладок, серед яких два типи накладок, які зараз знаходяться в експлуатації – перший тип композиційна, а другий – вугільнографітна, а третій тип – сучасна високотехнологічна накладка з матеріалу «Романіт-УВЛШ». Розрахунки проведено для Львівської залізниці та виконувались вони без урахування зростання цін на матеріальні та трудові ресурси, без урахування зміни вартості грошей у часі. Отримані відносні одиниці при зміни інших умов не будуть мати суттєвих коливань.

Парк електрорухомого складу, що знаходиться «у роботі»: електровозів постійного струму – 68 одиниць., електропоїздів постійного струму – 157 секцій. Середній місячний пробіг для електровозів постійного струму 8 000...12 000 км, для електропоїздів постійного струму 14 000 км.

Накладки першого типу характеризуються наступними показниками: середній ресурс при встановлені на електровозах – 17 000 км; при встановлені на електропоїздах 3500...4000 км. Спостерігається сезонність середнього ресурсу: у зимовий час (грудень – лютий) заміна накладок на електровозах здійснюється кожні 4 доби, а на електропоїздах кожні 300 км. Середній знос контактного проводу 0,08...0,18 кв. мм/10 тис. проходів. Вартість комплекту накладок приведених до довжини полоза 1200 мм складатиме 2 652 грн., без ПДВ.

Накладки другого типу мають середній ресурс при встановлені на електропоїздах – 300 км. Спостерігається сезонність середнього ресурсу: у зимовий час (грудень – лютий) на електропоїздах – 150 км. Середній знос контактного проводу на 10 тис. проходів – дані відсутні. Вартість комплекту накладок приведених до довжини полоза 1200 мм складатиме 628 грн., без ПДВ.

Накладки третього типу мають середній ресурс при встановлені на електровозах станом мають експертну оцінку середнього ресурсу експериментальних накладок – 70 000 км, при встановлені на електропоїздах – 14 423 км. Сезонність роботи накладок не зафіксовано. Середній знос контактного проводу 0,01...0,023 кв. мм/10 тис. проходів. Вартість комплекту накладок приведених до довжини полоза 1200 мм складатиме 12 000 грн., без ПДВ.

Порівняльний аналіз проведено за двома критеріями – порівняння щорічної кількості замін накладок та порівняння щорічних витрат нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів.

За першим критерієм накладки першого типу характеризуються наступним.

1. Заміна накладок першого типу для електровозів.
   - Середньомісячний пробіг електровозів постійного струму складатиме: (8000+12000)/2=10000 км.
   - Середньодобовий пробіг електровозів постійного струму складатиме: 10000/31=322 км.
   - Середньорічний пробіг електровозів постійного струму складатиме: 10000·12=120000 км.
   - Кількість замін накладок першого типу за період: весна-літо-осінь (9 місяців) дорівнює: (10000·9)/17000 = 5,3 замін.
   - Кількість замін накладок першого типу за зимовий період (90 діб) дорівнює: 90/4 = 22,5 замін.
   - Середньорічна кількість замін накладок: 5,3+22,5 ≈ 28 замін.
2. Заміна накладок першого типу для електропоїздів.
   - Середньодобовий пробіг електропоїздів постійного струму складатиме: 14000/31=451 км.
   - Середньорічний пробіг поїздів постійного струму складатиме: 14000·12 = 168000 км.
   - Кількість замін накладок першого типу за період: весна-літо-осінь (9 місяців) дорівнює: (14000·9)/((3500+4000)/2)=33,6 замін.
   - Кількість замін накладок ПКД-4-2 за зимовий період (90 діб) дорівнює: 90·451/300 = 135,3 замін.
   - Середньорічна кількість замін накладок: 33,6+135,3 ≈ 170 замін.
3. Заміна накладок третього типу для електровозів.
   - Середньорічна кількість замін накладок: 120000/70000 ≈ 2 заміни.
4. Заміна накладок третього типу для електропоїздів.

– Середньорічна кількість замін накладок: 168000/14423 ≈ 12 замін.

5. Заміна накладок другого типу для електропоїздів.

– Кількість другого типу за період: весна-літо-осінь (9 місяців) дорівнює: 14000·9/300 = 420 замін.

– Кількість замін накладок другого типу за зимовий період (90 діб) дорівнює: 14000·3/150 = 280 замін.

– Середньорічна кількість замін накладок: 420+280≈ 700 замін.

Результати розрахунків представимо у таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Результати розрахунків щорічної кількості замін накладок електровозів

№	Показник	Тип накладки	
		Перший	Третій
1	Щорічна кількість замін	28	2
2	Вартість однієї заміни трирядного струмоприймача (полоз 1200 м), тис. грн. (без ПДВ)	3·2,652 = 7,956	3·12,0 = 36
3	Щорічні витрати, тис. грн.	28·7,956 = 222,768	2·36 = 72
4	Співвідношення витрат (до мінімального зі значень)	3,09 рази	1

Таблиця 2

Результати розрахунків щорічної кількості замін накладок електропоїздів

№	Показник	Тип накладки		
		Перший	Третій	Другий
1	Щорічна кількість замін	170	12	700
2	Вартість однієї заміни дворядного струмоприймача (полоз 1200 м), тис. грн. (без ПДВ)	2·2,652 = 5,304	2·12,0 = 24	2·0,628 = 1,256
3	Щорічні витрати, тис. грн.	170·5,304= 901,68	12·24 = 288	700·1,256= 879,2
4	Співвідношення витрат (до мінімального зі значень)	3,13 рази	1	3,05 рази

За другим критерієм проведемо порівняння щорічних витрат нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів

У відповідності до «Типових норм часу...» на заміну одного струмоприймача електровоза витрачається 0,24 нормо·год. Виходячи з цього значення представимо результати розрахунків у табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків щорічних витрат нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів електровозів

№	Показник	Тип накладки	
		Перший	Третій
1	Щорічна кількість замін	28	2
2	Щорічні витрати, нормо·год	28·7,956 = 222,768	2·36 = 72
3	Співвідношення витрат (до мінімального зі значень)	14,0 разів	1

У відповідності до «Типових норм часу...» на заміну одного струмоприймача секції електропоїзда витрачається 0,24 нормо·год. Виходячи з цього значення представимо результати розрахунків у табл.4.

Таблиця 4

Результати розрахунків щорічних витрат нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів електропоїздів

№	Показник	Тип накладки		
		Перший	Третій	Другий
1	Щорічна кількість замін	170	12	700
2	Щорічні витрати, нормо·год	170·5,304= 901,68	12·24 = 288	700·1,256= 879,2
3	Співвідношення витрат (до мінімального зі значень)	14,17 рази	1	58,33 рази

Висновки

1. Використання полозів з матеріалу "Романіт-УВЛШ" в умовах Львівської залізниці дозволить зменшити щорічні витрати на придбання накладок для електровозів у порівняні накладками першого типу у 3,09 рази.

2. Використання полозів з матеріалу "Романіт-УВЛШ" в умовах Львівської залізниці дозволить зменшити щорічні витрати на придбання накладок для електропоїздів у порівняні накладками першого типу у 3,13 рази, а в порівнянні з вугільними накладками другого типу у 3,05 рази.

3. Використання полозів з матеріалу "Романіт-УВЛШ" в умовах Львівської залізниці дозволить зменшити щорічні витрати нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів електровозів у порівняні накладками першого типу у 14,0 разів.

4. Використання полозів з матеріалу "Романіт-УВЛШ" в умовах Львівської залізниці дозволить зменшити щорічні витрати нормованого часу на зміну полозів струмоприймачів електропоїздів у порівняні накладками першого типу у 14,17 рази, а в порівнянні з вугільними накладками другого типу у 58,33 рази.

Список літератури

1. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її ре-зультати / М. І. Сергієнко // Локомотив-информ. – 2010. – №4. – С. 24-28.
2. Лашко, А. Д. Енергозбереження на заліз-ничному транспорті України / А. Д. Лаш-ко, М. І. Сергієнко // Залізничний транс-порт України. – 2001. – №4. – С. 7-11.
3. Малышко, И. В. Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины / И. В. Малышко // Локомотив-информ. – 2007. – №1. – С. 12-14.
4. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин В.В. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника. 1986.
5. 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.
6. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. [Текст] Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец – Москва: Физматлит, 2007 – 368 с.
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. Janahmadov, A. Kh, Javadov, M. Y. Synergetics and fractals in tribology / A. Kh Janahmadov Maksim Javadov. Springer, 2016. – P. 381. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6.
9. The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions / Bai, L., Meng, Y., Khan, Z.A. [et al.] // Tribol Lett. – 2017. – Vol. 65(4). – P. 115-127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y
10. Берент, В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта [Текст] В.Я. Берент. – М.: Інтекст. 2005. – 408 с.
11. Гершман И.С. Токосъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта / И.С. Гершман, Н.В. Миронос, М.А. Мельник, Е.И. Гершман, – М.: Вестник ВННИЖТ, Вип. 4, 2012. – с. 3-10.
12. Муха, А.М. Знос контактного проводу при його взаємодії з струмоприймачами залізничного електрорухомого складу обладнаними контактними вставками з матеріалу «Романіт-УВЛШ» [Текст] / А.М. Муха, Д.В., Устименко, О.Ю. Балійчук, О.Я. Куриленко, І.В. Малишко, Ю.О. Адамович // Залізничний транспорт України. - 2017. - № 4. - С. 52-58.
13. Горобец, В.Л. Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава / В.Л. Горобец, Н.А. Бабяк, А.Я. Ярмак, А.М. Бондарев // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – №1(218), С. 297-302.
14. Тартаковский, Э. Д. Токосъемные 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.
15. Муха А. М. Порівняння теплових показників сильнострумових ковзних контактів електротранспорту, як критерій їх енергоефективності [текст] / А.М. Муха, Д.В. Устименко, О.Ю. Балійчук [та ін.] Науково-технічний збірник «Гірнича електромеханіка та автоматика» – 2018. №100. – С. 116-120.
16. Ustymenko D. V. Nanostructures in the formation of the properties of high-current sliding electrical contacts on the electric rolling stock [text]: 2019 IEEE 39th International Conference / D. V. Ustymenko, A. M. Mukha, O. Y. Baliichuk, O. Ya. Kurylenko, S. Romanov, T. Sebiev // ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 233-236. 978-1-7281-2064-5/19/$31.00 ©2019 IEEE

УДК 62-83

В.А. Волков, кандидат техн. наук
(Украина, Днепр, НТУ "Днепровская политехника")

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРАМВАЯ С ТЯГОВЫМИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Анотація. *Визначено вид траєкторій швидкості при розгоні і гальмуванні трамвая, відповідних мінімізації загального і питомого споживання енергії трамваєм. Досліджено електромеханічні і енергетичні процеси в трамваї, тяговому двигуні і суперконденсаторі при пуско-гальмівних режимах. Виконано розрахунки загального та питомого електроспоживання трамваєм при русі між сусідніми зупинками з різноманітними відомими видами траєкторій швидкості в пуско-гальмівних режимах. Практичне використання результатів досліджень дозволяє зменшити до мінімально можливих значень загальне або питоме споживання енергії трамваєм при його руху.*

Ключові слова: *трамвай, тяговий асинхронний двигун, частотне регулювання, електроспоживання, оптимізація.*

Аннотация. *Определен вид траекторий скорости при разгоне и торможении трамвая, соответствующих минимизации общего и удельного потребления энергии трамваем. Исследованы электромеханические и энергетические процессы в трамвае, тяговом двигателе и суперконденсаторе при пуско-тормозных режимах. Выполнены расчеты общего и удельного электропотребления трамваем при движении между соседними остановками с различными известными видами траекторий скорости в пуско-тормозных режимах. Практическое использование результатов исследований позволяет уменьшить до минимально возможных значений общее или удельное потребление энергии трамваем при его движении.*

Ключевые слова: *трамвай, тяговый асинхронный двигатель, частотное регулирование, электропотребление, оптимизация.*

Abstract. *The type of trajectories of speed during acceleration and deceleration of a tram, corresponding to the minimization of the total and specific energy consumption of the tram, is determined. The electromechanical and energy processes in the tram, traction engine and supercapacitor are investigated under the start-braking regimes. Calculations of the total and specific power consumption of the tram were made when moving between adjacent stops with different known types of speed trajectories in the start-braking regimes. Practical use of research results allows to reduce to the lowest possible values the total or specific energy consumption of a tram during its movement.*

Key words: *tram, traction asynchronous engine, frequency regulation, power consumption, optimization.*

Введение. Главной мировой тенденцией развития городского общественного электротранспорта (трамвая, троллейбуса) является создание его на основе тягового частотно-регулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД), что обусловлено повышенной надежностью и уменьшенными расходами при обслуживании, увеличенными межремонтными сроками эксплуатации и общими сроками службы этого двигателя. Такие трамваи в настоящее время выпускаются более, чем в двадцати странах мира (в том числе – в Германии, Франции, Италии, России, Чехии, Польше, США, Японии и др.) [1, 2]. Принимая же одновременно во внимание существующую ныне относительно высокую стоимость электроэнергии и продолжающуюся тенденцию к ее удорожанию в Украине и в мире, становится очень актуальной и востребованной практикой минимизация потребляемой электроэнергии городским общественным электротранспортом как при движении с установившимися скоростями, так и – в пуско-тормозных режимах (которые, как известно, составляют для трамвая относительно большую часть во временном цикле движения между соседними остановками).

В существующей зарубежной и отечественной научно-технической литературе вопросам исследования потерь мощности, потребляемой или генерируемой энергии, энергосберегающего управления электротранспортом с тяговыми ЧРАД посвящен целый ряд публикаций. В частности, применительно к трамваю в [3] разработана компьютерная модель для вычисления потребляемой мощности и энергии тяговыми двигателями и суммарной потребляемой энергии трамваем от питающей электрической подстанции в установившихся и пуско-тормозных режимах при заданной траектории изменения его скорости (но – без исследования влияния формы этой траектории на электропотребление и электрогенерацию трамваем). В статье [4] разработано и исследовано энергосберегающее управление тяговыми ЧРАД трамвая при режимах разгона и торможения, рассчитаны переходные электромеханические и энергетические процессы для указанных режимов тяговых двигателей.

При этих исследованиях предполагалась технчиеская возможность при торможении трамвая реализации режима генерации энергии тяговыми ЧРАД в контактную электрическую сеть, что на практике не всегда оказывается возможным. А именно, для реализации данного режима генерации (от трамвая, находящегося в режиме торможения) необходимо присутствие на тех же питающих троллеях в этот момент времени хотя бы одного другого (соседнего) трамвая, который в это время осуществляет (при режимах разгона или установившегося движения) потребление энергии из КЭС. На практике данная ситуация не всегда выполняется (особенно при малоинтенсивном движении трамваев). По этой причине (исходя из невозможности реализации экономичного электрического торможения тягового ЧРАД с генерацией энергии в сеть) для осуществления торможения в этом случае вынужденно на практике применяется совсем неэкономичный вид механического торможения трамвая (посредством тормозных колодок) либо движение трамвая в установившемся режиме или при торможении на выбеге (при котором на последнем этапе торможения также требуется применение механического торможения). Кроме этого, даже при возможной реализации режима генерации энергии (передаваемой от тормозящего трамвая в одному или нескольким соседним трамваям, потребляющим энергию в это время) возникающие потери энергии в троллеях увеличены и зависят от длины троллей между тормозящим и указанным потребляющим генерируемую энергию трамваями.

Наиболее эффективным путем гарантированного обеспечения режимов генерации трамвая является применение в нем накопителей генерируемой энергии [5, 6]. В частности, в статьях [5, 6] выполнены исследования энергоэффективности тяговых ЧРАД трамвая при осуществлении их питания через трехфазный инвертор напряжения: из контактной электрической сети (КЭС) или от дополнительно установленного накопителя генерируемой энергии в виде аккумуляторной батареи (АБ) или суперконденсатора (СК), а также предложено энергосберегающее управление тяговым ЧРАД при электрическом (рекуперативном) торможении. Это управление заключается в формировании определенных длительностей параболического вида (выпуклой формы) энергосберегающих траекторий скорости трамвая при торможении, при которых обеспечивается наибольшая генерация энергии в АБ или СК. Причем последующее потребление энергии трамваем в режимах тяги происходит сначала от упомянутых АБ или СК, а только затем – от КЭС (за счет чего обеспечивается общее снижение потребления энергии тяговыми ЧРАД из контактной электрической сети и уменьшение потерь энергии в этой сети).

Однако до настоящего времени в известной отечественной и зарубежной научно-технической литературе отсутствуют публикации, рассматривающее применительно к суперконденсаторному накопителю энергии схему электропитания трамвая, исследования электромеханических и энергетических процессов трамвая и его тяговых двигателей, энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных времен разгона и торможения трамвая, а также минимизацию его электропотребления в этих режимах.

Цель работы. Исследование при пуско-тормозных режимах электромеханических и энергетических процессов и минимизация (посредством энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных времен разгона и торможения) электропотребления трамвая, снабженного частотно-регулируемыми асинхронными двигателями и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии.

При исследованиях приняты допущения:

- объектом исследования являются электромеханические и энергетические процессы для одновагонного трамвая типа «Tatra – T6B5» с тяговыми ЧРАД при режимах разгона и установившегося движения (с потреблением электроэнергии из КЭС либо из СК) и электрического торможения (с генерацией энергии от тяговых двигателей только в СК) – применительно к схеме электропитания, представленной на рис.1; основные технические характеристики исследуемого трамвая даны в табл.1 [2];
- применялось идеализированное представление используемого тягового короткозамкнутого ЧРАД типа АТМ225М4У2 (номинальной мощностью 55 кВт и номинальным действующим линейным статорным напряжением 450В), дополненное учетом потерь мощности в стали этого двигателя [4];
- параметры тягового ЧРАД (у которого активные сопротивления были приведены к температуре 115°С) полагались неизменными и представлены в табл.1;
- полагалось использование для тягового привода трамвая векторного типа системы автоматического управления (САУ), характеризующейся раздельным регулированием намагничивающей i_{1x} и активной i_{1y} проекций обобщенного вектора статорного тока $\bar{i}_1$ (образованного основными гармоническими составляющими фазных статорных токов) ЧРАД на оси вращающейся ортогональной координатной системы «х-у», связанной вещественной осью «х» с обобщенным вектором потокосцепления ротора этого двигателя;
- не учитывались свободные (затухающие) составляющие статорных токов тягового ЧРАД в режимах разгона и торможения (что возможно вследствие использования векторной САУ, характеризующейся высоким быстродействием и точностью);
- для тягового ЧРАД при режимах разгона и торможения посредством САУ реализовывались две зоны регулирования: в первой зоне (при $0 < \omega \le \omega_н$) – при постоянстве модуля потокосцепления ротора Ψ_r,

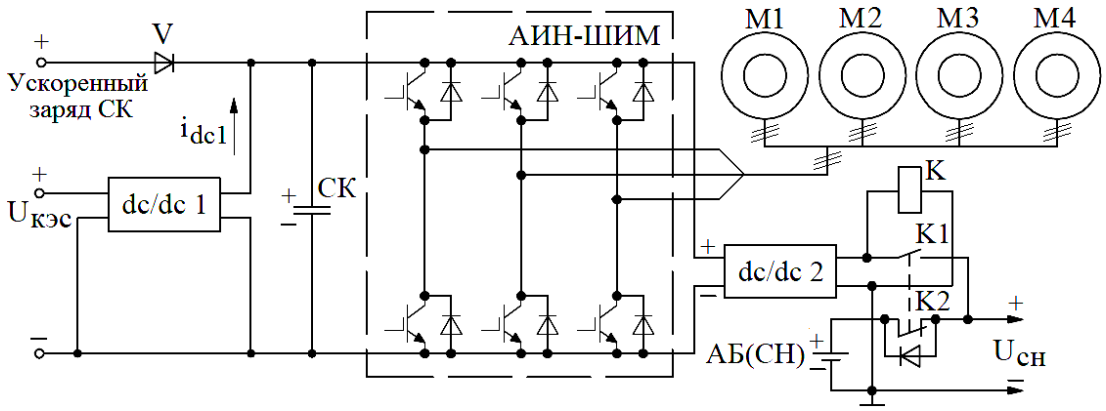


Рис. 1 Электрическая схема питания собственных нужд и тяговых ЧРАД трамвая: где АИН-ШИМ – трехфазный автономный инвертор напряжения, выполненный на IGBT-транзисторах, шунтированных обратными диодами; СК – суперконденсатор; М1…М4 – тяговые ЧРАД; $U_{кэс}$ – напряжение контактной электрической сети; $U_{сн}$ – напряжение питания собственных нужд); АБ (СН) – аккумуляторная батарея для питания собственных нужд; К – электромеханического реле

Таблица 1

Номинальные параметры двигателя и макета трамвая

Название параметра, единицы измерения	Значение
I Двигатель АТМ 225 М4У2	
- 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»)	
- номинальная вместимость вагона, чел.	120
- максимальная скорость трамвая, км/ч	65
- 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
- КПД силового преобразователя, %	94
- максимальная мощность потребления собственных нужд, кВт	1

равном его номинальному значению $\Psi_{rн}$, а во второй зоне (при $\omega > \omega_н$) – при постоянстве соотношения: $\omega_1 \cdot \Psi_r = \omega_{1н} \cdot \Psi_{rн} = const$ [7], где ω_1 и $\omega_{1н}$ – текущее и номинальное значения частоты статора; ω и $\omega_н$ – текущее и номинальное значения скорости ротора тягового двигателя соответственно;

- полагается (с учетом наличия в принятой схеме электропитания на рис.1 стабилизатора постоянного напряжения «dc/dc1») всегда достаточным уровень напряжения на входе АИН-ШИМ для реализации вышеупомянутого двухзонного регулирования скорости тягового двигателя [4];

- электромеханические и энергетические процессы трамвая исследовались в широком диапазоне изменения длительностей их времен разгона и торможения до скоростей, не превышающих 50 км/ч (значения последних соответствуют режиму городского движения в Украине и Европе, в том числе – действующему европейскому стандарту городского и пригородного цикла движения транспортных средств (NEDC) [8]); при данном цикле движения длительности времен разгона (от нулевой до максимальной скорости $\upsilon_м$ = 50 км/ч) и торможения (от максимальной скорости $\upsilon_м$ = 50 км/ч до остановленного состояния транспортного средства) составляют 26с;

- исследования электромеханических и энергетических процессов выполнялись для максимальной полной массы m трамвая, равной 26.8 т [4];

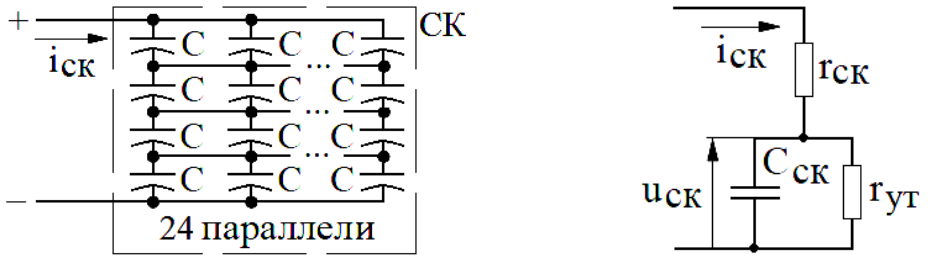
- расчеты сил сопротивления движению и механических процессов трамвая выполнены в абсолютной системе единиц СИ, а электромеханических и энергетических процессов для тягового ЧРАД – в общепринятой для машин переменного тока относительной системе единиц (о.е.) [7];

- значения коэффициента полезного действия (КПД) для преобразователя напряжения «dc/dc1» и трехфазного АИН-ШИМ полагались неизменными и равными соответственно: η_{dc1} = 98% и η_u = 96%, а текущие значения КПД $\eta_м$ движущего механизма (трансмиссии) трамвая определялись (в функции развиваемой им механической мощности $P_м = F_m \cdot \upsilon$, отнесенной к номинальной мощности $P_{дв.н}$ тягового ЧРАД) из расчетных соотношений в [4], где F_m и υ – текущие значения соответственно силы тяги, Н и скорости движения, м/с трамвая;

- принималось отсутствие: движения окружающего воздуха (ветра) и проскальзывания колес трамвая относительно рельса;

- с учетом выполнения (согласно схеме на рис.2,а) суперконденсатора СК на модулях BM0D0006E160B02 фирмы «Maxwell Technologies» (с техническими характеристиками: С = 5.8Ф; $U_н$ = 160 В; U_{max} = 170 В; I_{max} = 170 А; $R_{ск}$ = 220 мОм; $R_{ут}$=6.4 кОм; m = 5.2 кг) [9]), которые были соединены между собой по четыре последовательно и по двадцать четыре штуки параллельно (при общем количестве 48 модулей), при дальнейших расчетах суперконденсатор задавался эквивалентной схемой замещения, показанной на рис.2,б [10], со следующими эквивалентными параметрами: сопротивлениями $r_{ск} = 4R_{ск}/24 = 36.7$ мОм и $r_{ут} = 4 \cdot 6.4/24 = 1.07$ кОм, емкостью $C_{ск} = 24\,C/\,4 = 34.8$ Ф; при этом условимся, что при функционировании в широтно-импульсном режиме преобразователя «dc/dc1» [11, 12] в схеме электропитания на рис.1 поддерживается (стабилизируется) при потреблении энергии от КЭС напряжение на суперконденсаторе равным заданному значению: $U^*_{ск} = 560\text{В} = const$;

- все приводимые далее в статье расчетные данные (в таблицах и на рисунках) для электромеханических и энергетических процессов трамвая соответствуют его горизонтальному движению (с крутизной уклона $i = 0$).



а) б)

Рис. 2 Схема суперконденсатора на модулях BMOD0006E160B02 емкостью С= 5.8 Ф (а) и его эквивалентная схема замещения (б), в которой: $r_{ск}$ = 36.7 мОм, $r_{ут}$ = 1.07 кОм, $C_{ск}$ =34.8 Ф

На *первом этапе* приведем исходные расчетные аналитические зависимости из [4] для механических (в абсолютных единицах):

$$F_m - F_c = m(1+\gamma)\cdot\upsilon', \quad \varepsilon = \frac{\omega}{\upsilon} = \frac{\omega_н}{\upsilon_н} = \frac{\omega_м}{\upsilon_м} = const, \quad s = \int_0^t \upsilon \cdot dt, \quad s_p = \int_0^{t_p} \upsilon \cdot dt, \quad s_m = \int_0^{t_m} \upsilon \cdot dt \qquad (1)$$

и энергетических (в относительных единицах) процессов трамвая:

$$P_\Sigma = n \cdot \left[M \cdot \omega + \left(\Delta P_{дв} + \Delta P_{мод}\right)\right] / \eta_u + P_{сн}, \qquad (2)$$

а также – для электромеханических и энергетических процессов его тяговых ЧРАД (все величины приводятся в относительных единицах):

$$\left.\begin{array}{l}
M_{c.дв} = M_c / n, \quad J = J_\Sigma / n, \; M = M_{c.дв} + J \cdot \omega', \; J_\Sigma = (1+\gamma) \cdot m[кг] / \varepsilon^2 [рад/м] \cdot J_б \left[кг \cdot м^2\right], \\
M_c = \begin{cases} \left(M_{co} + q \cdot \omega^2\right) / \eta_м - \text{при } M \ge 0, \\ \left(M_{co} + q \cdot \omega^2\right) \cdot \eta_м - \text{при } M < 0, \end{cases} \qquad \Delta P_{дв} = \begin{cases} \Delta P_{дв.1} - \text{при } 0 \le \omega \le \omega_н \text{ (зона 1)}, \\ \Delta P_{дв.2} - \text{при } \omega > \omega_н \text{ (зона 2)}, \end{cases} \\
\Delta P_{дв.1} = a_1 + b \cdot \left(M_{c.дв} + J \cdot \omega'\right)^2 + c \cdot \left(\Psi_m / \Psi_{mн}\right)^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2, \\
\Delta P_{дв.2} = a_2 \left(\dfrac{\Psi_{гн}}{\omega_1} - \dfrac{T_г \Psi_{гн}}{\omega_1^2} \cdot \omega_1' \right)^2 + b \omega_1^2 \left(M_{c.дв} + J \cdot \omega'\right)^2 + c \cdot \left(\Psi_m / \Psi_{mн}\right)^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2
\end{array}\right\} . (3)$$

В формулах (1) – (3) используются следующие обозначения: F_m и F_c – силы соответственно тяги и сопротивления движению трамвая (определенные из [4]); υ – текущая скорость движения, м/с трамвая; $\upsilon_н = 24.4$ км/ч – скорость трамвая, соответствующая номинальной скорости $\omega_н$ тягового ЧРАД; $\upsilon_м$ и $\omega_м$ – максимальная скорость трамвая и соответствующая ей скорость ротора тягового ЧРАД; γ – коэффициент, учитывающий в транспортном средстве соотношение между собой значений кинетических энергий вращательно и поступательно движущихся масс (для трамвая принято значение: $\gamma = 0.1$ [4]); υ' – производная скорости трамвая, м/с^2 по текущему времени t; $\varepsilon = 23.19$ рад/м – соотношение между соответствующими друг другу скоростью ω ротора ЧРАД, рад/с и скоростью υ движения троллейбуса, м/с [4]; s, s_p и s_m – соответственно текущее, пройденное трамваем при разгоне или торможении, расстояния; t_p и t_m – времена соответственно разгона и торможения трамвая; P_Σ – текущая суммарная потребляемая (при $P_\Sigma > 0$) или генерируемая (при $P_\Sigma < 0$) мощность всеми ЧРАД; $n = 4$ – количество тяговых двигателей в одновагонном трамвае; M – развиваемый электромагнитный момент одним тяговым ЧРАД трамвая; M_c – приведенный к валу ЧРАД суммарный статический момент сопротивления трамвая; $M_{c.дв}$ – приведенный к валу ЧРАД статический момент одного тягового двигателя; J_Σ – приведенный к валам тяговых ЧРАД суммарный момент инерции трамвая; J – приведенный к валу одного тягового ЧРАД момент инерции трамвая; $J_б$ – базисное значение момента инерции тягового ЧРАД в системе относительных единиц; $\Delta P_{дв}$ – общие основные потери мощности одного тягового ЧРАД; $\Delta P_{дв.1}$ и $\Delta P_{дв.2}$ – текущие значения общих основных потерь мощности одного тягового двигателя в первой и второй зонах регулирования скорости соответственно; $\lambda = 1.3$ – коэффициент, учитывающий изменение основных потерь мощности в стали тягового ЧРАД от частоты статора ω_1 [4, 7]; Ψ_m и $\Psi_{mн}$ – текущее и номинальное значения модуля обобщенного вектора магнитного потока в воздушном зазоре тягового ЧРАД; M_{co}, q и a_1, a_2, b, c, d – постоянные коэффициенты, рассчитываемые из соотношений в [4], исходя из соответственно сопротивления движению трамвая или параметров применяемого в нем тягового ЧРАД.

На *втором этапе* проанализируем четыре возможных режима работы системы электропитания на рис.1:

а) в момент начала разгона трамвая напряжение $u_{ск}$ на суперконденсаторе равно значению $u_{ско}$ (превышающему его заданное значение $u_{ско} > U_{ск}^*$); в данном режиме (соответствующем первой части разгона трамвая) происходит потребление энергии тяговым ЧРАД (через инвертор) от суперконденсатора, вследствие чего уменьшается заряд и снижается напряжение $u_{ск}$ на суперконденсаторе (но всегда в этом режиме оно неизменно превышает заданное его значение: $u_{ск} > U_{ск}^*$);

б) в процессе разгона и потребления энергии через АИН-ШИМ тяговыми ЧРАД текущее напряжение на суперконденсаторе снижается до уровня его заданного значения $u_{ск} = U_{ск}^*$, после чего до этого закрытые транзисторы преобразователя «dc/dc1» переходят в широтно-импульсный режим работы [11, 12] и стабилизируют напряжение $u_{ск}$ суперконденсатора на заданном уровне $U_{ск}^*$ (это соответствует второй части режима разгона или выходу ЧРАД на установившуюся скорость и характеризуется: потреблением трамваем энергии от КЭС, равенством нулю тока $i_{ск} \approx 0$ через суперконденсатор и поддержанием неизменным его напряжения: $u_{ск} = U_{ск}^*$);

в) при начале режима торможения из-за возникновения генерации энергии (от четырех ЧРАД через инвертор в супеконденсатор) и одновременного с этим закрытия транзисторов преобразователя «dc/dc1» происходит заряд СК до напряжения, превышающего его заданное значение: $u_{ск} > U^*_{ск}$;

г) во второй части торможения (по мере снижения скорости ЧРАД) режим генерации изменяется на режим потребления энергии тяговыми ЧРАД (через инвертор) от суперконденсатора СК (заряженного до напряжения $u_{ск} > U^*_{ск}$); при этом транзисторы преобразователя «dc/dc1» продолжают оставаться закрытыми; после остановки ЧРАД суперконденсатор остается заряженным до повышенного напряжения $u_{ск}(t_{m1}) > U^*_{ск}$ и за время остановки незначительно уменьшает (обычно из-за ее непродолжительности и относительного малого потребления во время нее энергии) свое напряжение от величины $u_{ск}(t_{m1})$ до значения $u_{ско}$ (где $u_{ско} > U^*_{ск}$).

Для режимов работы: «а», «в», «г» рассмотренной системы электропитания справедливы расчетные зависимости для нахождения текущего напряжения $u_{ск}(t)$ на суперконденсаторе и рассеиваемых в нем потерь энергии $\Delta W_{ск}(t)$ при его разряде и заряде:

$$u_{ск}(t) = u_{ск}(0) - \frac{1}{C_{ск}} \cdot \int_0^t i_{ск}(t) \cdot dt\,, \quad \Delta W_{ск}(t) = r_{ск} \cdot \int_0^t i^2_{ск}(t) \cdot dt\,, \tag{4}$$

где $u_{ск}(0)$ – начальное значение напряжения на суперконденсаторе при рассматриваемом режиме. Для режима «б» выполняются другие соотношения: $u_{ск} = U^*_{ск}$; $i_{ск} \approx 0$; $\Delta W_{ск}(t) \approx 0$.

Причем, исходя из уравнения баланса для текущей суммарной мощности P_Σ на входе АИН-ШИМ (в схеме электропитания на рис. 1):

$$P_\Sigma(t) \approx u_{ск}(t) \cdot i_{ск}(t), \tag{5}$$

мгновенное значение тока $i_{ск}(t)$, протекающего в этой схеме через суперконденсатор СК, определяется для режимов «а», «в», «г» из зависимости:

$$i_{ск}(t) = P_\Sigma(t) / u_{ск}(t), \tag{6}$$

а для режима «б» (когда $i_{ск} \approx 0$ и $u_{ск} = U^*_{ск} = const$) выходной ток преобразователя «dc/dc1» находится из соотношения:

$$i_{dc1}(t) = P_\Sigma(t) / U^*_{ск} \geq 0\,. \tag{7}$$

Принимая во внимание, что положительное значение потребляемой суммарной мощности ($P_\Sigma > 0$) соответствуют режиму потребления трамваем энергии, а отрицательное значение ($P_\Sigma < 0$) – режиму генерации энергии, и исходя из всегда положительного значения напряжения $u_{ск}(t)$ на суперконденсаторе в схеме на рис. 1, следует, что знак протекающего тока $i_{ск}(t)$ через СК всегда совпадает со знаком потребляемой мощности P_Σ. При закрытых же транзисторах преобразователя «dc/dc1» в схеме на рис. 1 (когда отсутствует электропотребление из КЭС или генерация в нее энергии): положительное значение тока суперконденсатора $i_{ск}(t) \geq 0$ соответствуют согласно (4) его разряду, а отрицательное значение $i_{ск}(t) < 0$ – его заряду.

На *третьем этапе* для режимов торможения, исходя из зависимостей (2) – (7) для исследуемых (показанных на рис. 3 и описываемых математическими соотношениями из [13]) тахограмм (ТГ) $\upsilon(t)$ трамвая, рассчитаем из зависимостей [14]:

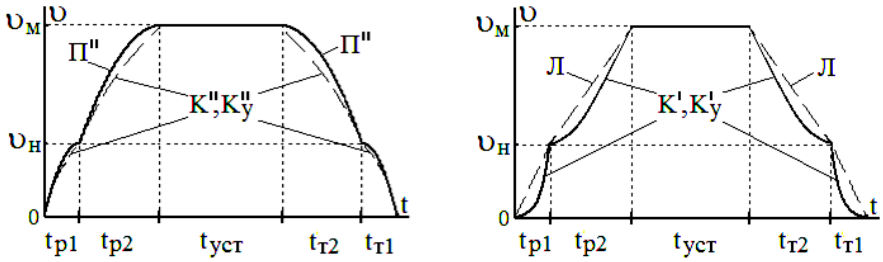


Рис. 3 Виды исследуемых тахограмм трамвая при пуско-тормозных режимах: а – для параболической $П''$ и квазиоптимальных $К''$, $К''_y$ выпуклой формы; б – для линейной $Л$, параболической $П'$ и квазиоптимальных $К'$, $К'_y$ вогнутой формы тахограмм

$$\left.\begin{aligned}
&W_{m1(n)} = 0.5\int_0^{t_{m1}} P_\Sigma \cdot [1+sign(P_\Sigma)]\cdot dt, \quad W_{m2(n)} = 0.5\int_0^{t_{m2}} P_\Sigma \cdot [1+sign(P_\Sigma)]\cdot dt,\\
&W_{m1(г)} = 0.5\int_0^{t_{m1}} P_\Sigma \cdot [1-sign(P_\Sigma)]\cdot dt, \quad W_{m2(г)} = 0.5\int_0^{t_{m2}} P_\Sigma \cdot [1-sign(P_\Sigma)]\cdot dt,\\
&\Delta W_{ск.m1(n)} = 0.5\int_0^{t_{m1}} r_{ск}\cdot i_{ск}^2 \cdot [1+sign(P_\Sigma)]\cdot dt, \quad \Delta W_{ск.m2(n)} = 0.5\int_0^{t_{m2}} r_{ск}\cdot i_{ск}^2 \cdot [1+sign(P_\Sigma)]\cdot dt,\\
&\Delta W_{ск.m1(г)} = 0.5\int_0^{t_{m1}} r_{ск}\cdot i_{ск}^2 \cdot [1-sign(P_\Sigma)]\cdot dt, \quad \Delta W_{ск.m2(г)} = 0.5\int_0^{t_{m2}} r_{ск}\cdot i_{ск}^2 \cdot [1-sign(P_\Sigma)]\cdot dt
\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

электропотребление $W_{m1(n)}$, $W_{m2(n)}$ и электрогенерацию $W_{m1(г)}$, $W_{m2(г)}$ при режимах торможения трамвая соответственно для первой и второй зон регулирования скорости тягового ЧРАД, а также потери энергии в суперконденсаторе при торможении: в первой $\Delta W_{ск.m1(n)}$, $\Delta W_{ск.m1(г)}$ и второй $\Delta W_{ск.m2(n)}$, $\Delta W_{ск.m2(г)}$ зонах регулирования скорости, – соответствующие при $P_\Sigma \geq 0$ электропотреблению (обозначены показанным в скобках индексом «п») или при $P_\Sigma < 0$ генерации (обозначены показанным в скобках индексом «г»), где t_{m1} и t_{m2} – длительности времен торможения соответственно в первой и второй зонах регулирования; t – текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемых первой и второй зон регулирования скорости: $0 \leq t \leq t_{m1}$ и $0 \leq t \leq t_{m2}$; «sign» – математическая операция определения знака алгебраического числа (т.е. $sign(P_\Sigma)$=1 при $P_\Sigma \geq 0$ и $sign(P_\Sigma)$= –1 при $P_\Sigma < 0$).

С учетом (8) применительно к режиму торможения трамвая вычислим из зависимостей [14]:

$$\left.\begin{aligned}
&W_{m(n)} = W_{m1(n)} + W_{m2(n)}, \quad W_{m(г)} = W_{m1(г)} + W_{m2(г)},\\
&W_{ск.m} = W_{m(n)} + W_{m(г)} + \Delta W_{ск.m(n)} + \Delta W_{ск.m(г)}, \quad \Delta W_{ск.m(г)} = \Delta W_{ск.m1(г)} + \Delta W_{ск.m2(г)},\\
&\eta_{ск.m} = \left(\left|W_{m(г)}\right| - W_{m(n)} - \Delta W_{ск.m(n)} - \Delta W_{ск.m(г)}\right) / \left(\left|W_{m(г)}\right| - W_{m(n)}\right),\\
&W_{m1} = W_{m1(n)} + W_{m1(г)} + \Delta W_{ск.m1(n)} + \Delta W_{ск.m1(г)},\\
&W_{m2} = W_{m2(n)} + W_{m2(г)} + \Delta W_{ск.m2(n)} + \Delta W_{ск.m2(г)},\\
&p_{m1} = \frac{W_{m1}}{\alpha_{m1}}, \quad p_{m2} = \frac{W_{m2}}{\alpha_{m2}}, \quad p_m = \frac{W_m}{\alpha_m}, \quad \alpha_{m1} = \int_0^{t_{m1}} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{m2} = \int_0^{t_{m2}} \omega \cdot dt, \quad \alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2}
\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

значения потребляемой $W_{m(n)}$ и генерируемой $W_{m(г)}$ энергии, общей потребляемой энергии W_m в указанном режиме, накопленной энергии $W_{ск.m}$ суперконденсатором при торможении, потребления энергий W_{m1} и W_{m2} соответственно при первом и втором диапазоне регулирования скорости ЧРАД, значение $\eta_{ск.m}$ КПД суперконденсатора при режиме торможения трамвая, а также – удельные значения p_{m1},

p_{m2} электропотребления соответственно в первой и второй зонах регулирования скорости и удельное общее электропотребление p_m при торможении трамвая, где α_{m1} и α_{m2} – пройденные положения валом тягового ЧРАД при торможении соответственно в первой и второй зонах регулирования; α_m – общее пройденное положение валом тягового двигателя при торможении; $t_m = t_{m1} + t_{m2}$ – общее время торможения.

Исходя из уравнения баланса для запасенной энергии в СК при режиме торможения:

$$0.5 \cdot C_{ск} \cdot \left(U_{ск}^*\right)^2 + \left|W_{ск.m}\right| = 0.5 \cdot C_{ск} \cdot u_{ск}^2(t_{m1}), \tag{10}$$

определим максимальное значение напряжения $u_{ск}(t_{m1}) = u_{ск.м}$ на этом конденсаторе по окончании режима торможения:

$$u_{ск}(t_{m1}) = \sqrt{2\left|W_{ск.m}\right| / C_{ск} + \left(U_{ск}^*\right)^2}\ , \tag{11}$$

где $U_{ск}^*$ – значение напряжения на суперконденсаторе в начале торможения.

На *четвертом этапе* для режимов разгона, исходя из расчетных зависимостей (2) – (7) для исследуемых (показанных на рис. 3 и описываемых соотношениями из [13]) тахограмм $\upsilon(t)$ трамвая, рассчитаем из соотношений [14]:

$$\left.\begin{aligned}
&W_{p1} = \int_0^{t_{p1}} P_\Sigma dt, \quad W_{p2} = \int_0^{t_{p2}} P_\Sigma dt, \quad \Delta W_{ск.p} = \int_0^{t_p^*} r_{ск} \cdot i_{ск}^2(t) \cdot dt, \quad p_{кэс} = W_{кэс} / \alpha_p, \\
&W_p = W_{p1} + W_{p2} + \Delta W_{ск.p}, \quad W_{кэс} = \left\{W_p - 0.5 C_{ск}\left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^*\right)^2\right]\right\} / \eta_{dc1} \ge 0, \\
&p_{p1} = \left[W_{p1} + \int_0^{t_{p1}} r_{ск} \cdot i_{ск}^2(t) \cdot dt\right] / \alpha_{p1}, \quad p_{p2} = \left[W_{p2} + \int_0^{\left(t_p^* - t_{p1}\right)} r_{ск} \cdot i_{ск}^2(t) \cdot dt\right] / \alpha_{p2}, \\
&\eta_{ск.p} = \frac{0.5 \cdot C_{ск} \cdot \left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^*\right)^2\right] - \Delta W_{ск.p}}{0.5 \cdot C_{ск} \cdot \left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^*\right)^2\right]}, \quad \alpha_{p1} = \int_0^{t_{p1}} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{p2} = \int_0^{t_{p2}} \omega \cdot dt, \quad \alpha_p = \alpha_{p1} + \alpha_{p2}
\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

значения потребляемых энергий W_{p1}, W_{p2} и удельных потребляемых энергий p_{p1}, p_{p2} в первой и второй зонах регулирования скорости, потерь энергии $\Delta W_{ск.p}$ в суперконденсаторе и КПД $\eta_{ск.p}$ суперконденсатора при разгоне, общего потребления трамваем энергии $W_{кэс}$ и удельной потребляемой энергии $p_{кэс}$ из КЭС, пройденные положения α_{p1} и α_{p2} валом тягового ЧРАД соответственно в первой и второй зонах регулирования скорости, общее пройденное положение α_p валом тягового двигателя при разгоне, где t_{p1} и t_{p2} – длительности времен разгона соответственно в первой и второй зонах регулирования; t_p^* – длительность времени (отсчитываемого от начала разгона) для режима «а» в схеме электропитания на рис. 1 (соответствующего разряду СК до стабилизируемого значения напряжения: $u_{ск} = U_{ск}^*$); $u_{ско}$ – начальное значение напряжения (присущее началу разгона) на суперконденсаторе (принятое при расчетах равным напряжению на нем по окончании режима «б» торможения: $u_{ско} \approx u_{ск}(t_{m1})$. Это, очевидно, обусловлено обычно малым значением электропотребления остановленным трамваем при кратковременной длительности его остановки (например, для высадки и посадки пассажиров или при запрещающем сигнале светофора); t – текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемых режимов работы: $0 \le t \le t_{p1}$, $0 \le t \le t_{p2}$ или $0 \le t \le t_p^*$; $t_p = t_{p1} + t_{p2}$ – общее время разгона.

Результаты вычисления потребляемых энергий W_{p1}, W_{p2}, $W_{кэс}$ и W_{m1}, W_{m2} и их удельных значений p_{p1}, p_{p2}, $p_{кэс}$ и p_{m1}, p_{m2} при разгоне и торможении трамвая и варьировании длительностей

времен разгона t_{p1}, t_{p2} и торможения t_{m1}, t_{m2} изображены в виде графических зависимостей, показанных на рис. 4 и рис. 5. В табл.2 представлены по результатам выполненных расчетов оптимальные (минимальные) потребления энергии W^o_{p1}, W^o_{p2}, $W^o_{кэс}$ и W^o_{m1}, W^o_{m2} и их удельные значения p_{p1}, p_{p2}, $p_{кэс}$ и p_{m1}, p_{m2}, соответствующие на рис. 4 и рис. 5 оптимальным временам разгона t^o_{p1}, t^o_{p2} и торможения t^o_{m1}, t^o_{m2} в первой и второй зонах регулирования скорости тягового ЧРАД (все величины для трамвая и ЧРАД, относящиеся к первой зоне регулирования, обозначаются индексом «1», а ко второй – индексом «2»).

Таблица 2

Значения оптимальных времен t^o_{p1}, t^o_{p2}, t^o_{m1}, t^o_{m2} разгона и торможения трамвая и соответствующих им потребляемых энергий W^o_{p1}, W^o_{p2}, W^o_{m1}, W^o_{m2} и общего электропотребления $W_{кэс}$, а также удельных потреблений энергии p_{p1}, p_{p2}, p_{m1}, p_{m2}, $p_{кэс}$ для разных видов (К′, К″, П′, П″, Л) тахограмм

Вид ТГ	Разгон								Торможение					
	t^o_{p1}	W^o_{p1}	p_{p1}	t^o_{p2}	W^o_{p2}	p_{p2}	$W_{кэс}$	$p_{кэс}$	t^o_{m1}	W^o_{m1}	p_{m1}	t^o_{m2}	W^o_{m2}	p_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
К′	4.2	3793.9	6.334	5.6	12519	4.700	7012.3	2.614	4.2	-2720.4	-4.426	5.0	-8635.6	-3.505
К″	4.0	3799.9	6.104	5.6	12514	4.633	7011.8	2.577	4.2	-2714.2	-4.062	5.0	-8637.7	-3.476
П′	5.0	3837.4	7.419	7.7	12815	3.949	6836.5	2.094	5.0	-2676.7	-5.017	6.7	-8415.8	-2.869
П″	4.3	3943.7	4.415	5.7	12869	4.268	8360.2	2.747	4.3	-2571.3	-2.857	5.0	-8368.7	-3.134
Л	4.0	3799.9	6.104	5.6	12519	4.700	7012.3	2.614	4.2	-2714.2	-4.062	5.0	-8635.6	-3.505

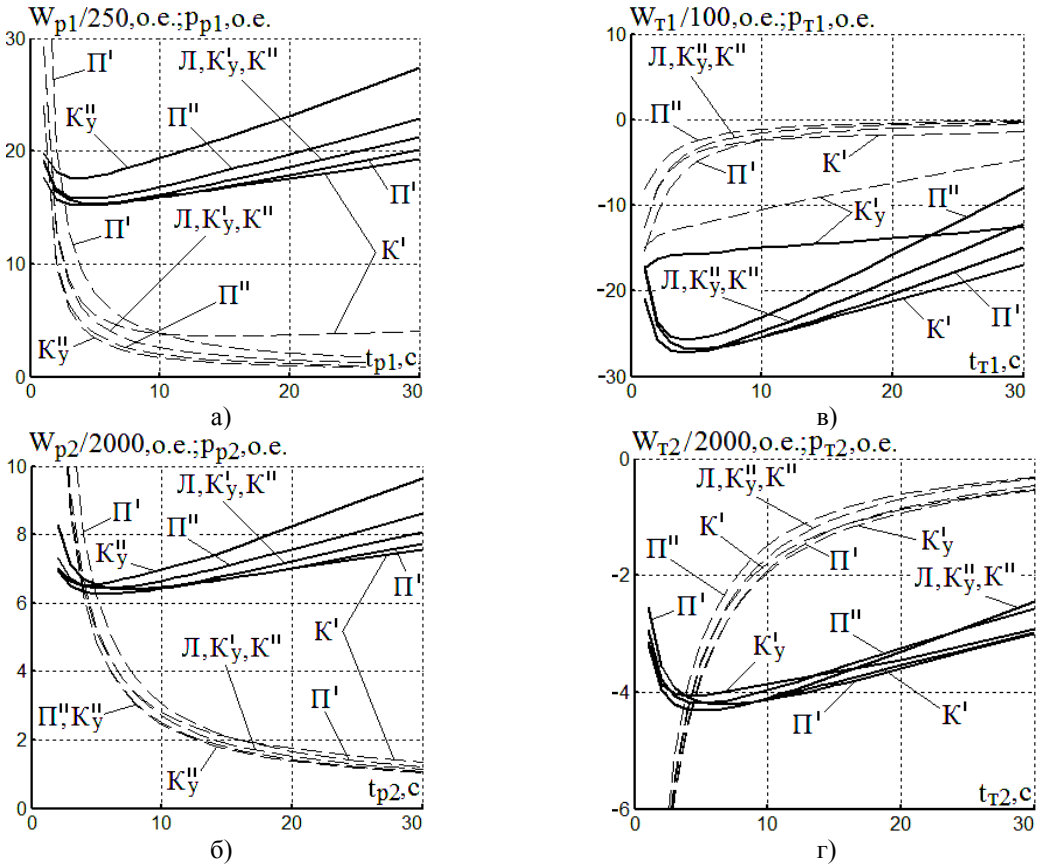


Рис. 4 Зависимости значений электропотребления W_{p1}, W_{p2}, W_{m1}, W_{m2} (показаны сплошной линией) и удельного электропотребления p_{p1}, p_{p2}, p_{m1}, p_{m2} (показаны пунктиром) трамвая при разгоне (а, б) и торможении (в, г) в первой (а, в) и второй (б, г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1}, t_{p2} и торможения t_{m1}, t_{m2} для разных видов (К′, К″, К′$_у$, К″$_у$, П′, П″, Л) тахограмм

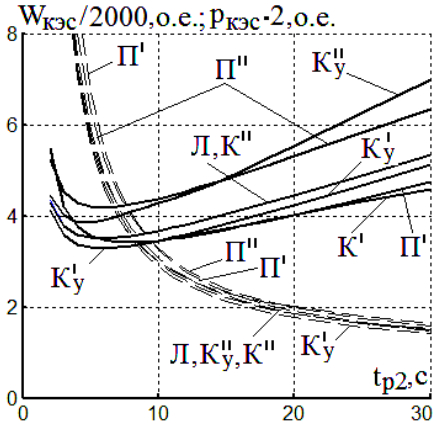


Рис. 5. Зависимости для общего $W_{кэс}$ (показаны сплошной линией) и удельного $p_{кэс}$ потребления энергии (показаны пунктиром) трамваем из контактной электрической сети при разных видах ($К'$, $К''$, $К'_у$, $К''_у$, $П'$, $П''$, Л) тахограмм

При выполненных исследованиях электропотребления и удельного энергопотребления трамвая в пуско-тормозных режимах (результаты которых показаны графиками на рис. 4 и рис. 5) задавались различного вида тахограммы ЧРАД: линейная (Л), параболическая вогнутой ($П'$) и выпуклой ($П''$) формы, квазиоптимальная вогнутой ($К'$) и выпуклой ($К''$) формы, квазиоптимальная вогнутой ($К'_у$) и выпуклой ($К''_у$) формы тахограммы, полученные применительно к удельному электропотреблению. При этом (аналогично рассмотренному в [4]) значения поправочного коэффициента ξ^* (равные ξ_1^* в первой и ξ_2^* – во второй зоне регулирования скорости) соответствуют (при конкретных неизменных длительностях времен разгона t_p или торможения t_m) минимально возможным значениям электропотребления: W_{p1}, W_{p2} или W_{m1}, W_{m2} в режимах разгона или торможения с траекториями K и K'', а при траекториях K'_y, K''_y – минимально возможным удельным значениям электропотребления: p_{p1}, p_{p2} и p_{m1}, p_{m2}.

Рассчитанные для квазиоптимальных траекторий скорости K', K'' и K'_y, K''_y значения соответствующих поправочных коэффициентов ξ_1^* и ξ_2^* представлены на рис. 6.

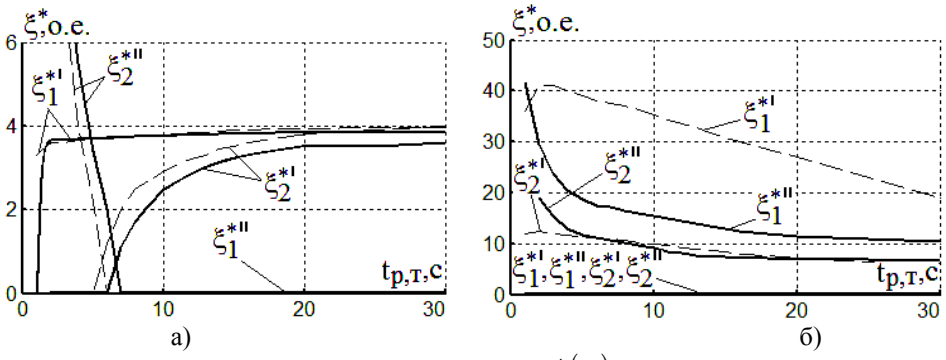


Рис. 6. Зависимости поправочных коэффициентов $\xi^*(t_p)$, $\xi^*(t_m)$ для квазиоптимальных (а – по потреблению, б – по удельному потреблению энергии) тахограмм вогнутой и выпуклой (показаны одним и двумя штрихами соответственно) формы при первой и второй зонах регулирования (показаны индексами 1 и 2 соответственно), изображенные: сплошной линией – для разгона, пунктиром – для торможения

На *пятом этапе*, исходя из допустимых для трамвая максимальных значений ускорения $\upsilon'_{p.max}$ = 1.5 м/с^2 и замедления $|\upsilon'_{m.max}|$ = 1.3 м/с^2 (соответствующих согласно [14] комфортному нахождению пассажиров в городском электротранспорте), определим из полученных в [14] зависимостей рабочие диапазоны изменения длительностей времен разгона t_{p1}, t_{p2} и торможения t_{m1}, t_{m2}, при которых значения ускорений и замедлений трамвая не превышают их максимальных значений, для линейной:

$$t_{p1,2} \geq t^*_{p1,2} = B/\upsilon'_{p.max} \qquad \text{и} \qquad t_{m1,2} \geq t^*_{m1,2} = B/\upsilon'_{m.max}, \tag{13}$$

параболической (вогнутой и выпуклой формы):

$$t_{p1,2} \geq t^*_{p1,2} = 2B/\upsilon'_{p.max}, \qquad t_{m1,2} \geq t^*_{m1,2} = 2B/\upsilon'_{m.max}, \tag{14}$$

и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) траекторий скорости:

$$t_{p1,2} \geq t^*_{p1,2} = \frac{1}{\xi^*\sqrt{K}} \cdot arth\left(\frac{\xi^*\sqrt{K}\cdot B}{\upsilon'_{p.max}}\right), \quad t_{m1,2} \geq t^*_{m1,2} = \frac{1}{\xi^*\sqrt{K}} \cdot arth\left(\frac{\xi^*\sqrt{K}\cdot B}{\upsilon'_{m.max}}\right), \tag{15}$$

где коэффициент B принимает значение, равное: $\upsilon_н$ – при первой зоне регулирования или ($\upsilon_м - \upsilon_н$) – при второй зоне регулирования скорости. Рассчитанные из (13) – (15) для исследуемых траекторий скорости пуско-тормозых режимов трамвая (применительно к значениям его номинальной $\upsilon_н = 24.4$ км/ч = =6.77 м/с и максимальной $\upsilon_м$ =50 км/ч = 13.9 м/с скоростей) минимально возможные (исходя из допустимых значений его ускорения и замедления) длительности времен разгона t^*_{p1}, t^*_{p2} и торможения t^*_{m1}, t^*_{m2} представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета минимально возможных (исходя из максимально допустимых ускорений и замедлений) времен t^*_{p1}, t^*_{p2} и t^*_{m1}, t^*_{m2} разгона и торможения трамвая и соответствующие им потребляемых энергий W^*_{p1}, W^*_{p2}, W^*_{m1}, W^*_{m2} и общего электропотребления $W^*_{кэс}$, а также удельных потребляемых энергий p_{p1}, p_{p2}, $p_{кэс}$, p_{m1}, p_{m2} для разных видов тахограмм

Вид ТГ	Разгон								Торможение					
	t^*_{p1}	W^*_{p1}	p_{p1}	t^*_{p2}	W^*_{p2}	p_{p2}	$W^*_{кэс}$	$p_{кэс}$	t^*_{m1}	W^*_{m1}	p_{m1}	t^*_{m2}	W^*_{m2}	p_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
К′у	4.55	3803.5	5.364	4.77	12548	5.555	6628.6	2.902	5.25	-1560.4	-12.21	5.50	-8075.4	-3.422
К″у	4.55	4405.9	3.750	4.77	13043	5.124	7686.5	2.962	5.25	-2696.4	-3.238	5.50	-8628.2	-3.192
К′	4.55	3795.5	5.931	4.77	12548	5.555	6628.6	2.902	5.25	-2708.0	-3.697	5.50	-8628.2	-3.192
К″	4.55	3803.5	5.364	4.77	12535	5.413	7052.7	3.017	5.25	-2696.4	-3.238	5.50	-8628.1	-3.165
П′	9.04	3937.8	4.188	9.50	12877	3.215	6884.0	1.709	10.44	-2517.9	-2.283	10.96	-8184.0	-1.727
П″	9.04	4145.6	2.199	9.50	13228	2.624	8675.8	1.710	10.44	-2278.7	-1.043	10.96	-7804.7	-1.334
Л	4.52	3802.7	5.400	4.75	12551	5.579	7061.3	3.104	5.22	-2697.2	-3.258	5.48	-8628.7	-3.204

Рассчитав из зависимостей в [13] для текущих значений скорости $\upsilon(t)$ их вторые производные $\upsilon''(t)$ по времени, определим их максимальные (по модулю) значения применительно к исследуемым траекториям скорости трамвая, которые равны: нулю – при разгоне и торможении для линейного вида, $2B/t_p^2$ или $2B/t_m^2$ – при разгоне или торможении для параболического вида, $B\cdot\left(\xi^*\sqrt{K}\right)^2$ – при разгоне и торможении для квазиоптимального вида траектории скорости [14]. Выявлено, что вычисленные максимальные абсолютные значения вторых производных скорости для параболической (вогнутой и выпуклой формы) и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) при разгоне и торможении (с временами, равными и превышающими значения t^*_{p1}, t^*_{p2} и t^*_{m1}, t^*_{m2} из табл.3) составляют менее 0.5 м/с^3 (при этом аналогично требованию к электротранспорту из [14] максимальные значения второй производной скорости для трамвая не должны превышать 2 м/с^3).

На *шестом этапе* применительно к стандартному европейскому циклу городского и пригородного движения NEDC [8] (характеризуемому максимальными скоростями $\upsilon_м = 50$ км/ч движения при временах разгона t_p и торможения t_m, равных 26с) выполнены, исходя из зависимостей (1) – (4), (6), (8), (9) и (12), расчеты: механических (скорости ω ротора тягового ЧРАД и скорости υ трамвая, угла α положе-

ния ротора тягового двигателя и пройденного расстояния $s = \alpha / z_p \cdot \varepsilon$ трамваем, где $z_p = 2$ – число пар полюсов тягового ЧРАД), электромеханических (электромагнитного момента M тягового двигателя, его модуля Ψ_r обобщенного вектора потокосцепления ротора и модуля i_1 обобщенного вектора статорного тока) и энергетических (суммарной потребляемой мощности P_Σ всеми тяговыми ЧРАД и энергии $W_{кэс}$ трамваем из КЭС; напряжения $u_{ск}$, тока $i_{ск}$ и изменения энергии $\Delta W_{ск}$ для суперконденсатора) переходных процессов разгона и торможения трамвая с суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии, графические зависимости которых приведены на рис. 7.

Для перехода при оценке электромеханических и энергетических процессов от относительных к абсолютным значениям величин следует полученные в относительных единицах значения умножить на базисные значения, приведенные в табл.4.

Таблица 4

Базисные значения величин для тягового двигателя

Величина	I_1	M, M_c	Ψ	ω_1	ω	$P, \Delta P$	ΔW	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	$0.01/\pi$

На этом же этапе определим при цикле движения NEDC суммарное электропотребление W_Σ трамваем (со схемой электропитания на рис. 1), затрачиваемое на его движение между соседними остановками (находящимися друг от друга, например, на расстоянии, равном L_o = 470 м).

Данное суммарное электропотребление W_Σ трамвая находится с учетом (1) – (3), (8), (9) и (12) из приведенных в [4, 7] зависимостей:

$$\left.\begin{aligned}
&W_\Sigma = W_{кэс} + W_{уст}, \quad W_{уст} = P_{\Sigma.уст} \cdot t_{уст}, \quad t_{уст} = \frac{\left[L_o - \left(s_p + s_m\right)\right]}{\upsilon_{уст}}, \quad \chi_o = \frac{2}{k_r \cdot L_m}\left(X \cdot Y\right)^{0.5}, \\
&P_{\Sigma.уст} = n \cdot \left(M_{с.дв} \cdot \omega_{уст} + \Delta P_{дв} + \Delta P_{мод}\right) / \eta_{сп} + P_{сн}, \quad \Delta P_{дв} = \Delta P_{эм} + d \cdot \omega_{уст}^2, \quad \Delta P_{эм} = \left|M_{с.дв}\right| \cdot \chi_o, \\
&\omega_1 = \frac{1}{2\tau}\left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \tau \cdot \omega_{уст}}\right), \quad \tau = R_r M_c / \Psi_{rн}^2, \quad X = R_s + 0.005 \cdot \frac{P_{дв.н}}{\eta_н} + k_r^2\left(R_r + \frac{\Delta P_{ст.н} L_{\sigma r}^2 \omega_1^\lambda}{\Psi_{mн}^2}\right), \\
&Y = R_s + 0.005 \cdot P_{дв.н} / \eta_н + \Delta P_{ст.н} L_{\sigma r}^2 \omega_1^\lambda / \Psi_{mн}^2
\end{aligned}\right\}, \qquad (16)$$

где W_p и W_m – электропотребление трамвая в режимах разгона и торможения; $P_{\Sigma.уст}$ и $W_{уст}$ – суммарное потребление соответственно мощности и энергии в установившемся режиме работы трамвая; R_s и R_r – активные сопротивления фазных соответственно статорной и роторной обмоток тягового ЧРАД; $\omega_{уст}$ и ω_1 – соответственно установившееся значение скорости и соответствующее ему значение угловой частоты статора тягового двигателя; L_m и $L_{\sigma r}$ – индуктивности соответственно намагничивания и рассеяния ротора тягового ЧРАД; k_r – коэффициент связи ротора двигателя; $\Delta P_{эм}$ и $\Delta P_{ст.н}$ – соответственно текущее значение магнитных потерь мощности и номинальные потери мощности в стали тягового ЧРАД; $\upsilon_{уст}$ и $t_{уст}$ – соответственно значения установившейся скорости трамвая и длительности времени режима работы с установившейся скоростью: $P_{дв.н}$ и $\eta_н$ – номинальные значения соответственно мощности и КПД тягового ЧРАД; $\eta_{сп} = \eta_{dc1} \cdot \eta_u$ – КПД силового преобразователя; τ, X, Y – расчетные коэффициенты. Результаты расчетов представлены в табл.5.

Удельный расход энергии трамваем при движении в цикле NEDC находится (применительно к исследуемым видам тахограмм) из соотношения:

$$w = W_\Sigma \cdot W_б / \left(3600 \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{L}_0\right) \text{ Втч/т·км}, \qquad (17)$$

где $m = 26.8$т и $L_0 = 0.47$ км – соответственно масса полного трамвая и расстояние между соседними остановками; W_Σ – суммарное потребление энергии между соседними остановками (удаленными друг от друга на указанное расстояние). Результаты выполненных расчетов приведены в табл.5.

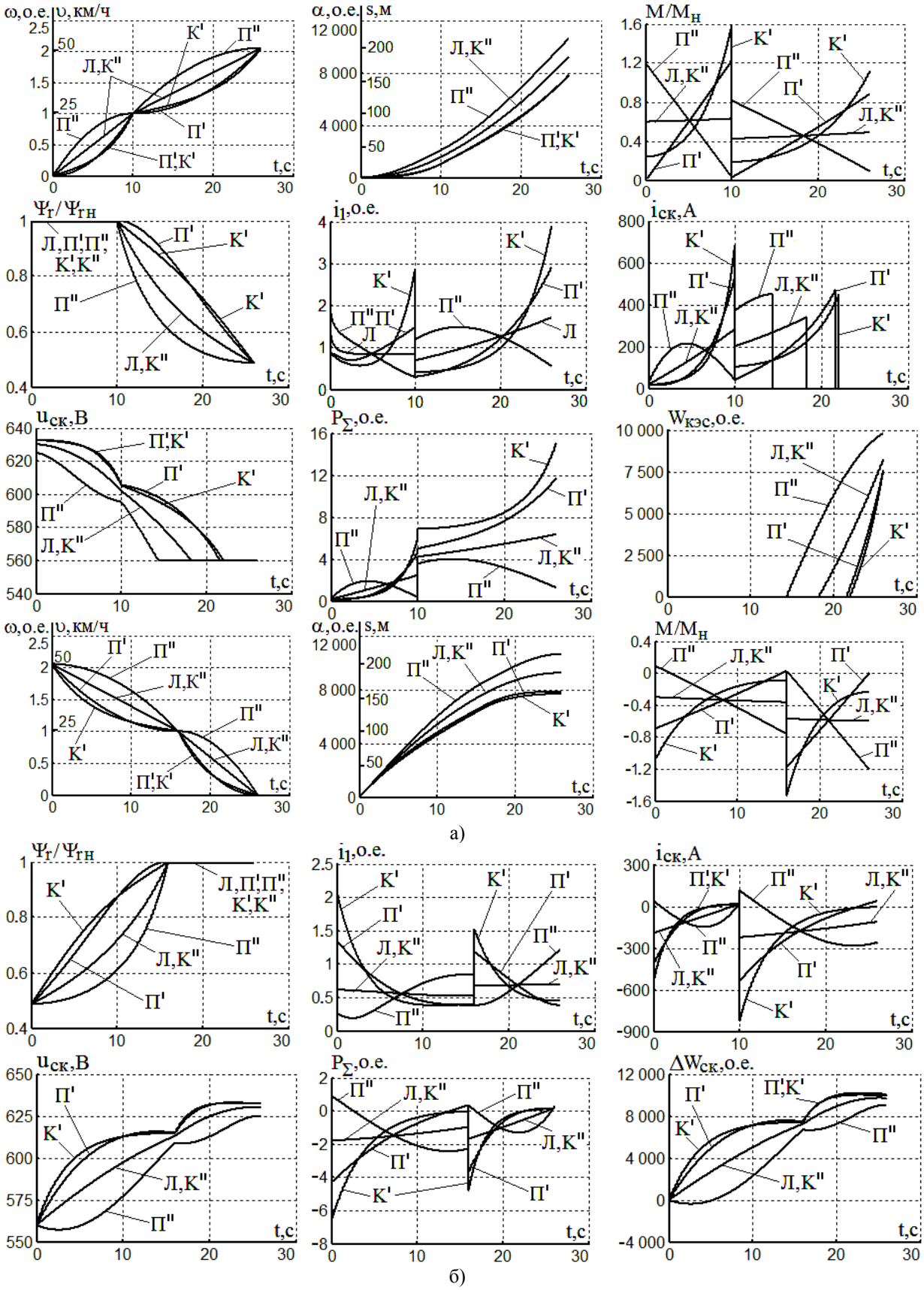


Рис. 7 Электромеханические и энергетические процессы для разгона (а) и торможения (б) трамвая при цикле движения NEDC для параболических вогнутой (П′) и выпуклой (П″), квазиоптимальной вогнутой (К′), квазиоптимальной выпуклой (К″) и линейной (Л) тахограмм

Таблица 5

Результаты расчета удельного расхода w энергии и суммарного электропотребления W_{Σ} трамвая за время движения (с циклом NEDC) между остановками ($L_o = 470$ м, $\upsilon_м = 50$ км/ч) для разных видов ($К'_у$, $К''_у$, $К'$, $К''$, $П'$, $П''$, Л) его тахограмм с временами разгона и торможения:

$t_{p1} = t_{m1} = 10$ **с и** $t_{p2} = t_{m2} = 16$ **с**

Вид ТГ	$\eta_{ск.р}$	$\eta_{ск.т}$	$u_{ск.м}$	$t_{уст}$	s_p	s_m	$s_{уст}$	W_p	W_m	$W_{кэс}$	$p_{кэс}$	$W_г$	$W_{уст}$	W_{Σ}	w
	%	%	В	с	м	м	м	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	Вт·ч/т·км
$К'_у$	99.5	95.3	625.6	10.3	199.1	128.3	142.6	17807	-8746	7797	1.017	-9759	3211	11008	53.72
$К''_у$	98.4	99.3	630.2	0.47	264.5	199.1	6.46	20204	-9763	9938	1.055	-9785	147	10085	49.22
$К'$	99.4	98.4	632.7	9.76	169.0	165.4	135.6	17522	-10083	7567	1.115	-10163	3043	10610	51.78
$К''$	99.5	99.3	630.2	5.17	199.1	199.1	71.8	17807	-9763	8234	1.074	-9785	1612	9846	48.05
$П'$	99.4	98.8	632.9	9.53	168.8	168.8	132.4	17505	-10202	7521	1.109	-10309	2971	10492	51.20
$П''$	99.4	100	624.9	0.81	229.4	229.4	11.2	18571	-9385	9808	1.148	-9447	253	10061	49.10
Л	99.5	99.3	630.2	5.17	199.1	199.1	71.8	17807	-9763	8234	1.074	-9785	1612	9846	48.05

На *седьмом этапе* оценим запас хода трамвая на горизонтальном участке дороги при исчезновении напряжения в контактной сети ($u_{кэс} = 0$) и питании инвертора АИН-ШИМ (при закрытых транзисторах в преобразователе напряжения «dc/dc1» [11, 12] в схеме на рис. 1) от первоначально заряженного (до его заданного напряжения $U^*_{ск} = 560$ В) суперконденсатора СК. При дальнейших расчетах: во-первых, условимся, что допустимый разряд СК характеризуется снижением на нем напряжения до 70% от заданного значения $U^*_{ск}$ (то есть, в диапазоне от $U^*_{ск} = 560$ В до $U_{ск.min} = 0.7U^*_{ск} = 392$ В); и, во-вторых, будем полагать, что при исчезновении напряжения КЭС автоматически от САУ осуществляется ограничение максимальной скорости троллейбуса на уровне $\upsilon_м = 0.7\upsilon_н$ (что составляет 17.1 км/ч для трамвая [4]) и соответствует значению $\omega = 0.7\omega_{1н} = 0.7$ о.е. скорости его тягового ЧРАД (при которой при указанном снижении напряжения на входе инвертора обеспечивается функционирование тягового двигателя в первой зоне регулирования скорости с номинальным значением $\Psi_{гн}$ потокосцепления ротора [4, 7]).

Вычислим начальное значение энергии заряженного суперконденсатора:

$$W^*_{ск} = 0.5C_{ск} \cdot \left(U^*_{ск}\right)^2 / 3600 = 1.516 \text{ кВтч}, \tag{18}$$

и определим отдаваемую этим конденсатором энергию (при его разряде до напряжения $U_{ск.min}$):

$$\Delta W_{ск} = \frac{0.5C_{ск}}{3600}\left[\left(U^*_{ск}\right)^2 - U^2_{ск.min}\right] = 0.773 \text{ кВтч}, \tag{19}$$

где 3600 – переводной коэффициент из кДж в кВтч.

Исходя из энергетического баланса, составленного применительно к движению трамвая на упомянутой пониженной скорости $\upsilon_м = 0.7\upsilon_н$ после исчезновения напряжения КЭС (на протяжении длительности времени, пока напряжение на суперконденсаторе не уменьшиться до значения $0.7U^*_{ск}$):

$$\Delta W_{ск} = w \cdot m \cdot s, \tag{20}$$

определим запас хода (пробег) трамвая при этом движении из зависимости:

$$s \approx \Delta W_{ск} / w \cdot m \cdot, \tag{21}$$

где $\Delta W_{ск}$ – вычисленное из (18) значение отдаваемой энергии СК в этом режиме; w – здесь удельный расход энергии трамвая, соответствующий его разгону до пониженной скорости $\upsilon_м = 0.7\upsilon_н = 17.1$ км/ч, установившемуся движению на этой скорости и последующему торможению до остановленного состояния (при преодолении того же расстояния между соседними остановками, равного 470 м). Применительно к полной массе $m = 26.8$ т трамвая и для пуско-тормозных режимов с линейной формой тахограмм

рассчитанный из (17) удельный расход w энергии трамваем при движении с упомянутой пониженной скоростью составляет 28.72 Вт·ч/т·км, а вычисленный из (21) запас хода s примерно равен 1000 м.

Представляет практический интерес оценка длительностей времен ускоренного заряда СК неизменным значением постоянного тока $I_{ск} = 100$ А (через диод V в схеме на рис. 1) на электрической заправочной станции применительно к следующим диапазонам изменения напряжения $u_{ск}$ на указанном суперконденсаторе:

- от нуля до заданного значения $U^*_{ск} = 560$ В: $\tau_{з1} = \dfrac{C_{ск}U^*_{ск}}{I_{ск}} = \dfrac{34.8 \cdot 560}{100} = 195$ (с) ;

- от напряжения $U_{ск.min} = 392$ В до напряжения $U^*_{ск} = 560$ В:

$$\tau_{з2} = \frac{C_{ск}\left(U^*_{ск} - U_{ск.min}\right)}{I_{ск}} = \frac{34.8 \cdot (560 - 392)}{100} = 58.5\,(\text{с}).$$

Аналогично из последних двух соотношений получим, что при увеличении зарядного тока $I_{ск}$ до 250 А времена заряда $\tau_{з1}$ и $\tau_{з2}$ сокращаются в 2.5 раза и становятся равными соответственно 78 с и 23 с.

Также оценим в ночное (нерабочее) время (когда трамвай отключен от КЭС и выключены все его электропотребители) происходящее уменьшение напряжения $u_{ск}$ на суперконденсаторе, вызванное его разрядом от протекания в нем тока утечки [9]. Задавшись длительностью ночного (нерабочего для трамвая) интервала времени, равным $\tau_{нр} = 6$ч, вычислим из соотношений [14]:

$$U_{ск.min} \approx U^*_{ск} \cdot e^{-\tau_{нр}/T_{ск}} \quad \text{и} \quad T_{ск} = r_{ут}C_{ск} \tag{22}$$

значение напряжения $U_{ск.min}$ для этого разряженного (после ночи) суперконденсатора: $U_{ск.min}$=313В, где $T_{ск} = 10.3$ч – электромагнитная постоянная времени разряда суперконденсатора. Далее из формулы (19) рассчитаем соответствующие данному разряду ежесуточные потери энергии $\Delta W_{ск}$=1.042 кВтч в СК. Очевидно, эти потери энергии должны быть восполнены (путем заряда СК до его заданного напряжения $U^*_{ск}$) перед утренним выездом из парка на маршрут для каждого трамвая.

Из публикации [5] известно, что за счет применения емкостного накопителя генерируемой энергии на практике для трамвая экономится (из-за обеспечиваемого устойчивого режима генерации энергии в накопитель независимо от наличия или отсутствия на тех же троллеях другого электротранспорта, потребляющего электроэнергию) до $\delta = 23\%$ от общей потребляемой энергии. С учетом этого рассчитаем годовой размер ожидаемой экономии электроэнергии, приходящейся на один трамвай и достигаемой за счет применения суперконденсаторного накопителя энергии:

$$Э_г = \Delta W \cdot 15 \cdot 18 \cdot 365 \cdot W_б / 3600 = 17750 \text{ кВтч}, \qquad \Delta W \approx W_{кэс}\left[1/(1-\delta) - 1\right] = 9807.5 \cdot 0.2987 = 2930 \text{ о.е.},$$

где ΔW – экономия энергии при одном пуско-тормозном режиме трамвая (на примере параболической тахограммы вида П″ согласно табл.5, для которой $W_{кэс} = 9808$ о.е.); 15 – среднее количество этих режимов в час; 18 – количество рабочих часов для трамвая в сутки; 365 – число рабочих дней в году; $W_б$ – базисное значение энергии из табл.4; 3600 – переводной коэффициент энергии из кДж в кВт·ч.

ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенной в пуско-тормозных режимах оптимизации электропотребления трамвая, снабженного тяговым ЧРАД и суперконденсаторным накопителем энергии, установлено, что в первой и второй зонах регулирования скорости наименьшее (согласно рис. 5, табл.3 и табл.5) потребление энергии из контактной электрической сети достигается при использовании квазиоптимальной К′ тахограммы вогнутой формы, а наименьшее удельное потребление энергии – при применении квазиоптимальной К′$_у$ вогнутой формы и параболической П′ вогнутой формы тахограмм. Квазиоптимальные тахограммы рассчитываются аналогично [13] в виде временных функций гиперболического синуса (содержащих в аргументе поправочный коэффициент ξ^*, значения которого согласно рис. 6 зависят от длительностей времен разгона и торможения трамвая).

2. Выявлен «U»-образный вид зависимостей (показанных на рис. 4 и рис. 5) потребления W_{p1}, W_{p2}, $W_{кэс}$ и генерации W_{m1}, W_{m2} энергии трамваем от длительности времен разгона и торможения применительно ко всем видам (линейному, параболическому и квазиоптимальному) исследуемых тахограмм. Такой вид зависимостей свидетельствует о наличии для первой и второй зон регулирования скорости оптимальных длительностей времен разгона t_{p1}^{o}, t_{p2}^{o} и торможения t_{m1}^{o}, t_{m2}^{o}, обеспечивающих минимальное значение электропотребления или максимальное значение генерации энергии в пуско-тормозных режимах. Однако, исходя из существующих ограничений в пуско-тормозных режимах для трамвая по допустимым значениям его ускорения и замедления, указанные оптимальные времена на практике оказываются нереализуемыми.

3. Установлен (согласно рис. 4 и рис. 5) для первой и второй зон регулирования скорости трамвая монотонно убывающий вид зависимости удельных электропотреблений p_{p1}, p_{p2}, $p_{кэс}$ и p_{m1}, p_{m2} при увеличении длительности времен разгона и аналогичный монотонно убывающий вид удельной генерации при увеличении длительности времени торможения. Из этого следует, что для минимизации электропотребления и максимизации генерации необходимо при пуско-тормозных режимах задавать наименьшие на практике реализуемые (из табл.3) значения длительностей времен разгона t_{p1}^{*}, t_{p2}^{*} и торможения t_{m1}^{*}, t_{m2}^{*} при всех рассмотренных видах траекторий изменения скорости, а для минимизации удельных значений электропотребления и генерации – задавать увеличенные значения этих времен.

5. Полученные аналитические зависимости (6) – (12), (16) позволяют рассчитать для пуско-тормозных и установившихся режимов трамвая потребление, генерацию и потери электроэнергии в схеме электропитания на рис. 1, снабженной суперконденсаторным накопителем энергии.

6. Проведенные исследования переходных и установившихся режимов работы трамвая с суперконденсаторным накопителем энергии подтверждают возможность их практической реализации (поскольку согласно рис. 7 все электромеханические и энергетические параметры трамвая, тягового двигателя и суперконденсатора находятся в пределах для них допустимых значений), а также свидетельствуют (из табл. 5) о значениях КПД суперконденстора, равных (98.4 – 99.5) %, и удельном расходе энергии трамваем, равном (48 – 54) Вт·ч/т·км для исследуемых траекторий скорости.

7. Из результатов исследования суммарного электропотребления W_{Σ} трамваем для европейского цикла движения NEDC следует, что согласно табл.5 переход в пуско-тормозных режимах от параболического вида выпуклой и вогнутой формы траекторий к линейной форме траектории скорости позволяет уменьшить удельный расход энергии трамвая на (2 – 6) %.

8. Согласно рис. 4, рис. 5 и табл.5 переход от длительностей времен разгона и торможения, соответствующих циклу NEDC, к минимально возможным (исходя из допустимых максимальных ускорений и замедлений трамвая) их значениям из табл.3, позволяет для параболической выпуклой формы траектории скорости уменьшить на 11.5 % электропотребление трамвая в пуско-тормозных режимах.

9. Полученные результаты исследований направлены на уменьшение непроизводительных потерь энергии в трамвае, снабженном тяговыми ЧРАД, и рекомендуются для практического использования проектантам и службам эксплуатации городского электротранспорта.

Список литературы

1. Интернет портал «ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга», https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (07.03.2019)

2. Сайт «Харьков транспортный» http://gortransport.kharkov.ua/ps_models/50/ (23.10.2018)

3. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network / J. Edstrand. – Goteborg, Sweden, 2012. – 101 p.

4. Волков В.А. Энергосберегающее управление тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая / В.А. Волков // Гірнича електромеханіка та автоматика. – Днепр: НТУ «Дніпровська політехніка». – 2018. – №100. – С. 52 – 69.

5. 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.

6. 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.

7. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470с.

8. Интернет портал «ЭкоТехника», https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html (07.03.2019)

9. Интернет портал «Maxwell», http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule_DS_3000246_6.pdf (07.03.2019)

10. Singh Th. P. Comparative Performance Investigation of Battery and Ultracapacitor for Electric Vehicle Applications / Th. P. Singh, S.Y. Kumar // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, no. 20, pp. 10197 – 10204.

11. Gopikrishnan M. Battery/ultra Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles / M. Gopikrishnan // Middle-East Journal of Scientific Research.–2014.–pp.1122 –1126.

12. Michalczuk M. A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle / M. Michalczuk, L. M. Grzesiak, B. Ufnalski // Przeglad Elektrotechniczny. – 2012. – pp. 158 – 162.

13. Волков В.А. Энергосберегающее управление тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем троллейбуса / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчуг. – 2018. – № 4 (44). – С. 38 – 52. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.4.44.38-52

14. Волков В.А. Оптимизация электропотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2019. – Вип. 1(45) – С. 8 – 24.

15. Thakur A. A Voltage and State of Charge Control Technique for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Standalone Photovoltaic Application/ A. Thakur, L. M. Saini // IEEE. – 2015.–pp. 1–6.

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

УДК 621.4

Ю.И. Оксень, канд. техн. наук, Е.П. Трофимова, В.П. Писарев
(Украина, Днепр, НТУ «Днепровская политехника»)
И.Л. Дякун, канд. техн. наук
(Украина, Днепр, Институт геотехнической механики НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ТЕПЛА ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Аннотация. *Разработана схема утилизации вторичной теплоты газопоршневых установок путем преобразования ее в электрическую энергию с помощью двухконтурной теплосиловой установки с различными рабочими веществами в контурах. Разработаны метод и алгоритм расчета максимально эффективного теплового режима установки в условиях заданных ограничений на температурные напоры в теплообменных аппаратах. На основе математического моделирования тепловых режимов установлено, что в условиях газопоршневой установки JMS-620 можно утилизировать до 3800 кВт тепловой мощности и выработать при этом до 500 кВт электрической мощности. КПД по преобразованию вторичной теплоты в электроэнергию достигает 13,0%, что приводит к повышению общего КПД газопоршневой установки по выработке электроэнергии с 42,9 до 50,0%.*

Ключевые слова: *газопоршневая установка, утилизация вторичного тепла, выработка электроэнергии, теплосиловая установка, моделирование максимально эффективных тепловых режимов*

Анотація. *Розроблено схему утилізації вторинної теплоти газопоршневих установок шляхом перетворення її на електричну енергію за допомогою двоконтурної теплосилової установки з різними робочими речовинами в контурах. Розроблено метод і алгоритм розрахунку максимально ефективного теплового режиму установки в умовах заданих обмежень на температурні напори в теплообмінних апаратах. На основі математичного моделювання теплових режимів встановлено, що в умовах газопоршневої установки JMS 620 можна утилізувати до 3800 кВт теплової потужності і виробити при цьому до 500 кВт електричної потужності. ККД з перетворення вторинної теплоти на електроенергію сягає 13,0%, що призводить до підвищення загального ККД газопоршневої установки з вироблення електроенергії з 42,9 до 50,0%.*

Ключові слова: *газопоршневі установки, утилізація вторинного тепла, теплосилова установка, вироблення електроенергії, моделювання максимально ефективних теплових режимів*

Abstract. *A scheme has been developed for utilization of secondary heat of gas engine by converting it into electrical energy using a two-circuit thermal power installation with various working substances in the circuits. A method and an algorithm for calculating the most efficient thermal regime of the installation under the conditions of specified limitations on temperature pressures in heat exchangers have been developed. On the basis of mathematical modeling of thermal conditions, it was found that under the conditions of the gas engine JMS 620 it is possible to utilize up to 3,800 kW of thermal power and generate up to 500 kW of electrical power. The efficiency of conversion of secondary heat into electricity reaches 13.0%, which leads to an increase in the overall efficiency of the gas engine for generating electricity from 42.9 to 50.0%.*

Keywords: *gas engine, recycling of secondary heat, thermal power installation, power generation, modeling of the most efficient thermal conditions*

Постановка задачи исследования.

В последние годы на угольных шахтах Украины в качестве способа утилизации метана, добываемого дегазационными системами, начинает применяться сжигание его в газопоршневых установках (ГПУ) [1]. Эти установки являются когенерационными и вырабатывают электрическую энергию и теплоту. На практике, однако, возникают случаи, когда в связи с удаленностью тепловых потребителей вырабатываемая вторичная теплота сбрасывается в окружающую среду. Повысить эффективность ГПУ в этих случаях можно путем преобразования сбрасываемой теплоты в дополнительную электрическую энергию с помощью теплосиловых установок (ТСУ), работающих на низкокипящих рабочих телах (НРТ). В работе [2] предложена одна из возможных схем такого преобразования, однако ее эффективность, как следует из приведенных данных, невысока (КПД по выработке электроэнергии не превышает 10 %).

Целью данного исследования является совершенствование и повышение эффективности преобразования вторичного тепла ГПУ в электрическую энергию.

Методика и результаты исследования. Анализ схемы ТСУ. рассмотренной в работе [2], показал, что ее невысокая эффективность обусловлена, в основном, значительными потерями эксергии вторичной теплоты при передаче ее от выхлопных газов к воде системы охлаждения двигателя, которая имеет значительно более низкую температуру (110 °С), чем выхлопные газы (420 °С). Эти потери могут быть существенно снижены, если теплоту от выхлопных газов передать непосредственно рабочему телу, циркулирующему в отдельном контуре ТСУ. Схема утилизации вторичной теплоты ГПУ путем преобразования ее в электрическую энергию с помощью двухконтурной ТСУ приведена на рис. 1.

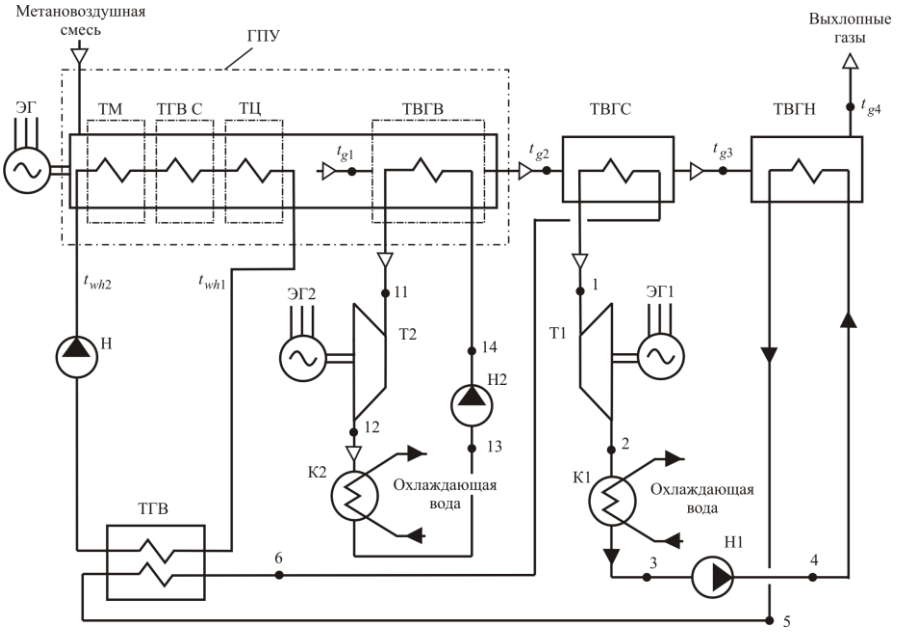


Рис. 1. Схема утилизации вторичной теплоты ГПУ на основе двухконтурной ТСУ: ГПУ – газопоршневая установка; ТМ – теплообменник масла; ТГВС – теплообменник газовоздушной смеси; ТЦ – теплообменник цилиндров; ТВГВ, ТВГС и ТВГН – теплообменники выхлопных газов: высоко-, средне- и низкотемпературный; ТГВ – теплообменник горячей воды; Т1, Т2 – турбины; ЭГ, ЭГ1, ЭГ2 – электрогенераторы;К1, К2 – конденсаторы; Н, Н1, Н2 - насосы

В приведенной схеме можно выделить низкотемпературный контур 1-2-3-4-5-6-1 и высокотемпературный 11-12-13-14-11. В высокотемпературном контуре осуществляется преобразование высокопотенциальной теплоты выхлопных газов, а в низкотемпературном – низкопотенциальной теплоты горячей воды системы охлаждения двигателя и остаточной теплоты выхлопных газов в работу. Каждый контур представляет собой, по сути, ТСУ, работающую по циклу Ренкина. При этом теплота конденсации рабочих тел контуров передается в конденсаторах К1 и К2 охлаждающей воде и далее отводится в окружающую среду.

Термодинамические циклы изменения состояния рабочих веществ в контурах приведены на рис. 2 в *T, s* – координатах (*T* – температура, *s* – энтропия).

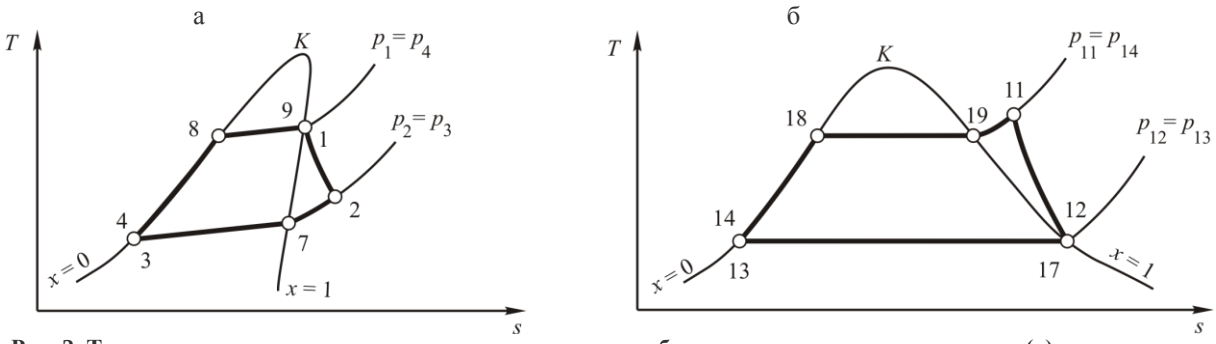


Рис. 2. Термодинамические циклы изменения состояния рабочих тел в низкотемпературном (а) и высокотемпературном (б) контурах

Номера характерных точек циклов соответствуют номерам точек, указанным на схеме ТСУ (см. рис. 1).

Для высокотемпературного контура цикл изображен для случая применения в качестве рабочего тела веществ, для которых $(\partial T/\partial s)_{x=1} < 0$ и которые изобарно кипят и конденсируются при постоянной температуре (водяной пар).

Для низкотемпературного контура цикл изображен для смесевого рабочего тела типа бутан-пентановой смеси, для которого $(\partial T/\partial s)_{x=1} > 0$ и которое изобарно кипит и конденсируется при переменной температуре.

В данном анализе в качестве рабочего вещества высокотемпературного контура принята вода, а низкотемпературного – смесь бутана и пентана, 85% и 15% по массе соответственно. Процессы нагрева и парообразования рабочих тел 4-8-9-1, 14-18-19-11, а также процессы их охлаждения и конденсации 2-7-3 и 12-17-13 на рис. 2 изображены как изобарные.

Возможность повышения энергетической эффективности двигательных циклов и увеличения выработки электрической энергии ограничивается температурой горячего и холодного источников теплоты. Максимальная эффективность будет иметь место тогда, когда температура рабочего тела будет отличаться от температур этих источников на бесконечно малую величину. Однако для передачи теплоты в этих случаях потребуется бесконечно большая поверхность теплообмена теплообменных аппаратов, поэтому реализовать такие циклы практически невозможно. Условием практической реализации циклов является отличие температуры рабочего тела от температур греющих и охлаждающих сред на конечную величину. Это условие будет выполнено, если температурные напоры на концах теплообменных аппаратов и в сечениях, в которых начинается кипение нагреваемой среды или конденсация охлаждаемой среды, будут больше некоторых минимальных, т. е. если в каждом j-м характерном сечении

$$\Delta t_j \geq \Delta t_{j\,\min} \tag{1}$$

где Δt_j and $\Delta t_{j\,\min}$ – элементы множеств фактических $\Delta t_j \in T$ и минимальных граничных $\Delta t_{j\,\min} \in T_{\min}$ температурных напоров в характерных сечениях теплообменных аппаратов, °С.

$$T = \{\Delta t_{g1}, \Delta t_{g2}, \Delta t_{g3}, \Delta t_{g4}, \Delta t_{wh2}, \Delta t_{cr}, \Delta t_{cr1}, \Delta t_{wc1}, \Delta t_{cr7}\}, \tag{2}$$

$$T_{\min} = \{\Delta t_{g1\min}, \Delta t_{g2\min}, \Delta t_{g3\min}, \Delta t_{g4\min}, \Delta t_{wh\min}, \Delta t_{cr\min}, \Delta t_{cr1\min}, \Delta t_{wc\min}, \Delta t_{cr7\min}\}, \tag{3}$$

$$\Delta t_{g1} = t_{g1} - t_{11}, \tag{4}$$

$$\Delta t_{g2} = t_{g2} - t_1, \tag{5}$$

$$\Delta t_{g3} = t_{g3} - t_6, \tag{6}$$

$$\Delta t_{g4} = t_{g4} - t_4, \tag{7}$$

$$\Delta t_{wh2} = t_{wh2} - t_5, \tag{8}$$

$$\Delta t_{cr} = t_{cr} - t_8, \tag{9}$$

$$\Delta t_{cr1} = t_{cr1} - t_{18}, \tag{10}$$

$$\Delta t_{wc1} = t_3 - t_{wc1}, \tag{11}$$

$$\Delta t_{cr7} = t_7 - t_{cr7}, \tag{12}$$

где t_1, t_3, t_4, t_5, t_7, t_8, t_{10}, t_{11}, t_{17}, t_{18} – температура рабочих веществ в характерных точках циклов; t_{g1}, t_{g2}, t_{g3} и t_{g4} – температура выхлопных газов на входе и выходе теплообменников ТВГВ, ТВГС и ТВГН (см. рис. 1); t_{cr} – температура греющей среды в сечении теплообменного аппарата, в котором начинается кипение НРТ низкотемпературного контура, t_{cr1} – температура выхлопных газов в сечении теплообменника ТВГВ, в котором начинается кипение рабочего вещества высокотемпературного контура; t_{wh2} – температура горячей воды системы охлаждения двигателя на выходе теплообменника ТГВ; t_{cr7} – температура охлаждающей воды в сечении конденсатора К1, в котором начинается конденсация НРТ; t_{wc1} – температура охлаждающей воды на входе в конденсаторы К1 и К2.

Соотношение между температурами греющих и нагреваемых сред при движении вдоль поверхности теплообмена F в теплообменных аппаратах ТВГВ, ТВГС, ТВГН и ТГВ показано на рис. 3.

При известном составе выхлопных газов, их массовом расходе m_g, температуре на входе в теплообменник ТВГВ t_{g1}, тепловой мощности теплообменника ТГВ Q_{wh}, температуре горячей воды на его входе t_{wh1} и выходе t_{wh2} расчет сводится к определению таких значений температур выхлопных газов t_{g2}, t_{g3} и

t_{g4}, при которых в условиях ограничений (1) вырабатываемая электрическая мощность будет максимальной

$$N_{el} = f\left(t_{g2}, t_{g3}, t_{g4}\right) \to \max . \quad (13)$$

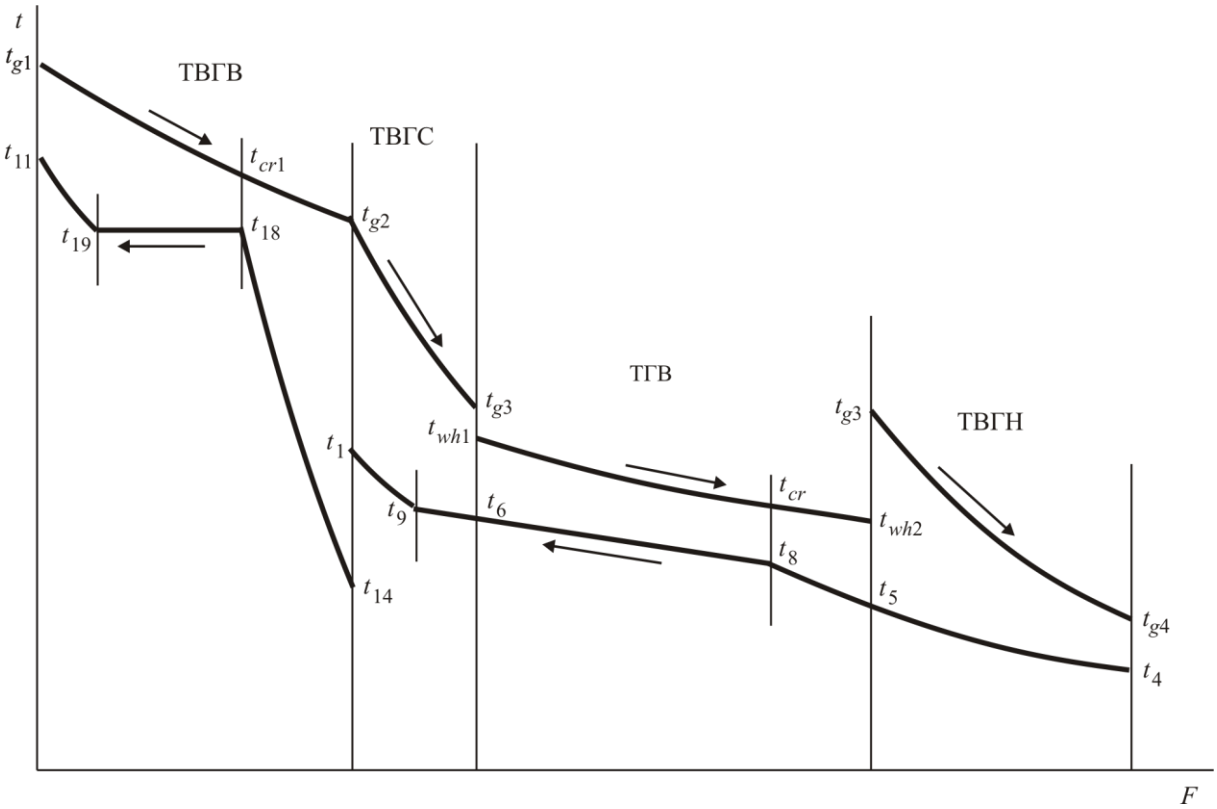


Рис. 3. Изменение температур сред в теплообменных аппаратах двухконтурной ТСУ

Расчет осуществляется методом последовательных приближений. Вектор искомых параметров t_{g2}, t_{g3}, t_{g4} на каждой расчетной итерации формируется алгоритмом метода поиска оптимального решения, в качестве которого принят метод комплексов [3, 4].

Для сформированного вектора t_{g2}, t_{g3} и t_{g4} производится расчет параметров термодинамических циклов и теплового режима контуров ТСУ. Неизвестные параметры в характерных точках циклов определяются в результате совместного решения уравнений термодинамических процессов в элементах ТСУ, уравнений состояния рабочих тел и уравнений материального и энергетического баланса отдельных элементов, а также контуров и ТСУ в целом. После проверки на соответствие рассчитанного теплового режима системе ограничений (1) в направлении улучшения решения задачи формируется новый вектор искомых параметров. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

Моделирование тепловых режимов ТСУ произведено для условий утилизации вторичного тепла ГПУ JMS-620 фирмы GE Jenbacher при следующих исходных данных:

- температура выхлопных газов на входе в теплообменник ТВГВ t_{g1} = 420,6 °С;
- расход выхлопных газов, m_g = 4,872 кг/с;
- температура охлаждающей воды на входе и выходе теплообменника ТГВ t_{wh1} = 88,6 °С, t_{wh2} = 70 °С;
- тепловая мощность теплообменника ТГВ Q_{wh} = 1358 кВт;
- температура охлаждающей воды на входе и выходе конденсаторов К1 и К2 t_{wc1} =20 °С, t_{wc2} =25 °С;
- минимальный температурный напор в конденсаторах К1 и К2 $\Delta t_{wc\,\min}$ = 5 °С.
- давление, температура и относительная влажность исходной метановоздушной смеси, p_{ini} =101,3 кПа, t_{ini} = 30 °С, φ_{ini} = 0,80;
- давление выхлопных газов p_g = 101,3 кПа;
- коэффициент избытка воздуха в исходной метановоздушной смеси α = 1,9;
- изоэнтропные КПД турбин и насосов η_{st} = 0,7; η_{sp} = 0,7;
- механический КПД турбин и насосов η_{mech} = 0,97;
- КПД электрогенераторов и электродвигателей η_{el} = 0,95.

С целью упрощения анализа результатов моделирования минимальные температурные напоры были приняты одинаковыми во всех теплообменниках выхлопных газов $\Delta t_{g1\min} = \Delta t_{g2\min} = \Delta t_{g3\min} = \Delta t_{g4\min} = \Delta t_{g\,\min}$. Значения $\Delta t_{g\,\min}$ варьировались в диапазоне от 4,5 до 45 °С, а минимальных температурных напоров в теплообменнике горячей воды $\Delta t_{\min}$ в диапазоне от 1,5 до 15 °С при соотношении $\Delta t_{g\,\min}/\Delta t_{\min}$ = 3,0.

Результаты расчета параметров состояния рабочих тел в характерных точках циклов для режима, соответствующего $\Delta t_{\min}$ =1,5 °С, приведены в табл. 1. Температура выхлопных газов в этом режиме t_{g2} = 132,.8 °С, t_{g3} = 76,3 °С и t_{g4} = 43,5 °С.

Таблица 1 - Результаты расчета теплового режима ТСУ при $\Delta t_{\min}$ = 1,5 °С

Точка	Температура °С	Давление кПа	Энтальпия кДж/кг	Энтропия кДж/(кг·К)	Плотность кг/м^3	Степень сухости
1	72,73	716,2	648,5	2,34	17,68	1,000
2	45,36	221,4	614,9	2,39	5,31	-
3	25,00	221,4	216,9	1,07	579,60	0,000
4	25,36	716,2	218,1	1,07	580,02	-
5	68,06	716,2	326,8	1,41	526,11	-
6	71,58	716,2	590,0	2,17	21,42	0,817
7	30,02	221,4	586,8	2,30	5,65	1,000
8	68,60	716,2	328,3	1,41	525,34	0,000
9	72,73	716,2	648,5	2,34	17,68	1,000
11	415,99	1260,2	3294,7	7,41	4,02	-
12	30,00	4,2	2555,3	8,45	0,03	1,000
13	30,00	4,2	125,7	0,44	995,61	0,000
14	30,16	1260,2	127,5	0,44	996,12	-
17	30,00	4,2	2555,5	8,45	0,03	1,000
18	190,18	1260,2	808,2	2,24	875,87	0,000
19	190,18	1260,2	2785,4	6,50	6,42	1,000

На рис. 4 и 5 построены графики, показывающие влияние ограничений по температурным напорам на общую утилизированную тепловую мощность Q_{ut}, тепловые мощности теплообменников выхлопных газов Q_{g1}, Q_{g2}, Q_{g3}, общую вырабатываемую электрическую мощность N_{el}, и электрическую мощность, вырабатываемую в низко- $N_{el\,1}$ и высокотемпературном $N_{el\,2}$ контурах ТСУ.

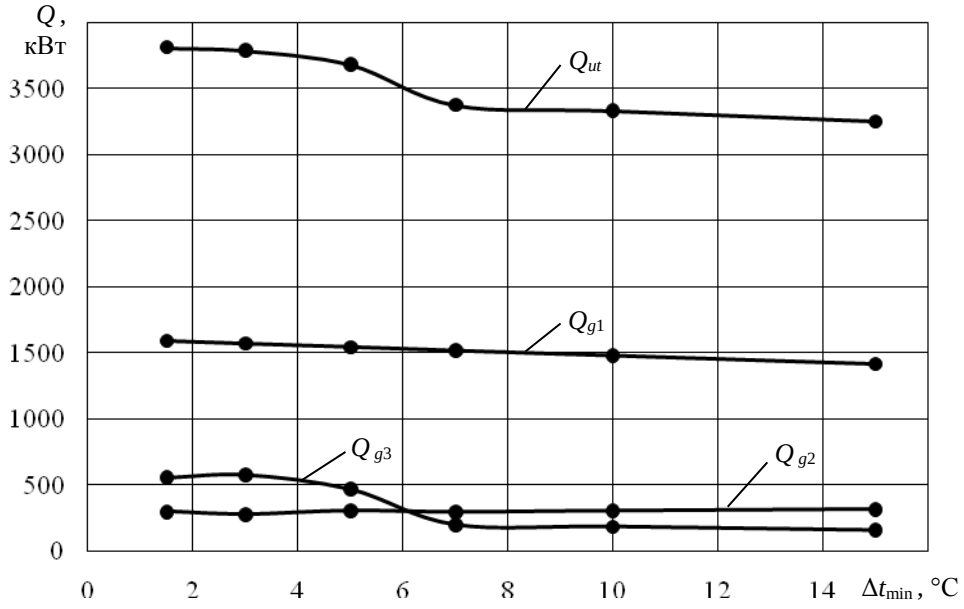


Рис. 4. Влияние температурных напоров в теплообменных аппаратах на их тепловую мощность и на общую утилизируемую тепловую мощность

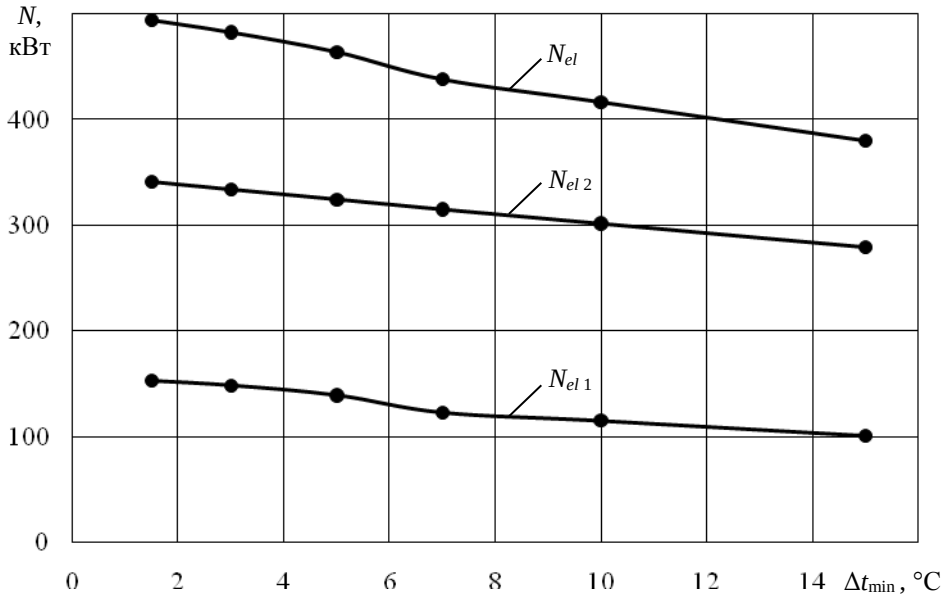


Рис. 5. Влияние температурных напоров в теплообменных аппаратах на электрическую мощность, вырабатываемую в низкотемпературном N_{el1}, высокотемпературном N_{el2} контурах и ТСУ в целом N_{el}

Анализ данных, приведенных на рисунках, показывает, что:

- с уменьшением температурных напоров в теплообменных аппаратах возрастает не только вырабатываемая электрическая мощность, но и утилизируемая тепловая, причем возрастание тепловой мощности обуславливается, главным образом, утилизацией низкопотенциальной теплоты выхлопных газов в теплообменнике ТВГН;
- вклад высокотемпературного контура ТСУ в общую выработку электрической энергии в 2,5 – 3,0 раза больше, чем низкотемпературного контура;
- из утилизированной тепловой мощности до 3800 кВт ТСУ позволяет выработать до 500 кВт электрической мощности.

По сравнению с рассмотренной в работе [2] одноконтурной ТСУ данная двухконтурная позволяет из утилизированной теплоты выработать электроэнергии в 1,9 раза больше. Ее КПД по преобразованию вторичной теплоты в электроэнергию достигает 13,0%, что приводит к повышению общего КПД ГПУ по выработке электроэнергии с 42,9 до 50,0%.

Выводы. Разработана схема утилизации вторичной теплоты газопоршневых установок путем преобразования ее в электрическую энергию с помощью двухконтурной теплосиловой установки с различными рабочими веществами в контурах. Разработаны метод и алгоритм расчета максимально эффективного теплового режима установки в условиях заданных ограничений на температурные напоры в теплообменных аппаратах. На основе математического моделирования тепловых режимов установлено, что в условиях газопоршневой установки JMS-620 можно утилизировать до 3800 кВт тепловой мощности и получить из нее до 500 кВт электрической мощности. КПД по преобразованию вторичной теплоты в электроэнергию достигает 13,0%, что приводит к повышению общего КПД газопоршневой установки по выработке электроэнергии с 42,9 до 50,0%. Результаты моделирования свидетельствуют о перспективности практической реализации предложенного технического решения.

Список использованных источников

1. Федоров, С.Д. Проблема утилизации шахтного метана в когенерационных установках и пути ее решения на примере шахты им. А.Ф. Засядько / С.Д. Федоров, С.В. Облакевич, О.П. Радюк // Промелектро. – 2006. – № 5. – С. 35-39.
2. Оксень, Ю.И. Исследование эффективности использования вторичного тепла газопоршневых установок для выработки электроэнергии / Ю.И. Оксень, М.В. Радюк // Геотехнічна механіка : Межвід. зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 81 . – С. 200-207.
3. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1988. – 128 с.
4. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М. : Мир, 1986. – Т. 1. – 349 с.

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

УДК 652.52.011.56:19.52

М. М. Трипутень, канд.техн. наук
(Україна, Дніпро, Національний ТУ «Дніпровська політехніка»)
В. В. Кузнецов, канд.техн. наук, Є. В. Кузнецова
(Національна металургійна академія України)
М. М. Трипутень, А.В. Кузнецова
(Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара)

α-АЛГЕБРА В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Анотація. *Стаття присвячена актуальній проблемі вибору засобів захисту асинхронних двигунів, працюючих в цехових електричних мережах промислових підприємств з неякісною електроенергією. Відома енергоекономічна модель асинхронного двигуна представлена у вигляді диз'юнкції предикатів, до якої можна застосувати алгоритм розпізнавання образів для прийняття рішень. Головне достоїнство предикатної моделі – відкритість і можливість накопичення знань про режими роботи електромеханічного обладнання.*

Практична реалізація процедур навчання, адаптації, мінімізації предикатної моделі і пошук на її основі найкращого варіанту захисту асинхронного двигуна на алгоритмічних мовах високого рівня передбачає обробку великих об'ємів даних. Показано, що елементи предикатних рівнянь можна представити у вигляді реляційної моделі даних і використати операції α *- алгебри для її перетворень. Процедури перетворення легко інтегруються в інформаційні і програмні структури АСК підприємством, які використовують СКБД, орієнтовані на реляційні моделі.*

Ключові слова: *якість електричної енергії, предикатна модель, асинхронний двигун, мережі промислових підприємств.*

Аннотация*. Статья посвящена актуальной проблеме выбора средств защиты асинхронных двигателей (АД), работающих в цеховых электрических сетях промышленных предприятий с некачественной электроэнергией. Известная энергоэкономическая модель асинхронного двигателя представлена в виде дизъюнкции предикатов, к которой применим алгоритм распознавания образов для принятия решения. Главное достоинство предикатной модели - открытость и возможность накопления знаний о режимах работы электромеханического оборудования.*

Практическая реализация процедур обучения, адаптации, минимизации предикатной модели и поиск на её основе наилучшего варианта защиты асинхронного двигателя на алгоритмических языках высокого уровня предполагает обработку больших объёмов данных. Показано, что элементы предикатных уравнений можно представить в виде реляционной модели данных и использовать операции α *- алгебры для её преобразований. Процедуры преобразования легко интегрируется в информационные и программные структуры АСУ предприятием, которые используют СУБД, ориентированные на реляционные модели.*

Ключевые слова: *качество электрической энергии, предиктная модель, асинхронный двигатель, сети промышленных предприятий.*

Abstract. *The article is devoted to the urgent problem of choosing the means of protection of asynchronous motors (AM) operating in the shop electric networks of industrial enterprises with low-quality electricity. The well-known energy-economic model of an induction motor is presented in the form of a predicate disjunction, to which we apply the pattern recognition algorithm for making decisions. The main advantage of the predicate model is openness and the possibility of accumulating knowledge about the operating modes of electromechanical equipment.*

The practical implementation of training, adaptation, minimization of the predicate model and the search on its basis for the best option for protecting an asynchronous motor in high-level algorithmic languages involves the processing of large amounts of data. It is shown that elements of predicate equations can be represented as a relational data model and use operations - algebras for its transformations. The transformation procedures are easily integrated into the information and software structures of the automated enterprise management structure, which use database management systems oriented to relational models..

Keywords: *power quality, predicate model, asynchronous motor, industrial enterprise networks.*

Вступ. Основними шляхами зниження негативного впливу неякісної електроенергії на працездатність електродвигунів в виробничих умовах, а, значить, і на ефективність виробництва в цілому є: застосування «індивідуальних» LC-фільтрів для захисту особливо відповідальних електроприводів; застосування «групових» пристроїв компенсації впливу неякісної напруги живлення на рівні цеха; придушення спотворень напруги живлення в місцях їх виникнення. Допускається також відмова від прийняття будь-яких заходів, не рахуючись з істотним зменшенням ресурсу двигуна. Кожний із указаних варіантів характеризується деякою вартістю впровадження і очікуваним економічним ефектом [1].

В [2] запропонований підхід до визначення найкращого варіанту захисту асинхронних двигунів (АД) на основі відомого алгоритму розпізнавання образів, основним елементом якого є предикатна модель [3]. На даний час відомі процедури прискореного навчання, адаптації, оптимізації і скорочення зазначеної моделі [4-6].

Реалізація елементів алгоритму припускає накопичення, пошук, реорганізацію та відновлення великої кількості даних – елементів предикатної моделі. Втім виконання цих процедур на алгоритмічних мовах високого рівня малоефективне, оскільки більшість із них орієнтовані на обчислювальні операції, моделювання, опис рівнобіжних процесів, опрацювання символьної інформації тощо. Це приводить до ускладнення прикладних програм і їх залежності від способу уявлення та опису даних, що значно ускладнює впровадження алгоритму вибору найкращого варіанту захисту АД.

Постановка задачі. Визначити математичний апарат, який дозволив би структурувати предикатну модель, формалізувати процедури її утворення, корекції, прийняття оптимальних рішень з подальшою інтеграцією в існуючі інформаційні і програмні структури автоматизованих систем керування на підприємствах.

Мета роботи. Обґрунтувати можливість уявлення елементів предикатних рівнянь у вигляді реляційної моделі даних і опис відомих процедур алгоритму вибору найкращого варіанту захисту АД на основі α-алгебри (реляційної алгебри Кодда).

Матеріали дослідження. Прийняття рішення про економічну доцільність вибору конкретного варіанту захисту асинхронного двигуна (або відмову від нього) залежить від значень технічних і економічних (вхідних) величин: коефіцієнта спотворення синусоїдальності K_U, коефіцієнтів окремих гармонічних складових $K_{U(m)}(m=7)$, коефіцієнта зворотної послідовності K_{2U}, коефіцієнта нульової послідовності K_{20}, вартостей технічних засобів захисту $C_j(i=\overline{1,r})$, где r – кількість різних типів пристроїв захисту).

Кожна вхідна величина має деякі відхилення, обумовлені або точністю виміру (для технічних величин), або економічною ситуацією (для економічних величин). Це дозволило представити енергоекономічну модель АД у вигляді суми предикатів (дискретному вигляді) [2]:

$$Z_{\text{em}}\left[\vec{X},\vec{C}\right]=V_{p=1}^{q}\,\mathrm{V}_{l}^{\lambda_p}\mathrm{Z}_{p,l}\left[\vec{X},\vec{C}\right], \tag{1}$$

тут
$$Z_{em}\left[\vec{X},\vec{C}\right]=2^{-n}\prod_{j=1}^{n}\left\{1+\operatorname{sgn}\left[(X_j-X_{j\min}^{pl})(X_{j\max}^{pl}-X_j)\right]\right\}+$$
$$+2^{-r}\prod_{j=1}^{r}\left\{1+\operatorname{sgn}\left[(C_j-C_{j\min}^{pl})(C_{j\max}^{pl}-C_j)\right]\right\},$$

V - логічна операція диз'юнкції.

Тут: q - кількість класів (діапазонів) сумарного збитку від впровадження засобів захисту або їх комбінацій; λ_p - кількість предикатів, що визначають p – діапазон; n, r - кількість технічних і економічних величин відповідно; $X_{j\min}^{pl}, X_{j\max}^{pl}, C_{j\min}^{pl}, C_{j\max}^{pl}$ - константи моделі.

Формування параметрів предикатів і об'єднання їх в класи здійснюється на етапі навчанні моделі по критерію мінімуму економічних втрат $E_{вт}$ від використання технічних засобів захисту АД (або їх відсутності):

$$E_{вт}\to\min. \tag{2}$$

В процесі навчання розпізнаванню по елементам вибіркової сукупності вхідних величин задають різні значення критерію керування $E_{вт}$ в інтервалі $E_{вт.\max}\div E_{вт.\min}$, розбиваючи факторний простір на два: M_1, якщо $E<E_{вт}$ і M_2, якщо $E>E_{вт}$. Змінюючи значення $E_{\text{вт}}$ з інтервалом

$\Delta E_{вт} = (E_{вт.\max} - E_{вт.\min}) / q$, отримують q гіперповерхонь, які розділяють класи. Гіперповерхні у відповідності з методикою аналітичного опису методом, що допускає розбиття факторного простору на елементарні підобласті, можуть бути задані у вигляді предикатних рівнянь (1). Тут: $\Delta E_{вт}$ - допустимі відхилення економічних втрат від розрахованого значення.

Множина технологічних ситуацій, що задаються предикатами (1) об'єднуються в класи залежно від значень економічних втрат. Кожний клас визначається диз'юнкцією предикатів. Використання такої моделі припускає упорядкування її елементів у вигляді двомірної таблиці, в стовбцях якої слід розмістити Причому в її стовпцях розміщуються значення; $X_{j\min}^{pl}, X_{j\max}^{pl}, C_{j\min}^{pl}, C_{j\max}^{pl}$, а рядок відповідає деякому предикату.

Неважко бачити, що стовпці таблиці мають різну назву й однорідні, усі рядки унікальні і мають ту саму структуру. Порядок проходження рядків не істотний і впливає тільки на швидкість доступу до кожної з них. Ураховуючи також, що інформація в стовпцях атомарна можна зробити висновок про те, що дана таблиця задовольняє умовам і обмеженням, які дозволяють вважати її відношенням – реляційною моделлю даних [7-8]. Порядковий номер кортежу відношення (рядка таблиці) однозначно ідентифікує об'єкт (економічну ситуацію). Сукупність атрибутів (стовпців таблиці) визначає схему відношення. Ясно, що множина відношень M_k, кожне з яких описує певний клас технологічних ситуацій, цілком визначають модель технологічного процесу. Тут $k = \overline{1,q}$, де q – кількість відношень.

Для спрощення подальших міркувань максимальні і мінімальні значення вхідних технічних і економічних величин позначимо через $x_{i\min}$ і $x_{i\max}$.

Операції над відношеннями визначаються α-алгеброю. Розглянемо застосування α-алгебри для реалізації процедур алгоритму [2]. Будемо вважати, що відношення M_k, які визначають класи технологічних ситуацій сумісні і мають схему $\left(x_{1\min}, x_{1\max}, x_{r\min}, x_{r\max}, x_{r+1\min}, x_{r+1\max}, \ldots, x_{(r+n)\min}, x_{(r+n)\max}\right)$. Значення атрибутів M_k розраховуються відповідно до виразів $x_{i\min} = x_i - \Delta x_i, x_{i\max} = x_i + \Delta x_i$. Тут Δx_i - точність виміру (розрахунку) технічного параметру або величина коливання вартості пристрою для захисту АД.

Процедура навчання припускає перевірку наявності поточної економічної ситуації в класі j (клас j визначається за значенням величини економічних втрат), що легко реалізується операцією фільтрації $R\left[x_{i\min} \le x_i,\ x_i < x_{i\max},\ x_{i\min} \in M\_j,\ x_{i\max} \in M\_j,\ x_i \in M\_, i = \overline{1,(n+r)}\right]$. Якщо потужність результуючого відношення дорівнює нулю (поточна ситуація не пізнана), то необхідно розширити відношення M_j, що досягається об'єднанням відношень $M\_j \bigcup M\_$.

Для реалізації процедури оптимізації необхідно виконати операцію фільтрації, використовуючи за атрибути $x_{r+1}, \ldots, x_{r+n}$, над усіма відношеннями M_i, починаючи відповідно до алгоритму, що відповідає найменшому значенню величини економічних втрат. Фільтрацію необхідно виконувати доти, поки не буде отримане результуюче відношення з потужністю відмінною від нуля. Над останнім відношенням необхідно виконати операцію проекції на атрибути, що визначають значення економічних параметрів $R\left[x_{1\min}, x_{1\max}, \ldots, x_{r\min}, x_{r\max}\right]$. Всі кортежі отриманого відношення задають множину рівноцінних економічних втрат.

Реалізація процедури адаптації, крім приєднання поточної технологічної ситуації до заданого класу, припускає вилучення її з іншого класу. Вилучення кортежу з відношення досягається виконанням операції різниці $M\_j \setminus M\_$.

Алгоритми мінімізації і прискореного навчання ґрунтуються на об'єднанні двох підобластей $D1$ і $D2$ у факторному просторі (рис.1).

Кортежі відношення, що визначають ці підобласті, відрізняються значенням двох атрибутів $x_{l\min}, x_{l\max}$ (x_1 – ознакова вісь, у напрямку якої відбувається об'єднання). Виділення зазначених кортежів D_1 і D_2 досягається операцією фільтрації. Для одержання кортежу D_12, який визначає об'єднану область D_12, спочатку відношення D_1 розкладається на відношення D_1MX без атрибута

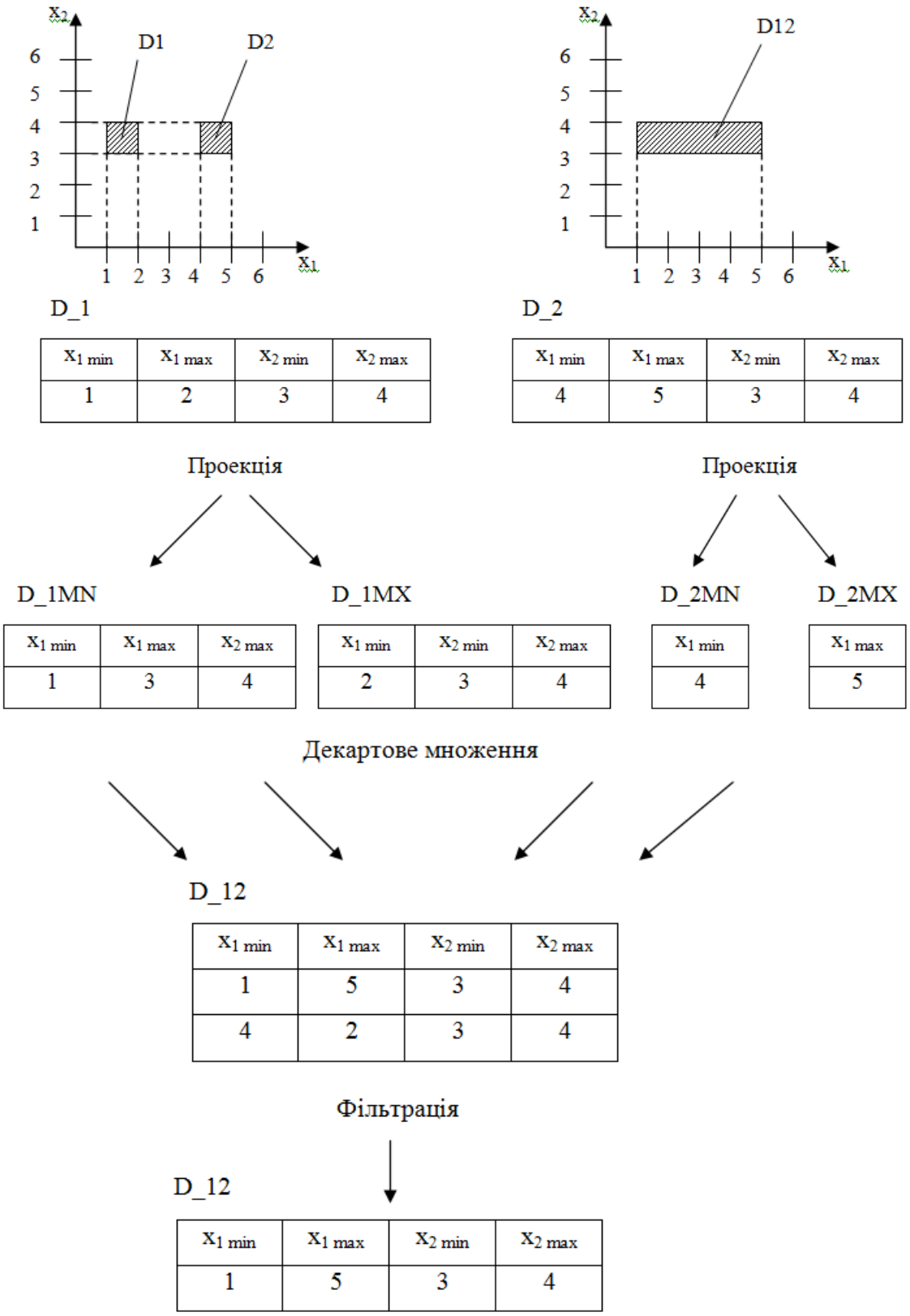


Рис. 1. Визначення кортежу, що задає об'єднану область

$x_{1\min}$ і відношення D_1MN без атрибута $x_{1\max}$, а відношення D_2 – на відношення D_2MN з єдиним атрибутом $x_{1\min}$ і відношення D_2MX з єдиним атрибутом $x_{1\max}$. Дане розкладання дося-

гається операцією проекції. Потім виконанням операції декартового множення $D\_1MX \otimes D\_2MN$ і $D\_1MN \otimes D\_2MX$ формуються два кортежі відношення D_12 з повним набором атрибутів, із яких виділяється шуканий D_12 шляхом фільтрації за умови $x_{1\min} < x_{1\max}$.

Висновки.

Уявлення елементів предикатної моделі у вигляді реляційної моделі даних дозволило описати процедури навчання, оптимізації, адаптації і мінімізації на основі єдиного математичного апарата – α-алгебри. З огляду на те, що реляційні моделі даних підтримуються системами керування базами даних, зазначений підхід до визначення засобів захисту асинхронних двигунів може бути легко інтегрований в інформаційні та програмні структури діючих на підприємстві систем керування.

Список використаних джерел

1. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. ─ Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково – виробничий журнал. ─ Кременчук: КДПУ, 2011. ─ Випуск 4/2011(16).- С.53-57.

2. Кузнецов В.В., Николенко А.В., Иващенко В.П. Алгоритм распознавания в задачах повышения энергоэффективности асинхронных двигателей, работающих в условии некачественной электроэнергии / Кузнецов В.В., Николенко А.В., Иващенко В.П., Трипутень Н.М. - Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".- Харьков: НТУ, 2017. - Выпуск 27 (1249). С.95-99.

3. Воронов В.А. Метод описания технологических ситуаций и его использование при управлении процессами // – Обогащение руд. – 1982. - №2. – С. 31-35.

4. Трипутень Н.М., Коба А.С. Методика и результаты вычислительных исследований алгоритма идентификации предикатной модели // Гірнича електромеханіка та автоматика. –2000. –№64.-с. 106-108.

5. Качан Ю.Г. Адаптация образа в алгоритме распознавания производственных ситуаций //Механизация и автоматизация управления. - 1984. - №1. – С. 15-17.

6. Качан Ю. Г., Трипутень Н. М. Минимизация описания образов в задачах распознавания производственных ситуаций // Изв. вузов. гор. журн. - 1986. - N 7. - С. 119 - 122.

7. Дрибас В. П. Реляционные модели базы данных // Минск: БГУ – 1982 – 192 С.

8. Kuznetsov V., Nikolenko A/ The algorithm of identification in context of improvement energy efficiency of induction motors operating with low-quality electric power. Proceedings IV international conference “Advanced rail technologies”.- Warsaw. Jozefow, 2015.С.67-68.

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

УДК 622.647

В.И. Тарасов, канд. техн. наук
(*Украина. Днепр. Национальный технический университет “ Днепровская политехника“*

МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ТРАНСПОРТЕ ГРУЗОВ ЛЕНТОЧНЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ

Анотація. *Досліджено вплив реального вантажопотоку стричкового конвейєра на питомі витрати енергії приводом. Запропоновано для конкретного вантажопотоку заміст будови конвейєрної лінії з типових конструкцій конвейєрів проектування конвейєрів з типових елементів (стрічка , ролики, барабани, двигуни і т.і.).*

Ключові слова: *стрічковий конвейєр, асинхронний двигун, питомі витрати енергії на транспортну роботу.*

Аннотация. *Исследовано влияние реального грузопотока ленточного конвейера на удельные затраты энергии приводом. Предложено для конкретного грузопотока вместо построения конвейерной линии из типовых конструкций конвейеров применить проектирование конвейеров из типовых элементов (лента, ролики, барабаны, редукторы, двигатели и т.п.).*

Ключевые слова: *ленточный конвейер, асинхронный двигатель, удельные затраты энергии на транспортную работу.*

Abstract. *Researched of the influence of real cargo traffic of a belt conveyor on the specific energy consumption of drive. It is proposed for a particular cargo traffic to apply the design of conveyors based on typical elements (belts, rollrs, drams, gearboxes, drive, etc.) instead of building a line of typical conveyors.*

Keywords: *belt conveyor, asynchronous electric drive, specific energy consumption for transportation.*

Введение. Конвейеры для угольных шахт выпускаются комплектно под усредненные условия их эксплуатации. Число типоразмеров конвейеров значительно меньше многообразных условий их работы. Это приводит к тому, что конвейер, спроектированный на максимальные грузопоток, длину и мощность привода , реально используется с меньшими показателями. Резерв по производительности может составлять от 2-х до 7-и. В этих условиях электродвигатель работает в режиме с нагрузкой меньшей от номинальной, что ведет к уменьшению его КПД. Такой режим работы в свою очередь провоцирует снижение показателя качества использования электроэнергии – cosφ и увеличивает затраты электроэнергии на транспортирование груза.

Транспортную систему конвейерного транспорта можно представить в виде трехуровневой структуры: система – подсистемы – элементы. В настоящее время проектирование системы ведется на уровне подсистем приспосабливая типовые конвейеры к конкретным условиям их эксплуатации. Адаптационная способность конкретного конвейера к реальным условиям его работы оцениваются тремя факторами: приемной способностью ленты, прочностью ленты и мощностью двигателя. Каждый тип и типоразмер конвейера построен так, что обеспечивает номинальную загрузку двигателя при максимальной длине на заданном угле установки β и максимальной производительности. При меньших значениях этих параметров двигатель оказывается не догруженным по мощности до номинальной, что снижает его показатель экономического использования энергии.

Качество использования типового конвейера по приемной способности можно оценить следующим выражением

$$q = Q / 3{,}6\, v \rightarrow q_{\text{пасп}} \ ,$$

где q, $q_{\text{пасп}}$ – соответственно реальная и паспортная линейная масса груза на ленте, кг/м; Q – поступающий на конвейер грузопоток, т/ч; v – скорость ленты, м/с. $q_{\text{пасп}}$ ограничивается геометрической емкостью грузовой ветви ленты. Довести q до предела $q_{\text{пасп}}$ можно уменьшением скорости ленты v. Уменьшение скорости при неизменном поступающем грузопотоке соответственно увеличивает необходимую силу тяги для перемещения ленты с грузом, при этом мощность не изменяется, а пробег ленты и роликов уменьшается, что продлевает их долговечность.

Оценка совершенства ленточного конвейера может быть выполнена в соответствии со следующей задачей:

$$q / (q_{\text{л}} + q_{\text{р}}) \rightarrow max,$$

где $q_{\text{л}}, q_{\text{р}}$ – соответственно линейные массы ленты и вращающихся частей роликов, кг/м.

Конвейерные ленты выпускаются с тканевым и тросовым каркасом. Последние имеют в несколько раз большее разрывное усилие, в 1,5 раза большую линейную массу и в полтора раза дороже тканевых. Степень адаптации их к конкретным условиям нагружения минимальна, т. к. они имеют один предел прочности на разрыв. В некоторых конкретных условиях их работы запас прочности такой ленты неоправданно высокий и составляет 30-70 при нормативе 8-10. Ленты с тканевым каркасом имеют от 3-х до 8-ми слоев ткани и соответственно шесть пределов прочности на разрыв и шесть значений линейной массы. Это позволяет адаптировать ленту к реальным условиям нагружения изменением числа прокладок каркаса. С точки зрения обеспечения минимальной линейной массы ленты конвейера следует отдавать предпочтение лентам с тканевым каркасом. Тросовые ленты следует применять там , где ленты с тканевым каркасом малоэффективны (крутые и длинные уклоны).

В конкретных условиях длина конвейера определяется результатом кусочно-линейной аппроксимации извилистой выработки и отличается от паспортной в меньшую сторону. При меньшей длине конвейера двигатели его недогружены, что ведет к увеличению реактивного сопротивления в электрической сети и снижает cosφ.

Цель работы. Обоснование направлений минимизации удельных затрат электроэнергии на транспортирование сыпучих грузов при проектировании систем конвейерного транспорта.

Результаты исследований. Для изучения возможности минимизации энергозатрат на транспортирование угля , нами проведены статистические исследования длин горизонтально и слабо наклонных конвейеров на 10–ти шахтах Павлоградского района. Распределение случайной величины определено

на дискетном пространстве выборки объемом 111 значений. Гистограмма распределения длины конвейеров с шириной ленты в 1 метр приведена на рис.1, из которой следует, что реальные длины конвейеров 1Л100К, 2Л100У, 2Л100У-01, 3Л100У существенно меньшие, чем имеют в состоянии поставки изготовителем.

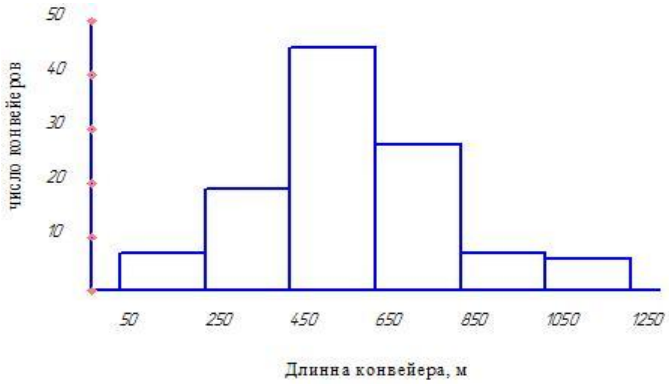


Рис.1. Гистограмма распределения длин конвейеров с шириной ленты В=1 м

При этом соотношение между линейными массами груза ленты и роликов не изменяются, а необходимая мощность привода уменьшается. Установленная же мощность двигателя остается неизменной, определенной для предельных условий работы конвейера. По этой причине двигатель не догружен, т.е. имеет резерв по мощности. Ленточный конвейер перемещает груз на несущем органе под действием силы тяги, которая ему передается посредством трения от приводного барабана. Энергия приводного блока расходуется на работу сил трения перемещения полезного груза, ленты, вращения поддерживающих ленту роликов. [1].

Тяговое усилие приводного блока будет

$$F_{н-с} = F_г + F_л + F_р ,$$

где $F_г$, $F_л$,$F_р$ - соответственно сила тяги для перемещения груза, ленты, вращения роликов. Необходимый момент на приводном барабане будет

$$M_Б = (F_г + F_л + F_р)\, r \quad ,$$

где r - радиус приводного барабана, м.

Силы тяги в этом выражении являются линейными функциями длины. При зафиксированной длине конвейера изменение грузопотока влияет только на силу тяги для перемещения груза $F_г$, а силы $F_л$ и $F_р$ остаются неизменными. При $F_г$ = 0 получают момент на приводном барабане для холостого хода конвейера. Потребляемая мощность привода при холостом режиме конвейера весьма существенна и составляет от 14 до 25 % его мощности при номинальной загрузке конвейера (табл. 1).

Таблица 1

Потребляемая мощность приводом конвейера

Конвейер	Длина, м	Угол наклона, град	Скорость ленты м/с,	Мощность,кВт	
				номинальная	холостого хода
2Л80	800	0	2,0	110	28
2Л100	1000	0	2,5	220	55
2Л120	750	12	3.15	1000	134

Представляет интерес для экономии энергии ограничение работы электродвигателей привода конвейера путем установки ограничителей холостого хода. Экономия электроэнергии в этом случае представляет собой разность между расходом энергии электродвигателем за время холостого хода и расходом

ее при нагруженном конвейере. Внедрение ограничителей имеет назначение снизить до минимума холостую работу конвейера и производить автоматическую остановку его при снятии полезной нагрузки.

Если при неизменном грузопотоке уменьшить длину конвейера, то соответственно уменьшаются все три составляющие $F_г$, $F_л$, $F_р$. Момент на быстроходном валу редуктора, с которым соединен двигатель, находят из выражения

$$M = M_Б / \ i\,\eta_р \quad ,$$

где *i*- передаточное число редуктора; $\eta_р$ - КПД редуктора.

Номинальный момент двигателя установленного в приводе будет

$$M_н = 9750\, N_н / n_н \quad , \text{Нм},$$

где $N_н$ - номинальная мощность, кВт; $n_н$- номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин.

Очевидно, что в установившемся режиме работы конвейера необходимо соблюдать условие

$$M_н \geq M.$$

Соотношение между $M_н$ и M дает информацию остепени загрузки двигателя, которую можно оценить коэффициентом загрузки

$$K_з \ = M/M_н .$$

Повышенная мощность установленного в приводе двигателя ведет к увеличению реактивного сопротивления двигателя и электрической сети, что снижает cosφ . Активная мощность двигателя будет

$$N_а = U\,I\,cos\varphi ,$$

где *U* - напряжение; *I* - сила тока; φ - угол сдвига по фазе между векторами *U* и *I*.

При заданном *U* для получения одной и той же мощности $N_а$ требуется тем большая сила тока, чем меньше cosφ. Увеличение силы тока приводит к потерям энергии на нагрев в двигателе и соединяющей его с генератором линии (электрической сети). Зависимости cosφ и КПД двигателя от коэффициента его загрузки приведены на рис. 2.

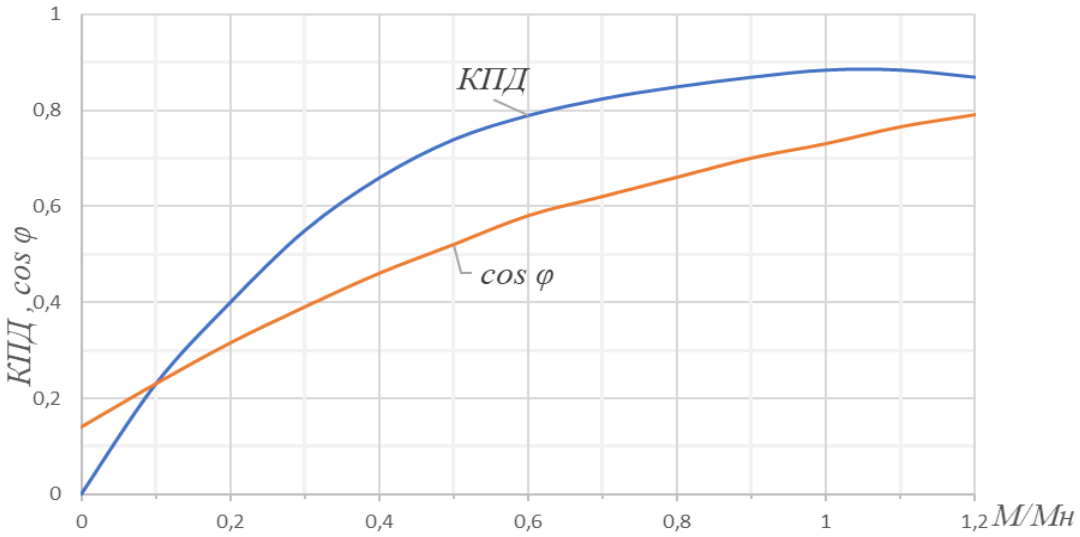


Рис.2. Зависимости КПД и cosφ асинхронного двигателя от коэффициента его загрузки

Анализ этих зависимостей показывает, что недогрузка двигателя ведет к значительным потерям электрической энергии в приводе. Необходимая мощность на выходном валу редуктора привода будет

$$N_п = F_{н-с} v / 1000\,\eta_р \ , \ кВт.$$

Мощность потребляемая приводом из сети

$$N = N_п \ / \ \eta_д cos\varphi, \ кВт,$$

где $\eta_д$,$cos\varphi$ – соответственно КПД двигателя и коэффициент мощности (рис.2); φ – угол сдвига фаз между током и напряжением. Значения этих параметров зависят от коэффициента загрузки электродвигателя $K_з$.

Эффективность транспортной машины оценивают затратами энергии на единицу транспортной работы. Удельный расход энергии конвейером, отнесенный к одной тонне перевезенного груза

$$Э_т = N / Q, \ кВт.ч/т.$$

Удельный расход энергии конвейером, отнесенный к одному тонно-километру транспортной работы

$$Э = N / Q \ l \ , \ кВт.ч/т.км,$$

где Q – грузопоток, поступающий на конвейер, т/ч; l – длина конвейера, км.

Расчетные параметры адаптации типовых конвейеров к конкретным условиям работы приведены в таблице 2, из которой следует, что большие удельные расходы энергии обусловлены низкими значениями КПД и $cos\varphi$ вызванных недогрузкой приводных двигателей до их номинальной мощности .

Таблица 2

Расчетные параметры адаптации типовых конвейеров к конкретным условиям работы

Выработка			Конвейер				Результаты расчета			
***l*, м**	***β*, град**	***Q*, т/ч**	**Тип**	**Ширина ленты, м**	**Производительность, т/ч**	**Мощность привода, кВт**	**Кз**	**КПД**	**Cos*φ***	**Э, кВт.ч/т.км**
800	0	300	2Л80	0,8	420	110	0.51	0,77	0,56	0,186
1000	0	700	2Л100	1,0	850	220	0,62	0,82	0,61	0.322
750	12	1000	2Л120	1,2	1500	1000	0,65	0,84	0,63	1,632

При проектировании ленточных конвейеров из типовых элементов мощность привода определяется длиной конкретной выработки и грузопотоком в ней , отклонение от которой будет определяться только шагом линейки мощностей стандартных двигателей. В этом случае двигатель окажется максимально нагруженным и потери энергии в нем и электрической сети на нагрев, оцениваемые с помощью КПД и cosφ, будут минимальными.

Налицо техническое противоречие, когда заводам для поднятия серийности выпускаемых конвейеров выгодно максимально сужать номенклатуру, а горным предприятиям нужна как можно более широкая номенклатура конвейеров соответствующая каждому набору горно-технических условий работы, и что бы каждый конвейер обеспечивал минимальные удельные затраты энергии на транспортирование . Разрешить это противоречие позволит переход от проектирования конвейеров под усредненные горно-технические условия к проектированию конвейера из типовых элементов для конкретных горнотехнических условий каждой транспортной выработки.

Последняя проблема может быть решена заводами путем изготовления конвейеров под заказ горного предприятия для конкретных горных выработок. Однако, эта проблема более оперативна может быть решена на уровне ремонтно-механических служб производственного объединения . Для этого нужно создать банк покупных типовых элементов (ролики , барабаны, редукторы, муфты, двигатели и т.п.) и организовать на базе собственной ремонтно-механической службы производство недостающих элементов (рамы , ограждения и т.п.). Проектирование конвейера из типовых элементов под конкретные горно-технические условия может выполнять технический отдел объединения или соответствующая сторонняя организация .

Параметры адаптации конвейеров из типовых элементов к тем же что и в табл.2 условиям работы приведены в таблице 3. Анализ результатов показывает,что удельные затраты энергии в этом случае на 20-34% ниже, чем в таблице 2.

Это объясняется тем, что мощности двигателей максимально приближены к необходимым и следовательно двигатели и сеть работают с высокими значениями КПД и cosφ.

Таблица 3

Расчетные параметры адаптации ленточных конвейеров из типовых элементов

Характеристики выработки			Конвейер из типовых элементов			Результаты расчета				
***l*, м**	***β*, град**	***Q*, т/ч**	**Ширина ленты, м**	**Линейная масса груза, кг/м**	**Скорость ленты, м/с**	**Мощность привода, кВт**	**Кз**	**КПД**	**Cos*φ***	**Э, кВт.ч/ т.км**
800	0	300	0,8	41,6	2,0	85	1	0,89	0,74	0.120
1000	0	700	1,0	77.8	2,5	140	1	0,89	074	0,250
750	12	1000	1,2	88	3,15	650	1	0.89	0,74	1,316

Выводы. В расчетах затрат энергии на транспортирование груза ленточным конвейером следует учитывать степень загрузки двигателя по моменту на его валу в соответствии с которой устанавливать его КПД и коэффициент мощности электрической сети –cos*φ*.

Построение конвейерных линий шахт из типовых конвейеров приводит к существенной их недогрузки из-за того, что их длины, мощности приводов, установленные заводами изготовителями максимально возможными, в реальных условиях имеют меньшие значения. Уменьшение длины или производительности поступающего грузопотока влечет за собой снижение КПД двигателя и коэффициента мощности электрической сети – cos*φ*, что увеличивает на 20-30% удельные затраты энергии на транспортирование груза.

При переходе к проектированию ленточных конвейеров из типовых элементов конвейер будет максимально приближен к реальным условиям эксплуатации, КПД двигателя и коэффициент мощности - cos*φ* будут иметь максимально возможные значения. Отклонение мощности двигателя в большую сторону от необходимой будет определяться шагом ряда мощностей стандартных двигателей .

При холостом режиме работы конвейер потребляет от 14 до 25 % энергии от режима его работы с полной нагрузкой в зависимости от горнотехнических условий. Сократить до минимума эти потери энергии можно с помощью ограничителя холостого хода , которые отключает привод автоматически при отсутствии груза на ленте.

Список использованных источников

1. В.И. Тарасов Оценка совершенства ленточногоконвейера по энергетическому показателю /В.И.Тарасов // Розробка родовищ -2015:щорічний наук.–техн.зб.- Д: Літограф, 2015.с.155-161.

Рекомендовано до друку: д-ром техн.наук, проф. Заболотним К. С.

УДК 662.767.2:621.317.42

В. Л. Коваленко, канд. техн. наук О. І. Лапікова
(*Україна, Запоріжжя, Запорізький Національний Університет*)
Є. В. Кузнецова
(*Україна, Дніпро, Національна металургійна академія України*)
А.В. Кузнецова, Д.В. Галушко, М.А. Лобко, Д.О. Чернишов
(*Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара*)
О.О. Ровенський
(Україна, НТУ "Дніпровська політехніка")

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ УТВОРЕННЯ БІОГАЗУ ПРИ МЕЗОФІЛЬНОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМІ

Анотація. *У статті приведено результати експериментальних досліджень щодо визначення можливості інтенсифікації біометаногенезу і встановлення кількісних показників роботи біореактора за умови оптимальних величин напруженості електричного поля. Проведено серію експериментальних циклів біометаногенезу при різних напруженостях електричного поля, що діє на субстрат. Встановлено діапазон значень напруженості для максимізації виходу біогазу шляхом застосування поля в умовах мезофільного режиму роботи біореактору. Наведено лабораторну установку, розроблену для проведення зазначених дослідів щодо впливу електричного поля на субстрат та роботу біореактора. Представлено*

енергетичні характеристики для мезофільного температурного режиму: загальний обсяг виділеного біогазу та динаміку його виходу в залежності від напруженості електричного поля.

Ключові слова: *біогаз, біометаногенез, електричне поле, лабораторна установка, біогазова установка, мезофільний температурний режим*

Аннотация*. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению возможности интенсификации биометаногенеза и установления количественных показателей работы биореактора при оптимальных величинах напряженности электрического поля. Проведена серия экспериментальных циклов биометаногенеза при различной напряженности электрического поля, действующего на субстрат. Установлено диапазон значений напряженности для максимизации выхода биогаза путем применения поля в условиях мезофильного режима работы биореактора. Приведена лабораторная установка, разработанная для проведения указанных опытов по влиянию электрического поля на субстрат и работу биореактора. Представлены энергетические характеристики для мезофильного температурного режима: общий объем выделенного биогаза и динамику его выхода в зависимости от напряженности электрического поля.*

Ключевые слова: *качество электрической энергии, предиктная модель, асинхронный двигатель, сети промышленных предприятий, мезофильный температурный режим*

Abstract. *The article presents the results of experimental studies to determine the possibility of intensifying biomethanogenesis and establishing quantitative indicators of the bioreactor at optimal electric field strengths. A series of experimental cycles of biomethanogenesis was carried out at various electric field strengths acting on the substrate. A range of tension values has been established to maximize the biogas yield by applying the field under the conditions of the mesophilic bioreactor operation mode. A laboratory setup is developed for carrying out the indicated experiments on the effect of an electric field on a substrate and the operation of a bioreactor. The energy characteristics for the mesophilic temperature regime are presented: the total volume of biogas released and the dynamics of its output depending on the electric field strength.*

Keywords: *biodas, biomethanogenesis, electric field, laboratory equipment, biogasplant, mesophilic temperature regime*

Вступ. Стрімкий розвиток альтернативної енергетики в сучасних політико-економічних умовах вимагає безперервного вдосконалення систем отримання біогазу, зокрема за рахунок впровадження нових, більш ефективних способів підвищення продуктивності метантенків [1]. На базі проведеного аналізу результатів іноземних і вітчизняних досліджень встановлено можливість інтенсифікації біометаногенезу та збільшення обсягу виділеного газу шляхом впливу на субстрат постійним електричним полем [2]. Втім, безсистемний та вибірковий характер попередніх робіт у даній галузі не дозволяє встановити необхідну інтенсивність зазначеного впливу, а отже, і доцільність його застосування в умовах реального виробництва.

Постановка задачі. Зосередженість відомих наукових досліджень лише на виявленні впливу електричного поля на окремі групи мікроорганізмів та відсутність комплексного підходу в питанні його енергетичної і економічної ефективності обумовлюють потребу в розробці загальної концепції та послідовності проведення серії експериментів, які б дозволили оцінити доцільність зазначеного впливу на субстрат в цілому та встановити оптимальну його інтенсивність, що дозволить максимізувати обсяги виходу біогазу впродовж всього циклу. Відсутність лабораторних установок, які б забезпечили можливість дослідити процес виробництва біогазу на всіх його етапах в залежності від різних режимів підігріву, перемішування і електричного впливу, зумовлює необхідність створення фізичної моделі, яка буде відповідати поставленому завданню.

Мета роботи. Розробити послідовність проведення експериментальних циклів впливу на субстрат постійним електричним полем, яка б дозволила встановити оптимальну його інтенсивність задля максимізації обсягів виходу біогазу при мезофільному температурному режимі роботи біореактору. Встановити кількісні показники та оцінити доцільність такої стимуляції в заданому температурному режимі під дією зазначеного впливу.

Матеріали дослідження. Виробництво біогазу, як найбільш перспективна в умовах України галузь відновлюваної енергетики, потребує подальшого розвитку шляхом розробки та впровадження нових методів збільшення продуктивності метантенків і підвищення ефективності біогазових установок в цілому.В результаті проведеного аналізу літературних джерел виявлено недостатньо досліджений спосіб інтенсифікації процесу біометаногенезу впливом на субстрат електричного поля. В залежності від параметрів електричне поле може виступати як стимулятором, так і інгібітором.

Запропонована послідовність проведення експерименту передбачає необхідну з погляду статистичної достовірності кількість циклів біометаногенезу, при перебігу яких дотримуються задана температура, інтенсивність перемішування та напруженість електричного поля. При цьому впродовж кожного з експериментальних циклів фіксується обсяг та динаміка виходу зібраної біогазової суміші.

Перший цикл проводиться без впливу електричного поля. Отриманий сумарний обсяг зібраної біогазової суміші приймається за контрольний показник. Другий цикл необхідно провести при впливі електричного поля максимально можливої інтенсивності, за якої у відомих дослідженнях виявлена стимуляція життєдіяльності задіяних у процесі мікроорганізмів [3,4,5]. При кожному наступному експериментальному циклі напруженість поля необхідно поступово зменшувати від граничного значення до такого рівня, коли обсяг зібраного при цьому біогазу, після одержання найбільшого значення стане наближатися до контрольної величини.

Відомо, що робота переважної більшості біогазових установок відбувається при дотриманні термофільного (52-58 °С) або мезофільного (30-35 °С) температурного режиму. При виході температури субстрату за вказані межі спостерігається пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів, задіяних в процесі біологічної переробки субстрату, і гальмування біометаногенезу до повного його припинення включно. Дотримання вказаних режимів передбачає активізацію, зростання і розмноження специфічних, притаманних тільки їм, груп мікроорганізмів на окремих, зсунутих у часі, етапах виробництва біогазу. Оскільки кожен вид бактерій і дріжджів має індивідуальну реакцію на вплив електричного поля, це зумовлює необхідність повторення ґрунтовних досліджень окремо для термофільного і мезофільного температурних режимів.

Для проведення зазначених експериментів і подальшого встановлення оптимального діапазону напруженості поля застосовано лабораторну біогазову установку зменшених розмірів [6], яка дозволяє варіювати температуру, інтенсивність перемішування і рівень напруженості електричного поля (рис. 1). В ній електричне поле рівномірно розподіляється двома алюмінієвими пластинами, які розташовані навколо резервуару 1 на ізоляційному каркасі і легко знімаються. Режими нагріву, напруга на пластинах 11, а отже, і напруженість електричного поля регулюються за рахунок лабораторних автотрансформаторів 10, діодного мосту та контролюється вольтметром.

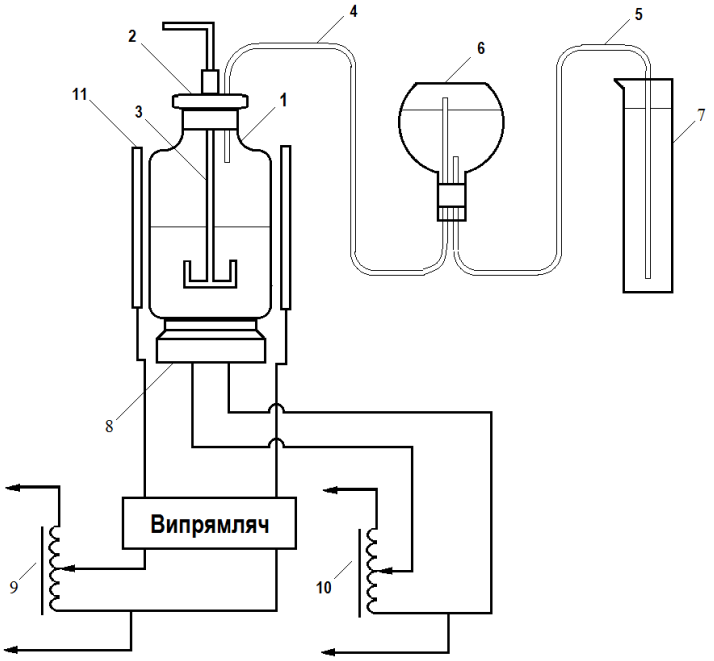


Рис. 1 – Біогазова установка для дослідження впливу електричного поля на субстрат
1 – резервуар, 2 – герметична кришка, 3 – мішалка, 4,5 – патрубки, 6 – резервуар-газозбірник, 7 – вимірювальний циліндр, 8 – нагрівач, 9,10 – лабораторні автотрансформатори, 11 – пластини

З її використанням проведено серію експериментів при мезофільному температурному режимі. Він потребує менших енергетичних витрат на власні потреби у порівнянні з термофільним за рахунок необхідності дотримання нижчих температур і є доцільним з енергетичної точки зору, а також найчастіше застосовується у промислових установках великого об'єму, й розрахованих на супутнє виробництво органічних добрив включно. Для експерименту використано субстрат з відходів життєдіяльності великої рогатої худоби, розбавлений до вологості 95-97%. Об'єм застосованого реактору – 3 дм^3.

Перший цикл біометаногенезу проведено без застосування електричного поля. Виділення біогазу при цьому почалося протягом другої доби, а робота установки до повного його припинення тривала 9

діб. Сумарно за весь час зібрано 3410 см^3 біогазової суміші. Цей об'єм прийнято за контрольний показник для подальшого порівняння.

Об'єм виробленого біогазу приводиться до нормальних умов для сухого газу [7]:

$$V_{БГ,н,у} = \frac{T_0}{T_л}\frac{P_л}{P_0}\left(1 - \frac{P_н}{P_л}\right) V_{БГ}, \quad (1)$$

де T_0, *К* та P_0, кПа – температура та атмосферний тиск за нормальних умов відповідно; $T_л$, *К* та $P_л$, кПа – температура та атмосферний тиск в лабораторному приміщенні, за яких виконувалось вимірювання об'єму виробленого біогазу; $V_{БГ}$ – об'єм виробленого біогазу за умов навколишнього середовища, дм^3; $P_н$ – тиск насиченої водяної пари, кПа.

В результаті проведення наступних експериментальних циклів згідно з запланованою послідовністю найбільш значний позитивний ефект спостерігався при напруженості постійного електричного поля всередині біореактору величиною 0,95 В/см. Газовиділення при цьому розпочалося вже в першу добу зі значно вищою інтенсивністю. При заданих параметрах впливу спостерігалося не тільки збільшення сумарного обсягу продукованого газу в 2,52 рази порівняно з контрольним показником, але й скорочення тривалості циклу до 5 діб, що зумовлює суттєве підвищення загальної ефективності роботи біогазової установки.

Проведення повторних експериментів за тих самих умов показало подібні результати. Відхилення кількості зібраного біогазу як в динаміці, так і в цілому за цикл не перевищує 2,5%, що дозволяє вважати результати досліджень ідентичними та достовірними.

Динаміку виділення біогазу впродовж базового та зазначеного експериментальних циклів наведено в таблиці 1 та зображено на рисунках 2, 3.

Таблиця 1 - Динаміка виходу біогазу при мезофільному температурному режимі

Доба	**Напруженість поля, В/см**	
	0	**0,95**
1	0	1760
2	960	1860
3	650	1860
4	500	1880
5	500	1250
6	350	0
7	200	0
8	150	0
9	100	0
10	0	0
Разом, см^3	**3410**	**8610**
% від контрольного показника	**100**	**252,5**

Висновки. В роботі на основі запропонованої фізичної моделі біогазової установки виконано дослідження впливу електричного поля на субстрат при різних температурних режимах процесу біометаногенезу. Дослідним шляхом встановлено оптимальний рівень напруженості для максимізації обсягів виходу біогазу в мезофільному температурному режимі роботи біогазової установки, який складає 0,94±0,15 В/см. При цьому доведено можливість збільшення продуктивності установки в 2,52 рази і скорочення тривалості циклу з 9 до 5 діб.

Оскільки при різних температурних режимах задіяні окремі види мікроорганізмів, які мають специфічну реакцію на вплив електричного поля, необхідно провести порівняння результатів від такого методу стимуляції при різних температурах субстрату і визначити найбільш економічно ефективну комбінацію температурного та електричного впливу на нього.

Отримані результати можуть стати основою для створення відповідних рекомендацій, методик та алгоритмів керування процесом отримання біогазу задля підвищення енергетичної ефективності біоенергетичних реакторів.

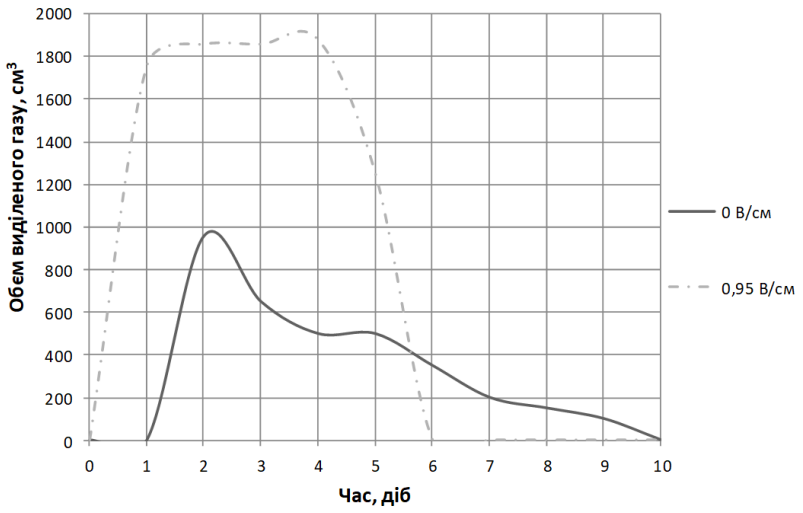


Рис. 2. Динаміка виділення біогазу впродовж проведених циклів біометаногенезу

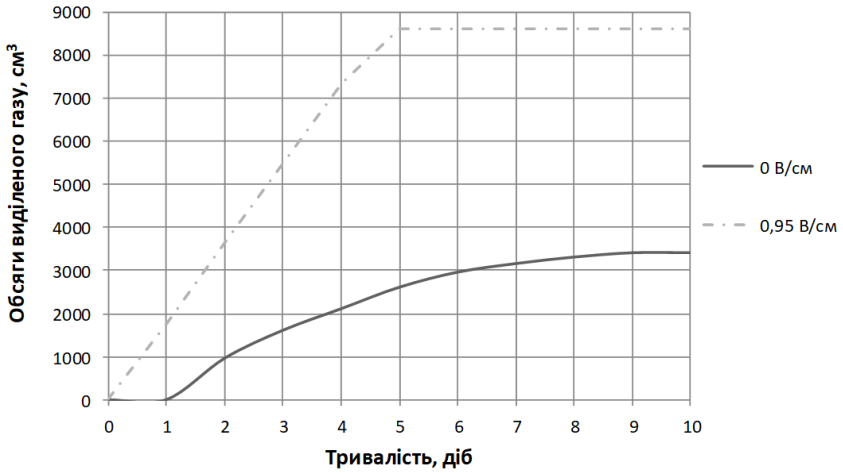


Рис. 3. Інтегрована залежність виділення біогазу впродовж циклу

Список використаних джерел

1. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Аналіз ефективності та перспектив розвитку біогазової енергетики. Збірник Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика 21 століття». КНУ, Київ, 2015, 353-355.
2. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Щодо впливу електричних полів та мікрохвильового випромінювання на мікроорганізми, задіяні в біометаногенезі. Журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»,КПІ, Київ, №4, 2016.
3. Hunt R.W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K.C. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. International Journal of Molecular Sciences, Int. J. Mol. Sci. 2009.
4. Zavalin, A.; Collins, W.E.; Morgan, S. In A Compensation Zone of Multipolar System of EM Fields Stimulates Bacterial Growth, Proceeds of the 24th Meeting of Bioelectromagnetics Society, Quebec, Canada, 2002; pp. 8-9.
5. Zavalin, A.; Lensky, V.; McCarrol, P.; Westbrook, R.; Collins, W.E.; Morgan, S. Biostimulation of microorganisms exposed to multipolar systems of mutually compensated EMF. Bioelectromagnetics 2009.
6. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Фізична модель біогазової установки з пристроєм впливу на субстрат електричними і магнітними полями. Збірник XVII Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI століття». КНУ, Київ, 2016.
7. Automatical methane potential test system. Operation and maintenance manual. – Lund: Bioprocess control Sweden AB, 2016. – 95 p.

Рекомендовано до друку: канд. техн. наук, доцентом Циплековим Д.В.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Азюковський Олександр Олександрович	Канд. техн. наук, професор кафедри електропривода Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	8
Бобров Олексій Володимирович	Канд. техн. наук, викладач електротехнічних та спеціальних дисциплін Коледжу ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна	21; 75
Боровік Роман Олексійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	25
Бородай Валерій Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	25
Бубліков Андрій Вікторович	Канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	43
Волков Володимир Олександрович	Докторант кафедри "Електропривод" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	87
Галушко Олег Михайлович	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Безпека інформації та телекомунікації", Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	29
Гненний Ігор Олексійович	Студент факультету Інформаційних технологій Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	61
Гребенюк Андрій Миколайович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	38
Дякун Інна Леонідівна	Канд. техн. наук, Інститут геотехнічної механіки НАН України, м. Дніпро, Україна	104
Жежеленко Ігор Володимирович	Д-р техн наук, професор кафедри електрифікації промислових підприємств Державного вищого навчального закладу «Приазовський технічний університет», м. Маріуполь, Україна	3
Житник Микола Явтухович	Науковий співробітник відділу систем керування транспортними засобами Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	14
Ільїна Інна Сергіївна	Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	78
Карзова Оксана Олександрівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	82

Кедря Михайло Михайлович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	82
Коваленко Віктор Леонідович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електротехніка та енергоефективність" Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна	119
Козир Світлана Василівна	Асистент кафедри "Системний аналіз" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	50
Козлов Володимир Петрович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	61
Колб Андрій Антонович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	21; 75
Колб Антон Андрійович	Канд. техн. наук, професор кафедри "Електропривод " Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	21; 75
Колосов Дмитро Леонідович	Д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри "Будівельна, теоретична та прикладна механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	78
Комiссаров Юрій Олексійович	Старший викладач кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	78
Коряшкіна Лариса Сергіївна	Канд. фіз-мат. наук, доцент кафедри "Системний аналіз" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	50
Кузнецова Аліса Віталіївна	Студентка факультету прикладної математики Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна	110
Кузнецов Віталій Вадимович	Канд. техн. наук, доцент каф. Електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	110
Кузнецова Євгенія Валеріївна	Старший викладач кафедри гуманітарних, фундаментальних та загально – інженерних дисциплін Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	110
Куриленко Олена Яківна	Старший викладач кафедри "Електротехніка та електромеханіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	82
Лапікова Олеся Ігорівна	Асистент кафедри "Електротехніка та енергоефективність" Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна	119
Левченко Руслана Юріївна	Інженер 2 кат. відділу "Системи керування транспортними засобами" Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	14

Лисенко Олександра Генадіївна	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електропривод" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	3
Малієнко Андрій Вікторович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системний аналіз" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	50
Манко Геннадій Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно – інтегрованих технологій і метрології» ДВНЗ «Українського державного хіміко-технологічного університету» м. Дніпро, Україна	56
Мещеряков Леонід Іванович	Д-р техн. наук, професор кафедри "Програмне забезпечення комп'ютерних систем" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	29
Моня Андрій Григорович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Вища математика" Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна	69
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	82
Оксень Юрій Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	104
Остаповская Светлана Янівна	Провідний інженер відділу систем керування транспортними засобами Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна	14
Папаїка Юрій Анатолійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Системи електропостачання" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	25
Пісарев Віктор Павлович	Студент механіко-машинобудівного факультету Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	104
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	14
Приходченко Сергій Дмитрович	Асистент кафедри "Програмне забезпечення комп’ютерних систем", Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	29; 61
Родна Катерина Станиславівна	асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	3
Самуся Володимир Ілліч	Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	78

Сироткіна Олена Ігорівна	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Програмне забезпечення комп’ютерних систем", Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	29
Тарасов Віктор Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	114
Трипутень Максим Миколайович	Студент факультету прикладної математики Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна	110
Трипутень Микола Мусійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Автоматизація та комп'ютерні системи" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	110
Трофімова Олена Павлівна	Асистент кафедри "Гірнича механіка" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	104
Устименко Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри "Електротехніка та електромеханіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна	82
Худолій Сергій Сергійович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Електропривод" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	65
Ципленков Дмитро Володимирович	Канд. техн. наук, доцент кафедри "Відновлювані джерела енергії" Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	21; 75
Швачка Олександр Іванович	Канд. техн. наук, доцент кафедри «Комп'ютерно - інтегровані технології і метрології» ДВНЗ «Український державного хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна	56
Шепетько Денис Олександрович	студент гр. 141м-18-4 Електротехнічного факультету Національного технічного університету "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна	25

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

$$c^2 = a^2 + b^2 . \qquad (1)$$

Вимоги до формул:

Розмір символів в формулах: Звичайний - 10 пт .; Великий індекс - 8 пт .; Дрібний індекс - 7 пт .; Великий символ - 12 пт .; Дрібний символ - 8 пунктів.

Стиль формул: Функція - похилий; Змінна - похилий; Дужки - прямі; Цифри - прямі.

Всі позначення - латинськими символами !!! Кирилиця в формулах - неприпустима !!!

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.

Підрисуночний 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 кожну 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 "Гірнича електромеханіка та автоматика"
49005, Україна, м Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", кафедра Електротехніки.

Сайт: **http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz.php**

*У науково-технічному збірнику "**Гірнича 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. <u>До и после формул оставлять одну пустую строку.</u> Между формулами оставлять пустую строку ***не надо***

$$c^2 = a^2 + b^2 . \qquad (1)$$

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. Днепропетровск, просп. К.Маркса, 19, Национальный горный университет, кафедра Электротехники.
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 shoud 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 musn`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, м**
The text of the table: font Times New Roman, left aligned 9 pt, **indentation of the first line - no**t. It is not necessary to leave a line before and after heding.	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 formattting:

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, l**eft 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, affilatin (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.one**

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 Electrical Engineering
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

Науково-технічний збірник

Гірнича електромеханіка та автоматика

Випуск 101

Технічний редактор
Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 27.06.19. Формат 30х42/4. Папір Captain.
Ризографія. Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. .
Тираж 70 пр.

ISSN 0201-7814

Видано
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.