

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.365

І.В. Жежеленко, д-р. техн. наук

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

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

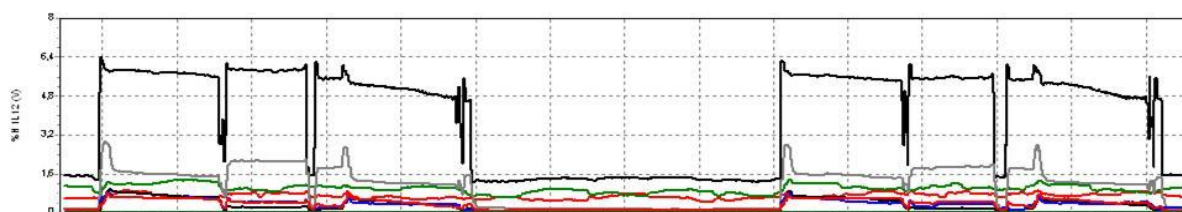
The parameters of the standard and equivalent replacement schemes of mining enterprises were calculated, on the basis of which modeling was performed and the interrelationships of the indicators of reliability and quality of power supply were obtained under a decentralized power supply system.

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'явилися потужні перетворювачі частоти на вентиляторах головного провітрювання (ВГП), підйомних машинах (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 відстанях 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 підйомного (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

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

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

Електропостачання та електроустаткування

- середньоквадратичне значення THD за зміну/добу

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

- коефіцієнт використання

$$K_{B THD} = \frac{THD_{cp}}{THD_{ном}}, \quad (3)$$

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

- коефіцієнт увімкнення

$$K_{y THD} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m t_{науза i}}; \quad (4)$$

- коефіцієнт максимуму

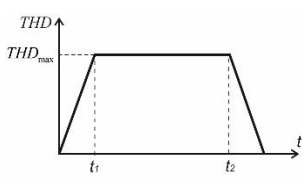
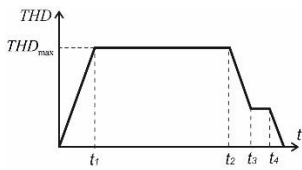
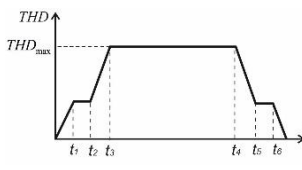
$$K_{M THD} = \frac{THD_{max}}{THD_{cp}}, \quad (5)$$

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	
	THD_{cp}	0,026	0,056	0,09	0,117	0,146
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,44	0,51	0,52	0,51	0,52
	$K_{y THD}$	0,50	0,53	0,56	0,56	0,56
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,025	0,054	0,08	0,111	0,131
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,42	0,49	0,49	0,48	0,47
	$K_{y THD}$	0,48	0,51	0,53	0,53	0,50
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,024	0,051	0,08	0,109	0,128
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,39	0,47	0,47	0,47	0,46
	$K_{y THD}$	0,45	0,49	0,51	0,52	0,49
	$K_{M THD}$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03

Значення коефіцієнтів вищих гармонік напруги

Профіль гармоніки	Потужність перетворювача, МВА					
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
	THD_{cp}	0,026	0,056	0,09	0,117	0,146
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,44	0,51	0,52	0,51	0,52
	$K_{U THD}$	0,50	0,53	0,56	0,56	0,56
	$K_M THD$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,025	0,054	0,08	0,111	0,131
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,42	0,49	0,49	0,48	0,47
	$K_{U THD}$	0,48	0,51	0,53	0,53	0,50
	$K_M THD$	1,33	1,14	1,14	1,14	1,03
	THD_{cp}	0,024	0,051	0,08	0,109	0,128
	THD_{ck}	0,003	0,011	0,025	0,044	0,069
	$K_{B THD}$	0,39	0,47	0,47	0,47	0,46
	$K_{U THD}$	0,45	0,49	0,51	0,52	0,49
	$K_M THD$	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).

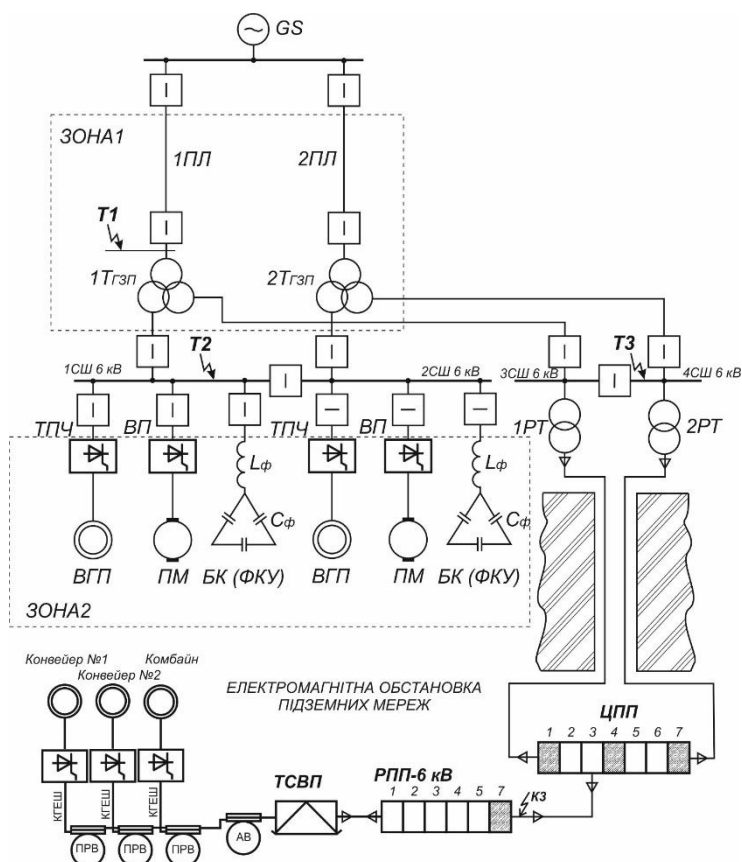
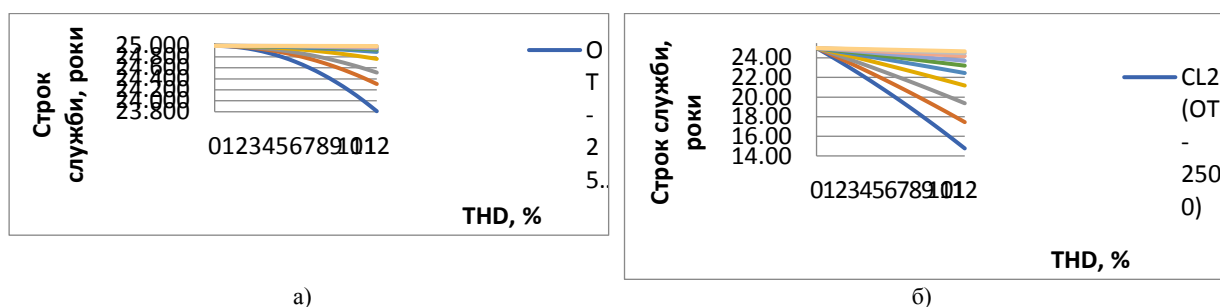


Рис. 2. Принципова схема електропостачання вугільної шахти

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



**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 обґрунтовані 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 підприємств 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. Папайка — 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 Efficiency 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 // Гірнична 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 – Taylor & 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 сталевих 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 електротехнічній системі «станція катодного захисту - підземний трубопровід - ґрунт». 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 «станція катодного захисту – підземний металевий трубопровід – ґрунт» 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 – ґрунт». 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