

А.В. Некрасов, канд. техн. наук, О.Ю. Давидов

(Україна, Кременчук, Кременчуцький державний університет ім. М. Остроградського)

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Вступ. Енергія, зокрема електрична, є одним з найважливіших продуктів споживання для електротехнологічних установок [1]. На якість випущеної продукції впливають процеси, які протікають в електротехнологічних установках під час її виготовлення. Всі електротехнологічні установки в періоди роботи характеризуються нерівномірним споживанням електричної енергії. Режими електроспоживання більшості електротехнологічних установок носить імпульсний характер з випадковими або детермінованими видозмінами в чергуванні імпульсів і форми. Характер графіків навантаження електротехнологічних установок приводить до появи в огибаючій кривій напруги провалів напруги. Унаслідок нерівномірності споживання потужності по фазах і нелінійної вольт-амперної характеристики навантаження електротехнологічних установок викликають несиметрію і несинусоїдальність живлячої напруги, а також появу струмів нульової, зворотної послідовностей [2]. Режим роботи електротехнологічних установок, які управляються за допомогою напівпровідникових силових пристроїв, викликають в системах електропостачання появу гармонійних складових. Тенденція розвитку енергозберігаючих технологій призводить до впровадження сучасних систем управління, які покращують режими роботи технологічних об'єктів [3]. Для дослідження режимів роботи електротехнологічних установок та формування у майбутніх фахівців розуміння процесів, які в них відбуваються, та впливу енергоспоживання на якість електричної енергії, з'являється необхідність створення спеціального сучасного лабораторного устаткування.

Аналіз попередніх досліджень. Вдосконалення режимів роботи електротехнологічних установок вимагає поглиблення розуміння режимів їх роботи і, як наслідок, підвищення якості методичного забезпечення та лабораторного забезпечення. Застосовані в даний час лабораторні стенди, що включають в свій склад електротехнічні системи, контроль параметрів яких здійснюється аналоговими приладами, низько інформативні. Обґрунтований спектр лабораторного устаткування, що включає різноманітні електротехнічні системи та пристрої, різнотипні перетворюючі агрегати, як нового, так і старого покоління, релейно-контактні схеми управління, дозволяє вивчати загальні принципи функціонування електротехнічних установок та пристроїв. Вимірювання параметрів традиційними приладами дозволяє досліджувати і аналізувати статичні режими роботи системи електроспоживання. Наявність складних пристроїв управління і

комп'ютеризованих вимірювальних систем розширює функціональність лабораторного обладнання. Присутність комп'ютеризованої системи і наявність вимірювальних датчиків дозволяють реалізувати складні системи управління [4]. На основі проведеного аналізу існуючих комп'ютеризованих комплексів, в основу яких покладені такі основні елементи: електрична мережа; вимірювальний елементи; системи управління; системи захисту та виконуючий елемент, можна констатувати, що сучасний комп'ютеризований електротехнічний комплекс задовольнятиме можливості, як з позиції проведення дослідницьких робіт, так і з позиції підвищення якості навчального процесу.

Мета роботи. Розробка структури комплексу по дослідженню процесів енергоспоживання та режимів роботи електротехнологічної установки зі зварювальним агрегатом змінного струму. Аналіз наукового та методичного потенціалу комплексу.

Матеріали і результати досліджень. Установки електричної зварки служать для зварювання металевих деталей за допомогою електричного струму. Процеси що відбуваються в електричній частині зварювальної установки є вкрай суттєвими, особливо з позиції покращення режимів електроспоживання. В умовах, промислового виробництва для електричного живлення зварювального елемента найбільш розповсюдженими є зварювальні трансформатори з тиристорними регуляторами напруги [5] або зварювальні випрямлячі. Характеристики таких трансформаторів та режими їх роботи за умов регулювання напруги на нелінійному навантаженні розглядаються в деяких курсах, при підготовці фахівців-електротехніків.

Існують навчальні курси, в яких дослідження споживання електричної енергії різними електротехнологічними установками є важливою ланкою опанування дисципліни. У зв'язку з неможливістю існуючого лабораторного обладнання повністю відобразити електроенергетичні процеси, які проходять в електричній мережі ставляться завдання створення комплексів, впровадження яких дозволить більш глибоко вивчити процеси, що відбуваються в електротехнологічних установках та в системі електропостачання, а також допомогти організувати навчальний процес та розширити спектр питань, що вивчаються.

Основними задачами комп'ютеризованого лабораторного стенду є: дослідження процесів споживання електричної енергії в трифазній мережі змінного струму електротехнічною зварювальною установкою; дослідження процесів споживання електричної енергії установкою з напівпровідниковим пристроєм; дослідження показників якості електричної енергії та дослідження способів компенсації неактивних складових потужності засобами конденсаторних компенсаторів.

Для визначення всього переліку робіт, що виконуються на лабораторному комплексі, слід розглянути схемне рішення – рис. 1.

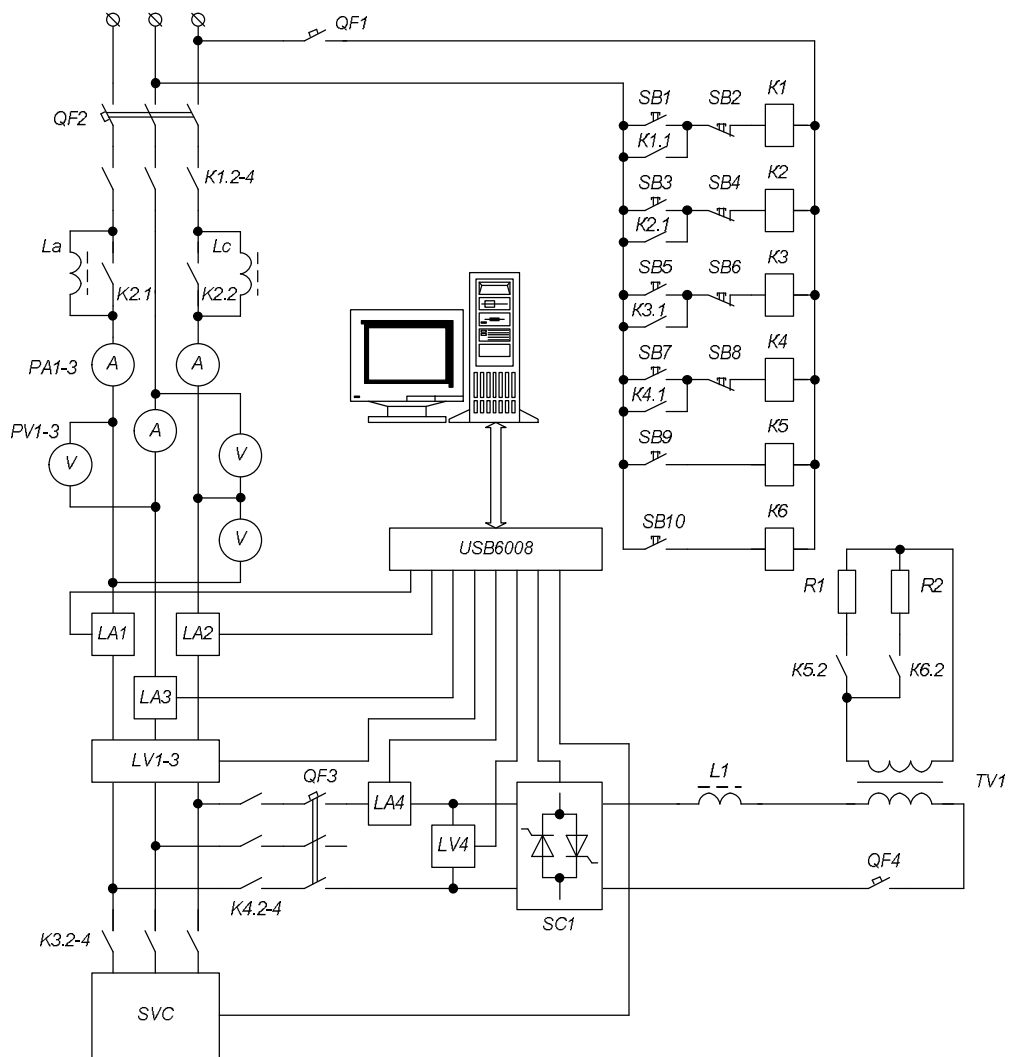


Рис. 1. Функціональна схема лабораторного комплексу

Комп'ютеризований лабораторний стенд, розроблений професорсько-викладацьким складом Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського, складається зі зварювального трансформатора, тиристорного регулятора напруги, контактної апаратури, вимірювальних приладів, блоку датчиків, пристрою аналогового-цифрового перетворення та пристрою компенсації. Враховуючи, що процес зварки супроводжується колосальним виділенням теплової та світлової енергії, а також вимагає певних навичок запалення і підтримки дуги, в цілях виключення променевої і теплових опіків раціонально замінити зварювальний елемент ланцюгом, який містить активний опір – комплект навантажувальних резисторів, які мають малий опір, що порівняний з опором зварювальної дуги. Періодичне включення та відключення цих резисторів забезпечують імітацію навантаження. Це декілька знижує достовірність досліджень, але забезпечує безпечні умови проведення робіт. Для регулювання струму первинна обмотка трансформатора отримує живлення від тиристорного регулятора напруги. Для контролю параметрів використовуються вимірювальні прилади та датчики струму і напруги. Комутація силових кіл стенду здійснюється контакторами, функції захисту відповідних кіл реалізують автоматичні

вимикачі. Структура стенду дозволяє проводити місцеве і дистанційне управління силовими перетворювачами від зовнішніх пристроїв, зокрема від ЕОМ, при програмній побудові системи регулювання.

Живлення стенду відбувається від лабораторної мережі трифазної напруги змінного струму промислової частоти з діючим значенням напруги 220 В. Силовий ланцюг стенда захищається трифазним автоматичним вимикачем QF2. Стенд підключається до мережі за допомогою контактів 2-5 лінійного контактора *K1* за умов натискання кнопки *SB1*. Відключення контактора відбувається за умов дії на кнопку *SB2*. Індуктивні елементи *La*, *Lc* та контактор *K2* реалізують схему з нормальним або підвищеним індуктивним опором мережі. Робота контактора *K2* управляється кнопками *SB3* та *SB4*. Струм та напруга мережі контролюються відповідними вимірювальними приладами, автоматизований контроль струму та напруги мережі реалізується датчиками струму *LA1-LA3* та датчиками напруги *LV1-LV3*. Контактор *K3* (кнопки управління *SB5*, *SB6*) забезпечує підключення до мережі напівпровідникового конденсаторного компенсатора (*SVC*). Контактор *K4* підключає до двох фаз мережі однофазний тиристорний перетворювач (*SC1*), який захищено автоматичним вимикачем *QF3*. Напруга та струм на вході тиристорного регулятора контролюються відповідними датчиками (*LA4* та *LV4*). Струмний захист кола реалізує автоматичний вимикач *QF4*. Вторинна обмотка трансформатора має напругу в декілька десятків вольт та підключається короткочасно до резисторів *R1* та *R2* силовими контактами контакторів *K5* та *K6* відповідно. Кола обмоток цих контакторів не мають ланцюгів само підхвату. Комутація реалізується короткочасно натисканням кнопок управління *SB9* та *SB10*. Виходи датчиків під'єднанні до пристрою *USB 6008* (National Instruments) за допомогою інтерфейсу вводу-виводу цей пристрій з'єднується з ЕОМ.

До складу зварювального агрегату входить напівпровідниковий перетворювач, що забезпечує можливість регулювання кількості електроенергії, яка поступає в агрегат. Два зустрічно-паралельно включених тиристора дозволяють комутувати однофазну мережу змінного струму і регулювати величину струму в ланцюзі і напругу на навантаженні [6]. Якщо навантаження регулятора носить активно-індуктивний характер, то форма струму в ланцюзі не повторює форму напруги, оскільки виникає е. р. с. самоіндукції, що перешкоджає наростанню і спаду струму [7]. Тому струм через вентиль протікає протягом деякого часу після зміни знаку живлячої напруги. Закон зміни струму тиристора може бути знайдений з рівняння рівноваги ланцюга, справедливого для струму через тиристор в інтервалі $\alpha \leq \theta \leq \alpha + \lambda$, поза яким струм не існує:

$$U_m \sin \theta = i r_n + \omega L_n \frac{di}{d\theta}. \quad (1)$$

Рішення для струму:

$$i(\theta) = \frac{U_m}{Z_H} \sin(\theta - \varphi) + A e^{\frac{\theta - \alpha}{\tau} \varphi}, \quad (2)$$

де $Z_H = \sqrt{r_H^2 + (\omega L_H)^2}$; $\varphi = \arctg \frac{\omega L_H}{r_H}$;

A – постійна інтегралу, для знаходження якої необхідно врахувати, що при $\theta = \alpha$, $i = 0$.

r_H – активне навантаження від тиристорного регулятора напруги до навантажувальних резисторів комп'ютеризованого лабораторного стенду;

ωL_H – індуктивне навантаження від тиристорного регулятора напруги до навантажувальних резисторів комп'ютеризованого лабораторного стенду.

З урахуванням цього вираз для струму навантаження:

$$i(\theta) = \frac{U_m}{Z_H} \left[\sin(\theta + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta - \alpha}{\tau} \varphi} \right]. \quad (3)$$

За період живлення напруги діюче значення струму тиристора:

$$I_{B\alpha \text{ эфф}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}, \quad (4)$$

де I – діюче значення струму при повністю відімкнених тиристорах.

Середнє значення струму тиристора:

$$I_{B\alpha} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1 + \cos \alpha}{\pi}. \quad (5)$$

Коефіцієнт форми кривої струму тиристора:

$$D = \frac{I_{B\alpha \text{ эфф}}}{I_{B\alpha}} = \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}{1 + \cos \alpha}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт форми вихідної напруги:

$$K_\varphi = \frac{U_{H\alpha \text{ эфф}}}{U_{H.c.p.}} = \frac{1}{1 + \cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}, \quad (7)$$

де $U_{н.ср} = \frac{U\sqrt{2}}{\pi}(1+\cos\alpha)$ середнє значення напруги на навантаженні за напівперіод живлячої напруги.

Активна потужність, споживана з мережі:

$$P_{спож} = \frac{P}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right), \quad (8)$$

де P – потужність, споживана з мережі при повністю відімкнених тиристорах.

Споживання реактивної потужності з напівпровідниковими вентилями обумовлене в основному двома причинами: природним комутаційним процесом і штучною затримкою моменту відкриття вентиля в цілях регулювання напруги. Реактивна потужність в зварювальному агрегаті необхідна не тільки для заряду – розряду індуктивності при підтримці безперервного горіння дуги, але і для покриття втрат в зварювальному трансформаторі і в короткій мережі, що також мають індуктивність:

$$Q_{спож} = \frac{P \sin^2 \alpha}{\pi}. \quad (9)$$

Коефіцієнт потужності мережі розраховується:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}, \quad (10)$$

де P_1 і Q_1 – активна і реактивна потужність на стороні первинної напруги зварювального агрегату.

Таким чином режими енергоспоживання та вплив зварювального агрегату на мережу залежить від кута керування (α) та навантаження (γ). Реалізація таких режимів можлива впливом на перетворювач SCI та комбінацією навантажень $R1$ та $R2$. На рис. 3 показані залежності коефіцієнта потужності від кута регулювання, та залежність реактивної потужності від активного навантаження.

Наявність в стенді датчиків електричних величин ($LA1-LA4$, $LVI-LV4$), пристрою аналогово-цифрового перетворення та ЕОМ дозволяють отримувати під час досліджень миттєві значення напруги та струмів у відповідних ланцюгах та спостерігати їх зміну у часі, наприклад як наведено на рис. 4. В результаті дослідження даної системи отримані графіки напруги (рис. 4) і струму (рис. 5) в трьох фазах лінії в точці підключення. З отриманих графіків видно, що при роботі зварювального агрегату несинусоїдальним струмом мережа навантажується несиметрично. Дія несинусоїдального струму приводить до виникнення додаткового падіння напруги у відповідних фазах. В результаті напруга стає несинусоїдальною, а система напруг трьох фаз несиметричною.

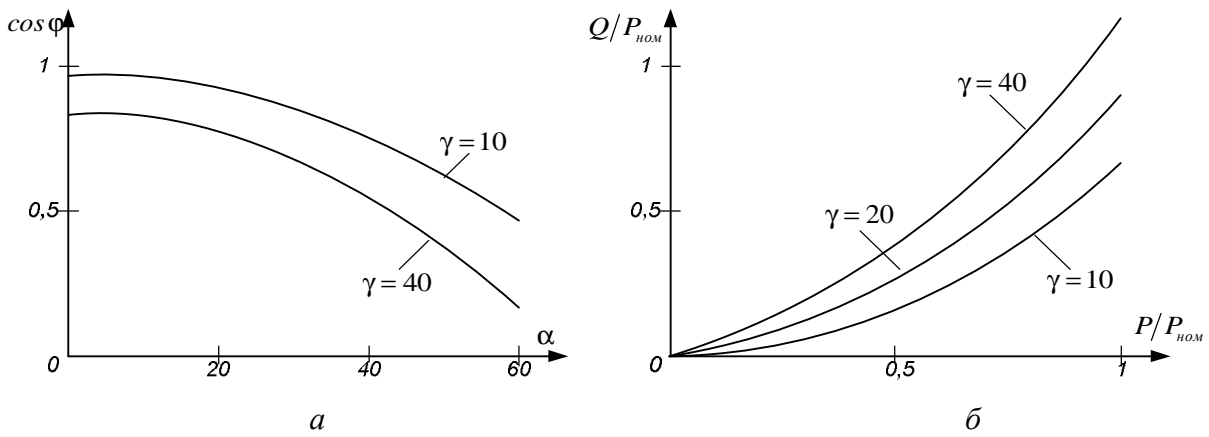


Рис. 3. Характеристики реактивного навантаження зварювального агрегату:
 а – залежність коефіцієнта потужності від кута регулювання;
 б – залежність реактивної потужності від активного навантаження

При споживанні електроенергії з трифазної мережі симетричним лінійним навантаженням зміна сумарної потужності в часі є прямою лінією. Проте, при дії в декількох фазах додаткового, причому нелінійного навантаження виникає зміна характеру енергоспоживання по фазах мережі, внаслідок чого одна з фаз виявляється більш завантаженою, ніж останні. В результаті графік зміни потужності в часі відрізняється від прямої на величину рівну додатковому енергоспоживанню по відповідній фазі. На рис. 6 і 7 приведені графіки напруги і струму вторинної обмотки зварювального трансформатора та повна потужність циркулююча в мережі.

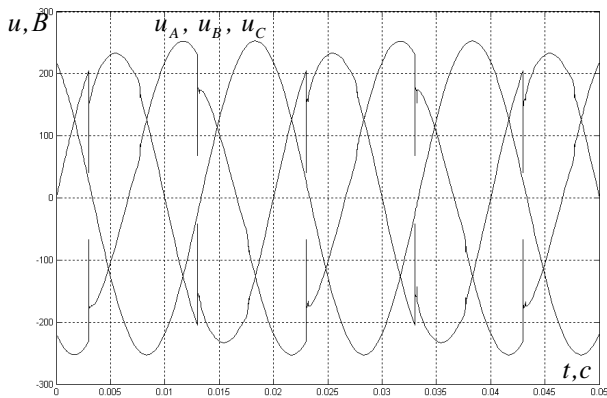


Рис. 4. Зміна напруги у фазах лінії

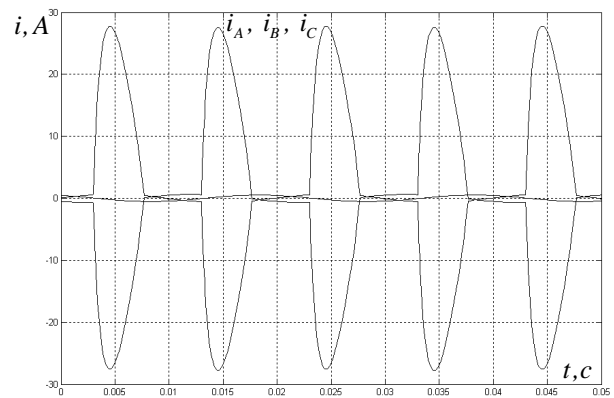


Рис. 5. Зміна струму у фазах лінії

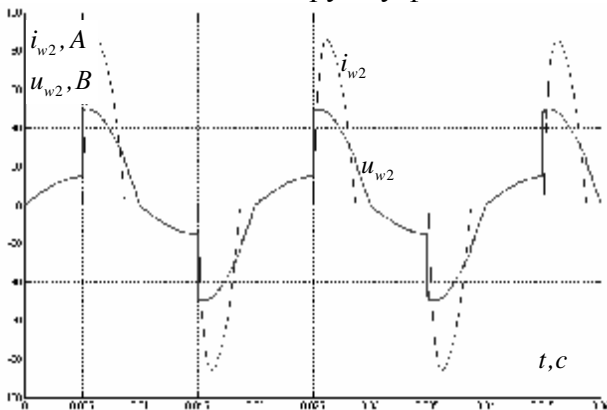


Рис. 6. Струм і напруга зварювального контура

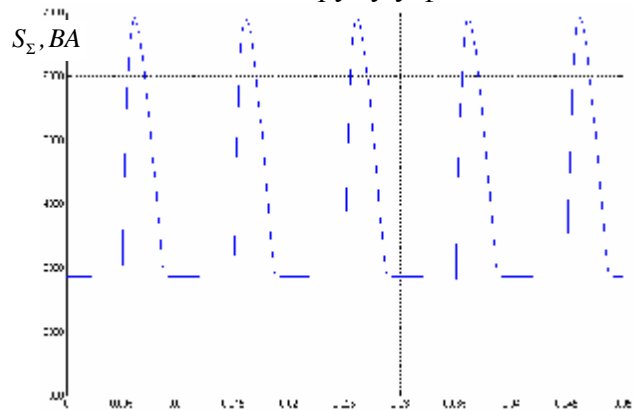


Рис. 7. Повна сумарна потужність трифазної мережі

Виходячи з функціонального складу лабораторного стенду, можливо виділити наступні спрямування експериментальних та лабораторних досліджень, зокрема:

- дослідження комп'ютеризованої системи вимірювання параметрів струму та напруги в електричній мережі змінного струму;
- дослідження рівня гармонік, діючого, середнього значень струму та напруги в трифазній мережі змінного струму за умов зміни навантаження;
- дослідження складових активної, реактивної, повної потужності в електричній мережі змінного струму з несинусоїдальним струмом;
- дослідження показників якості електричної енергії в трифазній мережі змінного струму з нелінійним несиметричним навантаженням;
- синтез та дослідження режимів роботи системи корекції коефіцієнту потужності в трифазній мережі змінного струму;
- дослідження ефективності регулювання реактивної потужності з конденсаторною установкою з дискретним та плавним регулюванням;
- дослідження статичних і динамічних характеристик однофазного тиристорного регулятора з активно-індуктивним навантаженням.

Висновки. На сучасному етапі розвитку енергозберігаючих технологій виявляється необхідність створення нових комп'ютеризованих лабораторних стендів, які допоможуть контролювати та корегувати вплив електротехнологічних установок на електричну мережу, за рахунок впровадження нових методів та алгоритмів управління. Крім дослідження впливу стенди допоможуть в проведенні наукових досліджень, а також організувати навчальний процес в спеціальностях. Елементом управління в зварювальній установці змінного струму виступає тиристорний регулятор напруги. Крім того зварювальні установки з тиристорними регуляторами напруги при зміні режиму управління спотворюють як форму кривої струму так і форму кривої напруги. Тому згідно з режимом роботи електротехнологічної установки, зокрема однофазної зварювальної установки змінного струму, особливу увагу необхідно приділяти впливу електротехнологічної установки на властивості електричної енергії як несинусоїдальність та несиметрія напруги, а також коливанням напруги в мережі. Показники якості електричної енергії, які необхідно контролювати для покращення якості електричної енергії: коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги; коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги; коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовностей.

Список літератури

1. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
2. Закс М.И. Сварочные выпрямители. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 96 с.
3. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
4. Родькин Д.И. Лабораторные исследовательские комплексы на базе измерительно-управляющих компьютеризированных систем // Сб. статей Проблемы создания новых машин и технологий: В 3 т. – Кременчуг, 2002. – С. 32–37.

5. Закс М.И., Каганский Б.А., Печенин А.А. Трансформаторы для электродуговой сварки. – Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 136 с.
6. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом ДОДЭКА-XXI, 2005. – 384 с.
7. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники. – К.: Техніка, 1978. – 376 с.