

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З РІЗНИМ ХАРАКТЕРОМ НАВАНТАЖЕННЯ

**С.Г. Павлюс¹, В.П. Іващенко², І.І. Папанова¹, В.І. Соборницький³, Г. А. Папанов⁴,
Д.В. Ципленков⁵, А.А. Колб⁶, Д.В. Галушко⁷**

¹ Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6654-2529

² Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,

³ Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9329-5738

⁴ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

⁶ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна,
tsyplenkov.d.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0585-5908

⁷ Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, Україна,

EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ELECTRICITY CONSUMPTION SYSTEMS WITH DIFFERENT NATURE OF LOAD

**S.G. Pavlyus¹, V.P. Ivashchenko², I.I. Papanova¹, V.I. Sobornytskyi³, G.A. Papanov⁴,
D.V. Tsiplenkov⁵, A.A. Kolb⁶, D.V. Galushko⁷**

¹ Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-6654-2529

² National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,

³ Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine,
electrical_eng@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9329-5738

⁴ National University of Railway Transport Academician V. Lazaryan, Dnipro

⁵ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
tsyplenkov.d.v@nmu.one, ORCID 0000-0003-0585-5908

⁶ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
kolb.a.a@nmu.one, ORCID 0000-0002-4016-606X

⁷ Dnipro National University named after O. Honchara, Dnipro, Ukraine,

Мета. Підвищення коефіцієнта потужності систем споживання енергії та аналіз їх ефективності в залежності від характеру навантаження.

Методика дослідження полягає у аналізі показників якості електричної енергії споживачів з різним характером навантаження.

Результати дослідження. Досліджено параметри технологічних систем живлення та споживання з лінійним і нелінійним характером навантаження. Показано що явище генерації суттєво впливає на вартість та якість електричної енергії. Встановлено, що для підвищення ефективності енергосистем необхідний індивідуальний підхід до вибору системи компенсування реактивної енергії. Показано, що для лінійних несиметричних споживачів ефективними являються типові компенсуючі пристрої.

Наукова новизна. Встановлено залежності показників якості електричної енергії від характеру споживачів.

Практичне значення. Розроблено рекомендації щодо підвищення коефіцієнта потужності в системах електроспоживання при умові мінімальної генерації реактивної енергії. Розроблено рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в лінійних несиметричних системах, для чого запропоновано застосування компенсаторів з індивідуальним регулюванням за робочими фазами.

Ключові слова: генерація, електроенергія, коефіцієнт потужності, компенсація, навантаження, потужність, споживач.

Актуальність

На стадії експлуатації діючої енергетичної системи важливе значення мають заходи по підвищенню її економічної ефективності за рахунок покращення показників якості енергії, які в нашій країні регламентуються ГОСТом 13109-97. Відомо, що ефективність електричної системи споживання залежить від багатьох показників, таких як коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми напруги (струму), несиметрія напруги, коефіцієнт форми кривих та ін. Для їх покращення фахові підприємства випускають компенсувальні пристрої реактивної енергії. Але, в ряді випадків

після їх встановлення енергетичні показники якості не досягають очікуваних значень, що пов'язано із зростанням генерації реактивної енергії, ціна за яку суттєво перевищує вартість реактивної енергії. В більшості країн світу при проектуванні систем компенсації цей факт не враховується.

В цьому аспекті актуальною стає необхідність дослідження залежності параметрів якості енергетичних систем від індивідуальних характеристик самої системи навантаження.

Сучасний стан проблеми підвищення ефективності енергосистем

Існуючі розробки з мінімізації втрат потужності здебільшого розглядають питання зменшення величини реактивної енергії у складі повної енергії за рахунок використання компенсаційних пристроїв [1, 2]. Однак вони ефективно працюють лише в лінійних системах споживання при симетричному навантаженні. В усіх інших випадках їх використання не дає бажаного результату.

У переважній більшості споживачі на підприємствах мають несиметричний характер, крім того, у багатьох випадках вони нелінійні (наприклад, частотні перетворювачі і тому подібне). Розвиток сучасної напівпровідникової техніки приводить до збільшення реактивної потужності яка погіршує синусоїдну форму кривої струму. Реальний струм таких споживачів представляє собою ряд синусоїдних складових струму з числа вищих гармонік 3,5,7,11 порядків. Такі споживачі являються нелінійними та несиметричними. Для несиметричних нелінійних споживачів традиційні системи компенсування реактивної енергії не є ефективними з таких причин:

- значно збільшується швидкість росту генерації реактивної енергії.
- мережі змінного струму захищаються вищими гармоніками, які в свою чергу негативно впливають на термін служби конденсаторів, збільшується ризик передчасного спрацьовування захисної комутаційної апаратури систем електропостачання, передчасний вихід з ладу споживачів, негативний вплив на систему споживання в тому числі за рахунок можливих резонансних явищ [1, 3].

Компенсувальні пристрої з незалежним регулюванням за окремими фазами [3] ефективно працюють лише в лінійних несиметричних системах.

Реактивна потужність при нелінійних навантаженнях функціонально залежить від величини спотворення кривих струмів і напруг. Це явище вимагає вирішення проблеми компенсації реактивної потужності з урахуванням особливостей несинусоїдних режимів. Крім цього, рівень реактивної потужності впливає на величину напруги. Відсутність єдиного підходу до визначення реактивної потужності робить актуальною розробку теорії реактивної потужності при несинусоїдних режимах. Остання базується на сутності фізичних процесів, що протікають в електричних колах з нелінійними елементами. Авторами [4] детально вивчені фізичні явища, що протікають в одно- і багатофазних системах з R,L,C контурами та коммутаторами. Виведені теоретичні співвідношення для резонансного режиму, без реактивного режиму та режиму накопичення енергії в реактивних елементах.

Для отримання заданих показників якості електроенергії необхідно проводити дослідження конкретного споживача з метою вивчення його середньо-статистичних параметрів, що дає можливість сформулювати вимоги до розробки ефективного компенсуючого пристрою з урахуванням характеру навантаження саме даного споживача.

Мета і постановка задачі

Мета роботи – підвищення коефіцієнта потужності систем споживання енергії та аналіз їх ефективності в залежності від характеру навантаження.

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати наступні задачі:

- дослідити залежність показників якості електричної енергії від характеру споживачів;
- розробити рекомендації щодо підвищення коефіцієнта потужності в системах електроспоживання при умові мінімальної генерації реактивної енергії.

Характеристика об'єкта дослідження

В якості об'єктів дослідження обрали 5 реальних підприємств з розрахунковою номінальною потужністю від 50 до 100 кВт та різним характером навантаження.

Перший споживач характеризувався дуже близьким до симетричного активно-індуктивним навантаженням. В основному працювали трифазні симетричні асинхронні комплекси. Для компенсації реактивної потужності використовували традиційну промислову конденсаторну установку. В результаті коефіцієнт потужності мав значення близьке до одиниці, генерація була нехтовно мала [1, 3].

Всі інші дослідні підприємства характеризувались несиметричним навантаженням.

Дослідне підприємство № 2 - вищий навчальний заклад - досягло ефективних показників при використанні компенсуючого пристрою з усередненим регулюванням.

На підприємствах № 3, 4 характер навантаження був несиметричний, але лінійний. Досліди показали, що звичайні симетричні пристрої на цих підприємствах забезпечують відносно високий коефіцієнт потужності ($\cos \varphi \approx 0,85$) та мінімальну генерацію тільки при роботі установок в режимі недокомпенсації.

Електропостачання та електроустаткування

Коефіцієнт потужності цих підприємств суттєво менший за одиницю. Подібну систему компенсації можна використовувати тільки якщо $\text{tg}\varphi < 0,25$. Для подальшого підвищення коефіцієнта потужності слід використовувати компенсувальні пристрої з регулюванням за окремими фазами.

Недосконалість існуючої трифазної системи компенсації полягає в тому, що для несиметричних споживачів використовують симетричні ступені конденсаторних секцій. Це приводить до недо- (перекомпенсації) окремих фаз, і, як наслідок, до збільшення генерації. Для уникнення цієї проблеми існують два шляхи. Можна зменшувати ємність конденсаторів кожної секції, але це веде до економічно не вигідного збільшення ціни самого пристрою. Другий шлях, більш ефективний, полягає у використанні пристроїв із окремим регулюванням за всіма робочими фазами. Порівнювальний аналіз показників наведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження показників якості на підприємствах з несиметричним навантаженням

Підприємства	Традиційне регулювання			Регулювання за трьома фазами		
	tgφ	Генерація, %	cosφ	tgφ	Генерація, %	cosφ
№3	0,25	10	0,85	0,1	1	0,99
№4	4	12	0,72	0,15	1,5	0,97

Споживач № 5 мав явно виражене несиметричне та нелінійне навантаження. Одночасно були присутні активно - індуктивні та активно - ємнісні приймачі. У зв'язку з нелінійністю ємнісна складова не могла ефективно компенсувати індуктивну складову. Використання типових компенсуючих пристроїв приводило лише до незначного компенсування індуктивної енергії та суттєвого збільшення генерації.

Проаналізуємо роботу цього споживача. Вхідні напруги в режимі холостого ходу були симетричними. Лінійна напруга дорівнювала 380 В, частота мережі 50 Гц. До вводу в експлуатацію нелінійного споживача характер навантаження був активно індуктивний. На цей момент активна енергія складала 20900 кВт·год, реактивна 1630 кВАр·год, генерація 0. При вмиканні навантаження параметри цієї системи дещо змінилися (таблиця 2).

Через 20 годин після вводу в експлуатацію активна енергія складала 47098 кВт·год (зросла на 28 кВт·год), а реактивна енергія виросла на 15 кВАр·год. При цьому генерація збільшилась до 66 кВАр·год. Швидкість росту генерації значно перевищила швидкість зміни реактивної енергії, чого не помічалось у випадках експлуатації лінійних споживачів. Тангенс кута зсуву фаз в рази перевищив допустиме значення.

При такому співвідношенні параметрів системи навантаження у лінійних споживачах індуктивна складова була би повністю скомпенсована. У випадку нелінійних споживачів реактивна енергія зменшилась всього на 40 відсотків. Таким чином, розглянута раніше система компенсації реактивної енергії не може працювати ефективно. З метою вибору ефективного шляху компенсування реактивної складової необхідно провести більш детальний аналіз нелінійної системи.

Аналіз параметрів нелінійного споживача

Для виконання дослідів користувалися запам'ятовувачим цифровим осцилографом С9-8 та електронним аналізатором якості електричної енергії POWER Q Plus. Були отримані векторні, хвильові діаграми та діаграма гармонійних складових напруг та струмів споживача № 5.

З векторної діаграми (рис. 1) видно, що результуючий характер навантаження - активно – ємнісний. Така система генерує реактивну енергію в напрямку джерела.

Таблиця 2 – Параметри споживача № 5 в режимі навантаження

Параметри	Фаза А	Фаза В	Фаза С	За всіма фазами
U_{ϕ} , В	221,3	216,6	219,8	
I_{ϕ} , А	57,4	112,7	121,3	
U_{Σ} , В	378,9	379,3	381,1	
I_{Σ} , А	60,77			
S , кВА	12,7	24,4	26,7	63,9
P , кВт	12,6	24,2	26,4	63,2
Q , кВАр	-1,9	-3,3	-3,5	-8,7

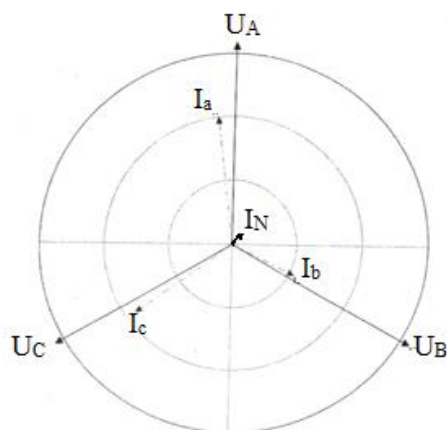


Рис. 1. Векторна діаграма струмів та напруг на вході споживача

З рис. 2 витікає, що крім основної гармоніки з частотою 50 гц наявні непарні гармонічні складові (3,5,7,9-гармонік струму та напруги). Фазні коефіцієнти гармонік прямої послідовності для напруги склали 1,7 %, 1,8 %, 1,4 %, а для струму – 4,9 %, 4,6 % і 4,5 %, чого не помічалося в споживачах з лінійною симетричною та несиметричною системою навантаження.

На рис. 3 наведені часові залежності миттєвих значень напруги та струму. Чітко видно, що вони спотворені гармонічними складовими. Хоча спотворення кривих напруги не перевищує допустимих стандартом значень, генерація росте в 4,4 рази швидше ніж реактивна енергія. Це при тому, що вартість генерації більше за ціну реактивної енергії у 3 рази.

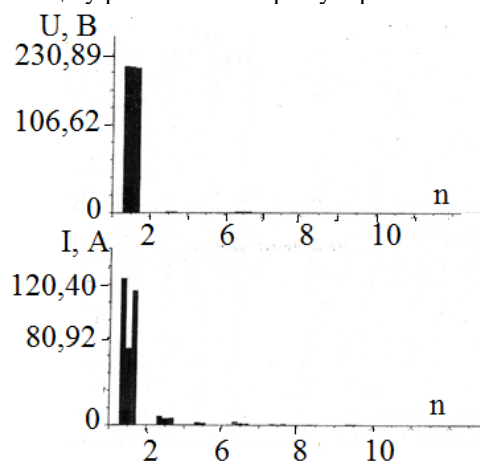


Рис. 2. Гармонічні складові напруги та струму при наявності нелінійного несиметричного споживача (n – номер гармоніки)

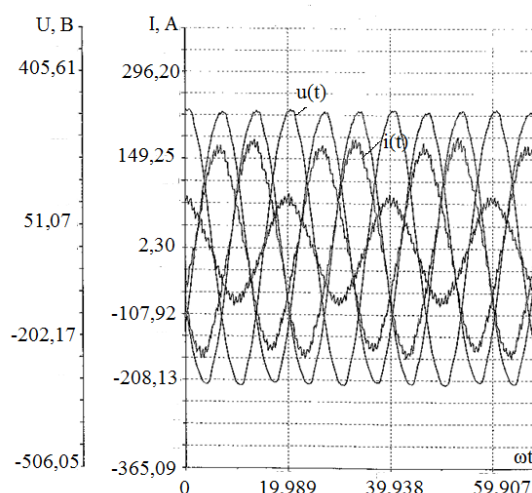


Рис. 3 - Хвильові діаграми напруги та струму на вході нелінійного споживача

Відповідність показників якості електроенергії для несиметричних споживачів будемо оцінювати за коефіцієнтами несиметрії прямої та зворотної послідовностей, значення яких повинні відповідати вимогам ГОСТу 13109-97.

За допомогою символічного методу розрахували коефіцієнти несиметрії для наведеної системи комплексних напруг: $U_a = 221,6e^{j0}$, $U_b = 216,6e^{-j120}$, $U_c = 219,8e^{j120}$.

На основі отриманих даних визначили коефіцієнти послідовностей: коефіцієнт нульової послідовності $K_0 = 1,55\%$; коефіцієнт зворотної послідовності $K_3 = 0,32\%$.

Таким чином, при несиметричному нелінійному навантаженні даного споживача коефіцієнти несиметрії відповідають вимогам діючого стандарту показників якості електричної енергії, тобто така система електропостачання має право на існування. Але в реальних умовах швидкість росту генерації в порівнянні з ростом реактивної енергії суттєво більше.

Далі дослідили вплив максимального активно-реактивного навантаження на величину коефіцієнтів послідовностей. Збільшили навантаження з лінійними та нелінійними споживачами. За рахунок падаючої

зовнішньої характеристики силового трансформатора змінилися значення фазних напруг: $U_a = 221,6ej0$, $U_b = 214e-j120$, $U_c = 196ej120$. Коефіцієнти нульової та зворотної послідовності відповідно склали 4,6 % і 3,33 %. При такій величині навантаження коефіцієнти вийшли за межі допустимих величин.

Таким чином, одним з головних недоліків нелінійних систем споживання являється наявність гармонічних складових. Для компенсації їх негативного впливу найбільш економічно вигідним є використання пасивних активно-реактивних фільтрів.

На споживачі № 5 використали типовий дросель марки ДТС-013, номінальні параметри якого: розрахункова потужність 50 кВт, номінальний струм 120 А, індуктивність 0,139 мГн.

В результаті використання фільтра були скомпенсовані гармонічні складові непарних гармонік. Але реактивна енергія була нейтралізована усього на 48 %. Тому паралельно з фільтром встановили компенсуючий пристрій з регулюванням за окремими фазами. Порівнювальний аналіз первинних показників і тих, що були отримані після використання компенсуючих засобів, наведені в таблиці 3.

Використані засоби практично знешкодили генерацію, та перетворили існуючу систему споживання на споживач з активним характером навантаження, що дає можливість всю спожиту енергію перетворювати в корисну роботу.

Таблиця 3 – Порівнювальний аналіз параметрів споживача № 5

Параметри	До компенсації	Після компенсації
Активна енергія, кВт·год	28	29,1
Реактивна енергія, кВар·год	15	0,03
Генерація, кВар·год	66	0
cosφ	0,88	0,99

Висновки

В результаті виконання роботи:

- досліджено параметри технологічних систем живлення та споживання з лінійним і нелінійним характером навантаження. Показано що явище генерації суттєво впливає на вартість та якість електричної енергії;

- встановлено, що для підвищення ефективності енергосистем необхідний індивідуальний підхід до вибору системи компенсування реактивної енергії;

- показано, що для лінійних симетричних споживачів ефективними являються типові компенсуючі пристрої;

- розроблено рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в лінійних несиметричних системах, для чого запропоновано застосування компенсаторів з індивідуальним регулюванням за робочими фазами;

- надано рекомендації щодо компенсації реактивної енергії в нелінійних споживачах за умови мінімальної генерації реактивної енергії, а саме:

- а) розрахунок гармонічних непарних складових струму та напруги як функцій індивідуальних параметрів споживача;

- б) вибір відповідної системи фільтрів для отриманих параметрів гармонік струму;

- в) встановлення пристрою для компенсації лінійної складової некомпенсованої реактивної енергії.

Такий підхід дав можливість суттєво підвищити коефіцієнт потужності при нульовій генерації.

Бібліографічний список

1. Повышение коэффициента мощности малых государственных предприятий [Текст] / С. Г. Павлюс и др. // Совр. науч. вестник. – 2011. - № 11 (107). – С. 84 - 91.
2. Соборницкий, В. И. Повышение коэффициента мощности электро-термических установок [Текст] / В. И. Соборницкий и др. // Ключови въпроси в съвременната наука: тезиси докл. XII Междунар. науч.-практ. конфер. (София, 15 – 22 априля 2016). – София, 2016. № 23. - С. 19 – 21.
3. Павлюс, Е. С. Повышение эффективности системы электро-потребления университета [Текст] / Е. С. Павлюс и др. // Хімія і сучасні технології: тези допов. VI Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та молод. вчених (Дніпро, 24 - 26 квітня 2013р.). – Д., 2013. – С. 12.
4. Шидловский, А. К. Элект-рические цепи с вентиляными ком-мутаторами [Текст]: монографія / А. К. Шидловский, В.С. Федий. – К.: ООО Артпринт, 2010. – 269 с. (друк. арк. 12,2).
5. Павлюс, С. Г. Методичні вказівки до лабораторно-практичних занять та організації самостійної роботи з дисципліни "Теорія електричних сигналів і кіл" за освітньо-професійною програмою "бакалавр" для студентів спеціальності 152 "Метрологія та інформаційно-виміррювальна техніка" (частина II) нормативний

блок "Електротехніка" [Текст]: методичні вказівки / С. Г. Павлюс, І. І. Папанова, В. І. Соборницький. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 34 с.

6. Соборницький, В. І. Эффективность технологических систем питания и потребления электроэнергии [Текст] / В. И. Соборницкий и др. // Nauka I studia. - 2016. - № 247 (161). - P. 35 – 39.

7. Соборницький, В. І. Влияние индуктивности и геометрии токоподводов в сетях высоких и низких частот [Текст] / В. И. Соборницкий и др. // - Совр. науч. вестник. – 2017. - № 4 (271). - С. 68 - 74.

АННОТАЦИЯ

Цель. Повышение коэффициента мощности систем потребления энергии и анализ их эффективности в зависимости от характера нагрузки.

Методика исследования заключается в анализе показателей качества электрической энергии потребителей с разным характером нагрузки.

Результаты исследования. Исследованы параметры технологических систем питания и потребления с линейным и нелинейным характером нагрузки. Показано что явление генерации существенно влияет на вар-мость и качество электрической энергии. Установлено, что для повышения эффективности энергосистем необходимо индивидуальный подход к выбору системы компенсации реактивной энергии. Показано, что для линейных симметричных потребителей эффективными являются типичные компенсирующие устройства.

Научная новизна. Установлены зависимости показателей качества электрической энергии от характера потребителей.

Практическое значение. Разработаны рекомендации по повышению коэффициента мощности в системах электропотребления при условии минимальной генерации реактивной энергии. Разработаны рекомендации по компенсации реактивной энергии в линейных несимметричных системах, для чего предложено исследование компенсаторов с индивидуальным регулированием по рабочим фазам.

Ключевые слова: генерация, электроэнергия, коэффициент мощности, компенсация, нагрузки, мощность, потребитель.

ABSTRACT

Goal. Increasing the power factor of energy consumption systems and analysis of their efficiency depending on the nature of the load.

The research methodology consists in the analysis of indicators of quality of electric energy of consumers with various character of loading.

Results of the research. The parameters of technological systems of power supply and consumption with linear and nonlinear nature of loading are investigated. It is shown that the phenomenon of generation significantly affects the cost and quality of electricity. It is established that to increase the efficiency of power systems requires an individual approach to the choice of reactive energy compensation system. It is shown that typical compensating devices are effective for linear symmetrical consumers.

Scientific novelty. The dependences of electricity quality indicators on the nature of consumers are established.

Practical meaning. Recommendations for increasing the power factor in power consumption systems with minimal generation of reactive energy have been developed. Recommendations for reactive energy compensation in linear asymmetric systems have been developed, for which the use of compensators with individual regulation by operating phases is proposed.

Keywords: generation, electricity, power factor, compensation, load, power, consumer.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, професором Папайкою Ю.А.