

УДК 621.316.761.2

© Власенко Р.В.¹, Бялобржеський О.В.²**ЗАСТОСУВАННЯ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ
ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ КОМПОНЕНТ СТРУМУ НЕСИМЕТРИЧНОГО
НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В ЧОТИРИПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ**

Поява однофазних споживачів в чотирипровідних мережах вимагає нового підходу до побудови системи керування силовими активними фільтрами. Розглянуто різні топології чотирипровідних силових активних фільтрів. В середовищі візуального моделювання створена електроенергетична модель з силовим активним фільтром на основі *pqr* теорії потужності. Проведено дослідження режимів роботи силового активного фільтру при несиметрії, несинусоїдальності напруги живлення та несиметричному нелінійному навантаженні. Оскільки *pqr* теорія потужності не враховує несинусоїдальність напруги, запропонована її корекція, що враховує даний параметр та покращує роботу силового активного фільтру.

Ключові слова: силовий активний фільтр, *pqr* теорія потужності, перетворення Кларка, широтно-імпульсна модуляція, *total harmonic distortion*.

Власенко Р.В., Бялобржеський А.В. Применение силового активного фильтра при компенсации компонент тока несимметричной нелинейной нагрузки в четырехпроводных сетях. Появление однофазных потребителей в четырехпроводных сетях требует нового подхода к построению системы управления силовыми активными фильтрами. Рассмотрены различные топологии четырехпроводных силовых активных фильтров. В среде визуального моделирования создана электроэнергетическая модель с силовым активным фильтром на основе *pqr* теории мощности. Проведено исследование режимов работы силового активного фильтра при несимметрии, несинусоидальности напряжения питания и несимметричной нелинейной нагрузке. Поскольку *pqr* теория мощности не учитывает несинусоидальность напряжения, предложена коррекция теории, учитывающая данный параметр и улучшающая работу силового активного фильтра.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, *pqr* теория мощности, преобразование Кларка, широтно-импульсная модуляция, *total harmonic distortion*.

R.V. Vlasenko, O.V. Bialobrzieski. Using active power filter to compensate the current component of asymmetrical non-linear load in the four wire network. Electricity quality improving is extremely relevant nowadays. With such industrial loads as induction motors, induction furnaces, welding machines, controlled or uncontrolled rectifiers, frequency converters and others reactive power, harmonics and unbalance are generated in power grid. Reactive power, higher harmonic currents and asymmetry loads influence the functioning of electric devices and electrical mains. An effective technical solution is the use of new compensating devices, that is active power filters. The emergence of consumers with a unit capacity of four wire networks requires a new approach to building system control active power filter. When designing the active power filter control system the current flowing in the neutral wire must be taken into account. To assess the power balance in the four wire active power filter, scientists have proposed to apply *pqr* theory of power based on the Clarke transformation. There are different topologies of three-phase four wire active power filters. A visual simulation of Matlab / Simulink model with an active power filter based on *pqr* theory of power has been created. A method of pulse width modulation with four control channels was used as pulses forming systems with transistor

¹ аспірант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, laplandec267@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, seemal@kdu.edu.ua

keys. Operating conditions of three-phase four wire active power filter with asymmetry, non-sinusoidal voltage source and asymmetric load have been studied. The correction taking into account the means improving the active power filter has been offered as pqr theory of power does not take into account non-sinusoidal voltage.

Keywords: active power filter, pqr theory of power, Clarke transformation, pulse width modulation, total harmonic distortion.

Постановка проблеми. У комплексі заходів, спрямованих на підвищення якості електричної енергії, суттєве значення має питання боротьби з поширенням несиметрії напруг і струмів в трифазних мережах промислових підприємств. Вирішення цього питання дозволяє підвищити надійність електропостачання, а також знизити втрати електроенергії, як в електричній мережі, так і в приймачах [1].

Останнім часом в сучасних системах електропостачання зростає кількість несиметричних навантажень зі значною одиничною потужністю. Негативний вплив несиметрії напруг і струмів на роботу електрообладнання відзначено у [1]. Проблеми якості електроенергії загострилися з впровадженням напівпровідникової техніки в промисловості, особливо це проявляється в чотирипровідних мережах [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Трифазні чотирипровідні силові активні фільтри (САФ) були запропоновані дослідниками в якості ефективного вирішення згаданих задач [3-5]. Трифазні чотирипровідні САФ розроблені на основі $p-q$ теорії миттєвої потужності, використання якої дозволяє обчислити потрібний струм корекції, враховуючи струм в нейтралі. Ця теорія була вперше запропонована Н. Акагі в 1984 році [6], і з тих пір є предметом різних інтерпретацій і поліпшень [7, 8]. $p-q$ теорія миттєвої потужності отримала розвиток у вигляді $p-q-r$ теорії, що базується на перетвореннях трифазних координат $a-b-c$ в $\alpha-\beta-0$ для трифазних чотирипровідних мереж та визначає дві компоненти реактивної потужності [7, 8]. Практичне застосування $p-q-r$ теорії полягає у реалізації алгоритму керування потоком потужності шляхом інжекції визначеного струму у чотири лінії мережі при роботі шунтуючого САФ. Зважаючи на можливість використання для чотирьохпровідних ліній декількох алгоритмів формування струму, в роботі поставлена задача порівняльного аналізу ефективності при реалізації обумовлених алгоритмів.

Метою даної роботи є дослідження режимів роботи та оцінка якості роботи САФ за електричними та енергетичними параметрами.

Виклад основного матеріалу. Нелінійні навантаження, як наприклад, однофазні керовані або некеровані випрямлячі для приводів з регульованою швидкістю обертання, зварювальних агрегатів, комп'ютерів і т.д., вимагають інших підходів для врахування балансу потужностей САФ. В результаті збільшується струм в нейтральному (нульовому) проводі, який має у складі вищі гармоніки, реактивну потужність навантаження і дисбаланс, що створюється в електричній мережі.

На рис. 1 показано три конфігурації САФ. Перша конфігурація (рис. 1, а) з чотирипровідним паралельним САФ включає два послідовно з'єднані конденсатори з еквівалентною ємністю, де до їх середньої точки підключається нейтральний провід. В даному випадку весь струм нейтралі протікає через шини постійного струму конденсаторів, які мають велике значення для компенсації реактивної потужності та зниження вищих гармонік. Струм нейтралі, що протікає через шини конденсаторів, впливає на їх роботу, як накопичуючих елементів. Тому дана схема не отримала широкого розповсюдження [4, 5]. Рис. 1, б представляє іншу конфігурацію САФ на базі перетворювача зі структурою, відомою, як чотирьохплечова. Четверте плече транзисторів використовується для керування струмом нейтралі в схемі САФ. Ця конфігурація отримала ширше розповсюдження, так як надає можливість незалежного керування корекцією струму в нейтралі. При цьому виникають незначні недоліки схеми рис. 1, б в порівнянні зі схемою рис. 1, а. Додається ще одне плече транзисторів, що веде до подорожчання схеми, необхідності реалізації додаткового каналу управління плечем транзисторів.

У чотирипровідних мережах високої напруги рекомендується використовувати три однофазні мостові транзисторні перетворювачі (рис. 1, в), що входять до складу САФ [5]. Така конфігурація дає підґрунтя для незалежного керування фазними струмами САФ, наявність трансформаторів виключає необхідність використання вхідних реакторів, окрім цього, є додатковим

інструментом для узгодження рівнів напруг мережі з напругою транзисторних перетворювачів. Збільшення кількості транзисторів відносно попередніх схем, на перший погляд, сприймається негативно, але підвищується якість керування ними, зменшується індивідуальне навантаження на транзистор [3-5].

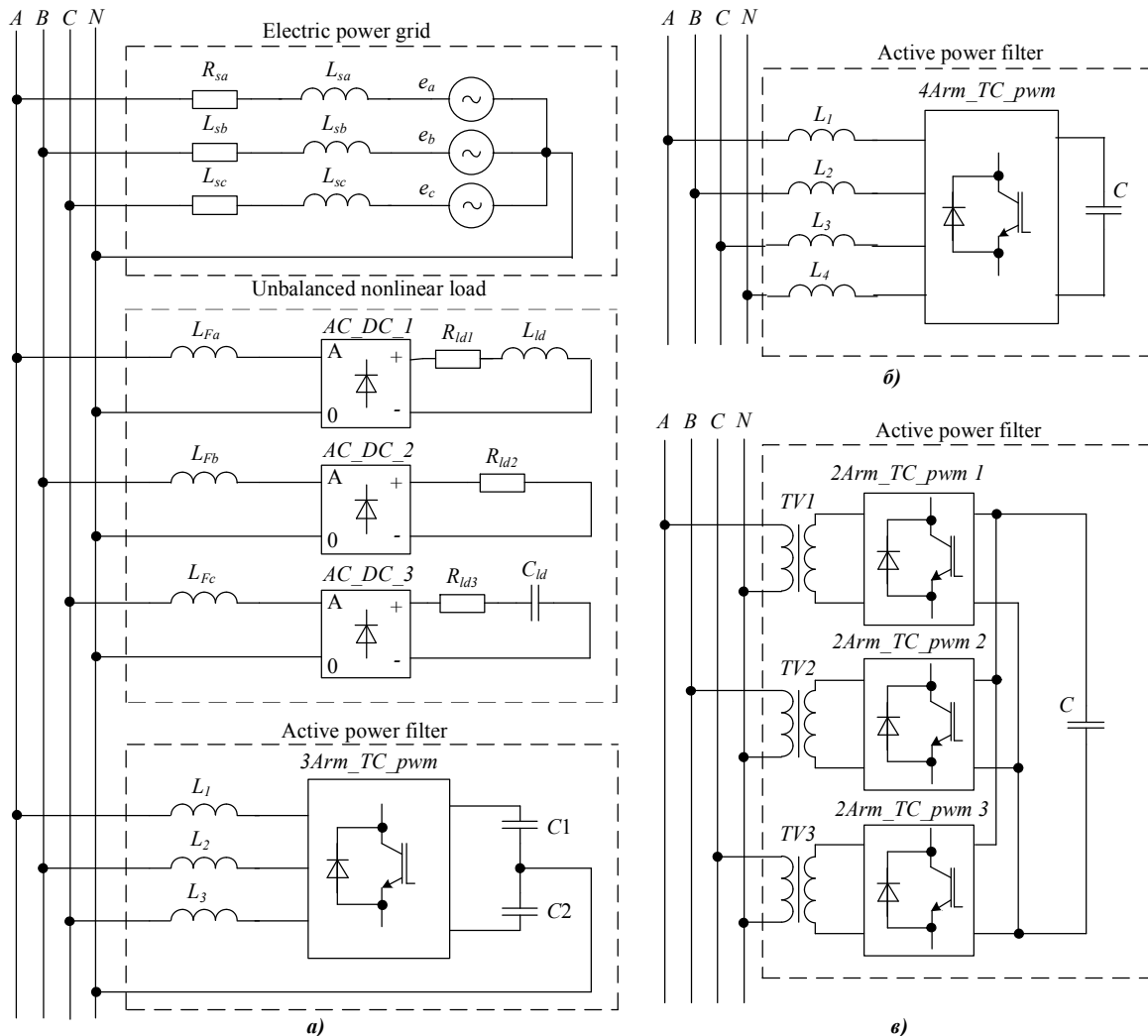


Рис. 1 – Схема трифазного чотирипровідного САФ: а) – з підключенням нейтрального проводу до середньої точки двох послідовно з'єднаних конденсаторів; б) – з додатковою ланкою силових ключів; в) – з трансформаторами та однофазними перетворювачами із загальним колом постійної напруги

З огляду на переваги та недоліки, для дослідження було обрано конфігурацію трифазного чотирипровідного САФ, зображеного на рис. 1, б. Для визначення струму САФ використано p - q - r теорію потужності. Формування імпульсів управління ключами транзисторів реалізовано використанням методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), широко розповсюдженій для побудови системи управління трифазними чотирипровідними САФ [3-5, 6].

Формування струму САФ з використанням p - q - r теорії потужності відбувається наступним чином. Вісь p співпадає за напрямом з узагальненим вектором напруги. Це означає, що вісь p буде вільно обертатися в тривимірному просторі. Вісь q знаходиться на площині $\alpha\beta$ і ортогональна до осі p . Вісь r та, що є ортогональною до обох осей p і q [7].

Реалізація послідовності розпочинається з перетворення напруг u_a, u_b, u_c та струмів i_a, i_b, i_c навантаження зі стаціонарної системи координат a - b - c $\mathbf{U}_{abc}=[u_a \ u_b \ u_c]^T$, $\mathbf{I}_{abc}=[i_a \ i_b \ i_c]^T$ до стаціонарної системи координат α - β - 0 $\mathbf{U}_{\alpha\beta 0}=[u_\alpha \ u_\beta \ u_0]^T$, $\mathbf{I}_{\alpha\beta 0}=[i_\alpha \ i_\beta \ i_0]^T$, використовуючи перетворення Кларка:

$$\mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\mathbf{U}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta 0} \mathbf{U}_{abc}; \quad \mathbf{I}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta 0} \mathbf{I}_{abc}. \quad (2)$$

Цей крок відповідає початковому кроку p - q теорії. Перетворення струму зі стаціонарної системи координат α - β - 0 $\mathbf{I}_{pqr} = [i_\alpha \ i_\beta \ i_0]^T$ до обертової системи координат p - q - r $\mathbf{I}_{pqr} = [i_p \ i_q \ i_r]^T$ виконують, зважаючи на взаємне розташування осей координат за рівнянням:

$$\mathbf{I}_{pqr} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0}} & \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta 0}} & \frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta}}{u_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha\beta 0}, \quad (3)$$

де узагальнений вектор напруги у просторі α - β - 0 та площині α - β відповідно:

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}, \quad u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (4)$$

Таким чином, управління за опорним струмом в p - q - r теорії вирішує два завдання: ліквідація струмів в нейтралі, балансування синусоїдальних фазних струмів. Усунення струму в нейтралі відбувається шляхом мінімізації, в ідеальному випадку до нульового значення, тобто переводу вектора з простору α - β - 0 до площини α - β .

Синусоїдальні і збалансовані фазні струми можуть бути отримані, якщо проекцію узагальненого вектора струму i_p забезпечити незмінною. Розглядаючи, таким чином:

$$i_p = i_{p_dc} + i_{p_ac}, \quad (5)$$

де i_{p_dc} – постійне (інтегроване) значення струму i_p ; i_{p_ac} – це пульсації i_p .

Використовуючи процедуру фільтрації, виділяють зі струму i_p постійне значення i_{p_dc} , а у якості заданого струму САФ обирають компоненту i_{p_ac} та компоненту i_q . Для того, щоб повернути струм в систему координат α - β - 0 , використовують зворотнє матричне перетворення вектора $\mathbf{I}_{pqr}' = [i_{p_ac} \ i_q \ i_r]^T$:

$$\mathbf{I}_{\alpha\beta 0}' = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_\alpha & -\frac{u_\beta u_{\alpha\beta 0}}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_\beta & \frac{u_\alpha u_{\alpha\beta 0}}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \\ u_0 & 0 & u_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \mathbf{I}_{pqr}'. \quad (6)$$

Заданий струм в координатах a - b - c $\mathbf{I}_{abc}' = [i_a' \ i_b' \ i_c']^T$ знаходиться з використанням зворотного перетворення Кларка $\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}^{abc} = (\mathbf{T}_{abc}^{\alpha\beta 0})^{-1}$:

$$\mathbf{I}_{abc}' = \mathbf{T}_{\alpha\beta 0}^{abc} \mathbf{I}_{\alpha\beta 0}'. \quad (7)$$

Заданий струм САФ в нейтральному проводі з використанням одиничної матриці третього порядку \mathbf{E}_3 :

$$i_0' = -\mathbf{E}_3 \mathbf{I}_{abc}'. \quad (8)$$

Струми i_a' , i_b' , i_c' , i_0' є вхідними параметрами для системи управління транзисторним перетворювачем САФ. Система управління транзисторним перетворювачем побудована за принципом управління по відхиленню заданого параметра, яким у даному випадку є струму для кожної лінії. Формування імпульсів управління вентилями відбувається шляхом реалізації ШІМ вихідного сигналу регулятора [9].

В програмі MATLAB створена модель електричної системи з трифазним чотирипровідним САФ (рис. 2), що включає: електричну мережу (*Three-Phase Source*) з еквівалентним активним та індуктивним опорами, лінійне навантаження (*Three-phase RL load*) та підключені через трифазний реактор (*Reactor*) три однофазні некеровані мостові випрямлячі (*AC-DCI-3*) з активно-

індуктивним навантаженням (*RL load*), активним навантаженням (*R load*) та активно-ємнісним навантаженням (*RC load*); трифазний чотирипровідний транзисторний перетворювач (*Transistor converter*), струмообмежуючі реактори (*L1-4*); конденсатор (*C*); систему формування заданого струму САФ (*p-q-r theory power*); систему формування імпульсів управління перетворювачем САФ (*PWM*) та вимірювальні блоки (*Measurement source, Measurement neutral source, Measurement load, Measurement neutral load, Measurement APF, Measurement neutral APF*).

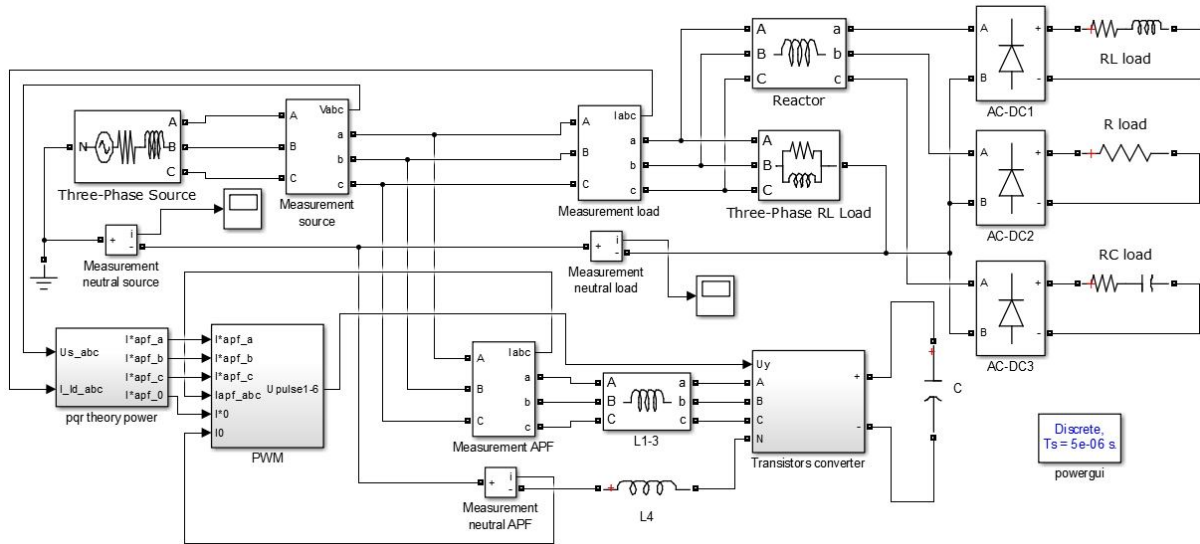


Рис. 2 – Електроенергетична модель з трифазним чотирипровідним САФ

Електропостачання здійснюється від електричної мережі (*Three-Phase source*) з номінальною напругою $U_s=380\text{ В}$ і частотою 50 Гц . Еквівалентні активний та реактивний опори мережі розраховані, виходячи з допустимої втрати напруги на них 7% , та складають відповідно $R_s=0,1\text{ Ом}$; $L_s=1,3\cdot 10^{-5}\text{ Гн}$. Лінійне навантаження (*Three-phase RL load*) з активною потужністю $P_{ld}=30\text{ кВт}$, реактивною потужністю $Q_{ld}=66\text{ кВАр}$ та нелінійне навантаження представлене у вигляді трьох однофазних некерованих мостових випрямлячів відповідно з активно-індуктивним $R_{ld1}=2,5\text{ Ом}$; $L_{ld1}=0,0116\text{ Гн}$ (*RL load*); активним $R_{ld2}=4\text{ Ом}$ (*R load*) та активно-ємнісним навантаженням $R_{ld3}=2\text{ Ом}$; $C_{ld3}=1\text{ нФ}$ (*RC load*). Введене до моделі навантаження забезпечує несинусоїдальність та несиметрію струму. Відповідно до потужності навантаження за [9, 10] розраховані параметри САФ: частота комутації $f=10\text{ кГц}$; коефіцієнт П-регулятора $P=0,5$; струмообмежуючі реактори $L1-4=0,0054\text{ Гн}$; конденсатор ємністю $C=20\text{ мФ}$ та напругою $U_{dc}=2000\text{ В}$.

В ході роботи трифазного чотирипровідного САФ отримані осцилограми струму навантаження i_{ld} і мережі i_s по фазам *abc* (рис. 3), струму нейтралі навантаження i_{NL} , САФ i_{NF} та мережі i_{NS} (рис. 4). Як видно з рис. 3, б, в результаті роботи системи САФ забезпечується зниження гармонік струму та його симетрування по фазам *a-b-c*, при цьому забезпечується зниження струму нульового провідника (рис. 4, б). Результуючий струм нульового провідника з боку мережі є помилкою регулювання струму, яку не компенсує регулятор струму САФ.

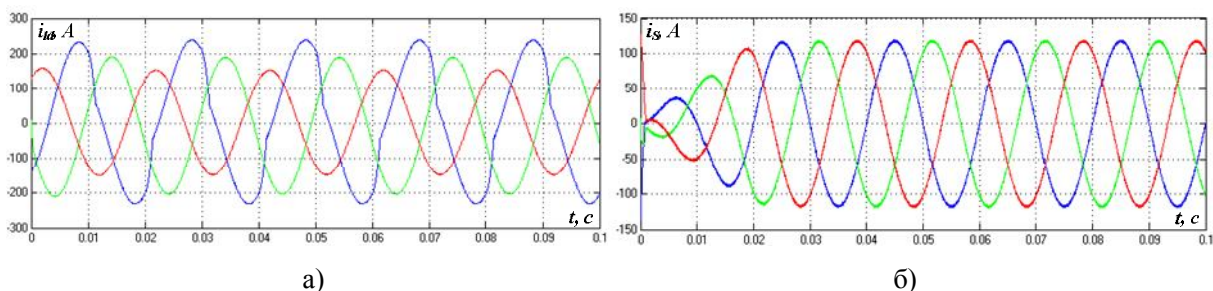


Рис. 3 – Осцилограми по фазам *abc*: а) – струму навантаження i_{ld} ; б) – струму мережі i_s

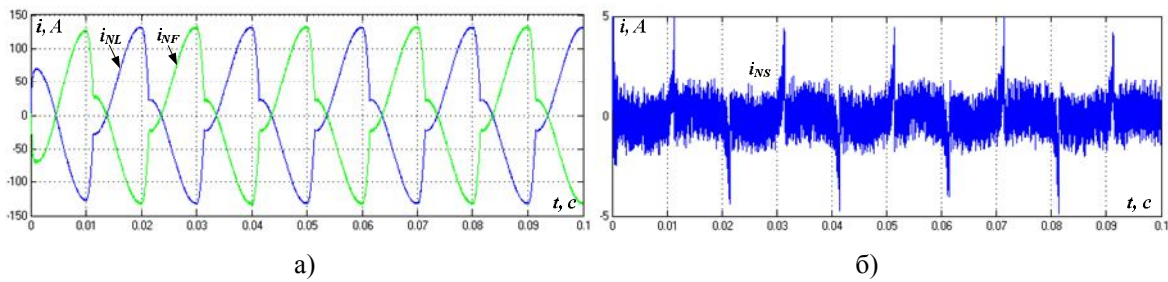


Рис. 4 – Осцилограми: а) – струму нейтралі навантаження i_{NL} та САФ i_{NF} ; б) – струму нейтралі мережі i_{NS}

Узагальнюючи результати експерименту, виконано порівняльний аналіз активної, реактивної потужностей та коефіцієнту спотворення синусоїдальності THD (*total harmonic distortion*) струму для навантаження та мережі (табл. 1). За даними табл. 1 побудовано діаграми рис. 5.

Таблиця 1

Зведені показники при симетричній напрузі мережі

$P, \text{кВт}$			$Q, \text{кВАр}$			$THD, \text{в.о.}$		
a	b	c	a	b	c	a	b	c
Навантаження								
22,57	20,35	9,257	26,27	21,02	20,36	0,1133	0,0021	0,0028
Мережа								
17,58	17,57	17,56	0,024	0,011	0,039	0,0101	0,0071	0,0074

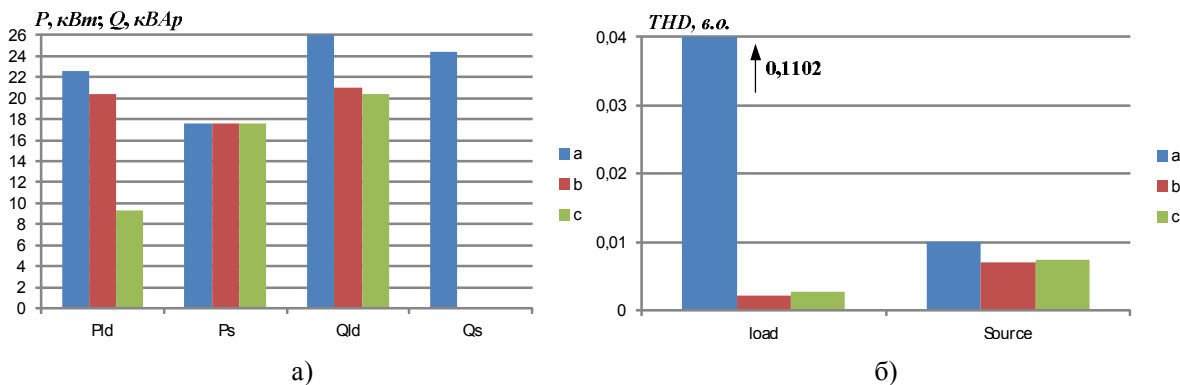


Рис. 5 – Графіки: а) – активної потужності навантаження Pld та мережі Ps та реактивної потужності навантаження Qld та мережі Qs ; б) – коефіцієнта THD струму навантаження (load) та мережі (Source)

Активна Pld і реактивна Qld потужність навантаження – несиметричні (рис. 5, а), тоді як при роботі САФ виконується симетрування. Активна потужність в мережі Ps розподіляється рівномірно, реактивна потужність Qs знижується до нуля. Параметр THD струму (рис. 5, б) знижується та розподіляється рівномірно між фазами мережі (Source).

Для дослідження впливу несиметрії напруги мережі на роботу моделі та вплив на процес формування струму САФ в модель у фазу a трифазної електричної мережі (*Three-Phase Source*) введено джерело напруги амплітудою 20 В . Виконано два експерименти з підвищенням та зниженням напруги фази a .

Узагальнені показники експерименту зведені до табл. 2. За отриманими даними табл. 2 побудовано діаграми – рис. 6.

Таблиця 2

Зведені показники при амплітудній несиметричній напрузі мережі (фаза *a*)

Фаз. зсув	<i>P</i> , кВт			<i>Q</i> , кВАр			<i>THD</i> , в.о.		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
180°	Навантаження								
	19,76	20,38	9,269	22,99	21,04	20,39	0,1135	0,002	0,0028
	Мережа								
	15,38	17,29	17,28	0,02	0,145	0,124	0,0132	0,012	0,013
0°	Навантаження								
	25,57	20,32	9,244	29,76	20,99	20,34	0,1132	0,002	0,0028
	Мережа								
	19,93	17,85	17,84	0,031	0,176	0,2	0,015	0,012	0,012

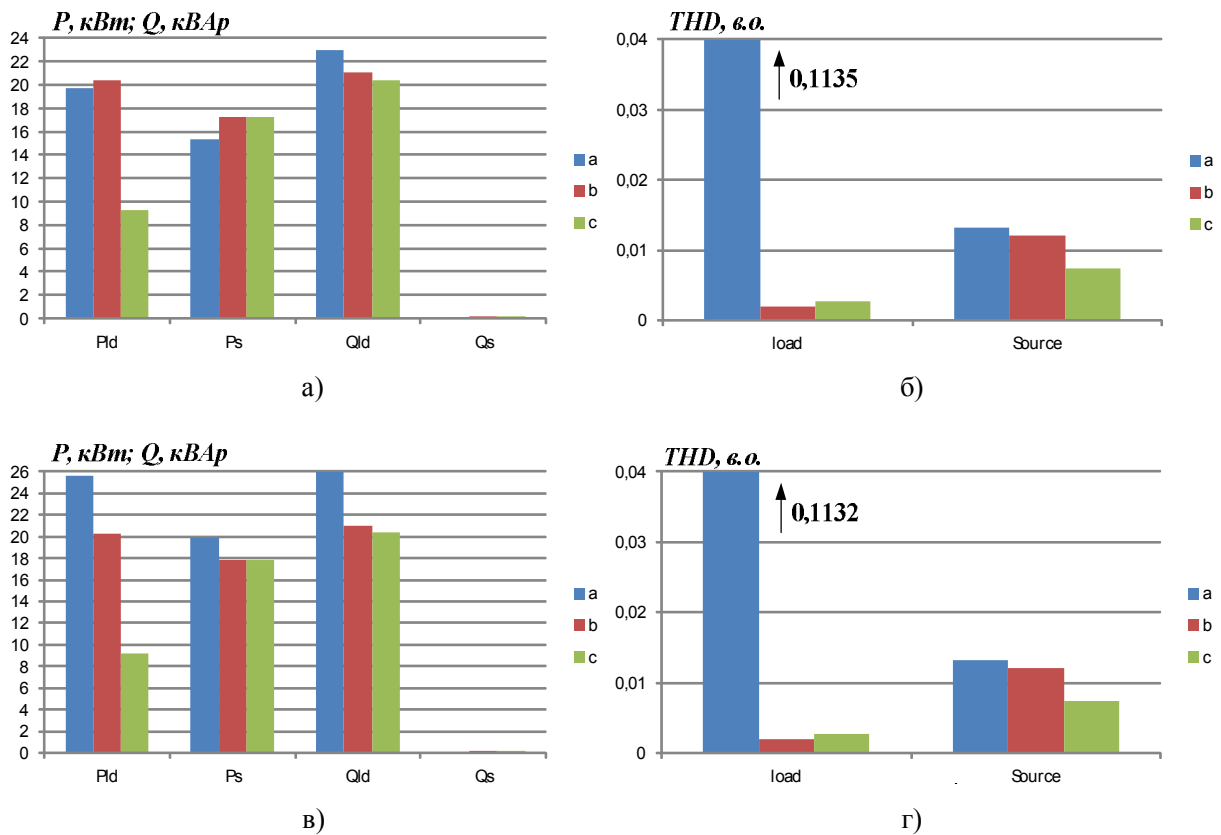


Рис. 6 – Графіки активної, реактивної потужності навантаження *Pld*, *Qld* та мережі *Ps*, *Qs* при фазовому зсуві: а) – 180°; в) – 0°; та коефіцієнта *THD* струму навантаження (*load*) та мережі (*Source*) при фазовому зсуві: б) – 180°; г) – 0°

Аналіз діаграм показує підвищення завантаження (рис. 6, а) та зниження завантаження (рис. 6, в) фази, у якій, відповідно, збільшено та зменшено амплітуду напруги.

Важливим фактором, що впливає на роботу САФ, є несинусоїдальна напруга мережі, що може бути спотворена паралельними навантаженнями (іншими споживачами). Тому є необхідність враховувати несинусоїдальність напруги мережі, бо це викличе некоректну реакцію в режимах роботи САФ. *p-q-r* теорія потужності не враховує несинусоїдальність напруги мережі живлення. Запропоновано корекцію *p-q-r* теорії потужності.

Для врахування несинусоїдальної напруги мережі виділяємо з напруги мережі складову за основною гармонікою, використовуючи розкладання в ряд Фур'є:

$$U_1 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad (9)$$

де $a_1 \cos(1\omega t)$, $b_1 \sin(1\omega t)$ – амплітуди і фази складової першої гармоніки.

Далі, виконуємо зворотне перетворення напруги за основною гармонікою до трифазної системи координат $a-b-c$:

$$u = U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (10)$$

де ω – кутова частота; φ – фазовий зсув.

Для проведення експерименту з несинусоїдальною несиметричною напругою мережі використано три джерела напруги: фаза a – з амплітудою першої гармоніки 20 В; фаза b – з амплітудою третьої гармоніки 20 В; фаза c – з амплітудою третьої гармоніки 20 В. Отримана осцилограма струму мережі з застосуванням $p-q-r$ теорії потужності (рис. 7, а) та при застосуванні корекції $p-q-r$ теорії потужності (рис. 7, б). Узагальнені показники експерименту зведені до табл. 3. За даними табл. 3 побудовані графіки – рис. 8.

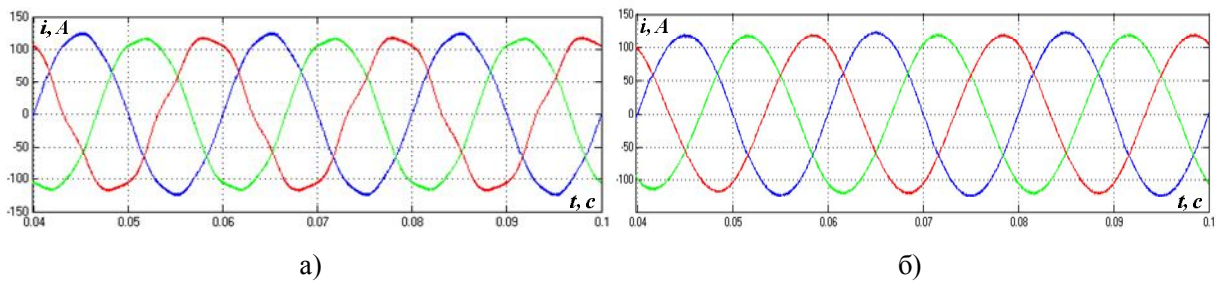


Рис. 7 – Осцилограми струму мережі при застосуванні: а) – $p-q-r$ теорії потужності; б) – корекції $p-q-r$ теорії потужності

Таблиця 3

Отримані дані величин до роботи та під час роботи САФ при несинусоїдальній напрузі мережі

Вар. експер.	$P, \text{кВт}$			$Q, \text{кВАр}$			$THD, \text{в.о.}$		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Вар. експер.	Навантаження								
	25,58	20,31	9,248	29,77	20,97	20,34	0,113	0,05	0,03
Без корекції	Мережа								
	19,84	18	17,74	0,222	0,184	0,382	0,024	0,051	0,058
Корекція	Мережа								
	19,94	17,83	17,84	0,012	0,154	0,202	0,016	0,013	0,014

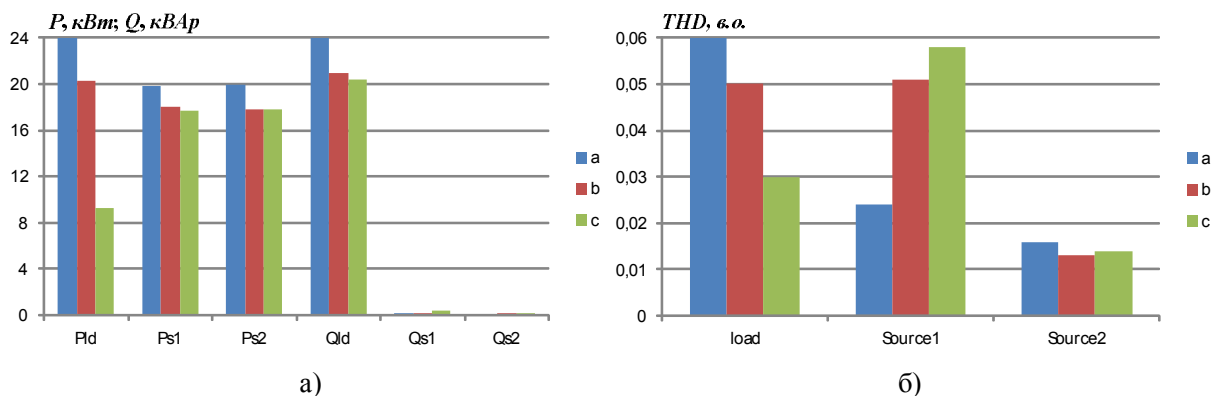


Рис. 8 – Графіки: а) – активної потужності навантаження P_{ld} та мережі P_s та реактивної потужності навантаження Q_{ld} та мережі Q_s ; б) – коефіцієнта THD струму навантаження (load) та мережі (Source)

Висновки

1. Для чотирипровідного САФ p - q - r теорія потужності забезпечує баланс потужностей та струмів мережі при несиметричному нелінійному навантаженні, при цьому без урахування помилки регулювання струму повністю компенсується струм нейтрального провідника.
2. Як показують результати досліджень та аналіз завантаження фаз мережі активною потужністю, відпрацьовуючи алгоритм формування струму за p - q - r теорією при несиметрії напруги мережі, за фазами струм розподіляється відповідно до розподілу напруги, що має певний сенс, беручи до уваги причини виникнення несиметрії напруг.
3. При несинусоїдальній несиметричній напрузі мережі в САФ при формуванні струму за p - q - r теорією раціонально використовувати фільтр низьких частот у каналі перетворення напруги, виключаючи тим самим вплив вищих гармонік напруги на формування струму.

Список використаних джерел:

1. Гриб О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения / О.Г. Гриб. – Харьков : ХНАГХ, 2004. – 180 с.
2. Баланс энергии в электрических цепях / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, А.В. Денисюк, В.Я. Жуйков, М.Т. Стрелков, Ю.А. Яценко. – Киев : Наукова думка, 1992. – 312 с.
3. Bhim Singh. A review of active filters for power quality improvement / Bhim Singh, Kamal Al-Haddad & Ambrish Chandra // IEEE transactions on industrial electronics. – 1999. – Vol. 46 – № 5 – Pp. 960-971.
4. Kouara H. Comparative study of three phase four wire shunt active power filter topologies based fuzzy logic dc bus voltage control / H. Kouara, H. Laib, A. Chaghi // International journal of energy, information and communications. – 2014. – Vol. 5. – Issue 3. – Pp. 1-12.
5. Teke A. Active power filter: review of converter topologies and control strategies / A. Teke, L. Saribulut, M. Emin Meral // Gazi university journal of science. – 2011. – Vol. 24. – Issue 2. – Pp. 283-289.
6. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – Hoboken, New Jersey, USA: IEEE press, 2007. – 379 p.
7. Kim H.S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H.S. Kim, H. Akagi // Conference records of IEEE PEDS 99. – 1999. – Pp. 422-427.
8. Kim H.S. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory theory / H.S. Kim, B.F. Bak-Jensen, B. Jaeho Choi // Power electronics specialists conference. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 478-485.
9. Popescu M. Optimum control strategy of three-phase shunt active filter system / M. Popescu, A. Bitoleanu, M. Dobriceanu, V. Suru // World academy of science, engineering and technology. – 2009. – № 58. – Pp. 441-446.
10. Zakis J. Comparison of flexible systems of reactive power compensation / J. Zakis, I. Rankis // 5th international symposium «Topical problems in the field of electrical and power engineering», doctoral school of energy and geotechnology kuressaare. – 2008. – Pp. 99-102.

Bibliography:

1. Gryb O.G. Control and regulation assymmetric regimes in systems of electric power / O.G. Gryb. – Kharkiv : HNAGH, 2004. – 180 p. (Rus.)
2. The balance of energy in electric circuits / V.E. Tonkal', A.V. Novosel'tsev, A.V. Denysiuk, V.Ya. Guykov, M.T. Strelkov, Yu.A. Yatsenko. – Kiev : Naukova dumka, 1992. – 312 p. (Rus.)
3. Bhim Singh. A review of active filters for power quality improvement / Bhim Singh, Kamal Al-Haddad & Ambrish Chandra // IEEE transactions on industrial electronics. – 1999. – Vol. 46 – № 5 – Pp. 960-971.
4. Kouara H. Comparative study of three phase four wire shunt active power filter topologies based fuzzy logic dc bus voltage control / H. Kouara, H. Laib, A. Chaghi // International journal of energy, information and communications. – 2014. – Vol. 5. – Issue 3. – Pp. 1-12.
5. Teke A. Active power filter: review of converter topologies and control strategies / A. Teke, L. Saribulut, M. Emin Meral // Gazi university journal of science. – 2011. – Vol. 24. – Issue 2. – Pp. 283-289.
6. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Wa-

- tanabe, M. Aredes. – Hoboken, New Jersey, USA: IEEE press, 2007. – 379 p.
7. Kim H.S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H.S. Kim, H. Akagi // Conference records of IEEE PEDS 99. – 1999. – Pp. 422-427.
 8. Kim H.S. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory theory / H.S. Kim, B.F. Bak-Jensen, B. Jaeho Choi // Power electronics specialists conference. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 478-485.
 9. Popescu M. Optimum control strategy of three-phase shunt active filter system / M. Popescu, A. Bitoleanu, M. Dobriceanu, V. Suru // World academy of science, engineering and technology. – 2009. – № 58. – Pp. 441-446.
 10. Zakis J. Comparison of flexible systems of reactive power compensation / J. Zakis, I. Rankis // 5th international symposium «Topical problems in the field of electrical and power engineering», doctoral school of energy and geotechnology kuressaare. – 2008. – Pp. 99-102.

Рецензент: О.М. Сінчук
д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. М. Остроградського

Стаття надійшла 27.10.2015

УДК 628.94:535

© Говоров Ф.П.¹, Король О.В.²,

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТ

В статті розглядається спосіб знезараження питної води, що базується на використанні світлодіодних джерел світла для генерації ультрафіолетового випромінювання. Запропоновано структуру системи знезараження води, методика та алгоритм розрахунку світлорозподілу світлодіодних джерел світла, що забезпечують ефективне використання електричної енергії для знезараження води.

Ключові слова: ультрафіолетове випромінювання, світлодіодні джерела світла, бактерицидна установка, структура, методика, алгоритм, програма розрахунку світлорозподілу.

Говоров Ф.П., Король О.В. Энергоэффективная технология обеззараживания воды в системах водоснабжения городов. В статье рассматривается способ обеззараживания питьевой воды, основанный на использовании светодиодных источников света для генерации ультрафиолетового излучения. Предложена методика и алгоритм расчета светораспределения светодиодных источников света, которые обеспечивают эффективное использование электрической энергии для обеззараживания воды.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, светодиодные источники света, бактерицидная установка, структура, методика, алгоритм, программа расчета светораспределения.

F.P. Govorov, O.V. Korol. Energy efficient water disinfection technology in city water supply system. The article describes a method of drinking water disinfection, based on the use of LED light sources for generating ultraviolet radiation, the radiation having a bactericidal effect on microorganisms and minimizing the energy expenditure. It eliminates the spread of pathogens in the water decreasing the amount of reagents, thereby

¹ д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків

² ст. наук. співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, oljana830804@mail.ru