



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **65509** (13) **U**  
(51) МПК  
**H02J 3/18 (2006.01)**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ**ОПИС**  
**ДО ПАТЕНТУ**  
**НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**видається під  
відповідальність  
власника  
патенту**(54) СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ НЕАКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ТРИФАЗНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ СПОЖИВАЧІВ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

1

2

(21) u201105659

(22) 04.05.2011

(24) 12.12.2011

(46) 12.12.2011, Бюл. № 23, 2011 р.

(72) БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ, ДАВИДОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ, КАРЛИК ЄВГЕН ПАВЛОВИЧ

(73) КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

(57) Спосіб зниження неактивної складової струму трифазної електричної мережі змінного струму споживачів з нелінійним навантаженням, що полягає у контролі напруги та струму в мережі та струму навантаження, як силовий канал використовується інвертор, що підключений паралельно навантаженню, для покращення форми струму на

виході інвертора встановлений Г-подібний фільтр, який **відрізняється** тим, що як інвертор використовується трифазний мостовий інвертор з індуктивним та ємнісним накопичувачами, в системі керування визначають коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги по кожній фазі та на основі різниці між заданим та поточним значенням змінюють частоту імпульсів модуляції системи керування інвертором, визначають приведений коефіцієнт потужності по кожній фазі та на основі різниці між заданим та поточним значенням змінюють шпаруватість імпульсів модуляції системи керування інвертором, контролюють напругу конденсатора

Спосіб належить до галузі електротехніки, і може використовуватись в пристроях для компенсації неактивних складових потужностей з симетруванням трифазної електричної мережі змінного струму.

Відомий спосіб [патент RU 2363085, H02J 3/18, 27.07.2009 Бюл. №21. Способ снижения энергоемкости энергетической системы потребителя и устройство для его осуществления, Ракутько С.А.] полягає в застосуванні компенсуючої конденсаторної установки, обчисленні необхідної ємності конденсатора за умови забезпечення максимального значення коефіцієнта потужності в кожній фазі, установки ємності кожної фази трифазної конденсаторної установки як середнього арифметичного значення з обчислених значень ємності. Пристрій для реалізації даного способу містить в кожній фазі трифазної мережі датчик напруги, датчик реактивного струму навантаження, блок ділення, суматор, до входів якого підключені виходи блоків ділення, а вихід через блок масштабування сполучений із загальним для всіх фаз виконуючим елементом, що перемикає секції конденсаторної установки.

Суттєві ознаки, що збігаються із способом, що заявляється: застосування компенсуючої конденсаторної установки, забезпечення максимального значення коефіцієнта потужності в кожній фазі.

Недоліки даного способу наступні: при розрахунку середнього арифметичного значення величини ємності конденсаторної батареї при максимальному навантаженні в мережі виникають режими недокомпенсації; спосіб має дискретне регулювання реактивною потужністю у зв'язку з перемиканням секції конденсаторної батареї з затримкою в часі; використання способу знижує рівень електромагнітної сумісності в електричній мережі в моменти комутації конденсаторної батареї; не враховується споживання реактивної потужності за рахунок вищих гармонійних складових струму та напруги при роботі споживачів з нелінійним навантаженням.

Відомий спосіб [патент RU 2354025, H02J 3/18, 27.04.2009 Бюл. №12. Способ компенсации высших гармоник и коррекция коэффициента мощности сети, Абрамович Б.М., Поліщук В.В., Сичев Ю.А.] полягає у формуванні імпульсів керування силовими ключами інвертора із використанням фазової синхронізації напруги і струму мережі, при цьому до фазової синхронізації напруги і струму сигнали від датчиків напруги обробляються фазовим перетворювачем, а після фазової синхронізації вихідні сигнали блока фазової синхронізації помножуються на сигнал задання по струму регулятора напруги накопичувального конденсатора, обробляються фазовим перетворювачем, потім

(13) **U**  
(11) **65509**  
(19) **UA**

порівнюються з вимірювальними сигналами струму нелінійного навантаження, заданого і фактичного струму інвертора, і отриманий в результаті цього сигнал розузгодження подається на входи релейних регуляторів.

Суттєві ознаки, що збігаються із способом, що заявляється: контролюють напругу та струм мережі в кожній фазі за допомогою відповідних датчиків; накопичуючий компенсатор підключають до мережі через інвертор, що підключений паралельно навантаженню; контролюють рівень напруги накопичуючого конденсатора; для зниження пульсацій струму інвертора встановлюють пасивний фільтр.

Недоліками даного способу є: координатні перетворення не враховують приведену реактивну потужність викликану вищими гармонійними складовими струму та напруги; швидкість обробки поточних результатів завжди проводиться з затримкою на період напруги мережі, тому що визначення координатних перетворень проводиться за один період мережі.

Найбільш близьким технічним рішенням до способу, що заявляється є спосіб керування кондиціонером електромережі [патент RU 2408122, H02J 3/18, H02J 1/70 27.12.2010 Бюл. №36. Спосіб управління кондиціонером електросети. Гейтенко А.Е., Гейтенко Е.Н.] за якими як силовий канал використовують двотактний інвертор з двополярним живленням і діодами рекуперації енергії, який підключають до електромережі паралельно, перший вивід інвертора підключають до фазного провідника електромережі в точці між датчиком струму і навантаженням, інший вивід інвертора підключають до нейтралі, а між точкою з'єднання інвертора з фазним провідником і навантаженням вимірюють струм за допомогою другого датчика струму, вихідний сигнал якого випрямляють та інтегрують, потім використовують як сигнал зворотного зв'язку для множення на сигнал напруги електромережі, результат множення порівнюють з сигналом першого датчика струму і за допомогою різницевого сигналу керують широкоімпульсним модулятором, що генерує в протифазі два сигнали керування імпульсними ключами інвертора, кожен з яких комутує в навантаження напругу відповідної полярності, яка потім фільтрується за допомогою Г-подібного фільтра, що складається з дроселя і конденсатора, а максимальний вихідний струм інвертора обмежують шляхом обмеження миттєвого значення струму кожного ключа інвертора.

Зазначений спосіб приймається прототипом, тому що має наступні спільні ознаки: контролюють напругу та струму в мережі та струму навантаження, як силовий канал використовується інвертор, що підключений паралельно навантаженню, для покращення форми струму на виході інвертора встановлений Г-подібний фільтр.

Недоліки способу: постійна підзарядка інвертора кондиціонера електромережі, що підключається до лінії електромережі ближче до первинного джерела, ніж навантаження та датчики струму і напруги або в іншу гілку тієї ж електромережі; двотактний інвертор комутує постійну напругу стороннього джерела постійного струму; синхронізація з

напругою в нелінійних несиметричних системах у зв'язку із викривленням кривої напруги може бути помилковою, тому додатково потрібно розраховувати першу гармоніку.

В основу корисної моделі поставлена задача: мінімізація неактивної складової струму в кожній фазі електричної мережі при роботі споживачів з нелінійним, несиметричним навантаженням за рахунок управління потоком неактивної складової потужності по кожній фазі трифазним інвертором, до складу якого входять накопичувачі.

Спосіб зниження неактивної складової струму трифазної електричної мережі змінного струму споживачів з нелінійним навантаженням, що полягає у контролі напруги та струму в мережі та струму навантаження, як силовий канал використовується інвертор, що підключений паралельно навантаженню, для покращення форми струму на виході інвертора встановлений Г-подібний фільтр, як інвертор використовується трифазний мостовий інвертор з індуктивним та ємнісним накопичувачами, в системі керування визначають коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги по кожній фазі та на основі різниці між заданим та поточним значенням змінюють частоту імпульсів модуляції системи керування інвертором, визначають приведений коефіцієнт потужності по кожній фазі та на основі різниці між заданим та поточним значенням змінюють шпаруватість імпульсів модуляції системи керування інвертором, контролюють напругу конденсатора.

Технічний результат досягається тим, що спосіб зниження неактивної складової струму мережі передбачає організацію потоку неактивної складової потужності по кожній фазі за рахунок формування сигналів керування трифазного інвертора з ємнісним накопичувачем. В системі керування задають параметри коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги по фазі, коефіцієнт приведеної потужності по фазі та середнє значення напруги на конденсаторі. В системі керування передбачено попередній заряд конденсатора. Контролюють напругу мережі, струм мережі, струм навантаження та напругу на конденсаторі. За поточними значеннями напруги та струму мережі визначають коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги. Порівнюють задане та поточне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги, змінюють частоту імпульсів модуляції системи керування інвертора по фазі. За поточними значеннями напруги та струму мережі визначають приведений коефіцієнт потужності за результатом порівняння заданого та поточного його значень змінюють шпаруватість імпульсів модуляції системи керування інвертора по відповідній фазі. Контролюють відхилення заданого значення напруги конденсатора від поточного та вразі перевищення вимикають пристрій компенсації та видають повідомлення.

Спосіб пояснюється наступними кресленнями, де на фіг. 1 - представлено алгоритм реалізації способу зниження неактивної складової струму за однією з фаз; фіг. 2 - блок схема реалізації способу, де 1 - датчики напруги мережі; 2 - датчики струму мережі, 3 - система керування, 4 - Г-

подібний фільтр, 5 - індуктивний накопичувач, 6 - трифазний інвертор, 7 - ємнісний накопичувач, 8 - датчик напруги, 9 - датчики струму навантаження; 10 - трифазне навантаження, 11 - нелінійне навантаження, 12 - однофазне навантаження.

Спосіб реалізується наступним чином. Система електропостачання, що розглядається (фіг. 2), має в своєму складі джерело електричної енергії змінного струму (або інше джерело) електрорушійної сили (е.р.с.)  $E_\phi$  з активною та реактивно складовими внутрішнього опору  $R_{вн}$  та  $X_{вн}$ , повна потужність якого співмірна з сумарною повною потужністю усіх споживачів  $S_{сум}$ . При цьому в системі (фіг. 1) в початковий момент роботи задаються: значенням приведених коефіцієнтів потужності

мережі  $k_{ПА}^{зад}, k_{ПВ}^{зад}, k_{ПС}^{зад}$  по кожній фазі, коефіцієнтів спотворення синусоїдальності напруги

$K_{UA}^{зад}, K_{UB}^{зад}, K_{UC}^{зад}$  по кожній фазі та середнє значення напруги на конденсаторі  $U_{KC(сеп)}^{зад}$ .

В електричній мережі перед пристроєм компенсації, вимірюють напругу  $U_A, U_B, U_C$  в кожній фазі, струм мережі  $I_A, I_B, I_C$  в кожній фазі, контролюють струм навантаження у споживачів  $I_{НА}, I_{НВ}, I_{НС}$  в кожній фазі, вимірюють напругу на конденсаторі  $U_{KC}$ , конденсатора. Розраховують струм конденсатора  $I_{КА}, I_{КВ}, I_{КС}$ .

Вимірювання проводиться дискретно в  $i$ -й момент з часом дискретизації  $T_d$ , який обирається з діапазону 1...100 мкс. Час вимірювань  $T$  обирається рівним 0,02 с. В результаті вимірювань отримують масив із  $N$  значень за кожним параметром з кутовим кроком  $\rho = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot T_d$ .

Для знаходження коефіцієнта спотворення напруги мережі по кожній фазі та коефіцієнта приведеної потужності, на підставі отриманих значень напруги  $U_{Ai}, U_{Bi}, U_{Ci}$  та струму  $I_{Ai}, I_{Bi}, I_{Ci}$  мережі по кожній фазі та відповідно до алгоритму швидкого перетворення Фур'є, визначають гармонійні складові параметрів, загальна кількість яких  $k$  по кожній фазі відповідно до ГОСТ 13109-97 дорівнює 40: синусні складові напруги та струму по кожній фазі:

$$AU_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ai} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad AI_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ai} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad (1)$$

$$AU_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Bi} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad AI_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Bi} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad (2)$$

$$AU_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ci} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad AI_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ci} \cdot \sin(k \cdot i \cdot \rho); \quad (3)$$

косинусні складові напруги та струму по кожній фазі:

$$BU_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ai} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad BI_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ai} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad (4)$$

$$BU_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Bi} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad BI_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Bi} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad (5)$$

$$BU_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ci} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad BI_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ci} \cdot \cos(k \cdot i \cdot \rho); \quad (6)$$

За отриманими складовими напруги та струму знаходяться амплітуди напруги  $MU_{Ak}, MU_{Bk}, MU_{Ck}$  та струму  $MI_{Ak}, MI_{Bk}, MI_{Ck}$   $k$ -ї гармоніки по кожній фазі:

$$MU_{Ak} \sqrt{AU_{Ak}^2 + BU_{Ak}^2}; \quad MI_{Ak} \sqrt{AI_{Ak}^2 + BI_{Ak}^2}; \quad (7)$$

$$MU_{Bk} \sqrt{AU_{Bk}^2 + BU_{Bk}^2}; \quad MI_{Bk} \sqrt{AI_{Bk}^2 + BI_{Bk}^2}; \quad (8)$$

$$MU_{Ck} \sqrt{AU_{Ck}^2 + BU_{Ck}^2}; \quad MI_{Ck} \sqrt{AI_{Ck}^2 + BI_{Ck}^2}; \quad (9)$$

та фазовий кут напруги  $\phi U_{Ak}, \phi U_{Bk}, \phi U_{Ck}$  та струму  $\phi I_{Ak}, \phi I_{Bk}, \phi I_{Ck}$   $k$ -ї гармоніки по кожній фазі.

$$\phi U_{Ak} = \arctg \frac{AU_{Ak}}{BU_{Ak}}; \quad \phi I_{Ak} = \arctg \frac{AI_{Ak}}{BI_{Ak}}; \quad (10)$$

$$\phi U_{Bk} = \arctg \frac{AU_{Bk}}{BU_{Bk}}; \quad \phi I_{Bk} = \arctg \frac{AI_{Bk}}{BI_{Bk}}; \quad (11)$$

$$\phi U_{Ck} = \arctg \frac{AU_{Ck}}{BU_{Ck}}; \quad \phi I_{Ck} = \arctg \frac{AI_{Ck}}{BI_{Ck}}. \quad (12)$$

Із складових значень фазового кута напруги  $\phi U_{Ak}, \phi U_{Bk}, \phi U_{Ck}$  по кожній фазі та фазового кута струму  $\phi I_{Ak}, \phi I_{Bk}, \phi I_{Ck}$  по кожній фазі знаходиться різниця по кожній гармоніці:

$$\phi Ak = \phi U_{Ak} - \phi I_{Ak}; \quad (13)$$

$$\phi Bk = \phi U_{Bk} - \phi I_{Bk}; \quad (14)$$

$$\phi Ck = \phi U_{Ck} - \phi I_{Ck}. \quad (15)$$

Розраховуються поточні значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги – величина, рівна відношенню вищих гармонік напруги до значення першої гармоніки по кожній фазі:

$$K_{UA} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} (MU_{kA})^2}}{MU_{1A}} \cdot 100; \quad (16)$$

$$K_{UB} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} (MU_{kB})^2}}{MU_{1B}} \cdot 100; \quad (17)$$

$$K_{UC} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} (MU_{kC})^2}}{MU_{1C}} \cdot 100. \quad (18)$$

Розраховані значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги порівнюють із заданими значеннями по кожній фазі:

$$K_{UA} < K_{UA}^{зад} ? \quad (19)$$

$$K_{UA} < K_{UA}^{зад} ? \quad (20)$$

$$K_{UA} < K_{UA}^{зад} ? \quad (21)$$

На підставі результату порівняння змінюють частоту модуляції системи керування трифазного інвертора за відповідною фазою.

Приведена реактивна потужність визначається відповідно до виразу:

$$Q_{PA} = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^{40} k \cdot MU_{kA} \cdot MI_{kA} \cdot \sin(\varphi_{kA}) \quad (22)$$

$$Q_{PB} = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^{40} k \cdot MU_{kB} \cdot MI_{kB} \cdot \sin(\varphi_{kB}) \quad (23)$$

$$Q_{PC} = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^{40} k \cdot MU_{kC} \cdot MI_{kC} \cdot \sin(\varphi_{kC}) \quad (24)$$

Активна потужність визначається відповідно до виразу:

$$P_A = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N MU_{Ai} \cdot MI_{Ai} \quad (25)$$

$$P_B = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N MU_{Bi} \cdot MI_{Bi} \quad (26)$$

$$P_C = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N MU_{Ci} \cdot MI_{Ci} \quad (27)$$

Розрахунок приведенного коефіцієнта потужності проводиться на основі приведеної реактивної потужності та споживаної активної потужності відповідно до виразу:

$$k_{PA} = \frac{Q_{PA}}{\sqrt{P_A^2 + Q_{PA}^2}} \quad (28)$$

$$k_{PB} = \frac{Q_{PB}}{\sqrt{P_B^2 + Q_{PB}^2}} \quad (29)$$

$$k_{PC} = \frac{Q_{PC}}{\sqrt{P_C^2 + Q_{PC}^2}} \quad (30)$$

Розраховані значення коефіцієнта приведеної потужності порівнюються із заданими значеннями по кожній фазі:

$$k_{PA} < k_{PA}^{зад} ? \quad (31)$$

$$k_{PB} < k_{PB}^{зад} ? \quad (32)$$

$$k_{PC} < k_{PC}^{зад} ? \quad (33)$$

На підставі результату порівняння змінюють шпаруватість імпульсів модуляції системи керування трифазного інвертора за відповідною фазою.

Для захисту режиму роботи пристрою компенсації від аварійних режимів роботи пристрою компенсації контролюють середнє значення напруги на конденсаторі, що підключений до катодно-анодної групи трифазного інвертора напруги:

$$U_{KC} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N U_{KC_i} \quad (34)$$

Якщо поточне значення напруги на конденсаторі не відповідає вимозі  $U_{KC} > 1,1 \cdot U_{KC(сеп)}^{зад}$ , відбувається відключення системи компенсації та видача попереджувального сигналу.

Споживачі представлені на фіг. 2 (стрілки відображають напрямок передачі потужності):

лінійним навантаженням, що споживає активну  $P_H$  та реактивну  $Q_H$  потужність;

нелінійним трифазним навантаженням, що споживає активну  $P_{3H}$ , реактивну  $Q_{3H}$ ;

однофазні лінійні навантаження, що споживають активну  $P_{1ф}$  реактивну  $Q_{1ф}$  потужності;

компенсуючим пристроєм - джерелом вторинного електропостачання з компенсацією неактивної потужності в живильній мережі, що споживає активну  $P_K$  та генерує приведену реактивну  $Q_{ПК}$  потужності.

Застосування способу призводить до зміни режиму роботи електроенергетичної системи (фіг. 2). Сумарний струм, що споживається системою  $I_\Sigma$ , та втрати активної  $\Delta P$  потужності в точці приєднання пристрою зниження неактивної складової струму при роботі усіх споживачів, при умові, що існує джерело з компенсацією спотворень в живильній мережі, споживає тільки активну потужність, тобто  $Q_{ПК} = 0$ :

$$I_\Sigma = \frac{S_{сум}}{U_M} = \frac{\sqrt{(P_L + P_{3H} + P_H + P_K + P_{1ф})^2 + (Q_H + Q_{3H} + Q_{1ф})^2}}{U_M}; \quad (35)$$

$$\Delta P = I_\Sigma^2 \cdot (R_{BH} + R_{BH}) = (R_{BH} + R_{BH}) \times \left[ \frac{\sqrt{(P_L + P_{3H} + P_H + P_K + P_{1ф})^2 + (Q_H + Q_{3H} + Q_{1ф})^2}}{U_M^2} \right]; \quad (36)$$

За умов використання способу, сумарний струм, що споживається  $I_\Sigma$ , та втрати активної  $\Delta P$  потужності в точці загального приєднання при роботі усіх споживачів, при умові, що джерело вторинного електропостачання з компенсацією в трифазній мережі змінного струму споживає активну потужність, а в мережу генерується приведена реактивна потужність  $Q_{ПК} < 0$ , отримаємо:

$$I_\Sigma = \frac{S_{сум}}{U_M} = \frac{\sqrt{(P_L + P_{3H} + P_H + P_K + P_{1ф})^2 + (Q_H + Q_{3H} + Q_{1ф} + Q_{ПК})^2}}{U_M}; \quad (37)$$

$$\Delta P = I_\Sigma^2 \cdot (R_{BH} + R_{BH}) = (R_{BH} + R_{BH}) \times \left[ \frac{\sqrt{(P_L + P_{3H} + P_H + P_K + P_{1ф})^2 + (Q_H + Q_{3H} + Q_{1ф} + Q_{ПК})^2}}{U_M^2} \right]; \quad (38)$$

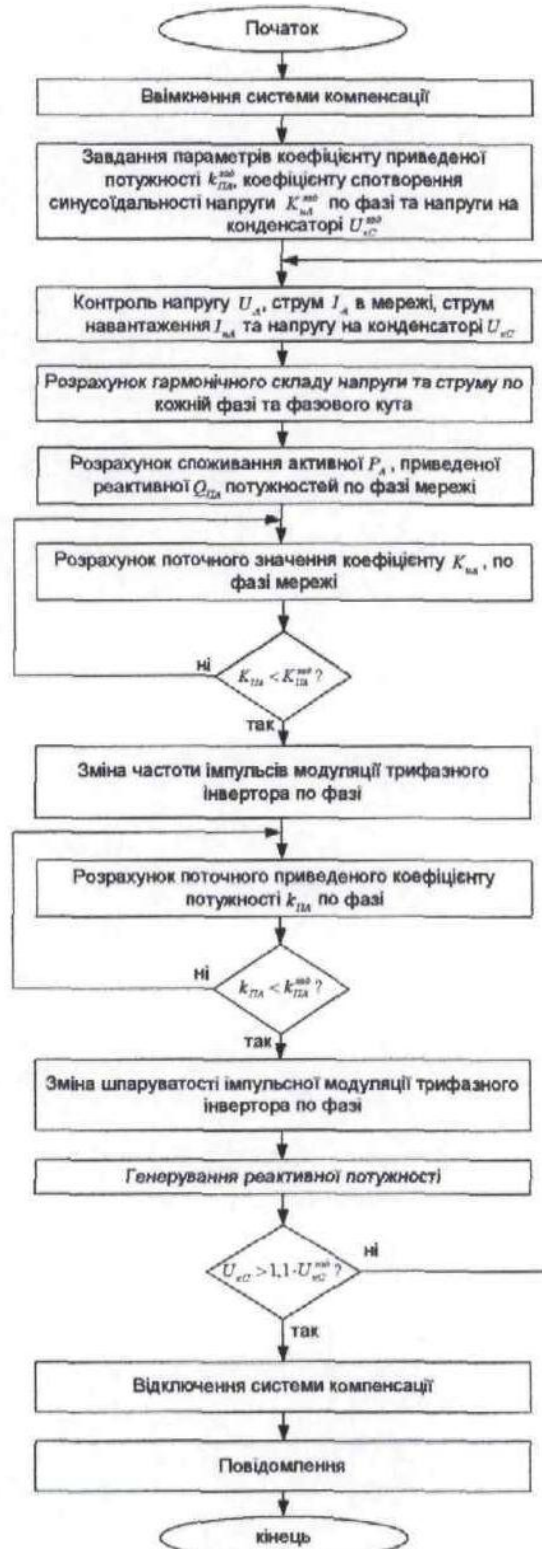
Таким чином із виразів (36) і (38) випливає, що в результаті роботи способу зниження неактивної складової струму в мережі компенсують реактивну

потужність та потужність спотворення та забезпечують позитивний ефект:

- зменшити втрати активної потужності в системі електропостачання;

- компенсація неактивної (приведеної реактивної потужності) складової повної потужності;

- поліпшити показники якості електроенергії, в частині коефіцієнта спотворення синусоїдальності напруги.



Фіг. 1

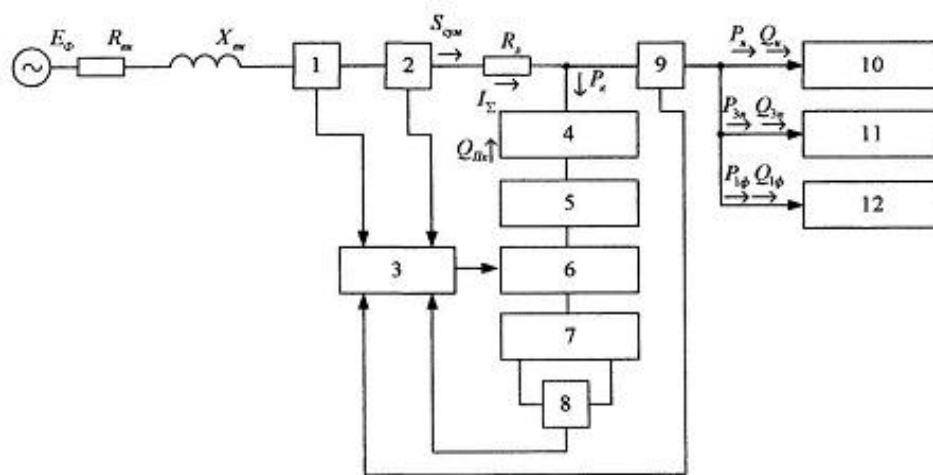


Fig. 2