

Винахід ставиться до електротехніки, зокрема - до пристроїв силових електроніки.

Більш половини електричної енергії споживається у світі після попереднього перетворення її параметрів за допомогою силових напівпровідникових перетворювачів [1]. Застосування таких перетворювачів дозволяє оптимізувати режими роботи споживачів і є тому ефективним засобом енергозбереження. Номінальна потужність працюючих у народному господарстві силових напівпровідникових перетворювачів охоплює діапазон від декількох кіловатів до сотень мегаватів. Сучасні перетворювачі мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і високою надійністю, проте їм властиві дві істотних хиб: 1) струм, споживаний перетворювачем із мережі, містить, крім основний, широкий спектр вищих гармонік; 2) основна гармоніка мережного струму відстає по фазі від напруги мережі, тобто - перетворювач споживає з мережі реактивну потужність.

Другий із зазначених недоліків призводить до додаткових навантажень у мережах, збільшує втрати потужності в них, і може бути причиною коливань напруги мережі, що живить, у точці підключення перетворювачів.

Сучасні стандарти, що регламентують якість електричної енергії в системах електропостачання [2, 3, 4], містять жорсткі вимоги до припустимих рівнів вищих гармонік у мережному струмі і до припустимих розмахів коливань напруги мережі, що виникають внаслідок змін розміру реактивної потужності.

Відомо декілька технічних рішень, що забезпечують виконання вимог зазначених стандартів.

Перша група технічних рішень полягає в тому, що в точці підключення перетворювача до мережі, що живить, паралельно включається пристрій, що фільтро-компенсує.

Пристрій, що фільтро-компенсує, включає чотири резонансних фільтри, що складаються з послідовно включених конденсаторів  $C_5, C_7, C_{11}, C_{13}$  і реакторів  $L_5, L_7, L_{11}, L_{12}$ , настроєних у резонанс відповідно на 5, 7, 11 і 13 гармоніки струму, і додаткового реактора  $L_{\text{дон}}$ , залученого до мережі через тиристорний регулятор напруги (ТРН). Резонансні фільтри вищих гармонік є одночасно джерелами реактивної потужності на частоті мережі. Хибою пристрою даного типу, що фільтро-компенсує, є те, що при малих навантаженнях вентильних перетворювачів на шинах змінного струму мережі виникає надлишок реактивної потужності. Цей надлишок реактивної потужності припадає компенсувати відстаючою реактивною потужністю додаткового реактора  $L_{\text{дон}}$ , розмір котрої плавно регулюється за допомогою ТРН. Описаному пристрою, що фільтро-компенсує, властиві й інші хиб:

- неможливість придушення вищих гармонік, що присутні у струмі вентильних перетворювачів, тих частот, на які не настроєні резонансні контури;
- генерація додаткових вищих гармонік струму тиристорним регулятором напруги;
- велика встановлена потужність пристрою, що фільтро-компенсує, що може бути більше чим установлена потужність вентильних перетворювачів.

Друга група технічних рішень, що дозволяють виконати вимоги стандартів по електромагнітній сумісності, заснована на використанні силових активних фільтрів (САФ) [5]. У цьому випадку, силовий активний фільтр, що схемно подає собою напівпровідниковий автономний інвертор напруги або автономний інвертор струму на цілком керованих напівпровідникових ключах, звичайно IGBT (біполярний транзистор з ізолюваним затвором), залучений паралельно вентильним перетворювачам. Система керування САФ забезпечує рівність нулю або деякому заданому значенню розміру сумарної реактивної потужності в мережі, що живить, і, крім того, придушує (фільтрує) вищі гармоніки мережного струму вентильних перетворювачів. Таке технічне рішення є універсальним, проте пов'язано з великими витратами, оскільки встановлена потужність САФ, у загальному випадку, істотно перевищує встановлену потужність вентильного перетворювача. До того ж, питома вартість  $\$/kW$  напівпровідникових приладів (IGBT), необхідних для роботи САФ, у декілька разів вище питомої вартості одноопераційних тиристорів, використовуваних у керованих випрямлячах [6].

Третя група технічних рішень дозволяє виконати вентильний перетворювач за схемою, що забезпечує "внутрішню" компенсацію реактивної потужності.

З цією метою включають паралельно або послідовно два керованих випрямляча, один із яких споживає реактивну потужність із мережі, а інший генерує реактивну потужність у мережу. Керування зазначеними випрямлячами здійснюється таким чином, щоб випрямлені токи, напруги й абсолютні значення реактивної потужності обох випрямлячів були рівні. Оскільки реактивні потужності зазначених випрямлячів рівні і протилежні за знаком, сумарна реактивна потужність на стороні мережі підтримується близької до нуля. Така схема описана, наприклад, у [7]. Керований випрямляч, що не споживає з мережі що живить, реактивної потужності, називають компенсованим керованим випрямлячем (ККВ). Хоча ККВ і не споживає з мережі реактивної потужності, його мережний струм несинусоїдален і містить широкий спектр вищих гармонік. Тому паралельно ККВ повинні бути залучені силовий активний фільтр або пасивні резонансні фільтри.

Складова частина ККВ - керований випрямляч, що генерує в мережу реактивну потужність, - виконаний на цілком керованих напівпровідникових вентилях, наприклад, ГТО (що замикаються по керуючому переході) тиристорів, і працюють з кутами керування, що випереджають, що відраховуються убік випередження від моменту природного умикання вентилів. Схема керованого випрямляча, що працює з кутами керування, що випереджають, описана в [8], [9]. Особливістю схеми керованого випрямляча, що працює з кутами керування, що випереджають, тобто генеруючого реактивну потужність у мережу, що живить, є необхідність виведення при комутації струму у вентилях енергії, що накопичується в анодних індуктивностях. Для виведення цієї "комутаційної" енергії в [8] запропоновано використовувати інвертора що веде мережа, а в [7] пропонується розсіювати цю енергію в резисторах. У [10] дана оцінка розміру виведеної "комутаційної" потужності, показана її залежність від розміру кутів керування, комутації і від струму навантаження. Як випливає з [10], при номінальних токах навантаження розмір вивідний "комутаційної" потужності досягає 9-10% від номінальної потужності, а при дворазових перевантаженнях по струму може збільшуватися до 30%.

Відомо також інше технічне рішення "внутрішньої" компенсації реактивної потужності, описане в [13]. Працюючий у режимі джерела струму керований випрямляч у цьому випадку [13] виконаний на цілком керованих вентилях, наприклад, ГТО тиристорів, що забезпечують широтно-імпульсну модуляцію з частотою

180-500Hz. За рахунок фазового зсуву і модуляції кривої струму досягається близький до одиниці коефіцієнт зсуву. Проте, керованому випрямлячу, описаному в [13] властиві істотні хиби: 1) велика вартість цілком керованих вентилів; 2) порівняно низький коефіцієнт корисної дії за рахунок динамічних утрат при широтно-імпульсній модуляції, 3) необхідність підключення паралельно вхідним клемам вентиляного моста батареї конденсаторів, що працюють на частоті широтно-імпульсної модуляції.

Пояснимо термін "близький до одиниці коефіцієнт потужності", що використовується в дійсному описі винаходу.

Коефіцієнт потужності  $K_m$  вентиляного перетворювача визначається як відношення активної потужності  $P$ , споживаної їм із мережі, що живить, до повної  $S$  потужності [1]:

$$K_m = \frac{P}{S}. \quad (1)$$

При синусоїдальній формі напруги трифазної мережі, що живить

$$P = 3U_{1\phi} I_{11} \cos \varphi_1, \quad (2)$$

де  $U_{1\phi}$  - чинне значення фазної напруги мережі;

$I_{11}$  - чинне значення основної гармоніки струму, споживаного перетворювачем із мережі;

$\varphi_1$  - кут зсуву між напругою мережі, що живить, і основною гармонікою струму перетворювача.

Значення кута  $\varphi_1$  можуть бути будь-якими в діапазоні

$$-\pi \leq \varphi_1 \leq \pi, \quad (3)$$

причому позитивні значення  $P$ , при  $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}$ , відповідають напрямку поструму середньої активної

потужності з мережі в навантаження, а негативні,  $-\pi \leq \varphi_1 \leq -\frac{\pi}{2}$  і  $\frac{\pi}{2} \leq \varphi_1 \leq \pi$ , - оберненому поструму активної потужності - із навантаження в мережу.

Основна гармоніка струму, споживаного з мережі перетворювачем, створює також реактивну потужність  $Q$  [1]:

$$Q = 3U_{1\phi} I_{11} \sin \varphi_1 \quad (4)$$

Позитивні значення реактивної потужності  $Q$ , при  $0 \leq \varphi_1 \leq \pi$ , відповідають режиму споживання перетворювачами реактивної потужності з мережі, а негативні значення  $Q$ , при  $-\pi \leq \varphi_1 \leq 0$ , - режиму генерації перетворювачем реактивної потужності в мережу.

Повна потужність  $S$  на стороні мережі перетворювача визначається як [1]:

$$S = 3U_{1\phi} I_{1\phi}, \quad (5)$$

де  $I_{1\phi}$  - чинне значення мережного струму перетворювача з урахуванням усіх гармонік, що утримуються в ньому

$$I_{1\phi} = \sqrt{I_{11}^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_{1k}^2}; \quad (6)$$

$I_{1k}$  - чинне значення  $k$ -тої гармоніки мережного струму.

Підставивши (2), (5) у (1), получимо

$$K_m = \frac{I_{11}}{I_{1\phi}} \cos \varphi_1. \quad (7)$$

Відношення

$$\frac{I_{11}}{I_{1\phi}} = K_u \quad (8)$$

називають коефіцієнтом переключування ( $K_u$ ), а розмір

$$\cos \varphi_1 = K_c \quad (9)$$

- коефіцієнтом зсуву.

- з (7), (8), (9)

$$K_m = K_c K_u. \quad (10)$$

Крім коефіцієнтів зсуву і переключування оперують коефіцієнтом несинусоїдальності [2]

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{1k}^2}}{I_{11}}. \quad (11)$$

Коефіцієнти  $K_{nc}$  і  $K_u$  пов'язані між собою співвідношенням

$$K_{nc} = \sqrt{\frac{1}{K_u^2} - 1}, \quad (12)$$

У промисловій установці коефіцієнт потужності завжди відрізняється від одиниці, проте, цілком реально підтримувати його за допомогою системи автоматичного регулювання в межах близьких до одиниці, наприклад, 0,95...1,00.

Перетворювачем із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності вважаємо перетворювач, що володіє властивістю "внутрішньої" компенсації реактивної потужності, що має умонтований пристрій корекції форми мережного струму, коефіцієнт потужності якого вище чим 0,95.

Найбільше близьким до того що заявляється у винаході, є напівпровідниковий перетворювач.

Силова частина цього перетворювача складається з чотирьохобмоточного перетворювального трансформатора 1, мережна обмотка 2 якого залучена до трифазної мережі змінної синусоїдальної напруги 3.

Одна з вентиляльних обмоток 4 перетворювального трансформатора залучена до клем змінного струму вентиляльної групи ВГ<sub>Г</sub> у вигляді шостипульсного моста на GTO тиристорах (або цілком керованих вентилях іншого типу) 5; інша вентиляльна обмотка 6 залучена до клем змінного струму вентиляльної групи ВГ<sub>Т</sub> у вигляді шостипульсного моста на одноопераційних тиристорах 7. Вентильні групи 5 і 7 включені послідовно і залучені до навантаження 8 так, що через мости і навантаження тече той самий струм I<sub>d</sub>. Третя вентиляльна обмотка 9 перетворювального трансформатора 1 залучена до затискачів змінного струму шостипульсного моста 10, що складає із шости силових транзисторів, перехід колектор-емітер кожного з яких шунтован в оберненому напрямку діодом. Вихід шостипульсного транзисторного моста 10 залучений до обкладок конденсатора 11, причому спільна точка, у якій об'єднані три колектори транзисторного моста 10, залучена до позитивної обкладки конденсатора 11, а спільна точка, у якій об'єднані три емітери транзисторів моста 10, залучена до негативної обкладки конденсатора 11. Міст 10 і конденсатор 11 становлять силову частину силового активного фільтра.

Для виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання обмотки 4 перетворювального трансформатора, до клем змінного струму вентиляльної групи ВГГ залучені клеми змінного струму діодної збірки, виконаної у вигляді діодного моста 12, клеми постійного струму якого залучені до приймача виведеної енергії 50.

Керування силовими мостами 5, 7, 10 здійснюється відповідно за допомогою системи імпульсно-фазового керування вентиляною групою на тиристорах, що замикаються, (СІФК<sub>Г</sub>), системи імпульсного -фазового керування вентиляною групою на одноопераційних тиристорах (СІФК<sub>Т</sub>), системи керування транзисторами силового активного фільтра 17. Керуючі сигнали на входи керування подаються з виходів двох замкнутих систем автоматичного регулювання. Одна з цих двох систем забезпечує автоматичне регулювання струму I<sub>d</sub> в навантаженні перетворювача відповідно до заданого значення струму I<sub>d</sub><sup>\*</sup>, розмір якого визначається технологічним процесом у навантаженні.

Ця система містить у собі вузол завдання по струму I<sub>d</sub><sup>\*</sup>18, датчик струму навантаження 19, елемент порівняння сигналів 20, регулятор струму I<sub>d</sub>21 на основі операційного підсилювача або мікропроцесорного пристрою.

Інша система автоматичного регулювання управляє транзисторами САФ 10, забезпечуючи регулювання струмів i<sub>фа</sub>, i<sub>фб</sub>, i<sub>фс</sub> у фазах змінного струму силового активного фільтра. Це регулювання здійснюється таким чином, щоб змінні фазні токи i<sub>a</sub>, i<sub>b</sub>, i<sub>c</sub> в мережній обмотці 2 перетворювального трансформатора 1 були близькі за формою до синусоїдальних і щоб ці токи збігалися по фазі з відповідними фазними напругами. Система містить у собі датчик миттєвих фазних напруг 28 мережі, що живить, стандартну, наприклад, Intel 80196МС, ланка перетворення миттєвих напруг 33 із координат a,b,c у α,β координати [11, 12] (перетворення Кларка); датчик фазних змінних струмів 29 вентиляльної групи на тиристорах що замикаються, датчик фазних змінних струмів 30 вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, стандартне, наприклад, Intel 80196МС, ланку перетворення миттєвих струмів 34 із координат a,b,c у координати α,β 34; стандартну [12] ланку розрахунку миттєвої активної і миттєвої реактивної потужності 35 по відомих фазних напругах і струмах; фільтр 36, що

дозволяє виділяти змінну збірку  $\tilde{P}$  із сумарної мережної активної потужності; вузол завдання напруги U<sub>c</sub>38 на конденсаторі мережного активного фільтра, датчик напруги U<sub>c</sub>39 на конденсаторі силового активного фільтра, вузол порівняння 40, пропорційну ланку (підсилювач) 41, ланка розрахунку розмірів необхідних струмів i<sub>фа</sub><sup>\*</sup>, i<sub>фб</sub><sup>\*</sup> 42 силового активного фільтра у координатах α,β; ланка перетворення заданих миттєвих струмів 43 силового активного фільтра з координат α, β у координати a,b,c; три датчики струмів 44, 45, 46 силового активного фільтра; три вузли порівняння 47, 48, 49.

З метою спрощення читання схеми перетворювача-прототипу на Фіг.2. Додатку усі виходи датчиків і входи вузлів, із якими датчики сполучені, позначені тими самими тризначними цифрами, укладеними в круглі скобки. Для позначення використовуються позначення: (101), (103), (105), (107).

Відомий перетворювач працює таким чином.

Перетворення енергії змінного струму, що забирається з мережі змінного струму 3, в енергію постійного струму, передану в навантаження 8, здійснюється за допомогою перетворювального трансформатора 1, мережна обмотка 2 якого залучені до мережі 3, а дві вентиляльні обмотки 4 і 6 залучені відповідно до входів вентиляльних груп ВГ<sub>Г</sub> і ВГ<sub>Т</sub> і двох включених послідовно вентиляльних груп, одна з яких 5 виконана на GTO тиристорах, а інша 7 виконана на одноопераційних тиристорах. Струм I<sub>d</sub> навантаження 8 регулюється шляхом зміни напруги на виході послідовно включених вентиляльних груп ВГ<sub>Г</sub> і ВГ<sub>Т</sub> (напруги на навантаженні):

$$U_d = U_{dG} + U_{dT} = U_{d0}(\cos \alpha_G + \cos \alpha_T), \quad (13)$$

де U<sub>d</sub> - середнє значення сумарної випрямленої напруги на навантаженні;

U<sub>d0</sub> - напруга ідеального холостого ходу на виході кожній із вентиляльних груп;

α<sub>G</sub>, α<sub>T</sub> - відповідно кути керування тиристорами ВГ<sub>Г</sub> і ВГ<sub>Т</sub>.

Необхідний розмір струму навантаження I<sub>d</sub><sup>\*</sup> задається вузлом завдання струму навантаження 18. Розмір заданого струму I<sub>d</sub><sup>\*</sup> порівнюється у вузлі порівняння 20 із фактичним значенням струму I<sub>d</sub>, що вимірюється датчиком струму 19. Різницеве значення подається з виходу вузла порівняння 20 на вхід регулятора РЕГ I<sub>d</sub> 21, що подає собою пропорційно-інтегральний підсилювач.

На виході РЕГ I<sub>d</sub> 21 виробляється сигнал напруги керування e<sub>y</sub>, подаваний паралельно на входи системи імпульсно-фазового керування СІФК<sub>Г</sub> 15 ВГ<sub>Г</sub> і системи імпульсно-фазового керування СІФК<sub>Т</sub> 16 ВГ<sub>Т</sub>.

Фазова характеристика СІФК<sub>Г</sub>, що подає собою залежність куту керування α<sub>G</sub> від розміру напруги керування, має вид

$$\alpha_G = -\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{e_y}{U_{\text{onm}}}\right) \quad (14)$$

де U<sub>onm</sub> = const - амплітуда синусоїдальної опорної напруги в СІФК<sub>Г</sub>. Аналогічно, фазова характеристика

СИФК<sub>т</sub>.

$$\alpha_T = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{e_y}{U_{\text{онм}}} \quad (15)$$

Таким чином, відповідно до співвідношень (14), (15) у будь-який момент часу кути керування GTO тиристорів  $\alpha_G$  у ВГГ й одноопераційних тиристорів  $\alpha_T$  у ВГ<sub>т</sub> рівні по розміру і протилежні за знаком:

$$-\alpha_G = \alpha_T \quad (16)$$

Оскільки кут зсуву між напругою мережі, що живить, і основною гармонікою мережного струму перетворювача  $\varphi_1$  (дивися (2), (3)) при струмових навантаженнях, значно менших номінального значення, дорівнює куту керування  $\alpha$  [1]

$$\varphi_{1G} \cong \alpha_G, \quad (17)$$

$$\varphi_{1T} \cong \alpha_T, \quad (18)$$

відповідно до співвідношень (14), (16), (17), (18) сумарна реактивна потужність на стороні мережі перетворювача близька до нуля:

$$Q_{\Sigma} = Q_G + Q_T \cong 0. \quad (19)$$

При збільшенні струму навантаження рівність (19) порушується, на стороні мережі перетворювача з'являється значна по розміру реактивна потужність. Для компенсації цієї реактивної потужності і для придушення вищих гармонік, що утримуються в мережному струму служить САФ 10 і система керування, що містить вузли 17, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 43, 47, 48, 49 і датчики 28, 29, 30, 39, 44, 45, 46.

Напруга на конденсаторі 11, силового активного фільтра підтримується постійною і рівною напрузі завдання  $U_c^*$  з виходу вузла завдання 38.

На входи системи керування активним фільтром подаються сигнал завдання по напрузі на конденсаторі  $U_c^*$  від вузла завдання 38, миттєві значення фазних напруг мережі, що живить,  $u_a, u_b, u_c$  із виходу датчика напруг 28, миттєві значення фазних змінних струмів  $i_{Ga}, i_{Gb}, i_{Gc}$  вентильної групи на GTO тиристорах із виходу датчика струмів 29; миттєві значення фазних змінних струмів вентильної групи на одноопераційних тиристорах  $i_{Ta}, i_{Tb}, i_{Tc}$  із виходу датчика струмів 30; миттєві значення фазних струмів силового активного фільтра  $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$  з виходів датчиків струмів 44, 45, 46. Зазначені сигнали опрацьовуються по приведеним у [12] алгоритмам за допомогою відомих пристроїв, наприклад, мікросхеми Intel 80196 MC. У результаті перетворень формуються сигнали завдання миттєвих фазних струмів силового активного фільтра  $i_{fa}^*, i_{fb}^*, i_{fc}^*$ , що порівнюються з фактичними значеннями фазних струмів  $i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$  контрольованих датчиками струмів 44, 45, 46, у вузлах порівняння 47, 48, 49. Якщо сигнал завдання більше фактичного струму

$$i_{fa}^* > i_{fa}, \quad (20)$$

включається транзистор емітерної групи відповідної фази в транзисторному мості 10, якщо

$$i_{fa}^* < i_{fa}, \quad (21)$$

включається транзистор колекторної групи відповідної фази в транзисторному мості 10.

Вивід енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання обмоток трансформатора 4, здійснюється через діодний міст 12 у джерело постійної напруги 51.

У такий спосіб відомий перетворювач змінної напруги в постійну дозволяє плавно регулювати струм навантаження  $I_d$  відповідно до завдання по струму  $I_d^*$  за допомогою регулятора струму РЕГ<sub>Id</sub> 21, що впливає через СІФК<sub>G</sub>15 і СІФК<sub>т</sub>16 на кути керування тиристорів ВГ<sub>G</sub> 5 і ВГ<sub>т</sub> 7. Зсув основної гармоніки мережного струму перетворювача і вищі гармоніки мережного струму, що виникають при такому регулюванні, компенсуються у відомому перетворювачі за допомогою САФ 10 і замкнутої системи автоматичного регулювання САФ.

Хоча відомий перетворювач забезпечує близький до одиниці коефіцієнт потужності на стороні мережі змінного струму, йому властиві істотні хиби:

1) Керування вентильними групами ВГ<sub>G</sub> 5 і ВГ<sub>т</sub> 7 відповідно до співвідношення (16) призводить до появи значної по розміру реактивної потужності в мережі при збільшенні струму навантаження перетворювача. Компенсація цієї реактивної потужності досягається ціною збільшення встановленої потужності САФ і збільшення потужності втрат у силових транзисторах.

2) Вивід енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентильної обмотки 4 ВГ<sub>G</sub> 5, в окреме джерело постійної напруги 50 через діодний міст 12 призводить до зниження ККД перетворювача і збільшує його встановлену потужність.

Задачею дійсного винаходу є створення напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійну, у якому зведена до мінімуму або цілком виключена поява реактивної потужності в мережі при збільшенні струму навантаження перетворювача, що дозволяє зменшити встановлену потужність САФ і потужність втрат у силових транзисторах, а також виключена необхідність виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентильної обмотки, в окреме джерело постійної напруги.

У першому варіанті винаходу поставлена задача вирішується тим, що у відомому перетворювачі змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, що містить першу вентильну групу на тиристорах, що замикаються, або інших цілком керованих силових напівпровідникових приладах, що працює з кутами керування, що випереджають, другу вентильну групу на одноопераційних тиристорах, що працює з відстаючими кутами керування, навантаження, включене послідовно з перший і другий вентильними групами, силовий активний фільтр, що складається з транзисторного моста з оберненими діодами і конденсатора, що фільтрує, чотириохобмотковий перетворювальний трансформатор, мережна обмотка якого залучена до мережі, що живить, одна з трьох вентильних обмоток якого залучена до клем змінного струму першої вентильної групи, друга вентильна обмотка якого залучена до клем змінного струму другої вентильної групи, а третя вентильна обмотка якого залучена до клем змінного струму транзисторного моста силового активного

фільтра, що містить також діодну збірку, клеми змінного струму якої сполучені з клемми змінного струму першої вентильної групи, систему імпульсно-фазового керування першою вентильною групою, систему імпульсно-фазового керування другою вентильною групою, систему керування силовим активним фільтром, вузол сигналу завдання по струму навантаження, вузол сигналу завдання розміру напруги на конденсаторі силового активного фільтра, датчик струму навантаження, перший вузол порівняння сигналу завдання по струму навантаження і сигналу зворотного зв'язку по струму навантаження, другий вузол порівняння сигналу завдання розміру напруги на конденсаторі силового активного фільтра і сигналу зворотного зв'язку по напрузі на конденсаторі силового активного фільтра, третій, четвертий і п'ятий вузли порівняння відповідно сигналів завдання струму фаз а, b, c силового активного фільтра і сигналів зворотного зв'язку по токах фаз а, b, c силового активного фільтра, перший пропорційно-інтегральний регулятор струму навантаження, другий пропорційно-інтегральний регулятор розміру комутаційної активної потужності, що виводиться в мережу, що живить, датчик миттєвих значень напруги трьох фаз мережі, що живить, другий датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, c першої вентильної групи на тиристорах що замикаються, третій датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, c другої вентильної групи на одноопераційних тиристорах, четвертий датчик миттєвого значення вхідного струму фази а силового активного фільтра, п'ятий датчик миттєвого значення вхідного струму фази b силового активного фільтра, шостий датчик миттєвого значення вхідного струму фази c силового активного фільтра, перший вузол перетворення миттєвих значень напруги трьох фаз мережі з координат а, b, c у координати  $\alpha, \beta$ , другий вузол перетворення миттєвих вхідних струмів першої вентильної групи на тиристорах, що замикаються, і другої вентильної групи на одноопераційних тиристорах із координат а, b, c у координати  $\alpha, \beta$ , перший фільтр виділення змінної складової активної потужності, датчик напруги на конденсаторі, перший вузол розрахунку миттєвої активної і миттєвої реактивної потужності, другий вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах  $\alpha, \beta$ , третій вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах а, b, c, додатково містить перший допоміжний діод, анод якого підключений до негативної обкладки конденсатора, а його катод підключений до спільної точки катодів першої вентильної групи, другий допоміжний діод, катод якого підключений до позитивної обкладки конденсатора, а його анод підключений до спільної точки анодів першої вентильної групи, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності, четвертий вузол розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, третій пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування першою вентильною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування першою вентильною групою на тиристорах що замикаються, четвертий пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування другою вентильною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування другою вентильною групою на одноопераційних тиристорах, п'ятий пропорційно-інтегральний регулятор середньої реактивної потужності, шостий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, сьомий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, восьмий вузол порівняння сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності і сигналу зворотного зв'язку по середній реактивній потужності з виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, другий фільтр виділення змінної складової реактивної потужності, причому діодна збірка виконана у вигляді шостипульсного діодного моста, спільна точка катодів діодного моста залучена до позитивної обкладки конденсатора силового активного фільтра, а спільна точка анодів діодного моста залучена до негативної обкладки конденсатора силового активного фільтра, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності залучений до позитивного входу восьмого вузла порівняння, негативний вхід восьмого вузла порівняння залучений до виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, вихід восьмого вузла порівняння залучений до входу п'ятого регулятора середньої реактивної потужності, вихід якого залучений паралельно до позитивного входу шостого вузла порівняння і негативного входу сьомого вузла порівняння, до іншого позитивного входу шостого вузла порівняння і до іншого позитивного входу сьомого вузла порівняння залучений паралельно вихід першого регулятора струму навантаження, вихід шостого вузла порівняння залучений до входу третього регулятора напруги керування першої вентильної групи, а вихід сьомого вузла порівняння залучений до входу четвертого регулятора напруги керування другої вентильної групи, вихід першого вузла розрахунку миттєвої реактивної потужності q залучений до входу другого фільтра, вихід змінної складової якого залучений до входу другого вузла розрахунку.

В другому варіанті винаходу поставлена задача вирішується тим, що у відомому перетворювачі змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, що містить першу вентильну групу на тиристорах, що замикаються, або інших цілком керованих силових напівпровідникових приладах, що працює з кутами керування, що випереджають, другу вентильну групу на одноопераційних тиристорах, що працює з відстаючими кутами керування, навантаження, включене послідовно з першої і другою вентильними групами, силовий активний фільтр, що складається з транзисторного моста з оберненими діодами і конденсатора, що фільтрує, чотирихобмотковий перетворювальний трансформатор, мережна обмотка якого залучена до мережі, що живить, одна з трьох вентильних обмоток якого залучена до клем змінного струму першої вентильної групи, інша вентильна обмотка якого залучена до клем змінного струму другої вентильної групи, а третя вентильна обмотка якого залучена до клем змінного струму транзисторного моста силового активного фільтра, що містить також діодну збірку, клеми змінного струму якої сполучені з клемми змінного струму першої вентильної групи, систему імпульсно-фазового керування першою вентильною групою, систему імпульсно-фазового керування другою вентильною групою, систему керування силовим активним фільтром, вузол сигналу завдання по струму навантаження, вузол сигналу завдання розміру напруги на конденсаторі силового активного фільтра, датчик струму навантаження, перший вузол порівняння сигналу завдання по струму навантаження і сигналу зворотного зв'язку по струму навантаження, другий вузол порівняння сигналу завдання розміру напруги на конденсаторі силового активного фільтра і сигналу зворотного зв'язку по напрузі на конденсаторі силового активного фільтра, третій, четвертий і п'ятий вузли порівняння відповідно сигналів завдання струму фаз а, b, c силового активного фільтра і сигналів зворотного зв'язку по токах фаз а, b, c

силового активного фільтра, перший пропорційно-інтегральний регулятор струму навантаження, другий пропорційно-інтегральний регулятор розміру комутаційної активної потужності, виведеної в мережу, що живить, перший датчик миттєвих значень напруги трьох фаз мережі, що живить, другий датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, с першої вентиляльної групи на тиристорах що замикаються, третій датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, с другої вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, четвертий датчик миттєвого значення вхідного струму фази а силового активного фільтра, п'ятий датчик миттєвого значення вхідного струму фази b силового активного фільтра, шостий датчик миттєвого значення вхідного струму фази с силового активного фільтра, перший вузол перетворення миттєвих значень напруги трьох фаз мережі з координат а, b, с у координати  $\alpha, \beta$ , другий вузол перетворення миттєвих вхідних струмів першої вентиляльної групи на тиристорах, що замикаються, і другий вентиляльний групи на одноопераційних тиристорах із координат а, b, с у координати  $\alpha, \beta$ , перший фільтр виділення змінної складової активної потужності, датчик напруги на конденсаторі, перший вузол розрахунку миттєвої активної і миттєвої реактивної потужності, другий вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах  $\alpha, \beta$ , третій вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах а, b, с, додатково содержит перший допоміжн діод, анод якого підключений до негативної обкладки конденсатора, а його катод підключений до спільної точки катодів першої вентиляльної групи, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності, четвертий вузол розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, третій пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування першою вентиляльною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування першою вентиляльною групою на тиристорах що замикаються, четвертий пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування другою вентиляльною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування другою вентиляльною групою на одноопераційних тиристорах, п'ятий пропорційно-інтегральний регулятор середньої реактивної потужності, шостий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, сьомий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, восьмий вузол порівняння сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності і сигналу зворотного зв'язку по середній реактивній потужності з виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, другий фільтр виділення змінної складової реактивної потужності, причому діодна збірка виконана у вигляді трипульсної діодної вентиляльної групи, спільна точка катодів якої залучена до позитивної обкладки конденсатора силового активного фільтра, перша вентиляльна група виконана на трьох тиристорах що замикаються, катоди яких сполучені між собою, друга вентиляльна група виконана на трьох одноопераційних тиристорах, аноди яких сполучені між собою, вентиляльна обмотка першої вентиляльної групи сполучена пофазно-паралельно з вентиляльною обмоткою, підключеною до клем змінного струму другої вентиляльної групи, і вони утворюють одну загальну вентиляльну обмотку, підключену пофазно до трьох анодів тиристорів, що замикаються, першої вентиляльної групи й одночасно підключену пофазно до трьох катодів одноопераційних тиристорів другої вентиляльної групи, датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, с першої вентиляльної групи на тиристорах, що замикаються, підключений паралельно з датчиком миттєвих значень струмів у фазах а, b, с, першої вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах і утворює загальний датчик струмів у фазах а, b, с об'єднаної вентиляльної обмотки, анод допоміжного діода підключений до негативної обкладки конденсатора, а його катод до спільної точки катодів першої вентиляльної групи, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності залучений до позитивного входу восьмого вузла порівняння, негативний вхід восьмого вузла порівняння залучений до виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, вихід восьмого вузла порівняння залучений до входу п'ятого регулятора середньої реактивної потужності, вихід якого залучений паралельно до позитивного входу шостого вузла порівняння і негативного входу сьомого вузла порівняння, до іншого позитивного входу шостого вузла порівняння і до іншого позитивного входу сьомого вузла порівняння залучений паралельно вихід першого регулятора струму навантаження, вихід шостого вузла порівняння залучений до входу третього регулятора напруги керування першої вентиляльної групи, а вихід сьомого вузла порівняння залучений до входу четвертого регулятора напруги керування другої вентиляльної групи, вихід першого вузла розрахунку миттєвої реактивної потужності q залучений до входу другого фільтра, вихід змінної складової якої залучений до входу другого вузла розрахунку.

У третьому варіанті винаходу що заявляється відомий перетворювач змінної напруги в постійне з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, що містить першу вентиляльну групу на тиристорах, що замикаються, або інших цілком керованих силових напівпровідникових приладах, що працює з кутами керування, що випереджають, другу вентиляльну групу на одноопераційних тиристорах, що працює з відстаючими кутами керування, навантаження, включене послідовно з першою і другою вентиляльними групами, силовий активний фільтр, що складається з транзисторного моста з оберненими діодами і конденсатора, що фільтрує, чотирьохобмотковий перетворювальний трансформатор, мережна обмотка якого залучена до мережі, що живить, одна з трьох вентиляльних обмоток якого залучена до клем змінного струму першої вентиляльної групи, інша вентиляльна обмотка якого залучена до клем змінного струму другої вентиляльної групи, а третя вентиляльна обмотка якого залучена до клем змінного струму транзисторного моста силового активного фільтра, що містить також діодну збірку, клеми змінного струму якої сполучені з клемми змінного струму першої вентиляльної групи, систему імпульсно-фазового керування першою вентиляльною групою, систему імпульсно-фазового керування другою вентиляльною групою, систему керування силовим активним фільтром, вузол сигналу завдання по. струму навантаження, вузол сигналу завдання розміру напруги на конденсаторі силового активного фільтра і сигналу зворотного зв'язку по напрузі на конденсаторі силового активного фільтра, третій, четвертий і п'ятий вузли порівняння відповідно сигналів завдання струму фаз а, b, с силового активного фільтра і сигналів зворотного зв'язку по токах фаз а, b, с силового активного фільтра, перший пропорційно-інтегральний регулятор струму навантаження, другий

пропорційно-інтегральний регулятор розміру комутаційної активної потужності, виведеної в мережу, що живить, перший датчик миттєвих значень напруги трьох фаз мережі, що живить, другий датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, с першої вентиляльної групи на тиристорах що замикаються, третій датчик миттєвих значень струмів у фазах а, b, с другої вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, четвертий датчик миттєвого значення вхідного струму фази а силового активного фільтра, п'ятий датчик миттєвого значення вхідного струму фази b силового активного фільтра, шостий датчик миттєвого значення вхідного струму фази с силового активного фільтра, перший вузол перетворення миттєвих значень напруги трьох фаз мережі з координат а, b, с у координати  $\alpha, \beta$ , другий вузол перетворення миттєвих вхідних струмів першої вентиляльної групи на тиристорах, що замикаються, і другої вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах із координат а, b, с у координати  $\alpha, \beta$  перший фільтр виділення змінної складової активної потужності, датчик напруги на конденсаторі, перший вузол розрахунку миттєвої активної і миттєвої реактивної потужності, другий вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах  $\alpha, \beta$ , третій вузол розрахунку сигналів завдання струмів силового активного фільтра в координатах а, b, с, додатково містить перший допоміжний діод, анод якого підключений до негативної обкладки конденсатора, а його катод підключений до спільної точки катодів першої вентиляльної групи, другий допоміжний діод, катод якого підключений до позитивної обкладки конденсатора, а його анод підключений до спільної точки анодів першої вентиляльної групи, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності, четвертий вузол розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, третій пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування першою вентиляльною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування першою вентиляльною групою на тиристорах що замикаються, четвертий пропорційно-інтегральний регулятор напруги керування другою вентиляльною групою, вихід якого залучений до входу системи імпульсно-фазового керування другою вентиляльною групою на одноопераційних тиристорах, п'ятий пропорційно-інтегральний регулятор середньої реактивної потужності, шостий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, сьомий вузол порівняння сигналу напруги керування і вихідного сигналу регулятора середньої реактивної потужності, восьмий вузол порівняння сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності і сигналу зворотного зв'язку по середній реактивній потужності з виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, другий фільтр виділення змінної складової реактивної потужності, притому діодна збірка виконана у вигляді двох діодних груп, перша з яких є трипульсною катодною діодною групою, спільна точка катодів якої залучена до позитивної обкладки конденсатора, а її клеми змінного струму залучені до клем змінного струму другої вентиляльної обмотки трансформатора, а друга є трипульсною анодною діодною групою, спільна точка анодів якої залучена до негативної обкладки конденсатора, а її клеми змінного струму залучені пофазно до клем першої вентиляльної обмотки трансформатора, перша шостипульсна вентиляльна група на тиристорах, що замикаються, виконана у вигляді двох трипульсних вентиляльних груп: трипульсної анодної групи на тиристорах що замикаються, спільна точка анодів якої сполучена з катодом першого допоміжного діода і сполучена з анодом другого допоміжного діода, а її клеми змінного струму сполучені пофазно з клемами першої вентиляльної обмотки трансформатора, і трипульсної катодної на тиристорах що замикаються, спільна точка катодів якої сполучена з катодом першого допоміжного діода і сполучена з анодом другого допоміжного діода, а її клеми змінного струму сполучені пофазно з клемами другої вентиляльної обмотки трансформатора, друга шостипульсна вентиляльна група на одноопераційних тиристорах виконана у вигляді двох трипульсних вентиляльних груп, перша з яких є анодною групою на одноопераційних тиристорах, спільна точка анодів якої сполучена з негативним виводом навантаження, а її клеми змінного струму сполучені пофазно з клемами другої вентиляльної обмотки трансформатора, а друга є катодною групою на одноопераційних тиристорах, спільна точка анодів якої сполучена з катодом першого допоміжного діода і сполучена з позитивним виводом навантаження, а її клеми змінного струму сполучені пофазно з клемами першої вентиляльної обмотки трансформатора, вузол сигналу завдання розміру середньої реактивної потужності залучений до позитивного входу восьмого вузла порівняння, негативний вхід восьмого вузла порівняння залучений до виходу вузла розрахунку фактичного значення середньої реактивної потужності, вихід восьмого вузла порівняння залучений до входу п'ятого регулятора середньої реактивної потужності, вихід якого залучений паралельно до позитивного входу шостого вузла порівняння і негативного входу сьомого вузла порівняння, до іншого позитивного входу шостого вузла порівняння і до іншого позитивного входу сьомого вузла порівняння залучений паралельно вихід першого регулятора струму навантаження, вихід шостого вузла порівняння залучений до входу третього регулятора напруги керування першою вентиляльною групою, а вихід сьомого вузла порівняння залучений до входу четвертого регулятора напруги керування другою вентиляльною групою, вихід першого вузла розрахунку миттєвої реактивної потужності  $q$  залучений до входу другого фільтра, вихід змінної складової якого залучений до входу другого вузла розрахунку.

Кожний із варіантів що заявляється напівпровідникового перетворювача змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності виконаний на основі компенсованого керованого випрямляча (ККВ) і допоміжного силового активного фільтра (САФ), що виконує одночасно дві функції: вивід у мережу "комутаційної" активної потужності і придушення вищих гармонік мережного струму ККВ. Другу функцію можна також називати "корекцією форми мережного струму", оскільки вона полягає в наближенні форми мережного струму до практично синусоїдальної форми.

Перетворювач змінної напруги в постійну що заявляється позбавлений хиб відомого перетворювача. Позитивний ефект досягається в такий спосіб. По-перше, у систему керування введений додатковий регулятор, що коректує кути керування тиристорами  $\alpha_G$  і  $\alpha_T$  таким чином, що досягається повна взаємна компенсація реактивних потужностей вентиляльних груп  $B_{G\Gamma}$  і  $B_{T\Gamma}$ , при якій функція компенсації реактивної потужності на стороні мережі за допомогою САФ не потрібна. По-друге, вихідні клеми діодної збірки залучені до обкладок конденсатора силового активного фільтра, а джерело постійної напруги виключено. По-третє, у схему введені два додаткових діоди, анод першого з них підключається до спільної точки анодів GTO тиристорів  $B_{T\Gamma}$ , а його катод залучений до спільної точки катодної вентиляльної групи діодного моста, анод

іншого додаткового діода залучений до спільної точки анодної вентиляльної групи діодного моста, а його катод залучений до спільної точки катодної групи GTO тиристорів ВГ<sub>Г</sub>. Запровадження двох додаткових діодів дозволяє створити ланцюга прострумання струму навантаження  $I_d$  при вимиканні GTO тиристорів ВГ<sub>Г</sub> і забезпечити стійку комутацію у фазах вентиляльної обмотки перетворювального трансформатора. По-четверте, відома система керування САФ видозмінена таким чином, що виключається функція компенсації реактивної потужності і додається функція виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентиляльних обмоток перетворювального трансформатора. У результаті САФ виконує дві функції: корекцію форми мережного струму (придушення вищих гармонік) і вивід енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентиляльної обмотки перетворювального трансформатора.

Більш докладно винахід пояснюється за допомогою малюнків, на яких зображені:

- на Фіг.1 - схема першого варіанта перетворювача;
- на Фіг.2 - схема другого варіанта перетворювача;
- на Фіг.3 - схема третього варіанта перетворювача;

Перший варіант що заявляється перетворювача подає із себе двенадцятипульсний перетворювач (Фіг.1), що складається з чотирьохобмоточного перетворювального трансформатора 1, мережна обмотка 2 якого залучена до промислової трифазної мережі змінної синусоїдальної напруги 3. Одна з вентиляльних обмоток 4 зазначеного перетворювального трансформатора залучена до клем змінного струму вентиляльної групи ВГ<sub>Г</sub> у вигляді шостипульсного моста на тиристорах, що замикаються, (або цілком керованих вентилях іншого типу) 5; інша вентиляльна обмотка 6 залучена до клем змінного струму вентиляльної групи ВГ<sub>Т</sub> у вигляді шостипульсного моста на одноопераційних тиристорах 7. Вентильні групи 5 і 7 включені послідовно і залучені до навантаження 8 так, що через мости і навантаження прострумає той самий струм  $I_d$ . Третя вентиляльна обмотка 9 перетворювального трансформатора 1 залучена до затискачів змінного струму шостипульсного моста 10, що складає із шости силових транзисторів, перехід колектор-емітер кожного з яких шунтован в оберненому напрямку діодом. Вихід шостипульсного транзисторного моста 10 залучений до обкладки конденсатора 11, причому спільна точка, у якій об'єднані три колектори транзисторного моста 10, залучена до позитивної обкладки конденсатора 11, а спільна точка, у якій об'єднані три емітери транзистору моста 10, залучена до негативної обкладки конденсатора 11. Міст 10 і конденсатор 11 утворюють силову частину силового активного фільтра.

Для виведення в мережу, що живить, через силовий активний фільтр комутаційної енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання обмотки 4 перетворювального трансформатора 1, служить діодна збірка 12, клеми фаз а, b, c змінного струму якої залучені відповідно до клем фаз а, b, c змінного струму вентиляльної групи на тиристорах 5, що замикаються; спільна точка катодів трьох діодів збірки 12 залучена до позитивної обкладки конденсатора 11, а спільна точка анодів трьох діодів збірки 12 залучена до негативної обкладки конденсатора 11.

Для створення шляху струму навантаження  $I_d$  при вимиканні тиристорів, що замикаються вентиляльної групи 5 до спільної точки катодів тиристорів, що замикаються, вентиляльної групи 5 залучений катод допоміжного діода 13, анод якого сполучений із негативною обкладкою конденсатора 11; а до спільної точки анодів тиристорів, що замикаються, вентиляльної групи 5 залучений анод допоміжного діода 14, катод якого сполучений із позитивною обкладкою конденсатора 11.

Керування силовими мостами 5, 7, 10 здійснюється відповідно за допомогою системи імпульсно-фазового керування вентиляльною групою на тиристорах 15, що замикаються; системи імпульсно-фазового керування вентиляльною групою на одноопераційних тиристорах 16; системи керування транзисторами силового активного фільтра 17. Керуючі сигнали на входи системи керування подаються з виходів трьох замкнутих систем автоматичного регулювання. Одна з цих трьох систем (назвемо її "зовнішньою") забезпечує автоматичне регулювання струму  $I_d$  в навантаженні перетворювача відповідно до заданого значення струму  $I_d^*$ , розмір якого визначається технологічним процесом у навантаженні. Ця система містить у собі вузол завдання по струму  $I_d^*$  18, датчик струму навантаження 19, елемент порівняння сигналів 20, регулятор струму  $I_d$  21 на основі операційного підсилювача або мікропроцесорного пристрою, елементи порівняння сигналів 22 і 23, регулятор напруги керування  $e_{VG}$  24 на вході системи імпульсно-фазового керування вентиляльною групою на тиристорах що замикаються, регулятор напруги керування  $e_{VT}$  25 на вході системи імпульсно-фазового керування вентиляльною групою на одноопераційних тиристорах.

Дві інші системи автоматичного регулювання назвемо "внутрішніми". Перша з них забезпечує регулювання розміру реактивної потужності  $Q$ , споживаної перетворювачем. У приватному, найбільше ймовірному на практиці, випадку може забезпечуватися рівність нулю сумарної реактивної потужності. Ця система автоматичного регулювання містить у собі вузол завдання розміру реактивної потужності  $Q^*$  26; пристрій обчислення фактичного розміру реактивної потужності 27, датчик миттєвих значень фазних напруг мережі, що живить, 28, датчик миттєвих значень фазних струмів 29 вентиляльної групи на тиристорах що замикаються, датчик миттєвих значень фазних струмів 30 вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, елемент порівняння сигналів 31, регулятор реактивної потужності 32. Відзначимо, що з метою спрощення накреслення Фіг.1, усі виходи датчиків напруг і струмів позначені тризначними цифрами, укладеними в круглі скобки, причому такі ж цифри в скобках зазначені на входах вузлів, куди подаються сигнали відповідних датчиків. На Фіг.1 для цілі цілі використуються позначення (101), (102),..., (107).

Інша "внутрішня" система автоматичного регулювання забезпечує регулювання струмів  $i_{fa}$ ,  $i_{fb}$ ,  $i_{fc}$  у фазах змінного струму силового активного фільтра. Це регулювання здійснюється таким чином, щоб змінні фазні токи  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  у мережній обмотці 2 перетворювального трансформатора 1 були близькі за формою до синусоїдального. Система містить у собі датчик миттєвих фазних напруг 28 мережі, що живить, стандартну,

наприклад, Intel 80196MC, ланка перетворення миттєвих напруг 33 із координат а, b, c у координати  $\alpha$ ,  $\beta$  [11,12] (перетворення Кларка); датчик фазних змінних струмів 29 вентиляльної групи на тиристорах що замикаються, датчик фазних змінних струмів 30 вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, стандартну,



наприклад, Intel 80196MC, ланку перетворення миттєвих струмів із координат  $a, b, c$  у координати  $\alpha, \beta$  34; стандартну [12] ланку розрахунку миттєвої активної і миттєвої реактивної потужності 35 по відомих фазних напругах і струмах; фільтр 36, що дозволяє виділяти змінну збірку  $\tilde{P}$  із сумарної мережної активної потужності; фільтр 37, що дозволяє виділяти змінну збірку  $\tilde{Q}$  із сумарної миттєвої реактивної потужності; вузол завдання розміру напруги  $U^*$  на конденсаторі силового активного фільтра 38; датчик напруги  $U_c$  на конденсаторі силового активного фільтра 39; вузол порівняння сигналів 40; пропорційну ланку (підсилювач) 41; ланку розрахунку розмірів необхідних струмів  $i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$  силового активного фільтра в координатах  $\alpha, \beta$  42; ланку перетворення заданих миттєвих струмів силового активного фільтра з координат  $\alpha, \beta$  у координати  $a, b, c$ ; три датчики струмів силового активного фільтра 44, 45, 46; три вузли порівняння 47, 48, 49.

Необхідно відзначити, що перетворювач, що патентується складається з відомих пристроїв і вузлів: мостовий випрямляч по шостипульсній мостовій схемі на тиристорах, описаний у [1], мостовий випрямляч по шостипульсній мостовій схемі на тиристорах, що замикаються, з пристроєм виведення комутаційної потужності, описаний у [8], [9]; силовий активний фільтр, описаний у [11], [12]. Відомі також датчики струму, датчики напруги, вимірювачі реактивної потужності, ланки перетворювача координат  $a, b, c$  трифазних систем напруг або струмів у координати  $\alpha, \beta$ , ланки оберненого перетворення координат  $\alpha, \beta$  у координати  $a, b, c$ ; вузли порівняння сигналів.

Предметом що патентується винаходу є нова силова схема перетворювача, у якому при послідовному з'єднанні вентиляльної групи 7 на одноопераційних тиристорах і вентиляній групі 5 на тиристорах що замикаються, до клем змінного струму вентиляльної групи 5 залучений діодний міст 12, а до клем постійного струму вентиляльної групи 5 залучені діоди 13 і 14, що дозволяє здійснювати вивід комутаційної активної потужності, що накопичується в індуктивностях розсіювання обмоток 4 трансформатора 1 через силовий активний фільтр 11, який одночасно виконує дві функції: зазначений вище вивід комутаційної активної потужності і корекцію форми (придушення вищих гармонік струму) мережних струмів перетворювача. Новим технічним рішенням є також побудова системи керування, при якій сигнал із виходу регулятора реактивної потужності 32 сумується із сигналом напруги керування  $e_y$  з виходу регулятора струму 21, сумарний сигнал посилюється в регуляторі 24 і подається на вхід системи імпульсно-фазового керування 15; одночасно з цим вихідний сигнал регулятора 32 відраховується із сигналу напруги керування регулятора струму 21, різницевий сигнал посилюється регулятором 25 і подається на вхід системи імпульсно-фазового керування 16 моста на одноопераційних тиристорах. Крім цього, на відміну від відомих технічних рішень у винаході що патентується вводиться фільтр 37 між виходом вузла розрахунку 35 миттєвих значень активної і реактивної потужності і входом вузла розрахунку 42 заданих струмів силового активного фільтра в координатах  $\alpha, \beta$ . Введення фільтра 37, що пропускає лише змінну складової реактивної потужності, дозволяє розділити дві функції: 1) функцію регулювання розміру середньої реактивної потужності, що у пристрої що патентується виконує регулятор 32 через регулятори 24, 25, системи імпульсно-фазового керування 15, 16 і вентиляльні групи 5, 7, і 2) функцію придушення вищих гармонік струму мережі й одночасного виведення комутаційної активної потужності, що у винаході що патентується виконують система керування силовим активним фільтром, діодний міст 12, допоміжні діоди 13, 14, силовий активний фільтр 10 і конденсатор 11.

Перетворювач змінної напруги в постійне працює такою уявою.

Енергія мережі, що живить, змінного струму 3 перетворюється в енергію постійної напруги за допомогою включення послідовно з навантаженням вентиляльних груп  $ВГ_G$  на СТО тиристорах 5 і  $ВГ_T$  на одноопераційних тиристорах 7, що живляться через мережну обмотку 2 і вентиляльні обмотки 4, 6 перетворювального трансформатора 1. Задане значення струму навантаження  $I_d^*$ , формоване у вузлі завдання струму навантаження  $I_d^*$  18, підтримується за допомогою зовнішньої стандартної системи автоматичного регулювання, що складає з пропорційно-інтегрального регулятора (операційного підсилювача)  $РЕГ_{Id}$  21, датчика струму навантаження  $I_d$  19, вузла порівняння заданого  $I_d^*$  і фактичного струму  $I_d$  навантаження 20, системи імпульсно-фазового керування  $СІФК_G$ , що має характеристику, що відповідає формулі (14) і  $СІФК_T$ , що володіє характеристикою, що відповідає формулі (15). Сумарна випрямлена напруга послідовно включених  $ВГ_G$  5 і  $ВГ_T$  7 визначається співвідношенням (13). "Зовнішня" система автоматичного регулювання забезпечує підтримку заданого струму  $I_d^*$  як у сталих режимах, так і в динамічних режимах. Відповідно до співвідношень (16), (4), (17), (18) і (19) при малих значеннях струмів  $I_d$ , значно менших номінальних струмів навантаження, реактивна потужність на стороні мережі перетворювача близька до нуля. При збільшенні струму навантаження збільшуються кути комутації струму у вентилях і, як слідство, на стороні мережі перетворювача з'являється позитивна реактивна потужність, розмір якої може бути значної.

Компенсація цієї реактивної потужності здійснюється за допомогою першої "внутрішньої" системи автоматичного регулювання, що складає з вузла завдання розміру реактивної потужності  $Q^*$  26, датчика фактичної реактивної потужності  $Q$  27, пропорційно-інтегрального регулятора  $РЕГ_Q$  32 трьох вузлів порівняння сигналів 31, 22, 23 і допоміжних регуляторів напруг керування  $РЕГ_{e_{yG}}$  24,  $РЕГ_{e_{yT}}$  23 на входах відповідно  $СІФК_G$  15 і  $СІФК_T$  16. Особливістю, що патентується першої замкнутої внутрішньої системи автоматичного регулювання є протилежні знаки сигналу корекції на входах вузлів порівняння 22 і 23, унаслідок чого "внутрішня" система не впливає на роботу "зовнішньої" системи автоматичного регулювання.

Для корекції форми мережного струму (придушення вищих гармонік струму) перетворювача використовується САФ 10, що живиться від вентиляльних обмоток 9 перетворювального трансформатора 1 і навантажених на конденсатор 11. Крім стандартної функції корекції мережного струму в пристрої що патентується САФ виконує функцію виведення в мережу енергії, що живить, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентиляльних обмоток 4 перетворювального трансформатора 1. Діоди діодної збірки 12 і додаткові діоди 13, 14 створюють контури для замикання струму індуктивностей розсіювання через конденсатор 11. Наприклад, при вимиканні GTO тиристорів фази а катодної вентиляльної групи струм  $i_{Ga}$  замикається, минаючи цей тиристор по ланцюзі: діод фази а катодної групи діодів діодної збірки 12,

конденсатор 11, допоміжний діод 13, спільна точка катодної групи GTO тиристорів ВГ<sub>Г</sub> 5. Аналогічно при вимиканні GTO тиристорів фази с анодної групи, струм -  $i_{Gc}$  замикається через допоміжний діод 14, конденсатор 11 і діод фази с анодної групи діодної збірки 12.

Корекція форми мережного струму і вивід енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання вентильної обмотки 4, здійснюється за допомогою другої "внутрішньої" системи автоматичного регулювання. Ця система включає: ланку перетворення координат напруг 33 у відповідності з таким матричним співвідношенням:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \\ 0 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; \quad (22)$$

ланку перетворення координат струмів відповідно до співвідношення 34:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \\ 0 \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ga} + i_{Ta} \\ i_{Gb} + i_{Tb} \\ i_{Gc} + i_{Tc} \end{bmatrix}; \quad (23)$$

ланку розрахунку миттєвих значень активної і реактивної потужності 35:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad (24)$$

фільтри, виділення змінних складових 36 і 37; ланку розрахунку завдань по струму в координатах  $\alpha, \beta$  42:

$$\begin{bmatrix} i^*_{\phi\alpha} \\ i^*_{\phi\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3(U_\alpha^2 + U_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + P_{ком} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}; \quad (25)$$

ланка оберненого перетворення координат 43:

$$\begin{bmatrix} i^*_{\phi\alpha} \\ i^*_{\phi\beta} \\ i^*_{\phi\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^*_{\phi\alpha} \\ i^*_{\phi\beta} \end{bmatrix}; \quad (26)$$

вузли порівняння сигналів завдання струмів із фактичними значеннями струмів 47, 48, 49; гістерезисну систему керування 17 транзисторами силового активного фільтра 10, вузол завдання розміру напруги на конденсаторі 38, вузол порівняння сигналів 40, підсилювач 41.

Керування транзисторами САФ здійснюється в такий спосіб: якщо знак на входах вузлів порівняння 47, 48, 49 позитивний, то включається транзистор емітерної групи відповідної фази транзисторного моста 10, а транзистор колекторної групи тієї ж фази моста 10 виключається, якщо знак напруги на виході вузла порівняння змінюється, то відбувається переключення зазначених транзисторів відповідної фази.

Другий варіант перетворювача змінної напруги в постійне що заявляється відрізняється від першого варіанта тим, що вентильні обмотки 4, 6 перетворювального трансформатора 1 включені паралельно і являють собою єдину обмотку 4, 6 (Фіг.2), вентильна група ВГ<sub>Г</sub> 5 виконана у вигляді катодної трипульсної вентильної групи на трьох GTO тиристорах, катоди яких сполучені між собою, а вентильна група ВГ<sub>Т</sub> 7 виконана у вигляді анодної трипульсної вентильної групи на трьох одноопераційних тиристорах, аноди яких сполучені між собою, діодна збірка ДС12 виконана у вигляді катодної трипульсної вентильної групи, катоди яких сполучені між собою, датчики струмів 29, 30 включені паралельно, тобто два датчики 29, 30 замінені одним датчиком 29, СІФК<sub>Г</sub> 15 і СІФК<sub>Т</sub> 16 виконані трьохканальними по числу тиристорів у кожній із вентильних груп ВГ<sub>Г</sub> і ВГ<sub>Т</sub>.

Цей другий варіант схема працює аналогічно описаному.

Третій варіант схеми перетворювача змінної напруги в постійне відрізняється від першого схемою з'єднання анодних і катодних трипульсних вентильних груп тиристорів, що замикаються, й одноопераційних тиристорів, що входять до складу мостових вентильних груп ВГ<sub>Г</sub> 5 і ВГ<sub>Т</sub> 7 (Фіг.3). Клеми змінного струму катодної вентильної групи з трьох GTO тиристорів пофазно сполучені з клемми змінного струму анодної групи з трьох одноопераційних тиристорів 7 і залучені до відповідних клем вентильної обмотки 6 трансформатора 1, клеми змінного струму анодної трипульсної вентильної групи 5 на GTO тиристорах сполучені пофазно з клемми змінного струму катодної трипульсної вентильної групи 7 на одноопераційних тиристорах і залучені до відповідних клем вентильної обмотки 4 трансформатора 1, створені у в такий спосіб змішані (на трьох GTO тиристорах і трьох одноопераційних тиристорах) дві вентильні групи включені послідовно з навантаженням так, що через зазначені вентильні групи і навантаження 8 замикається струм навантаження  $I_d$ .

Робота третього варіанта перетворювача також не відрізняється від роботи першого варіанта, описаного вище.

Всі три варіанти перетворювачів здійснюють перетворення змінної напруги в постійну напругу тим самим засобом при близькому до нуля, або при іншому заданому значенні, реактивної потужності і при близькій до синусоїди формі мережного струму.

Перетворювач із близьким до одиниці коефіцієнтом потужності може бути виконаний по різноманітних

схемах, які відрізняються кількістю фаз мережі, що живить, числом пульсацій у кривій випрямленої напруги, наявністю або відсутністю перетворювального трансформатора і інших непринципових особливостей.

#### Література

1. N. Mohan, Tore M. Underland, William P Robbins. Power Electronics Converters, Application and Design. John Wiley & sons, Inc., NY, 1995
2. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - 32с.
3. International Standard IEC-1000-2-2. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
4. IEEE Recommended Practices and Requirements to Harmonic Control in Electric Power System. IEEE Std. 519-1992.
5. Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, Д.С. Крылов. Преобразователь с единичным коэффициентом мощности. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. 4.4. Київ, 2000, с.70-75.
6. В.И. Гапанов, Ю.А. Шершнев, М.К. Гуревич, М.А. Козлова. Современные мощные полупроводниковые приборы и их функциональные особенности. Электротехника, 1998, №3, с. 48-52.
7. F. Richardeau, Ph. Ladous, Y Chtron. Introduction of "Dual-Switching" Cells in High-Power Phase-Controlled Converters. EPE Journal, vol. 7, No3/4, Dec. 1998, pp. 18-24.
8. Г.Г. Жемеров, И.Л. Коляндра, И.И. Левитан, Е.Б. Петрик, К.А. Старков. Преобразователь переменного напряжения в постоянное. Авт. свид. СССР №1394373. Опубл. 07.05.88. Бюл. №17.
9. М.И. Брайловский, Г.Г. Жемеров. Управляемый выпрямитель на запираемых тиристорах. Техническая электродинамика, 1990, №3. С.33-38.
10. Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов. Определение величины коммутационной активной мощности, рекуперированной в сеть в компенсированном управляемом выпрямителе. Вестник харьковского государственного политехнического университета. ХГПУ, 2000, вып. 112, с. 110-115.
11. Bong-Hwan Kwon, Jang-Hyong Youm, Jee-Woo Lim. A Line-Voltage-sensorless synchronous Rectifier. IEEE Trans. On Power Electronics, 1999, vol.14, No5, pp.966-972.
12. Joao Afonso, Carlos Couto, Julio Martins. Active filters with control based on the p-q theory. IEEE industrial Electronics society newsletter 2000, vol. 47, No3, pp.5-11.
13. N.R. Zargari Yung Xiao, Bin Wu. Near Unity input displacement factor for current source PWM drives. IEEE Industry Application Magazin, July/August, 1999, pp.19-25.

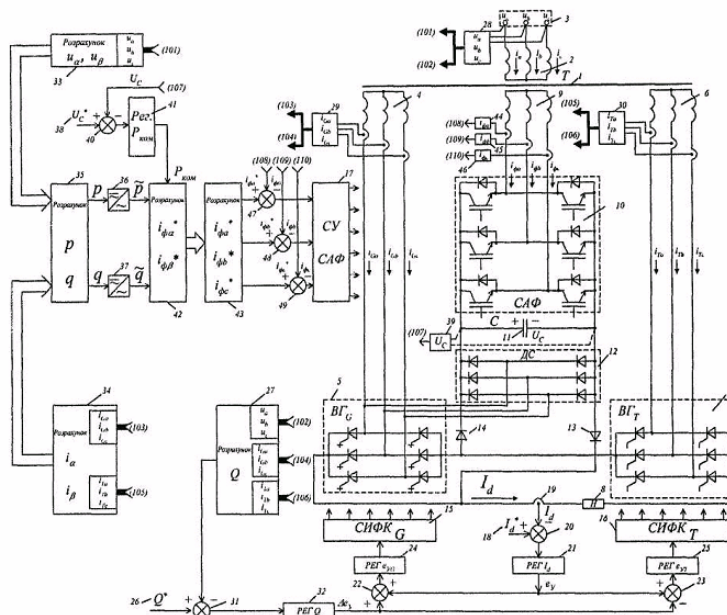


Fig.1

