

Винахід стосується електротехніки, зокрема перетворювальної техніки. Винахід може бути використаний в електроприводах змінного струму, спеціальних джерелах живлення, тощо.

Відомі способи комутації струму ключами двосторонньої провідності, що складаються з двох окремо керованих та проводячих у протилежних напрямках половин, засновані на інформації про полярність струму навантаження ( $I_n$ ), матричних перетворювачів (МП), [1, 2, 3], або інформації про співвідношення напруг мережі живлення [3, 4, 5]. У випадку слідування за полярністю  $I_n$  управління половинами ключів ведеться індивідуально для кожної полярності струму, що дозволяє здійснювати коректну комутацію (без струмів короткого замикання та викидів напруги на елементах схеми при розривах струму в індуктивності навантаження), якщо полярність  $I_n$  визначена однозначно. Якщо ж  $I_n \approx 0$  або через спотворення  $I_n$  змінює полярність багатократно на періоді вихідної напруги, у [1, 3] неможливо точно визначити порядок покрокової комутації половин ключів при кожній зміні полярності струму  $I_n$ . У [2] полярність  $I_n$  визначається за різницею в падінні напруги на половинах ключів в кожний момент часу. Це дозволяє досить точно визначити момент спаду струму до нульового значення. Але цей спосіб потребує значного розширення інтелектуальних можливостей драйверів силових ключів та ускладнення логічної частини системи керування за рахунок багатократних перехресних зв'язків між драйверами всіх ключів кожної вихідної фази МП. Крім цього, після фіксації нульового значення струму виникає невизначеність в подальшому виборі потрібного порядку перемикання половин ключів, що також ускладнює реалізацію способу комутації.

В реальних умовах пульсуючої з високою частотою і багатократно перетинаючої нульову лінію кривої вихідного струму реалізація механізму переводу струму з одного ключа в інший за цими способами буде ускладненою.

При використанні способів комутації, заснованих на інформації про співвідношення напруг мережі живлення, період напруги розбивають на інтервали, для кожного з яких згадане співвідношення напруг залишається незмінним, і підтримують постійно увімкненими половини всіх підключених до фази навантаження ключів, які не створюють шляхів для проходження струму короткого замикання протягом поточного інтервалу мережі живлення [4], або половини тільки двох ключів, підключених до вхідних фаз з максимальною та мінімальною напругами для даного інтервалу [5]. Такий підхід дозволяє забезпечити для фази МП постійну наявність умовних зворотних діодів за аналогією з автономними інверторами напруги і дає можливість здійснювати комутацію ключів із паузою, тому що завжди є шлях для проходження струму обох полярностей. Однак у моменти приблизної рівності фазних напруг, особливо якщо ці напруги спотворені (наприклад, в результаті проходження споживаного з мережі модульованого струму через індуктивність фільтру) і неодноразово порівнюються при зміні інтервалів, настає невизначеність у фіксації меж інтервалів напруги мережі. Неточність в виборі половин ключів, які підлягають постійному вмиканню протягом інтервалу, призводить до струмів короткого замикання через ключі в випадку перекриття, або до розривів струму при комутаціях, якщо потрібна для проведення струму під час пауз половина ключа виявиться вимкнутою.

При застосуванні способу комутації струму по [3] з використанням інформації про співвідношення вхідних напруг покроковий алгоритм перемикання половин ключів забезпечує коректну комутацію на тих часових інтервалах, де існує повна визначеність у співвідношенні напруг фаз, до яких підключені ключі, що перемикаються.

Недоліком цього способу, як і попередніх, є відсутність умов для реалізації безпечного перемикання ключів на інтервалах, де неможливо точно визначити співвідношення між вхідними фазними напругами, особливо при спотвореннях кривих напруг фаз мережі, до яких підключені ключі, що беруть участь у комутації. У випадку значних спотворень вхідних напруг ці способи незастосовні.

Найбільш близьким за технічною суттю до запропонованого є спосіб комутації струму ключами двосторонньої провідності матричних перетворювачів (МП) з числом вхідних фаз, дорівнюючим або більшим за три [6], який полягає в тому, що при переведенні струму навантаження МП з першого ключа, який забезпечує під'єднання навантаження до однієї вхідної фази, в другий ключ, який забезпечує під'єднання навантаження до іншої вхідної фази, у відповідності з порядком покрокового перемикання половин ключів, що задається поточним співвідношенням напруг для цих вхідних фаз, за умов неможливості точного визначення співвідношення напруг на момент початку покрокових перемикань ідентифікують на даний момент часу фазу мережі з екстремальною за модулем напругою і здійснюють проміжну комутацію струму з першого ключа в третій ключ, який забезпечує під'єднання навантаження до згаданої фази з екстремальною за модулем напругою, після чого переводять струм в другий ключ.

В поєднанні з векторною широтно-імпульсною модуляцією (ВШІМ) в трифазно-трифазному МП, що передбачає синтез просторових векторів вихідної напруги (наприклад, фазної –  $U_{\text{вих}}$ ) і вхідного струму протягом кожного циклу ВШІМ з нульових і ненульових стаціонарних векторів, з розбиттям періоду напруги мережі на шість інтервалів, межами яких є моменти зміни полярності вхідних фазних напруг, спосіб [6] передбачає формування нульових векторів одночасним вмиканням всіх ключів МП, під'єднаних до вхідної фази з екстремальною за модулем напругою всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, і при поєднанні в використанні для формування ненульових векторів двох вхідних лінійних напруг, максимальних за модулем усередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, ненульові вектори групують за ознакою формування з однієї і тієї ж вхідної лінійної напруги і розташовують між цими групами по часу формування нульовий вектор, а при сполученні циклів ВШІМ формують останній вектор попереднього і перший вектор наступного циклів з однієї і тієї ж вхідної лінійної напруги.

Спосіб комутації [6] забезпечує безпечні перемикання ключів навіть за умовами значних спотворень вхідних напруг МП. Використання двох максимальних за модулем лінійних напруг мережі на поточному інтервалі періоду напруги живлення для формування ненульових стаціонарних векторів дозволяє отримати максимально можливе співвідношення вихідної та вхідної напруг МП і підтримувати кут між просторовими векторами вхідного струму та вхідної фазної напруги близьким до нуля. Всі перемикання ключів при застосуванні способу [6] є функціонально доцільними і не призводять до додаткових динамічних втрат в

ключах МП.

Недоліком способу [6] являється неможливість використання при формуванні ненульових стаціонарних векторів двох вхідних лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення. Цей недолік не дозволяє застосовувати спосіб [6] при необхідності регулювання в широкому діапазоні кута зсуву між просторовими векторами напруги та струму мережі живлення, що значно звужує функціональні можливості МП.

В основу винаходу покладене завдання розширення функціональних можливостей МП шляхом створення умов для використання при формуванні ненульових стаціонарних векторів з двох вхідних лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, для здійснення регулювання в широкому діапазоні кута зсуву між просторовими векторами напруги та струму мережі живлення, при забезпеченні вилучення комутацій між ключами, підключеними до фаз мережі живлення, для яких на даний момент часу неможливо однозначно визначити співвідношення напруг між ними.

Поставлене завдання вирішується завдяки тому, що відповідно до способу комутації струму ключами двосторонньої провідності, кожен з яких складається з двох окремо керованих і проводячих у протилежних напрямках половин, матричних перетворювачів (МП) з числом вхідних фаз, дорівнюючим або більшим за три, який полягає в тому, що при переведенні струму навантаження МП з увімкненого в обох напрямках першого ключа, який забезпечує під'єднання навантаження до однієї вхідної фази, в другий ключ, який забезпечує під'єднання навантаження до іншої вхідної фази, у відповідності з порядком покрокового перемикавання половин ключів, що задається поточним співвідношенням напруг для цих вхідних фаз, за умов неможливості точного визначення співвідношення напруг на момент початку покрокових перемикань ідентифікують на даний момент часу фазу мережі з екстремальною за модулем напругою і здійснюють проміжну комутацію струму з першого ключа в третій ключ, який забезпечує під'єднання навантаження до згаданої фази з екстремальною за модулем напругою, після чого переводять струм в другий ключ, а в поєднанні з ВШІМ в трифазно-трифазному МП, що передбачає синтез просторових векторів  $U_{\text{вих}}$  і вхідного струму протягом кожного циклу ВШІМ з нульових і ненульових стаціонарних векторів з почерговим використанням для формування ненульових векторів двох вхідних лінійних напруг, зсунутих одна відносно іншої на 60 електричних градусів, з розбиттям періоду напруги мережі на шість інтервалів, межами яких є моменти зміни полярності вхідних фазних напруг, з формуванням нульових векторів одночасним вмиканням всіх ключів МП, під'єднаних до вхідної фази з екстремальною за модулем напругою всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, з розташуванням нульових векторів по часу формування між ненульовими векторами, згрупованими за ознакою відсутності прямого чергування векторів, яке вимагає комутації струму ключами, для яких на поточному інтервалі мережі неможливо точно визначити співвідношення вхідних напруг, при почерговому використанні для формування ненульових стаціонарних векторів двох вхідних лінійних напруг, одна з яких мінімальна за модулем усередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, ненульові вектори групують за ознакою чергування однонаправлених або сформованих з максимальної за модулем вхідної лінійної напруги векторів, і якщо останній вектор попередньої і перший вектор наступної групи є різнонаправленими і принаймні один з них сформований з мінімальної за модулем вхідної лінійної напруги на інтервалі періоду мережі, то між цими групами розташовують по часу формування нульовий вектор.

Порівняльний аналіз з відомими технічними рішеннями показує, що запропонований спосіб відрізняється від відомих тим, що при формуванні  $U_{\text{вих}}$  і вхідного струму з двох вхідних лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, дозволяє вилучити комутації струму ключами МП, під'єднаними до фаз мережі живлення, для яких на даний момент часу неможливо точно визначити полярність напруги між ними, завдяки чому комутації виконуються коректно без струмів короткого замикання через ключі та перенапруг на елементах схеми.

На фіг. 1 зображена принципова схема силової частини трифазно-трифазного МП; на фіг. 2 - часова діаграма напруг живлення трифазно-трифазного МП; на фіг. 3 - діаграма просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  і стаціонарних векторів при використанні для формування ненульових векторів двох лінійних напруг мережі, максимальних за модулем усередині поточного інтервалу періоду напруги живлення; на фіг. 4 - векторна діаграма, що пояснює можливі варіанти порядку чергування стаціонарних векторів у процесі синтезу  $U_{\text{вих}}$  (фіг. 3); на фіг. 5 - схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі для кожного з стаціонарних векторів на фіг. 4; на фіг. 6 - діаграма просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  і стаціонарних векторів при використанні для формування ненульових векторів двох лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення; на фіг. 7, 8 - векторні діаграми, що пояснюють можливі варіанти порядку чергування стаціонарних векторів у процесі синтезу просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  при різних його розташуваннях; на фіг. 9 - схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі для кожного з стаціонарних векторів на фіг. 7 і 8; на фіг. 10 - приклад функціональної схеми пристрою для реалізації запропонованого способу.

Розглянемо реалізацію запропонованого способу комутації струму в трифазно-трифазному МП з ВШІМ (фіг. 1 і фіг. 10).

Трифазно-трифазний МП (фіг. 1) містить дев'ять ключів двосторонньої провідності 1.1-1.9, що складаються з окремо керованих половин 2.1 - 2.9, що проводять струм від вхідних фаз до навантаження, і окремо керованих половин 3.1 - 3.9, що проводять струм в протилежному напрямку. Конфігурація ключа з двох з'єднаних емітерами IGBT-транзисторів з паралельно увімкненими зворотними діодами обрана як одна з можливих і принципового значення для пояснення запропонованого способу не має.

На часовій діаграмі напруг живлення трифазно-трифазного МП (фіг. 2) період напруги розбитий на шість інтервалів, межами яких є моменти зміни полярності вхідних фазних напруг. Інтервали позначені цифрами трьохрозрядного двійкового коду: 101, 100, 110, 010, 011, 001; кожний розряд означає полярність відповідної

фазної напруги фаз ABC у порядку старшинства розрядів ("1" - позитивна, "0" - негативна). Наприклад, для інтервалу 100  $u_{AB} > 0$ ,  $u_{BC} < 0$ ,  $u_C < 0$ .

Діаграма на фіг. 3 зображує стаціонарні вектори, що можуть використовуватися для синтезу  $U_{\text{вих}}$  МП для моменту часу  $t_n$  (фіг. 2) при формуванні ненульових векторів з двох лінійних напруг (наприклад,  $u_{AB}$  і  $u_{AC}$ ), максимальних за модулем усередині поточного інтервалу, позначеного кодом 100. Позначення 4.1-4.6 відповідають векторам, що формуються з лінійної напруги  $u_{AB}$ , а позначення 5.1-5.6 - векторам, що формуються з лінійної напруги  $u_{AC}$ . Позначення 6 відповідає нульовому вектору. Шість секторів на векторній діаграмі позначені як I-VI. Позначення 7 відповідає просторовому вектору  $U_{\text{вих}}$  МП, сформованому в секторі I діаграми, а 7.1 і 7.2 - його складовим за напрямками стаціонарних векторів (4.1, 5.1 і 4.2, 5.2), що утворюють межі 60-градусного сектора I. Векторна діаграма на фіг. 4 пояснює можливі варіанти порядку чергування стаціонарних векторів 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6 у процесі синтезу просторового вектора  $U_{\text{вих}}$ . Схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі живлення (фіг. 5) відповідають кожному з стаціонарних векторів 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6 на фіг. 4.

Векторні діаграми на фіг. 3, 4 і схема під'єднання на фіг. 5 стосуються способу комутації за прототипом [6] і приведені для пояснення можливих варіантів сполучення при переходах від способу за прототипом до запропонованого способу усередині одного інтервалу періоду напруги мережі живлення.

Діаграма на фіг. 6 зображує стаціонарні вектори, що можуть використовуватися для синтезу  $U_{\text{вих}}$  МП для моменту часу  $t_n$  (фіг. 2) при формуванні ненульових векторів з двох лінійних напруг ( $u_{AB}$  і  $u_{AC}$ ), одна з яких ( $u_{CB}$ ) мінімальна за модулем усередині поточного інтервалу, позначеного кодом 100 (для формування ненульових векторів можуть використовуватися також лінійна напруга  $u_{AC}$  і друга мінімальна за модулем усередині інтервалу 100 лінійна напруга  $u_{CB}$ ). Позначення 4.1-4.6 відповідають векторам, що формуються з лінійної напруги  $u_{AB}$ , а позначення 8.1-8.6 - векторам, що формуються з лінійної напруги  $u_{CB}$ . Позначення 6 відповідає нульовому вектору. Ненульові стаціонарні вектори створюють на площині шість секторів, які позначені на діаграмі як I-VI. Позначення 7 відповідає просторовому вектору  $U_{\text{вих}}$  МП, сформованому в секторі I діаграми, а 7.1 і 7.2 - його складовим за напрямками стаціонарних векторів (4.1, 8.1 і 4.2, 8.2), що утворюють межі 60-градусного сектора I. Векторна діаграма на фіг. 7 пояснює можливі варіанти порядку чергування стаціонарних векторів 4.1, 8.1, 4.2, 8.2, 6 у процесі синтезу просторового вектора  $U_{\text{вих}}$ . Векторна діаграма на фіг. 8 пояснює можливі варіанти порядку чергування стаціонарних векторів 4.1, 8.1, 4.6, 8.6, 6 для синтезу просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  в секторі VI (фіг. 6). Схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі живлення (фіг. 9) відповідають кожному з стаціонарних векторів 4.1, 8.1, 4.2, 8.2, 4.6, 8.6, 6 на трьох суміжних циклах ВШІМ при переміщенні просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  з сектора I в сектор VI (фіг. 6 - фіг. 8), причому перший зліва цикл є останнім в секторі I, а два наступних - першим та другим в секторі VI відповідно.

Функціональна схема пристрою для реалізації запропонованого способу в МП з ВШІМ (фіг. 10) аналогічна функціональній схемі для реалізації прототипу і включає в себе контролер 9, виконаний, наприклад, на базі сигнального процесора. Контролер 9 містить блок 10 формування завдання, сполучений з входом 11 модулятора 12, другий вхід 13 якого підключений до трифазного давача 14 напруги, під'єданого до вхідної мережі живлення 15. Виходи 16-18 контролера сполучені з входами програмованої логічної матриці 19, виходи 20 якої з'єднані з входами схеми 21 драйверів. Виходи 22 схеми 21 драйверів підключені до силового блоку 23 МП, виходи якого у свою чергу сполучені з навантаженням 24, наприклад, асинхронним двигуном.

Суть методу ВШІМ в МП (фіг. 1-9) полягає у формуванні заданих просторових векторів вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  і вхідного струму, які визначаються як середні значення за один цикл ВШІМ - тобто період несучої частоти. Як правило, заданий просторовий вектор одержують в результаті його синтезу з п'яти стаціонарних векторів - одного нульового і чотирьох ненульових [7], що попарно утворюють межі сектора, всередині якого розташований заданий вектор, наприклад, 7 (фіг. 3, 6). Для формування ненульових векторів використовуються наперемінно дві з трьох лінійних напруг мережі живлення. Амплітуди ненульових векторів фазної вихідної напруги дорівнюють 2/3 від миттєвих значень вхідних лінійних напруг, з яких вони сформовані. Нульовий вектор утворюється при підключенні всіх вихідних фаз МП до однієї фази мережі живлення. Тривалість використання ненульових стаціонарних векторів на циклі ВШІМ визначається законом модуляції (як правило, синусоїдальним) і обчислюється для даного циклу, виходячи з потрібного значення просторового вектора  $U_{\text{вих}}$  та поточного співвідношення напруг мережі живлення. Тривалість використання нульового вектора доповнює суму часових інтервалів для використання ненульових векторів до періоду несучої частоти ВШІМ. Кожному стаціонарному вектору вихідної напруги МП відповідає стаціонарний вектор вхідного струму, і набір з чотирьох ненульових і одного нульового векторів дозволяє отримати просторовий вектор струму, який описує траєкторію, близьку до кола, з частотою мережі живлення. Миттєві значення струму утворюють синусоїду (якщо знехтувати гармонічними складовими на несучій частоті).

Для синтезу вектора 7 у секторі I (фіг. 3) в момент часу  $t_n$  (фіг. 2) використовуються нульовий вектор 6 і ненульові вектори 4.1, 5.1 (одержання складової 7.1), 4.2, 5.2 (одержання складової 7.2), що формуються з двох максимальних за модулем лінійних напруг мережі ( $u_{AB}$  і  $u_{AC}$  усередині поточного інтервалу 100, фіг. 2). Таке формування з двох максимальних за модулем лінійних напруг є основним способом керування МП, так як дозволяє отримати максимальне співвідношення вихідної і вхідної напруг перетворювача і близький до нуля кут між просторовими векторами вхідного струму та вхідної напруги.

Кожному з вищезгаданих ненульових стаціонарних векторів відповідає певний стан МП, що описується комбінацією увімкнених ключів. Так, у певний момент часу  $t_n$  на інтервалі 100 (фіг. 2), наприклад, стаціонарному вектору 4.1 відповідає комбінація ключів 1.1, 1.5, 1.8 (фіг. 1); стаціонарному вектору 5.2 - комбінація ключів 1.1, 1.4, 1.9 (фіг. 1) і т. д. При переході з одного стану (вектор 4.1) до іншого (вектор 5.2) у середині інтервалу 100 (фіг. 2), коли порівнюються між собою фазні напруги фаз В та С, виникає невизначеність у черговості здійснення покрокової комутації струму між ключами 1.8 і 1.9 (фіг. 1). Крім того, при переходах до нульового вектора з вищезгаданих станів, коли нульовий вектор формується одночасним вмиканням ключів, підключених до фаз В або С, тобто ключів 1.2, 1.5, 1.8 або 1.3, 1.6, 1.9 (фіг. 1), також виникає згадана невизначеність для пар ключів 1.5 і 1.6, 1.8 і 1.9 (фіг. 1). Коректні комутації всередині

інтервалу 100 (фіг. 2) можливі тільки між ключем 1.1 (1.4, 1.7) і будь-яким іншим у кожній фазі МП.

На фіг. 4 для розглянутого сектора I і співвідношенні напруг мережі в момент часу  $t_n$  поточного інтервалу 100 (фіг. 2) штриховими лініями з'єднані між собою стаціонарні вектори, безпосереднє чергування яких забезпечується комутаціями ключів, під'єднаних до вхідних фаз з точно визначеною полярністю напруг між ними на поточному інтервалі мережі живлення. Тобто, дозволені взаємні переходи між ненульовими векторами 4.1 - 4.2 та 5.1 - 5.2, а також взаємні переходи між нульовим і будь-яким іншим вектором.

По закінченні одного циклу ВШІМ можна реверсувати напрямок обходу векторів на наступному циклі, тобто чергувати їх у зворотному порядку порівняно з попереднім.

Можливі варіанти чергування векторів на циклі ВШІМ і при переході від одного циклу до іншого для розташування вектора  $U_{вих}$  в секторі I (фіг. 3, 4) виглядають так [6]:

а)  $\rightarrow 4.2 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.2 \rightarrow \downarrow$

$\uparrow \leftarrow 4.2 \leftarrow 4.1 \leftarrow 6 \leftarrow 5.1 \leftarrow 5.2 \leftarrow$

б)  $\rightarrow 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.2 \rightarrow \downarrow$

$\uparrow \leftarrow 4.1 \leftarrow 4.2 \leftarrow 6 \leftarrow 5.1 \leftarrow 5.2 \leftarrow$

в)  $\rightarrow 4.2 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.1 \rightarrow \downarrow$

$\uparrow \leftarrow 4.2 \leftarrow 4.1 \leftarrow 6 \leftarrow 5.2 \leftarrow 5.1 \leftarrow$

г)  $\rightarrow 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.1 \rightarrow \downarrow$

$\uparrow \leftarrow 4.1 \leftarrow 4.2 \leftarrow 6 \leftarrow 5.2 \leftarrow 5.1 \leftarrow$

Інші припустимі варіанти можуть бути одержані поєднанням комбінацій з приведених чотирьох основних, наприклад, б) і в):

$\dots \rightarrow 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.2 \rightarrow 6 \rightarrow 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 4.1 \rightarrow \dots$

Схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі живлення, які відповідають стаціонарним векторам на фіг. 2, 4 та станам ключів МП для їх реалізації, приведені на фіг. 5. Чергування стаціонарних векторів на циклах ВШІМ тут здійснюється згідно з вищезгаданим варіантом г) в прямому та зворотному напрямках. Варіанти, в яких першими і останніми на циклі ВШІМ розташовані ненульові вектори з непарними (4.1, 4.3, 4.5 і 5.1, 5.3, 5.5) або парними (4.2, 4.4, 4.6 і 5.2, 5.4, 5.6) номерами (фіг. 9) в залежності від поточного інтервалу періоду мережі (для інтервалів з кодами 100, 010, 001 або 101, 110, 011 на фіг. 4), відрізняються від інших меншим числом комутацій на циклі:

$\dots 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.1 \dots$  або  $\dots 4.2 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.2 \dots$  – для сектора I,

$\dots 4.3 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.3 \dots$  або  $\dots 4.2 \rightarrow 4.3 \rightarrow 6 \rightarrow 5.3 \rightarrow 5.2 \dots$  – для сектора II,

$\dots 4.3 \rightarrow 4.4 \rightarrow 6 \rightarrow 5.4 \rightarrow 5.3 \dots$  або  $\dots 4.4 \rightarrow 4.3 \rightarrow 6 \rightarrow 5.3 \rightarrow 5.4 \dots$  – для сектора III,

$\dots 4.5 \rightarrow 4.4 \rightarrow 6 \rightarrow 5.4 \rightarrow 5.5 \dots$  або  $\dots 4.4 \rightarrow 4.5 \rightarrow 6 \rightarrow 5.5 \rightarrow 5.4 \dots$  – для сектора IV,

$\dots 4.5 \rightarrow 4.6 \rightarrow 6 \rightarrow 5.6 \rightarrow 5.5 \dots$  або  $\dots 4.6 \rightarrow 4.5 \rightarrow 6 \rightarrow 5.5 \rightarrow 5.6 \dots$  – для сектора V,

$\dots 4.1 \rightarrow 4.6 \rightarrow 6 \rightarrow 5.6 \rightarrow 5.1 \dots$  або  $\dots 4.6 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 5.1 \rightarrow 5.6 \dots$  – для сектора VI,

При переміщенні вектора  $U_{вих}$  з одного сектора в інший, наприклад, з сектора I в сектор II (фіг. 3) алгоритм чергування стаціонарних векторів не змінюється:

$\dots | 4.1 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.1 \rightarrow | 5.3 \rightarrow 5.2 \rightarrow 6 \rightarrow 4.2 \rightarrow 4.3 \rightarrow | 4.3 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 5.2 \rightarrow 5.3 \rightarrow | \dots$

Для сполучення між собою циклів ВШІМ як всередині сектора, так і при переміщеннях вектора  $U_{вих}$  з сектора в сектор (фіг. 3, 4), необхідно формувати ненульові вектори в кінці попереднього та на початку наступного циклів з однієї і тієї ж лінійної напруги.

Таким чином, реалізація способу по [6] при формуванні ненульових стаціонарних векторів напруги з двох лінійних напруг мережі, максимальних за модулем (наприклад,  $u_{AB}$  і  $u_{AC}$  усередині поточного інтервалу 100, фіг. 2) в секторі I (фіг. 3) передбачає:

1) Формування ненульових векторів з однієї лінійної напруги, що відповідає, наприклад, напрузі  $u_{AB}$  і векторам 4.1 та 4.2 (комбінації ключів 1.1, 1.5, 1.8 і 1.1, 1.4, 1.8 на фіг. 1).

2) Потім формування нульового вектора одночасним вмиканням всіх ключів, підключених до тієї фази мережі, напруга якої максимальна за модулем і відрізняється за знаком від двох інших фазних напруг. Для розглянутого інтервалу періоду мережі живлення такою фазою є фаза A, а ключами, що вмикаються, - 1.1, 1.4, 1.7 (фіг. 1).

3) На завершальному етапі циклу ВШІМ - формування ненульових векторів з іншої лінійної напруги, наприклад,  $u_{AC}$ , що відповідає векторам 5.2 і 5.1 (комбінації ключів 1.1, 1.4, 1.9 і 1.1, 1.6, 1.9 на фіг. 1).

4) При переході до наступного циклу ВШІМ як всередині сектора, так і при переміщеннях вектора  $U_{вих}$  з сектора в сектор (фіг. 3, 4) - розташування першими в циклі ненульових векторів, що формуються з тієї ж лінійної напруги, з якої було сформовано останні вектори попереднього циклу, наприклад: 4.1, 4.2 після 4.2, 4.1; 5.1, 5.2 після 5.2, 5.1; 4.3, 4.2 після 4.2, 4.1; 5.3, 5.2 після 5.2, 5.1 тощо.

Формування ненульових стаціонарних векторів напруги виключно з двох максимальних лінійних напруг мережі ( $u_{AB}$  і  $u_{AC}$  усередині поточного інтервалу 100, фіг. 2), дозволяє підтримувати кут між просторовими векторами вхідного струму та вхідної фазної напруги близьким до нуля при максимально можливому співвідношенні вихідної та вхідної напруг МП. Такий алгоритм ВШІМ може розглядатися як найбільш характерний для застосування в трифазно-трифазних МП.

При формуванні ненульових стаціонарних векторів напруги з двох лінійних напруг мережі (наприклад,  $u_{AB}$  і  $u_{CB}$  на інтервалі 100, фіг. 2), одна з яких ( $u_{CB}$ ) зсунута відносно іншої ( $u_{AB}$ ) на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині цього інтервалу, є можливість регулювати кут між просторовими векторами

відних струму та напруги. При цьому чергується таке формування з формуванням ненульових стаціонарних векторів виключно з двох максимальних лінійних напруг. Формування по прототипу [6] детально приведено вище для забезпечення демонстрації механізму переходів від способу комутації [6] до запропонованого і навпаки.

Для синтезу вектора 7 у секторі I (фіг. 6) для моменту часу  $t_n$  (фіг. 2) використовуються нульовий вектор 6 і ненульові вектори 4.1, 8.1 (одержання складової 7.1), 4.2, 8.2 (одержання складової 7.2). В момент часу  $t_n$  на інтервалі 100 (фіг. 2), наприклад, стаціонарному вектору 4.1 відповідає комбінація ключів 1.1, 1.5, 1.8 (фіг. 1); стаціонарному вектору 8.2 - комбінація ключів 1.3, 1.6, 1.8 (фіг. 1) і т. д. При переході з одного стану (вектор 4.1) до іншого (вектор 8.2) всередині інтервалу 100 (фіг. 2), коли порівнюються між собою фазні напруги фаз В та С, виникає невизначеність у черговості здійснення покрокової комутації струму між ключами 1.5 і 1.6 (фіг. 1). Крім того, при переходах до нульового вектора з вищезгаданих станів, коли нульовий вектор формується одночасним вмиканням ключів, підключених до фаз В або С, тобто ключів 1.2, 1.5, 1.8 або 1.3, 1.6, 1.9 (фіг. 1), також виникає згадана невизначеність для пар ключів 1.2 і 1.3, 1.5 і 1.6, 1.8 і 1.9 (фіг. 1). Коректні комутації у середині інтервалу 100 (фіг. 2) можливі тільки між ключем 1.1 (1.4, 1.7) і будь-яким іншим у кожній фазі МП.

На фіг. 7 для розглянутого сектора 1 і співвідношення напруг мережі в момент часу  $t_n$  поточного інтервалу 100 (фіг. 2) штриховими лініями з'єднані між собою стаціонарні вектори, безпосереднє чергування яких забезпечується комутаціями ключів, під'єднаних до вхідних фаз з точно визначеної полярності напруг між ними на поточному інтервалі періоду мережі. Тобто, дозволені взаємні переходи між ненульовими векторами 4.1 - 8.1, 4.2 - 8.2 та 4.1 - 4.2, а також взаємні переходи між нульовим вектором 6 і будь-яким ненульовим вектором. Як видно з фіг. 7, ненульові вектори можна об'єднати в групи, що складаються з одного або декількох векторів, наприклад (можливість взаємних переходів позначена як  $\leftrightarrow$ ):

д) 8.1 та 8.2  $\leftrightarrow$  4.2  $\leftrightarrow$  4.1

е) 8.2 та 8.1  $\leftrightarrow$  4.1  $\leftrightarrow$  4.2

ж) 4.1  $\leftrightarrow$  8.1 та 8.2  $\leftrightarrow$  4.2

з) 8.1  $\leftrightarrow$  4.1  $\leftrightarrow$  4.2  $\leftrightarrow$  8.2

У перших трьох випадках д), е), ж) нульовий вектор необхідно розташовувати між групами ненульових векторів, в останньому випадку з) розташування нульового вектора в циклі ВШІМ довільне. При переході від одного циклу ВШІМ до іншого можна чергувати вектори в зворотному напрямку.

Наприклад, алгоритм чергування п'яти стаціонарних векторів в циклах ВШІМ, що слідує один за одним, по варіанту з) може виглядати таким чином:

$\rightarrow 8.1 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 4.2 \rightarrow 8.2 \rightarrow$

$\uparrow \leftarrow 8.1 \leftarrow 4.1 \leftarrow 6 \leftarrow 4.2 \leftarrow 8.2 \leftarrow$

Цей варіант забезпечує меншу кількість комутацій ключів на циклі в порівнянні з іншими приведеними варіантами.

При переходах вектора  $U_{\text{вих}}$  з одного сектора в інший наведений вище алгоритм по варіанту з) з довільним розташуванням нульового вектора залишається без змін тільки у випадку, коли формування  $U_{\text{вих}}$  на новому циклі починається з використання того ж стаціонарного вектора, яким було закінчено попередній цикл ВШІМ, наприклад, при переході з сектора I в сектор VI (фіг. 6, 7, 8):

$\dots | 8.2 \rightarrow 4.2 \rightarrow 6 \rightarrow 4.1 \rightarrow 8.1 \rightarrow | 8.1 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 4.6 \rightarrow 8.6 \rightarrow | 8.6 \rightarrow 4.6 \rightarrow 6 \rightarrow 4.1 \rightarrow 8.1 \rightarrow | \dots$

Якщо ж при цьому переході попередній цикл ВШІМ закінчується ненульовим вектором 8.2, розташування нульового вектора на першому після переходу циклі не може бути довільним, так як повинно виконувати функцію розмежування ненульових векторів, чергування яких неприпустиме. На наступних циклах ВШІМ всередині сектора VI розташування векторів відповідає варіанту з). Для наведеного прикладу останній цикл ВШІМ в секторі I і перший та другий в секторі VI виглядатимуть так:

$\dots | 8.1 \rightarrow 4.1 \rightarrow 6 \rightarrow 4.2 \rightarrow 8.2 \rightarrow | 6 \rightarrow 8.1 \rightarrow 4.1 \rightarrow 4.6 \rightarrow 8.6 \rightarrow | 8.6 \rightarrow 4.6 \rightarrow 6 \rightarrow 4.1 \rightarrow 8.1 \rightarrow | \dots$

Схеми під'єднання вихідних фаз МП до фаз мережі живлення, які відповідають стаціонарним векторам на фіг. 7, 8 та станам ключів МП для їх реалізації, приведеш на фіг. 9. Вони ілюструють процес переміщення вектора  $U_{\text{вих}}$  з сектора I в сектор VI і пояснюють відмінності в розташуванні нульового вектора на першому після зміни сектора циклі ВШІМ і на інших циклах. Тут нульовий вектор 6 на початку першого після зміни сектора циклу ВШІМ виконує функцію розмежування між ненульовими векторами 8.2 і 8.1. В подальших циклах ВШІМ нульовий вектор розташовується посередині циклу з метою зменшення числа комутацій ключів.

Таким чином, для реалізації запропонованого способу при формуванні ненульових стаціонарних векторів напруги з двох лінійних напруг мережі (наприклад,  $U_{AB}$  і  $U_{CB}$  на інтервалі 100, фіг. 2), одна з яких ( $U_{CB}$ ) зсунута відносно іншої ( $U_{AB}$ ) на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині цього інтервалу, потрібно:

1) Нульові вектори формувати одночасним вмиканням всіх ключів, під'єднаних до фази мережі, напруга якої максимальна за модулем і відрізняється за знаком від двох інших фазних напруг для поточного інтервалу періоду мережі живлення. Для розглянутого інтервалу 100 (фіг. 2) такою фазою є фаза А, а ключами, що вмикаються - 1.1, 1.4, 1.7 (фіг. 1).

2) Ненульові вектори групувати за ознакою чергування тільки однонаправлених (4.1 і 8.1, 4.2 і 8.2), або сформованих з максимальної за модулем лінійної напруги векторів (4.1 і 4.2) - для інтервалу 100 (фіг. 2) в секторі I (фіг. 6, 7).

3) Нульовий вектор розташовувати по часу формування між групами, в яких останній вектор попередньої і перший вектор наступної групи є різнонаправленими і принаймні один з них сформований з мінімальної за модулем лінійної напруги на інтервалі періоду мережі. Для інтервалу 100 (фіг. 2) в секторах I і VI (фіг. 6-8) парами векторів, які обов'язково розмежуються за допомогою нульових векторів, є 4.1 і 8.2, 4.1 і 8.6, 4.2 і 8.1, 4.2 і 8.6, 4.6 і 8.1, 4.6 і 8.2, 8.1 і 8.2, 8.1 і 8.6, 8.2 і 8.6. При відсутності таких сполучень нульовий вектор для

поточного циклу ВШІМ розташовувати довільно.

При переходах від формування стаціонарних векторів напруги з двох максимальних за модулем лінійних напруг мережі до формування векторів з двох лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення, нульовий вектор на першому після переходу циклі ВШІМ розташовують на початку циклу, а на подальших циклах - згідно з прийнятим алгоритмом - так, як це робиться при зміні сектора розташування  $U_{\text{вих.}}$ .

При зворотних переходах розташовують нульовий вектор на останньому перед переходом циклі ВШІМ в кінці циклу.

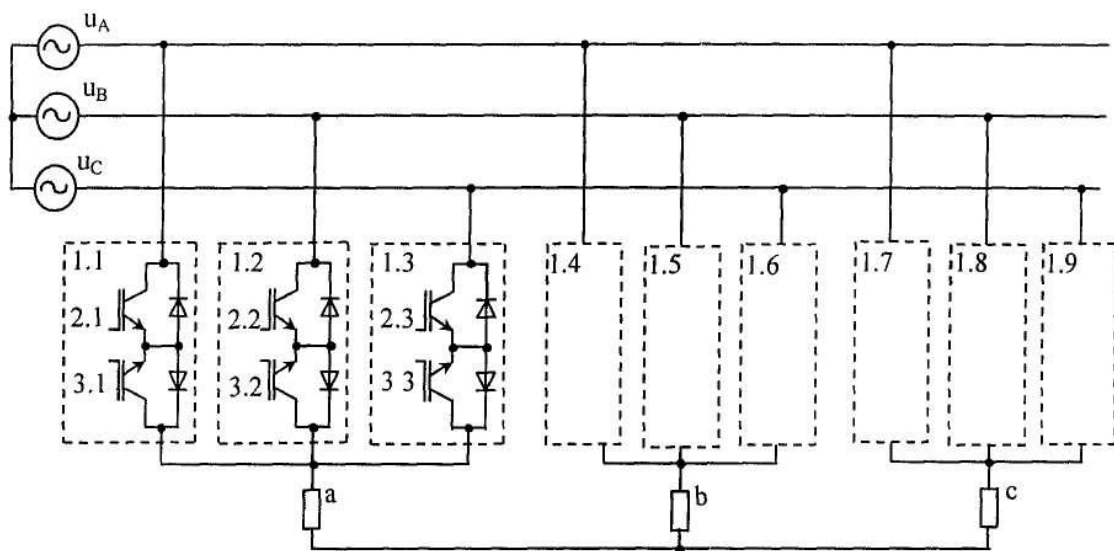
На межах інтервалів періоду мережі живлення (фіг. 2) співвідношення напруг між фазами мережі точно визначена. Така визначеність існує також на певному відрізку часу до і після межі інтервалів, тривалість якого залежить від міри спотворення кривих напруг мережі. Протягом цього відрізка часу зміна порядку покрокової комутації ключів для кожного інтервалу може здійснюватися в будь-який момент. За рахунок цього запропонований для МП з ВШІМ спосіб комутації струму нечутливий до точності визначення меж інтервалів періоду мережі живлення.

Реалізацію запропонованого способу показано на прикладі схеми на фіг. 10. Блок регулятора 10 контролера 9 формує координати необхідного просторового вектора вихідної напруги МП, які надходять на вхід 11 модулятора 12. На другий вхід 13 модулятора 12 надходять сигнали давача 14 напруг мережі живлення 15. Модулятор 12 на основі вхідних сигналів ідентифікує поточний часовий інтервал напруги мережі, поточний сектор розташування заданого просторового вектора вихідної напруги, розраховує необхідні для реалізації закону ШІМ тривалості кожного стану МП і з початком чергового циклу ШІМ виробляє в реальному масштабі часу імпульси відповідних тривалостей. Ці широтно-модульовані імпульси з виходу 16, а також коди поточного часового інтервалу напруги мережі з виходу 17 і поточного сектора просторового вектора вихідної напруги МП з виходу 18 подаються на входи програмованої логічної матриці 19. У матриці 19 формуються і розподіляються по вісімнадцяти каналах імпульси керування половинами ключів 2.1-2.9 і 3.1-3.9 (фіг. 1). У так званих статичних станах МП, тобто між комутаціями, увімкнені обидві половини проводячих ключів, у динамічних станах, тобто при переходах з одного статичного стану до іншого, у матриці 19 реалізується покрокова стратегія комутації транзисторів. Черговість статичних станів і переходи від одного стану до іншого відповідають запропонованому способу. Вихідні сигнали матриці 19 з виходу 20 надходять у схему 21 драйверів, де здійснюється гальванічна розв'язка, забезпечуються захисні заходи, підсилюються і узгоджуються за параметрами з транзисторами імпульси керування ними. З виходу 22 схеми 21 драйверів імпульси керування подаються безпосередньо на транзистори силового блоку 23 МП, навантаженого, наприклад, на асинхронний двигун 24.

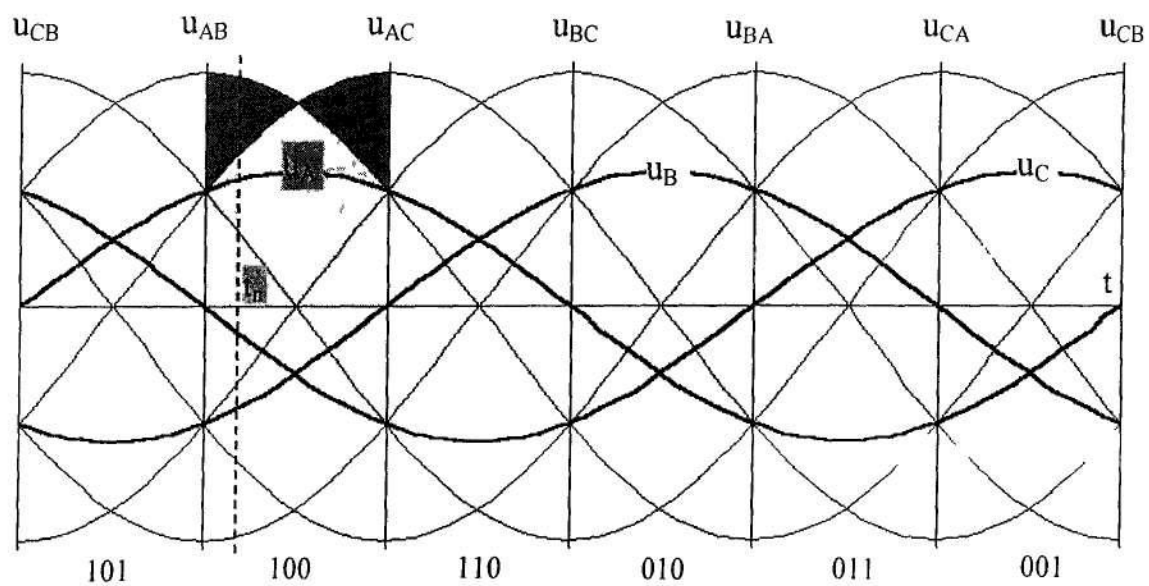
Таким чином, запропонований спосіб комутації струму розширює функціональні можливості матричного перетворювача при використанні для визначення порядку покрокових перемикачів половин ключів інформації про співвідношення вхідних напруг шляхом створення умов для формування ненульових стаціонарних векторів з двох вхідних лінійних напруг, одна з яких зсунута відносно іншої на 60 електричних градусів і мінімальна за модулем всередині поточного інтервалу періоду напруги мережі живлення. Це дозволяє здійснювати регулювання в широкому діапазоні кута зсуву між просторовими векторами напруги та струму мережі живлення при забезпеченні вилучення комутації між ключами, підключеними до фаз мережі живлення, для яких на даний момент часу неможливо однозначно визначити співвідношення напруг між ними.

Джерела інформації:

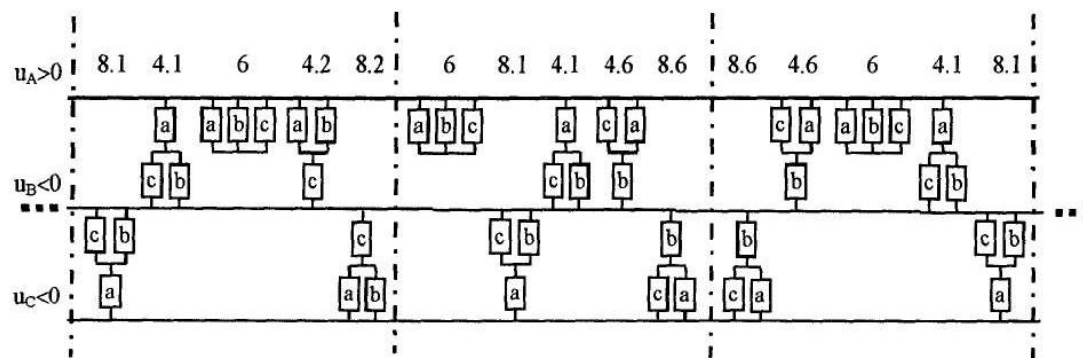
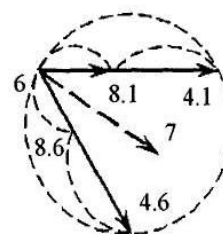
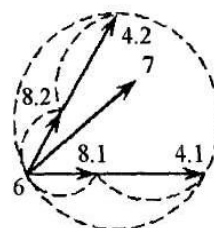
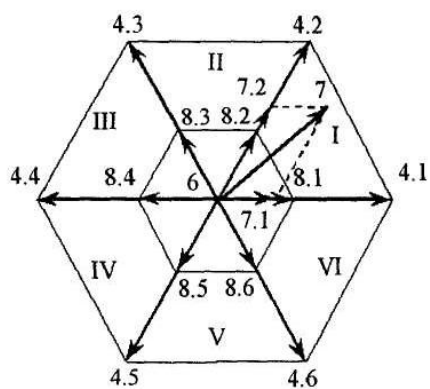
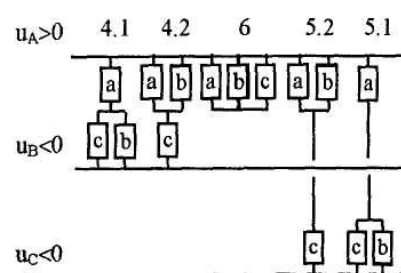
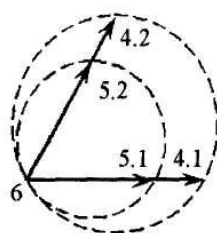
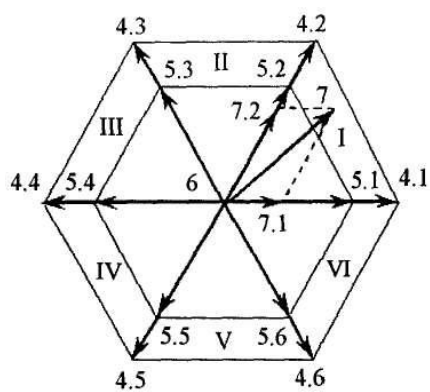
1. P. Wheeler, D. Grant, "Optimized input filter design and low-loss switching techniques for a practical matrix converter", in IEE Proc.-Electr. Power Applicat., vol.144, no.1, pp 53-60, Jan. 1997.
2. L. Empringham., P. W. Wheeler, J. C. Clare, "Matrix converter bi-directional switch commutation using intelligent gate drives", IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, No.456, London, September, 1998.
3. L. Mazet, H. Boulant, J-J Huselstein, C. Glaize, "Switching control in three phase matrix converters by discrimination of command orders", in Proc. PEMC'98, vol 2, Prague, Czech Republic, 1998, pp. 2-64 - 2-67
4. M. Ziegler, W. Hofmann, "Semi natural two steps commutation strategy for matrix converter", in Proc. 29<sup>th</sup> Annual IEEE meeting, PESC'98, 1998, vol.1, pp. 727-731.
5. J.H. Youw, B.H. Kwon, "Switching technique for current controlled AC-to-AC converters", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, no. 2, pp. 309 - 318, April 1999.
6. Чехет Е.М., Соболев В.М., Михальський В.М. „Спосіб комутації струму в ключах двосторонньої провідності матричних перетворювачів”. Заявка на винахід. Український інститут промислової власності. Реєстраційний № 2001031933, 22.03.2001. (UA 58613, 15.08.2003).
7. L. Zhang, C. Watthanasarn, W. Shepherd, "Analysis and implementation of a space vector modulation algorithm for direct ac-ac matrix converter", EPE Journal, vol.6, no.1, pp. 7-15, May 1996.



Фиг. 1



Фиг. 2



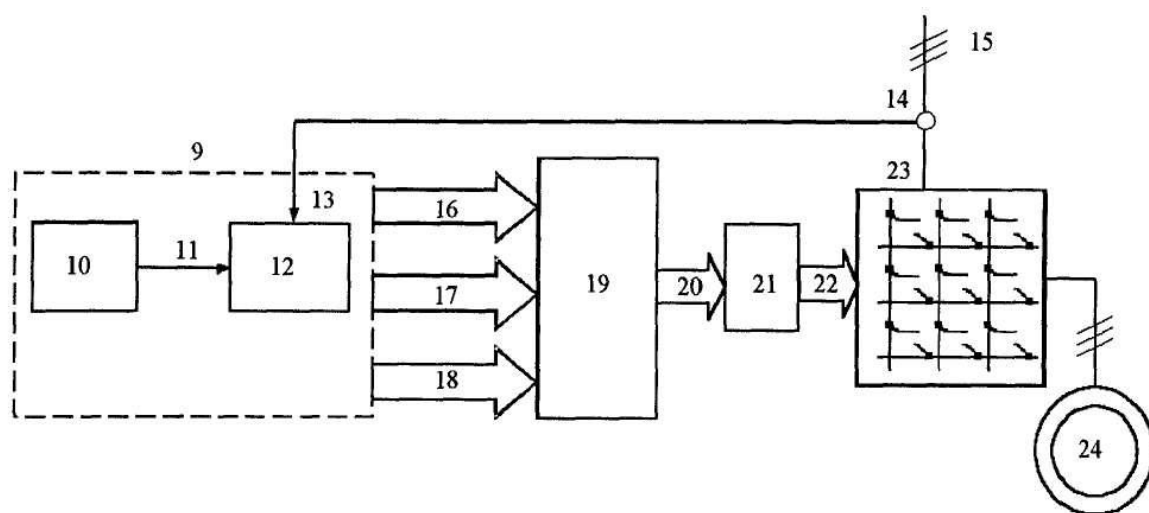


Fig. 10