



УКРАЇНА

(19) UA (11) 54953 (13) U  
(51) МПК (2009)  
H02P 27/04

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

### (54) КАСКАДНИЙ БАГАТОРІВНЕВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ

1

(21) u201007726

(22) 21.06.2010

(24) 25.11.2010

(46) 25.11.2010, Бюл. № 22, 2010 р.

(72) ШАВЬОЛКІН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

(57) Каскадний багаторівневий перетворювач частоти, що містить в кожній вихідній фазі три послідовно з'єднаних інвертори, кожний інвертор складається з чотирьох ключів, два джерела, напруга яких відповідно  $U_2=3U$  і  $U_3=6U$ , підключені у діагональ постійного струму другого і третього інверторів, вільні виводи діагоналі змінного струму першого і останнього інверторів утворюють відповідно початок і кінець фази перетворювача частоти, початки фаз якого з'єднані між собою, кінці призначені для підключення навантаження, систему керування електроприводом, на кожну фазу функціональний перетворювач, суматор, блок дискретизації за рівнем, перші виходи системи керування електроприводом, на яких формуються синусоїдальні сигнали заданої амплітуди і частоти, зсув між якими для трифазного перетворювача частоти складає  $2\pi/3$ , з'єднані з другим входом суматора, на другому і третьому виходах системи керування електроприводом формуються відповідно сигнал заданої амплітуди і синусоїда потроє-

2

ної до заданої частоти, вони з'єднані з відповідними входами функціонального перетворювача, перший вихід функціонального перетворювача з'єднано з першим входом суматора, вихід суматора з'єднано з входом блока дискретизації за рівнем, який **відрізняється** тим, що в нього додатково введені на кожну фазу блок формування імпульсів керування, регулятор напруги, конденсатор у діагоналі першого інвертора, суматор має додатковий вхід, система керування електроприводом має додатковий вихід, на якому формується синусоїда з частотою, що в дев'ять разів вище заданої частоти, а також додаткові вихід і вхід керування, функціональний перетворювач має додатковий вхід, що з'єднаний з додатковим виходом системи керування електроприводом, другий вихід функціонального перетворювача з'єднано з додатковим входом суматора, виходи блока дискретизації за рівнем з'єднані з входами задання блока формування імпульсів керування, виходи якого з'єднані з керуючими виводами ключів фази перетворювача, вхід і вихід керування блока формування імпульсів керування з'єднано, відповідно, з виходом і входом керування системи керування електроприводом, входи керування функціонального перетворювача підключено до виходів регулятора напруги відповідної фази, вхід якого підключено до конденсатора першого інвертора.

Корисна модель відноситься до області електротехніки і може бути використана в автоматизованому електроприводі для частотного керування електродвигунами змінного струму, а також для інших споживачів електроенергії змінного струму регульованої частоти.

Відомий гібридний несиметричний багаторівневий перетворювач частоти (далі - перетворювач) [UA, № 37698, МПК (2006) H02P7/00, опубл. 10.12.2008 р., Бюл. № 23], що містить трирівневий трифазний інвертор напруги з нульовим виводом і фіксуючими діодами, кожна фаза якого має чотири послідовно згідно з'єднаних ключа двобічної провідності, що складаються з повністю керованого тиристора або транзистора з паралельним зворотним діодом, два зарядних резистори,

контактор з п'ятьма контактами, розподільювач напруги на двох послідовно з'єднаних конденсаторах, спільна точка конденсаторів являє собою нульовий вивід джерела, два джерела з напругою  $U_3=6U$  з'єднані послідовно згідно, позитивний вивід першого з них і негативний другого підключено до конденсаторів через зарядні резистори, паралельно яким включені перший і другий контакти контактору, анод діоду першого і катод діоду останнього ключа фаз трирівневого трифазного інвертора з'єднані відповідно з негативним і позитивним виводом конденсаторів розподільювача напруги, анод діоду другого ключа фази трирівневого трифазного інвертора є вихідним виводом фази, а його катод з'єднано з катодом першого фіксуючого діоду, катод діоду четвертого ключа з'єднано з анодом

UA (11) 54953 (13) U

другого фіксуючого діоду, катод якого з'єднано з анодом першого фіксуючого діоду і нульовим виводом джерела, на кожну вихідну фазу два послідовно з'єднаних однофазних мостових інвертори, які складаються з чотирьох ключів, джерело постійного струму з напругою  $U_2=3U$ , негативний вивід якого підключено до негативного виводу діагоналі постійного струму другого з однофазних інверторів, а позитивний вивід джерела підключено до позитивного виводу діагоналі постійного струму другого з однофазних інверторів через контакт контактору, у діагональ постійного струму першого з однофазних інверторів підключено конденсатор, вільний вивід діагоналі змінного струму першого однофазного інвертора утворює кінець фази перетворювача частоти, що призначений для підключення навантаження, систему керування електроприводом, функціональний перетворювач, компаратор, перемикач сигналів керування, блок керування, розподільувач імпульсів, блок дискретизації за рівнем, суматор, фільтр, релейний регулятор, блок керування попереднім зарядженням, вихід компаратора з'єднано з входом керування перемикача сигналів керування, виходи якого з'єднані з входами керування ключів відповідних інверторів, перші виходи системи керування електроприводом на яких формуються синусоїдальні сигнали заданої амплітуди і частоти, зсув між якими для трифазного перетворювача частоти складає  $2\pi/3$  з'єднані з другим входом суматора, на другому і третьому виходах системи керування електроприводом формуються відповідно сигнал заданої амплітуди і синусоїда потроєної до заданої частоти, вони з'єднані з відповідними входами функціонального перетворювача, другий вихід також з'єднано з входом компаратора, перший вихід функціонального перетворювача з'єднано з першим входом суматора, вихід суматора з'єднано з першим входом завдання фазних напруг блока керування і блока дискретизації за рівнем, вихід якого з'єднано з входом розподільувача імпульсів, виходи якого з'єднані з першими входами перемикача сигналів керування, з другими входами якого з'єднані виходи блока керування, другий вхід блока керування з'єднано з другим виходом функціонального перетворювача у кожній фазі, треті входи перемикача сигналів керування з'єднані з відповідними виходами блока керування попереднім зарядженням, четвертий вихід системи керування електроприводом з'єднано з входом блока керування попереднім зарядженням, входи керування функціонального перетворювача підключено до відповідних виходів релейного регулятора, перший вхід якого через фільтр підключено до конденсатору першого однофазного інвертора однієї з фаз перетворювача, на другий подається сигнал припустимого відхилення напруги конденсатору від значення  $U$ .

Цей перетворювач має наступні недоліки.

1. Схема трифазного трирівневого інвертора у порівнянні з трьома однофазними інверторами при однаковій функції має шість додаткових фіксуючих діодів, що обумовлює додаткові витрати енергії у них.

2. Використання на вході трирівневого інвертору ємнісного розподільувача напруги передбачає

заходи для балансування напруги на конденсаторах розподільувача.

3. Використання однофазних інверторів напруга джерел яких  $3U$  обумовлює виникнення субгармонійних складових змінного струму, що споживається їх випрямлячами.

Найбільш близьким аналогом до корисної моделі є несиметричний багаторівневий перетворювач частоти (далі - перетворювач) [UA, № 30100, МПК (2006) H02P7/00, опубл. 11.02.2008 р. Бюл. № 3], який містить в кожній вихідній фазі три послідовно з'єднаних однофазних мостових інвертори, кожний інвертор складається з чотирьох ключів, трьох джерел постійного струму, що підключені у діагональ постійного струму інверторів, напруга джерела першого інвертора  $U_1=U$  мінімальна, напруга другого і третього джерел становлять відповідно  $U_2=3U$  і  $U_3=6U$ , вільні виходи діагоналі змінного струму першого і останнього інверторів утворюють відповідно початок і кінець фази перетворювача частоти, початки фаз якого з'єднані між собою, кінці призначені для підключення навантаження, систему керування електроприводом, функціональний перетворювач, компаратор, на кожну фазу перемикач сигналів керування, блок керування, розподільувач імпульсів, блок дискретизації за рівнем, суматор, вихід компаратора з'єднано з входом керування перемикача сигналів керування, виходи якого з'єднані з входами керування ключів відповідних інверторів, перші виходи системи керування електроприводом на яких формуються синусоїдальні сигнали заданої амплітуди і частоти, зсув між якими для трифазного перетворювача частоти складає  $2\pi/3$  з'єднані з другим входом суматора, на другому і третьому виходах системи керування електроприводом формуються відповідно сигнал заданої амплітуди і синусоїда потроєної до заданої частоти, вони з'єднані з відповідними входами функціонального перетворювача, другий вихід також з'єднано з входом компаратора, перший вихід функціонального перетворювача з'єднано з першим входом суматора, вихід суматора з'єднано з першим входом завдання фазних напруг блока керування і блока дискретизації за рівнем, вихід якого з'єднано з входом розподільувача імпульсів, виходи якого з'єднані з першими входами перемикача сигналів керування, з другими входами якого з'єднані виходи блока керування, другий вхід блока керування з'єднано з другим виходом функціонального перетворювача.

Перетворювач працює таким чином.

Система керування забезпечує комбінований алгоритм формування вихідної напруги з використанням багаторівневої ШІМ при малих амплітудах вихідної напруги, при значній кількості рівнів здійснюється перехід до амплітудного регулювання з квантуванням за рівнем. Сигнал заданої амплітуди  $A$  з виходу системи керування електроприводом надходить до входу компаратора, що визначає алгоритм формування вихідної напруги. Його вихідний сигнал надходить до входу керування перемикачем сигналів керування, що здійснює перемикач імпульсів з виходу розподільувача імпульсів (при відносній амплітуді  $A \geq 3$ ) або блока керування (при  $A < 3$ ) на відповідні входи керування ключів інверторів. Зміну напрямку передавання енергії

другого джерела виключає вибір співвідношення напруг 1:3:6. Виключення зміни напрямку передавання енергії першим джерелом досягається при амплітуді заданої напруги  $1,8 > A > 2,4$  попередньою модуляцією сигналу завдання третьою гармонікою, амплітуда якої задається згідно визначеній залежності від  $A$ , при амплітуді  $1,8 < A < 2,4$  здійснюється корегування алгоритму ШІМ у бік зменшення тривалості вмикання другого інвертора, згідно визначеній залежності  $k=f(A)$ .

Цей перетворювач має наступні недоліки.

1. Використання при квантуванні за рівнем попередньої модуляції сигналу завдання лише третьої гармоніки обмежує можливості покращення гармонійного складу вихідної напруги.

2. Велика кількість джерел, що при живленні від мережі змінного струму містять трифазний мостовий випрямляч з емнісним фільтром і комплект вторинних обмоток трансформатору. Це обумовлює додаткові витрати енергії і ускладнює конструкцію вхідного трансформатору.

3. Використання однофазних інверторів обумовлює виникнення субгармонійних складових змінного струму, що споживається випрямлячем на вході інвертору.

4. Різна напруга джерел і змінювання їх завантаження у процесі регулювання вихідної напруги не дозволяє забезпечити при використанні складених багатонапругових схем випрямлення для інверторів фази перетворювача ефективно придушення вищих гармонік і субгармонійних складових струму, що споживається перетворювачем від мережі змінного струму.

У корисній моделі поставлена задача підвищення енергетичних показників перетворювача і електроприводу в цілому. Це досягається:

1. Використанням для модуляції додаткового параметру - дев'ятої гармоніки, що дозволяє покращити гармонійний склад вихідної напруги при амплітудному регулюванні і розширити можливості цілеспрямованого перерозподілу завантаження інверторів.

2. Виключенням джерел для інверторів з мінімальною напругою, на вході яких залишається попередньо заряджений конденсатор.

3. Використанням визначених залежностей для амплітуд модулюючих третьої та дев'ятої гармонік, що забезпечує режим роботи інверторів з мінімальною напругою без передавання активної потужності і підтримання співвідношення завантаження другого і третього інверторів 1:2 згідно напругам їх джерел.

4. Використанням в кожній фазі для третього інвертору двох послідовно з'єднаних випрямлячів з напругою  $3U$  при цьому живлення випрямлячів другого і третього інверторів здійснюється від трьох комплектів вторинних обмоток, таким чином, що вони утворюють вісімнадцятифазну схему випрямлення. Це забезпечує придушення вищих і субгармонійних складових вхідного струму трансформатору перетворювача.

Поставлена задача вирішується тим, що каскадний багаторівневий перетворювач містить в кожній вихідній фазі три послідовно з'єднаних інвертори, кожний інвертор складається з чотирьох ключів, два джерела, напруга яких відповідно

$U_2=3U$  і  $U_3=6U$  підключені у діагональ постійного струму другого і третього інверторів, вільні виводи діагоналі змінного струму першого і останнього інверторів утворюють відповідно початок і кінець фази перетворювача частоти, початки фаз якого з'єднані між собою, кінці призначені для підключення навантаження, систему керування електроприводом, на кожен фазу функціональний перетворювач, суматор, блок дискретизації за рівнем, перші виходи системи керування електроприводом на яких формуються синусоїдальні сигнали заданої амплітуди і частоти, зсув між якими для трифазного перетворювача частоти складає  $2\pi/3$  з'єднані з другим входом суматора, на другому і третьому виходах системи керування електроприводом формуються відповідно сигнал заданої амплітуди і синусоїда потроєної до заданої частоти, вони з'єднані з відповідними входами функціонального перетворювача, перший вихід функціонального перетворювача з'єднано з першим входом суматора, вихід суматора з'єднано з входом блока дискретизації за рівнем, відповідно до корисної моделі перетворювач додатково вміщує на кожен фазу блок формування імпульсів керування, регулятор напруги, конденсатор у діагоналі першого інвертору, суматор має додатковий вхід, система керування електроприводом має додатковий вихід, на якому формується синусоїда з частотою, що в дев'ять разів вище заданої частоти, а також додатковий вихід і вхід керування, функціональний перетворювач має додатковий вхід, що з'єднано з додатковим виходом системи керування електроприводом, другий вихід функціонального перетворювача з'єднано з додатковим входом суматора, виходи блоку дискретизації за рівнем з'єднані з входами завдання блока формування імпульсів керування, виходи якого з'єднані з керуючими виводами ключів фази перетворювача, вхід і вихід керування блока формування імпульсів керування з'єднані, відповідно, з виходом і входом керування системи керування електроприводом, входи керування функціонального перетворювача підключено до виходів регулятора напруги відповідної фази, вхід якого підключено до конденсатору першого інвертору.

Введення у схему регуляторів напруги для кожної фази перетворювача забезпечує підтримання напруги на конденсаторі першого інвертору на рівні  $U$  у всіх фазах у замкненій системі регулювання.

Введення блоку формування імпульсів керування, додаткового регулюючого параметру - амплітуда дев'ятої гармоніки, корегування функцій системи керування електроприводом і функціонального перетворювача з використанням визначених залежностей для регулюючих параметрів забезпечує завдання режиму роботи першого інвертору без передавання енергії і попереднє зарядження його конденсатору, підтримання співвідношення завантаження другого і третього інверторів як 1:2, змінювання алгоритму роботи інверторів, що дозволяє зменшити витрати енергії у ключах перетворювача та двигуні за рахунок покращення гармонійного складу вихідної напруги.

Підтримання співвідношення завантаження другого і третього інверторів як 1:2 утворює умови

для покращення гармонійного складу вхідного струму перетворювача при живленні от мережі змінного струму і використанні вісімнадцятифазної схеми випрямлення для інверторів фази.

Запропоновані ознаки дозволяють покращити енергетичні показники електроприводу.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями:

На фіг. показана функціональна схема фази каскадного багаторівневого перетворювача частоти;

На фіг. представлені: система керування електроприводом 1, функціональний перетворювач 2, суматор 3, блок дискретизації за рівнем 4, регулятор напруги 5, блок формування імпульсів керування 6, інвертори 7, 8, 9, конденсатор 10, напруга якого  $U$ , джерела 11, 12, напруги яких становлять  $U_2=3U$ ,  $U_3=6U$ .

Каскадний багаторівневий перетворювач частоти працює таким чином.

Попереднє заряджання конденсаторів однофазних інверторів 7 здійснюється від джерела постійного струму третього інвертора 9 через коло навантаження - двигун, який використовується у режимі динамічного гальмування і в його обмотках протікає постійний струм. При цьому інвертор 9 працює у режимі знижуючого імпульсного перетворювача постійної напруги з ШІМ. Заряджання починається при наявності на керуючому виході системи керування електроприводом сигналу "Пуск"  $P=1$  і здійснюється за відомими принципами [Шавєлкін А.А. Несимметричный гибридный многоуровневый преобразователь частоты на базе пятиуровневого инвертора напряжения / Міжвідомчий науково-технічний збірник "Електромашинобудування та електрообладнання". - Київ: «Техніка», 2009. - Вип. 73. - с. 68-75.]. По завершенні процесу заряджання на виході керування блока

формування імпульсів керування 6 формується сигнал дозволу  $R=1$ , і здійснюється перехід перетворювача у робочий режим.

Синусоїдальна напруга  $A \sin \omega t$  заданої амплітуди  $A$  і частоти  $\omega$  з виходу системи керування електроприводом 1 надходить до одного з входів суматора 3. Функціональний перетворювач 2, на входи якого з відповідних виходів системи керування електроприводом 1 надходять сигнали  $A$ ,  $\sin(3\omega t)$  і  $\sin(9\omega t)$ , формує на першому виході напругу  $A_3 \sin(3\omega t)$ , а на другому  $A_9 \sin(9\omega t)$ . Значення  $A_3$  і  $A_9$  визначаються певними залежностями від  $A$  за умови, що перша гармоніка вихідної напруги однофазного інвертора дорівнює нулю і передавання активної потужності інвертором відсутнє. При цьому із можливих рішень  $A_3$  і  $A_9$  для кожного  $A$  обрані значення, що забезпечують підтримання співвідношення завантаження другого і третього інверторів максимально наближеним до 1:2. Напруги  $A_3 \sin(3\omega t)$  і  $A_9 \sin(9\omega t)$  з виходу функціонального перетворювача 2 надходять до входів суматора 3. Вихідна напруга суматора  $u_{3AD} = A \sin \omega t + A_3 \sin(3\omega t) + A_9 \sin(9\omega t)$  надходить до входу блоку формування імпульсів керування 4, який реалізує алгоритм квантування за середнім рівнем. Для одної фази його можна звести до наступного. Згідно  $u_{3AD}$  за допомогою компаратора (порівняння з 0) отримуємо функцію  $\text{sign}(u_{3AD})$ .

Напруга  $u_{3AD}$  перетворюється до одної полярності  $u'_{3AD} = u_{3AD} \text{sign}(u_{3AD})$ . За допомогою набору компараторів  $u'_{3AD}$  порівнюється з рівнями квантування  $U_{KVi}=0,5, 1,5, \dots 9,5$ . При  $u'_{3AD} > U_{KVi}$  напруга компаратора дорівнює 1, у протилежному випадку 0. Позначимо напруги компараторів відповідно рівням квантування ( $U_{0,5}, U_{1,5}$  і т.д.) тоді для напруг інверторів 7, 8, 9 отримуємо:

$$u_7 = (U_{0,5} \wedge \bar{U}_{1,5} - U_{1,5} \wedge \bar{U}_{2,5} + U_{3,5} \wedge \bar{U}_{4,5} - U_{4,5} \wedge \bar{U}_{5,5} + U_{6,5} \wedge \bar{U}_{7,5} - U_{7,5} \wedge \bar{U}_{8,5} + U_{3,5} \text{sign}(u_{3AD})) \cdot \text{sign}(u_{3AD})$$

$$u_8 = (U_{1,5} \wedge \bar{U}_{4,5} + U_{7,5} \text{sign}(u_{3AD})) \cdot \text{sign}(u_{3AD})$$

$u_9 = (U_{4,5}) \text{sign}(u_{3AD})$ , згідно напругам  $u_7$ ,  $u_8$ ,  $u_9$  формуються імпульси керування на відповідні ключі інверторів.

Підтримання напруги у колі постійного струму інверторів 7 у робочому режимі здійснює замкнена за напругою система керування з релейним регулятором напруги 5 у кожній фазі перетворювача, що побудована за відомими принципами [Шавєлкін А.А. Несимметричный гибридный многоуровневый преобразователь частоты на базе пятиуровневого инвертора напряжения / Міжвідомчий науково-технічний збірник "Електромашинобудування та електрообладнання". - Київ: «Техніка», 2009. - Вип. 73. - с. 68-75.]. Виходи регулятора напруги 5 кожної з фаз перетворювача з'єднано з входами керування функціонального перетворювача 2, що здійснює змінювання вихідних регулюючих параметрів (амплітуда третьої та дев'ятої гармонік  $A_3$ ,  $A_9$ ) згідно визначеним залежностям  $A_3=f(A)$ ,  $A_9=f(A)$ , що забезпечує відповідне мініма-

льне припущення першої гармоніки вихідної напруги  $\pm \Delta U_{1(1)}$  інвертору 7 відносно заданого значення  $U$ .

При живленні перетворювача від мережі змінного струму використовується багатообмотковий трансформатор с ізольованими комплектами вторинних обмоток. При цьому джерело 12 утворюється послідовним з'єднанням двох випрямлячів з напругою  $3U$ , що разом з випрямлячем джерела 11, напруга якого також  $3U$  складають вісімнадцятифазну схему випрямлення, коли зсув між напругами обмоток живлення випрямлячів становить  $20^\circ$ . При однаковому навантаженні випрямлячів це забезпечить ефективне придушення вищих гармонік і субгармонійних складових вхідного струму перетворювача.

Застосування запропонованої корисної моделі дозволяє зменшити витрати енергії у ключах перетворювача та двигуні, що сприяє покращенню енергетичних показників.

