

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ РОБОЧИХ СТАНІВ ВИКОНАВЧИХ СТРУКТУР БАГАТОРІВНЕВИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровський****, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Основною складовою частиною систем електроживлення постійного струму є різноманітні напівпровідникові переважно керовані випрямлячі з відповідними фільтруючими конденсаторами. Зокрема, це багаторівневі випрямлячі (БРВ) з цілеспрямованою дискретно-разовою зміною коефіцієнта передачі по напрузі шляхом відповідної зміни робочого стану його виконавчої структури. Синтезовані оптимальні варіанти цих структур відзначаються високою ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів. У цій роботі виявлено та проаналізовано особливості реалізації переходів між зазначеними робочими станами у двох типах БРВ – з широким (повним) та з обмеженим діапазоном регулювання вихідної напруги. Врахування цих особливостей дало змогу визначити доцільні алгоритми дискретно-разового керування напівпровідниковими ключовими елементами БРВ, які забезпечують прийнятний перебіг цих переходів, за якого практично виключається можливість виникнення відчутних небажаних сплесків або спадів напруги, що подається до споживача. Багатоваріантність реалізації алгоритмів переходів між рівнями вихідної напруги БРВ є ще одним з аспектів багатоваріантності трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів взагалі. Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: багаторівневий випрямляч, трансформаторно-ключова виконавча структура, tap changing transformer, smart transformer, алгоритм роботи, багатоваріантність.

Значна частина електротехнологічного устаткування потребує живлення постійним струмом з можливістю регулювання напруги, що подається до споживача, в певних межах [1, 2]. За існуючих умов переважного електропостачання на змінному струмі це вимагає створення та застосування окремого класу перетворювачів параметрів електроенергії – різноманітних випрямлячів, здебільшого на основі засобів силової електроніки з відповідними фільтруючими компонентами на виході [3, 4]. Серед пристроїв, що реалізують функцію випрямлення струму, можна виокремити перетворювачі з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами – ТКВС [5]), або Smart (tap changing) transformers [6, 7], які працюють на частоті мережі. Зокрема це багаторівневі випрямлячі – БРВ [8, 9], що відрізняються і багатоваріантністю побудови. Вони складаються з трансформатора T_r , вторинну обвитку якого секціоновано за деяким визначеним оптимальним законом, та, власне, блоку випрямлення – певної групи N паралельно з'єднаних стійок C , кожна з яких є парою послідовно з'єднаних напівпровідникових ключових елементів (тиристорів, діодів), спільні точки яких з'єднано з відповідними відводами вторинної обвитки T_r . У разі введення в дію будь-якої пари стійок БРВ працює у одному з Y можливих станів структури з коефіцієнтом передачі по напрузі, який, за незмінної вхідної напруги, визначається сумою напруг на секціях обвитки між цими стійками. (Зауважимо, що завдяки згаданому оптимальному вибору кількості витків секцій, забезпечується високе значення коефіцієнта ефективності використання ключових елементів $K_e = Y/N$). Перехід з цього стану в інший (тобто введення в дію іншої або частково іншої пари стійок) реалізується шляхом дискретно-разового керування (discrete-time control [10]) ключовими елементами стійок.

Попередні дослідження БРВ стосувалися, переважно, структурного синтезу (зокрема, доцільної декомпозиції на два функціонально тотожні блоки) та визначення оптимальних законів секціонування вторинної обвитки T_r , що відрізняються для варіантів БРВ з широким діапазоном (ШД) та обмеженим діапазоном (ОД) регулювання вихідної напруги. Тому **метою роботи** є визначення особливостей цілеспрямованої зміни робочих станів багаторівневих випрямлячів на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур під час регулювання величини вихідної напруги постійного струму.

Виконавча структура БРВ є незмінною за будь-яких вимог щодо ширини діапазону зміни вихідної напруги. Проте, як вже зазначалося, синтезовані у [8] та [9] оптимальні закони секціонування вторинної обвитки Tr суттєво відрізняються для БРВ з ШД та БРВ з ОД. В обох випадках вони дають змогу здійснювати вибір кількостей витків всіх секцій (враховуючи можливі варіанти оптимального секціонування) для функціонування виконавчої структури у множині робочих станів, яка визначається необхідною кількістю рівнів вихідної напруги за заданого діапазона її регулювання. Задля конкретності та наочності подальшого викладення матеріалу доцільно обмежитися розглядом узагальненої виконавчої структури БРВ з активним навантаженням та фільтруючим конденсатором, яка має 6 стійок з парами ключів, що забезпечує отримання 9 рівнів вихідної напруги (рис. 1, на якому не показано первинну обвитку Tr). Секція W_1 з найменшою кількістю витків розраховується на напругу кроку регулювання ΔU_k (величина між двома сусідніми рівнями), а кількості витків інших секцій нормуються саме по витках W_1 ($W_1^* = 1$; $W_2^* = W_2/W_1 \dots$). Так само співвідносяться й напруги секцій. Ємність конденсатора обирається за умови отримання заданого коефіцієнту

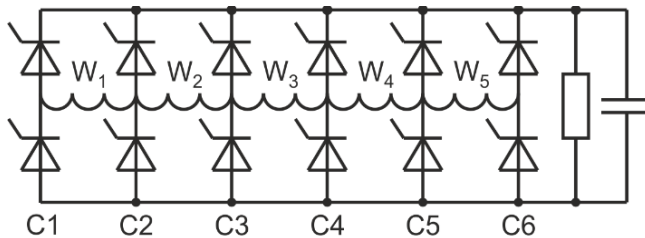


Рис. 1

пульсації вихідної напруги. Форма вхідного струму БРВ така сама як у однофазного двопівперіодного випрямляча з активно-ємнісним навантаженням.

Припустимо, що цей БРВ призначено для регулювання рівня вихідної напруги в діапазоні, верхня межа якого U_{2max} дорівнює, наприклад, $255 \text{ В} = 1,41 \times 180 \text{ В}$. Для цього випадку в таблиці наведено інформацію прикладів щодо секціонування вторинної обвитки Tr для двох рівноцінних (за ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів) типів виконавчої структури.

БРВ з		$\Delta U_2, \text{ В}$	$\Delta U_k, \text{ В}$	$W_1^* (U_1, \text{ В})$	$W_2^* (U_2, \text{ В})$	$W_3^* (U_3, \text{ В})$	$W_4^* (U_4, \text{ В})$	$W_5^* (U_5, \text{ В})$
ШД	1 вар.	255	28,2	1 (20)	3 (60)	0	3 (60)	2 (40)
	2 вар.	255	28,2	1 (20)	1 (20)	0	4 (80)	3 (60)
ОД		112	19,7	1 (14)	1 (14)	$W_3^* (68)$	3 (62)	3 (62)

Перший – БРВ з ШД (два варіанти реалізації), для якої $W_3=0$, а всі інші секції є регульовальними та обираються за законом [8]. Необхідні 9 рівнів напруги реалізуються під час вмикання комбінації наступних стійок: для варіанту 1 – C1, C2; C5, C6; C34, C5 (C2, C34); C1, C34; C34, C6; C2, C5; C1, C5; C2, C6; C1, C6 (C34 – модифікована стійка, що об'єднує стійки C3 та C4); для варіанту 2 – C1C2 (C2C34), C34C5, C5C6, C34C5, C2C4, C1C5, C34C5, C2C6, C1C6. Другий тип виконавчої структури – БРВ з ОД, коли середня секція W_3 розраховується на напругу нижньої межі діапазону регулювання ΔU_2 , а витки всіх інших секцій обираються за законом [9]. Тут дві тиристорні стійки (C3, C4), між якими знаходиться обвитка W_3 , можна замінити діодними стійками, які формують найнижчий рівень, а в разі необхідності вони виводяться з дії природним шляхом через введення у дію тиристорів. Інші рівні напруги реалізуються у разі вмикання наступних стійок: C2; C1; C5; C2, C5; C1, C5; C6; C2, C6; C1, C6. В таблиці наведено нормовані та абсолютні дійсні значення напруг секцій обвитки (в дужках) для прикладів, що розглядаються.

У БРВ, що працюють на будь-якому з 9 визначених рівнів вихідної напруги, потенційно можливими є 36 цілеспрямованих переходів між робочими станами. Реалізація цих переходів відзначається двома особливостями, які впливають на алгоритм роботи. Перша з них полягає у неоднаковій кількості ключових пар, що беруть участь у різних переходах. Так, у БРВ з ШД перехід між станами реалізується, як вже зазначалося, або заміною однієї пари стійок на іншу (11 випадків), або заміною лише однієї з стійок працюючої пари на іншу (25 випадків), що виконується зняттям сигналів керування з одних тиристорних пар та поданням відповідних сигналів на інші. У БРВ з ОД під час переходів між станами, крім заміни однієї чи двох стійок, є й інші види переходів, які обумовлені використанням діодів. Зокрема, це просто введення у дію однієї додаткової стійки, що не потребує зняття керування з якихось інших стійок. Наприклад, у разі переходу від першого (найменшого) рівня

напруги $U_{21}=95,9$ В (працюють діодні стійки С3, С4) до другого ($95,9$ В+ $19,8$ В= $115,6$ В) необхідно ввести у дію стійку С2, під час переходу до третього рівня (155 В) – С1, тощо. Є й більш складні переходи. Наприклад, для переходу з другого рівня ($115,6$ В) до шостого ($194,6$ В) треба замінити стійку С2 стійкою С1 та ввести у дію С5; у разі переходу з другого рівня на дев'ятий ($U_{29}=255$ В) – також замінити стійку С2 стійкою С1 але увімкнути стійку С6. Визначено, що неоднакова кількість тиристорних пар, що беруть участь за різних переходів, висуває певні вимоги до алгоритму керування ключами в сенсі подавання/зняття різної кількості керуючих сигналів.

Друга особливість реалізації зазначених переходів, яка є наслідком використання у БРВ некероаних (діоди) та неповністю кероаних напівпровідникових приладів (тиристори), полягає у ймовірності виникнення під час деяких переходів між рівнями незапланованого стану. Дійсно, за одночасного виведення з дії однієї стійки та введення в дію іншої, ключі першої деякий час продовжують проводити струм. Тобто, у структурі виникає тимчасовий, вищий за рівнем проміжний стан, "стрибок" напруги (наголосимо – безпечний, не аварійний). Наприклад, у БРВ з ШД у разі переходу з першого рівня (працюють стійки С1, С2) до третього рівня (знімається керування з ключів стійки С1 й одночасно подається керування для вмикання ключів стійки С3) виникає проміжний стан, що відповідає четвертому рівню вихідної напруги ($U_{24}=112,8$ В). Слід зазначити, що така ситуація відбувається в тому випадку, коли загальна комбінація увімкнених ключів початкової та наступної груп формують вищий ніж перехідні рівні напруги. Кількість переходів з можливими проміжними станами у БРВ з ШД дорівнює 15, а у БРВ з ОД – 9. (Зауважимо, що виникнення таких станів не залежить від кількості стійок, які замінюються при цьому – одна чи дві).

Визначене розмаїття можливих переходів свідчить про доцільність комп'ютерного моделювання режимів роботи БРВ, які можна вважати квазідинамічними.

Дослідження процесів переходів між рівнями у випрямлячі здійснювалося за допомогою пакету програм Matlab з використанням його графічного середовища Simulink. Було створено модель

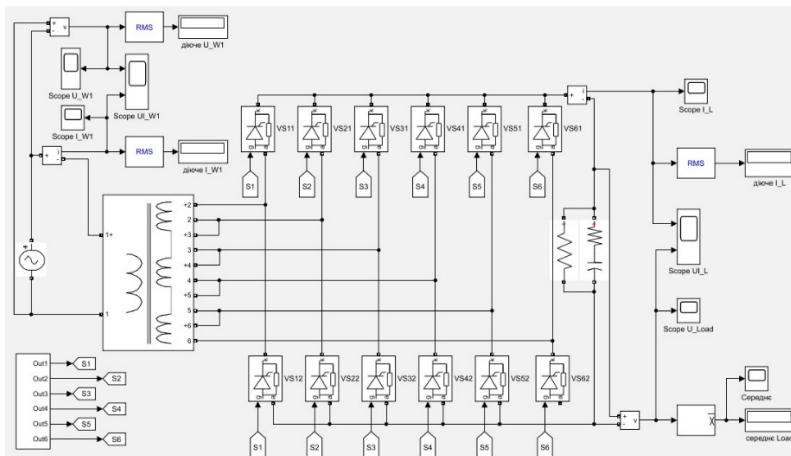


Рис. 2

системи, яка включає в себе: БРВ на основі багатообвиткового трансформатора (multi-winding transformer), силові ключі (тиристори, діоди), джерело змінної напруги, навантаження, засоби контролю (вимірювальні та візуальні), модуль керування тиристорами, допоміжні блоки. На рис. 2 зображено основні елементи моделі. Значення параметрів блоків обрано такими: опір активного навантаження 50 Ом, конденсатор ємністю 1700 мкФ, що забезпечує коефіцієнт пульсації вихідної напруги $\approx 5\%$. Було проведено моделювання переходів між можливими

рівнями напруги за різних алгоритмів керування ключами.

Більш детально розглянемо переходи між рівнями. Слід звернути увагу на те, що хоча в переході бере участь різна кількість стійок, але в будь-який момент часу увімкнено тільки дві. Під час моделювання має сенс розділити переходи на вищий рівень напруги ("вгору") і на нижчий ("вниз"), які з точки зору керування – асиметричні операції (ті ключі, що вмикалися, треба вимкнути). Але є суттєва різниця у перебігу процесів між аналогічними переходами "вгору" та "вниз", яка обумовлена, зокрема, властивостями роботи напівпровідникових ключів і наявністю фільтруючого конденсатора. Окремо треба наголосити на тому, що під час переходів у БРВ всі процеси суттєво залежать від синхронізації керування ключами з напругою змінного струму, при цьому наявність чи відсутність керування не завжди еквівалентна стану силового ключа – увімкнений він чи ні. Врахування цих чинників вимагає коригування алгоритму роботи напівпровідниковими ключами.

Беручи це до уваги, спочатку розглянемо переходи без проміжного стану, (для ШД (1 варіант) – 57%, для ШД (2 варіант) – 55%, для ОД – 75%). Застосуємо алгоритм, коли знімаємо керування з ключів початкової групи та синхронно подаємо керування на ключі наступної групи (зрозуміло, що якщо в групі є діоди, то керувати ними не треба). Розглянемо перехід "вгору". Після вмикання тиристорів

торів наступної групи, полярність напруги для відповідних "зайвих" ключів початкової групи (тих, що не задіяні в наступній групі) буде зворотною, тобто виникнуть умови для їхнього закриття, наслідком якого є їхнє вимикання природним шляхом. Напруга на виході БРВ синхронно з керуванням набуде нового миттєвого значення.

З точки зору алгоритму перемикання ключів такий перехід можна здійснити в будь-який момент часу. Але слід врахувати, що до складу системи входить фільтруючий конденсатор, а його дозаряд в статичному стані відбувається біля максимуму змінного струму. Якщо на цьому інтервалі виконати перехід, то миттєве значення зарядного струму суттєво збільшиться у порівнянні з усталеним станом, що негативно вплине на мережу живлення. Тому перехід "вгору" треба виконувати в нулі миттєвого значення змінної напруги, що зменшить амплітуду зарядного струму.

У випадку переходів "вниз" процеси дещо інші. Алгоритм керування тиристорів той самий, що й раніше – синхронна зміна керування. Але тиристори початкової групи одразу не закриються, тому що в системі присутній конденсатор, і поки величина напруги на ньому не знизиться (швидкість спаду визначає постійна часу навантаження та конденсатора) до відповідного рівня, доти не виникнуть умови для вимикання тиристорів початкової групи й вмикання наступної групи, а на цей процес ми не можемо вплинути. Оскільки постійна часу відносно велика (порівняно з періодом змінного струму), то перехід займає певний час, а його тривалість залежить від величин рівнів переходів, на що треба зважати під час оцінки інтервалу часу переходу. На відміну від переходу "вгору" момент часу, коли здійснюється перехід, не має суттєвого значення, хоча він певним чином впливає на тривалість переходу між рівнями.

Розглянемо переходи з проміжним станом. Аналіз показав, що через використання вищенаведеного алгоритму, перевищення значення напруги в порівнянні з заданими для різних прикладів може коливатись від 1 до 7 кроків регулювання. Так, наприклад, для БРВ з ШД (1 варіант) у разі переходу з 1 рівня на 2 вона сягає 7, бо абсолютна величина в проміжному стані становить 9. Наявність такої ситуації під час переходу може негативно вплинути на навантаження, тому її бажано позбутися.

Розглянемо алгоритм, який доцільний для таких переходів, а саме, коли між зняттям керування з ключів початкової групи, і подавання керування на ключі наступної групи вводиться певна пауза для врахування того, що за відсутності керуючих сигналів на ключах умовою їхнього вимикання є ще й відсутність струму в них. Беручи це до уваги, рекомендуємо вимикати керування з ключів, які виходять з роботи початкової групи в максимумі напруги змінного струму, а подавати керування на нові ключі в наступному нулі. Тривалість паузи в керуванні буде сягати півтора півперіоду напруги змінного струму.

Для ілюстрації на рис. 3 представлено приклади графіків вихідної напруги під час переходу з

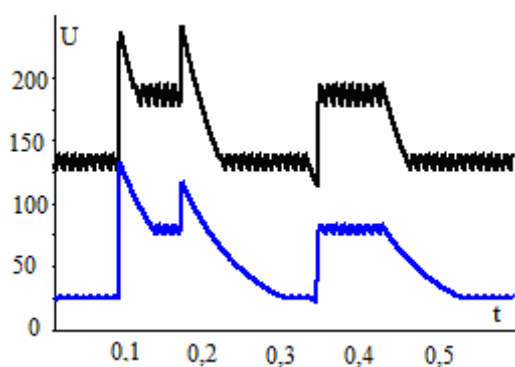


Рис. 3

проміжним станом у разі використання різних алгоритмів для БРВ з ШД (1 варіант). Тут продемонстровано переходи ("вгору" та "вниз") між рівнями 5 та 7 (верхній графік) й 1 та 3 (нижній графік). Ліворуч на рисунку використано алгоритм без паузи, а в правій – з паузою. Наочно видно наявність перехідного рівня за прямого та зворотного перемикання. Для представлених переходів проміжними, відповідно, будуть рівні 9 та 4, тобто "стрибок" рівня напруги в порівнянні зі штатними становить 2 та 1. Також можна оцінити характер зниження напруги на конденсаторі під час його розряду, тривалість якого визначається переходом, відповідно, між рівнями 9-5 та 4-1. Праворуч на рис. 3 показано переходи, в яких використано алгоритм з паузою. Тепер у вихідній напрузі відсутній перехідний

стан, зник "стрибок" напруги та зменшився інтервал розряду конденсаторі фільтра, який визначається вже переходом між рівнями 7-5 та 3-1. Подібний характер протікання процесу притаманний всім переходам між рівнями через проміжний стан.

Для двох типів виконавчої структури БРВ проведено за допомогою моделювання дослідження всіх можливих переходів між рівнями під час застосування алгоритмів без паузи та з паузою. Для ілюстрації на рис. 4 показано результати моделювання послідовних переходів від нижнього рівня напруги до найвищого і в зворотному напрямку для БРВ з ШД (варіант 1) у разі використання алгоритмів

му з паузою між усіма переходами, а на рис. 5 показано аналогічні переходи для БРВ з ОД під час застосування алгоритму з паузою тільки там, де виникає перехідний рівень. У випадку зростання рівня видно інтервал очевидного спаду миттєвого значення напруги в порівнянні з поточним (на рис. 4 він при кожному переході, на рис. 5 – їх два), миттєве значення якого приблизно на 13% нижче поточного середнього значення. Наявність даного інтервалу свідчить про те, що ключі вже вимкнулися, і здійснюється розряд конденсатора.

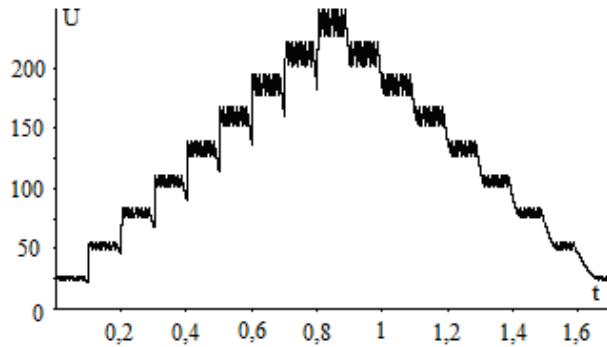


Рис. 4

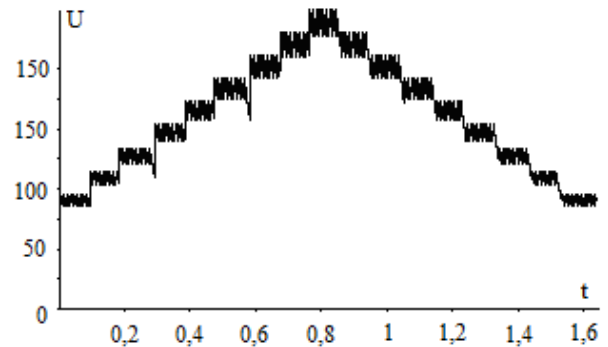


Рис. 5

У разі зниження рівня напруги вимкнений стан ключів практично відсутній, відбувається природне перемикання між ключами. Крім того, в цьому випадку наочно видно, що тривалість інтервалу розряду фільтруючого конденсатора на нижніх рівнях збільшується в порівнянні з переходами на верхніх рівнях, оскільки відносна величина зміни величин рівнів також збільшується. Таким чином, врахування виявлених особливостей зміни рівня вихідної напруги БРВ під час відповідних переходів між його робочими станами дало змогу обрати доцільні алгоритми керування напівпровідниковими ключовими елементами БРВ й забезпечити прийнятний перебіг переходів між станами, коли практично виключається можливість виникнення відчутних небажаних сплесків або спадів вихідної напруги.

Висновки. Визначено та проаналізовано особливості реалізації цілеспрямованих переходів між робочими станами виконавчої структури багаторівневого випрямляча з секціонуванням вторинної обвитки трансформуючого елемента за законами, оптимальними з позицій ефективності використання ключових елементів. Доведено, що суттєва економія апаратних засобів (напівпровідникових ключових елементів) при цьому вимагає лише незначного корегування роботи програмних засобів. Визначена багатоваріантність зміни робочих станів та можливих алгоритмів дискретно-разового керування ключовими елементами БРВ, що є ще одним підтвердженням багатоваріантності побудови та функціонування трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів параметрів електричної енергії.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Бар'єр-3" (реєстраційний номер 0123U100671), КПКВК 6541030.

1. Chaudhuri Nilanjan, Chaudhuri Balarko, Majumder Rajat, Yazdani Amirnaser. Multi-terminal Direct-Current Grids: Modeling, Analysis, and Control. John Wiley & Sons, 2014. 288 p.
2. Parag K., Suman D., Krishnamurthy Sh. Reduced switch count multi-level unidirectional rectifiers. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Denver, CO, USA, 15-19 September 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646952>.
3. Timothy F. Glennon T.F., Mehl B.R. Regulated AC/DC converter. US Patent No 4739466, 1988.
4. Crane A.D., Blewi W.M. Power converters. US Patent No 9800161B2, 2017.
5. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.
6. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.
7. Trentini A. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018. 90 p.
8. Липківський К.О., Мажаровський А.Г. Особливості секціонування обвитки трансформуючого елемента трансформаторно-ключової виконавчої структури у вольтододавчому каналі системи живлення постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.025>.

9. Особливості декомпозиції багаторівневих випрямлячів за умови заданого обмеження діапазону регулювання вихідної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.021>.

10. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11–20.

FEATURES OF CHANGING THE OPERATING STATES OF EXECUTIVE STRUCTURES OF MULTILEVEL RECTIFIERS

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net.

The main component of DC power supply systems are various semiconductor mostly controlled rectifiers with corresponding filter capacitors. In particular, these are multi-level rectifiers (MLRs) with a purposeful discrete-time change in the voltage transfer coefficient through a corresponding change in the operating state of its executive structure. Synthesized optimal variants of these structures are characterized by the high efficiency of the use of semiconductor switches elements. This work revealed and analyzed the peculiarities of the implementation of transitions between the specified operating states in two types of MLR – with a wide (full) and with a limited range of output voltage regulation. Taking into account these features made it possible to determine appropriate algorithms for discrete-time control of semiconductor switches elements of the MLR, which ensure an acceptable course of these transitions, during which the possibility of noticeable unwanted surges or drops in the voltage supplied to the consumer is practically excluded. The multivariate implementation of the algorithms for transitions between the output voltage levels of the MLR is another aspect of the multivariate transformer-and-switches executive structures of converters in general. References 10, tables 1, figures 5.

Key words: multi-level rectifier, transformer-and-switches executive structure, tap changing transformer, smart transformer, work algorithm, multivariate.

1. Chaudhuri Nilanjan, Chaudhuri Balarko, Majumder Rajat, Yazdani Amirnaser. Multi-terminal Direct-Current Grids: Modeling, Analysis, and Control. John Wiley & Sons, 2014. 288 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118960486>

2. Parag K., Suman D., Krishnamurthy Sh. Reduced switch count multi-level unidirectional rectifiers. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Denver, CO, USA, 15-19 September 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646952>.

3. Glennon T.F., Mehl B.R. Regulated AC/DC converter. US Patent No 4739466, 1988.

4. Crane A.D., Blewi W.M. Power converters. US Patent No 9800161B2, 2017.

5. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).

6. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.

7. Trentini A. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018. 90 p.

8. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Features of sectioning the turns of the transforming element of the transformer-key actuating structure in the boost channel of the DC power system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 25–31. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.025>.

9. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Features of decomposition of multilevel rectifiers under conditions of the specific limit of the range of output voltage regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 21–26. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.021>.

10. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11–20.

Надійшла 14.08.2023
Остаточний варіант 11.09.2023