

**ВДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОРІВНЕВОГО ВИПРЯМЛЯЧА У СКЛАДІ
ВОЛЬТОДОДАВЧОГО КАНАЛУ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
ШЛЯХОМ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ**

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

У системах живлення з відновлюваними джерелами енергії рівень вихідної напруги залежить від апріорі нестабільних метеорологічних умов довкілля. Це вимагає введення у такі системи накопичувача енергії (акумуляторної батареї) та організації відповідного вольтододавчого каналу (ВДК). У вихідному каскаді ВДК використовуються різні типи трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС), зокрема, багаторівневі випрямлячі (БРВ), одним з показників якості яких є ефективність використання напівпровідникових приладів. У роботі з метою підвищення цього показника запропоновано виконати декомпозицію БРВ на два послідовно з'єднані блоки, що дає змогу синтезувати нові схемотехнічні рішення ТКВС цього типу. На конкретних прикладах підтверджено можливість досягнення у двоблокових БРВ бажаної точності підтримання вихідної напруги за обмеженої кількості напівпровідникових приладів. Бібл. 14, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, системи живлення постійного струму, вольтододавчий канал, багаторівневий випрямляч, декомпозиція елементів.

Проблема узгодження вимог споживачів до якості електричної енергії (ЕЕ) існує з початку її широкого використання у життєдіяльності людини. Уніфікація споживачів щодо параметрів живлення повністю не вирішує цю проблему, бо навіть у разі приєднання до загальної електромережі системно забезпечується незмінність лише частоти струму, а такий важливий параметр як напруга може коливатися (відхилятися) у деяких унормованих межах, або, навіть, на певний (щоправда, теж унормований) час виходити за них. На рівень напруги та її стабільність впливають також втрати ЕЕ у лініях приєднання (особливо – "слабких"), віддаленість споживачів, тощо. У автономних системах, особливо у системах з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), швидкий розвиток яких сприяє поліпшенню екологічного стану довкілля і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті [1, 2], до цього додається суттєва нестабільність первинного джерела, що є наслідком апріорної його залежності від конкретних метеорологічних умов (сонячного випромінювання, швидкості вітру, тощо). Це вимагає введення у систему з ВДЕ накопичувачів ЕЕ (зокрема, акумуляторних батарей – АБ), які б у періоди суттєвого зменшення енергії первинного джерела віддавали б споживачеві (за необхідності – з проміжним перетворенням частоти струму) необхідну для його нормальної роботи додаткову електроенергію, накопичену в них у періоди, коли первинна енергія ВДЕ перевищує потреби споживача.

Необхідне регулювання доданої споживачеві ЕЕ пов'язане з організацією у системі з ВДЕ відповідного вольтододавчого каналу (ВДК). В разі системи змінного струму – це вольтододавчий трансформатор, вторинну обвитку якого введено у коло силового струму, а первинна живиться напругою, рівень якої повинен регулюватися у заданому діапазоні ΔU [3, 4, 5]. В системі постійного струму ця напруга подається у діагональ напівпровідникового мосту, увімкненого послідовно з навантаженням [6]. У нещодавно запатентованому рішенні такої системи [7] регулювання змінної напруги реалізується за допомогою трансформаторно-ключової виконавчої структури – ТКВС [8] (за західною термінологією – smart transformer [9, 10]), яка складається з трансформатора T_r з секціонованими обвитками та двох комутаторів – на первинному боці T_r з трьома парами зустрічно-паралельно ввім-

© Липківський К.О., Можаровський А.Г., 2021
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-3292-1360> ; ** <https://orcid.org/0000-0001-9801-2728>

кнутах тиристорів ($S_1=3$) та на вторинному – з двома ($S_2=2$). Вихідний каскад такого ВДК зображено на рис. 1. Регулювання напруги відбувається комутацією тиристорних пар, внаслідок якої цілеспрямовано змінюється коефіцієнт трансформації ТР. За дискретно-разового керування (discrete time control – DTC [11]) ця структура дає змогу отримати 6 (3×2) станів, яким відповідають шість рівнів напруги J , що додається ($J_1=6$). Загалом повна кількість рівнів вихідної напруги, з врахуванням режиму "транзит", коли діоди забезпечують пряму передачу енергії до навантаження, дорівнює $J_{1T}=J_1+1=7$. У такому разі крок регулювання напруги, що додається, ΔU_0 визначається заданим діапазоном зміни напруги ΔU та кількістю її рівнів – $\Delta U_0 = \Delta U / J_1$. Слід відзначити простоту схемотехнічного рішення [7] та, за умови використання DTC, й зручність регулювання, хоча при цьому доводиться вживати певних заходів задля уникнення можливості виникнення короткого замикання секцій обвитки Тр. До того ж, тут ефективність використання напівпровідникових приладів досить низька. Дійсно, якщо врахувати тільки тиристори (за п'яти парам, тобто $S=5$, їхня кількість $N=10$), то введений у [12] відповідний коефіцієнт $K_{em} = J/N = 6/10 = 0,6$, а з врахуванням й чотирьох діодів маємо $K_{em0} = J/N = 6/14 \approx 0,44$.

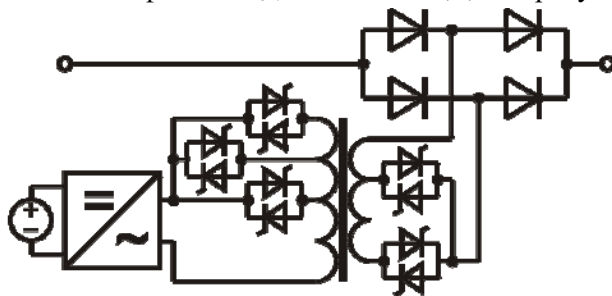


Рис. 1

Вмикання будь-якої однієї пари тиристорів (назвемо їхнє сполучення "стійкою") забезпечує пряму передачу енергії ("транзит") від первинного джерела постійного струму до споживача. Під час вмикання будь-яких двох стійок (одночасно працюють лише два тиристори) вступає у дію та секція обвитки (кілька секцій), крайні відводи якої (яких) підключені до спільних точок саме цих пар тиристорів. Зауважимо, що випадкове одночасне подавання керуючих сигналів на декілька чи навіть всі тиристори або їхнє вмикання через зовнішні чинники не призведе до аварійної ситуації, а їхнім наслідком буде лише підвищення вихідної напруги перетворювача на час тривалістю інтервалу комутації напівпровідникових ключів, який не перевищує півперіоду змінної напруги.

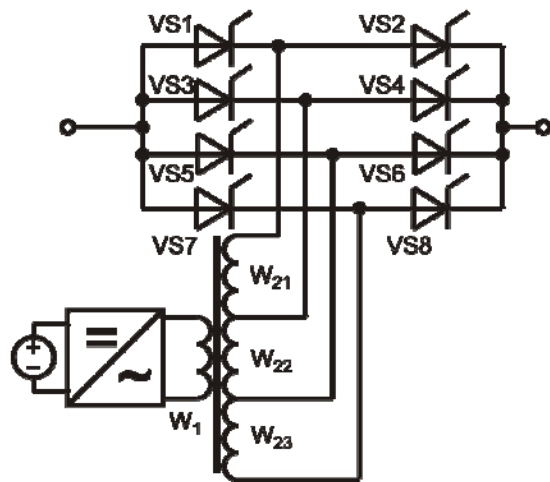


Рис. 2

1,5 рази більше ніж у [7]. Подальше збільшення кількості тиристорних стійок багаторівневого випрямляча у випадку секціонування обвитки трансформатора згідно з запропонованим у [14] законом веде до подальшого збільшення цього показника.

Все це свідчить, що запропонований у [13] варіант реалізації функції вольтододавання в системі живлення постійного струму оригінальним багаторівневим випрямлячем має суттєві переваги відносно схемотехнічного рішення [7], зокрема відзначається суттєво більшою ефективністю використання напівпровідникових приладів, спрощенням їхньої комутації. Проте багатоваріантність, апріорі

З метою покращення цього показника у [13] було запропоновано покласти реалізацію обох функцій – регулювання та випрямлення напруги змінного струму – на багаторівневий випрямляч, що складається з S паралельно з'єднаних пар послідовно з'єднаних тиристорів та трансформатора, секціонована вторинна обвитка якого має два крайні та $(S-2)$ проміжних відводів, кожний з яких з'єднано зі спільною точкою відповідної пари тиристорів.

Для отримання тієї ж кількості нетотожних рівнів на виході вольтододавального каналу, що й у [7] ($J=6$) тут потрібно (рис. 2) лише чотири пари тиристорів ($N=8$) і жодного діода, за умови вибору таких виткових співвідношень трьох секцій: W_3 (розрахована на напругу одного кроку регулювання ΔU_0); $W_2 = 3W_3$ ($3\Delta U_0$); $W_1 = 2W_3$ ($2\Delta U_0$). У такому разі коефіцієнт ефективності використання тиристорів дорівнюватиме $K_e = 6/8 = 0,75$, що у 1,25 рази більше ніж у схемотехнічному рішенні з [7]. Процес формування заданих шести рівнів напруги та алгоритм комутації тиристорів випрямляча достатньо висвітлені в [13]. Якщо задіяти як у [7] 10 тиристорів (5 стійок), то отримуємо (за співвідношень витків у чотирьох секціях обвитки, нормованих по найменшій секції, 2:3:3:1 або 3:4:1:1) 9 рівнів напруги, що додається, тобто маємо $K_e = 9/10 = 0,9$, що у

притаманна ТКВС, стимулює до подальшого пошуку можливих шляхів вдосконалення перетворювачів і цього типу.

Метою роботи є підвищення ефективності використання напівпровідникових приладів багаторівневого випрямляча у вихідному каскаді вольтододавчого каналу системи живлення постійного струму шляхом декомпозиції його елементів.

Оскільки подальше нарощування кількості тиристорних стійок (та, відповідно, кількості секцій) у єдиному багаторівневному випрямлячі (ЄБРВ) буде вести до подальшого певного, але монотонного й достатньо повільного збільшення кількості станів ТКВС, що реалізуються, та, як наслідок, кількості рівнів напруги, що регулюється, пропонується піти іншим шляхом. А саме – поділом ЄБРВ з S тиристорними стійками на два блоки – B_A та B_B , які вмикаються послідовно з навантаженням у коло силового струму (черговість їхнього розміщення не має значення) (рис. 3). Ці блоки подібні, але не однакові: B_A містить S_A тиристорних стійок, а B_B – $S_B = S - S_A$ стійок. У такому разі в трансформаторі Tr виокремлюються дві вторинні секціоновані обвитки, що гальванічно не пов'язані між собою, відповідно з $M_A = S_A - 1$ та $M_B = S_B - 1$ секціями.

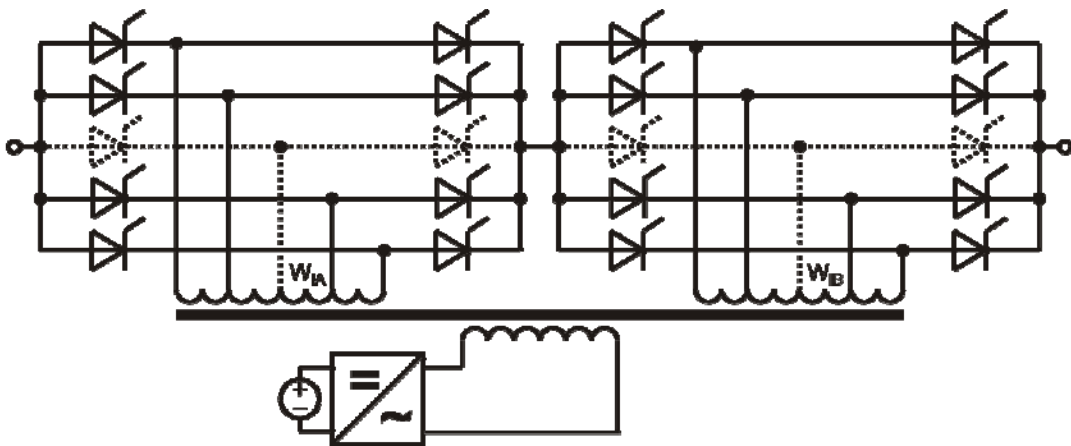


Рис. 3

Секції (та кількість витків у них) однієї обвитки, відводи між якими приєднуються до середніх точок тиристорних стійок B_A , позначаються через W_{iA} , а секції другої обвитки, відводи між якими приєднуються до середніх точок стійок B_B , – через W_{iB} . Секціонування кожної обвитки (тобто знаходження кількості витків у секціях, їхнє розташування) виконується для значень "своїх" S_A та S_B за законом, запропонованим у [14] для розрахунку секцій ЄБРВ з S тиристорними стійками. Тут, як і у [13], кожна обвитка містить секції трьох типів. Так у обвитці, пов'язаній з блоком B_A , це: секції з найменшою кількістю витків W_{3A} , розраховані на напругу кроку регулювання ΔU_0 (їхня кількість позначена через m_3); секції з найбільшою кількістю витків – W_{2A} (їхня кількість – m_{2A}) та єдина секція з проміжною кількістю витків $W_{1A} = W_{3A} - W_{2A}$ (тобто $m_{1A} = 1$). Аналогічно для обвитки, пов'язаної з B_B , маємо: W_{3B} (m_{3B}), W_{2B} (m_{2B}), W_{1B} (1). Задля зручності подальшого викладення матеріалу доцільно перейти до відносних параметрів, нормуючи витки всіх секцій по кількості витків найменшої секції W_{3A} ($W_{1A}^* = W_{1A} \cdot W_{3A}$, $W_{3A}^* = 1 \dots W_{iB}^* = W_{iB} \cdot W_{3A} \dots$).

Напруга, що додається, дорівнює заданій величині ΔU у стані ТКВС, коли в обох блоках задіяні усі секції обвиток Tr , тобто

$$\Delta U = \left(\sum_{i=1}^{M_A} W_{iA}^* m_{iA} + \sum_{i=1}^{M_B} W_{iB}^* m_{iB} \right) \Delta U_0. \quad (1)$$

З врахуванням отриманих у [14] емпіричних залежностей, можна записати вирази задля визначення кількості рівнів напруги J , що додаються, для кожного блоку

$$J_A = \left[2(S_A + 2)^2 - 25 + (-1)^{S_A} \right] / 8, \quad (2)$$

$$J_B = \left[2(S_B + 2)^2 - 25 + (-1)^{S_B} \right] / 8. \quad (3)$$

Оскільки кожний блок може працювати ще й у режимі "транзит", коли він не додає ніякої напруги, повні кількості робочих станів кожного блоку дорівнюють

$$J_{AT} = J_{AT+1} = \left[2(S_A + 2)^2 - 17 + (-1)^{S_A} \right] / 8, \quad (4)$$

$$J_{BT} = J_{B+1} = \left[2(S_B + 2)^2 - 17 + (-1)^{S_B} \right] / 8. \quad (5)$$

Внаслідок мультиплікативного характеру зв'язку між блоками (кожному стану B_A відповідає J_B станів B_B та навпаки – кожному стану B_B відповідає J_A станів B_A), загальна кількість станів та рівнів вихідної напруги (враховуючи рівень напруги первинного генератора)

$$J_{MT} = J_{AT} \times J_{BT}. \quad (6)$$

Діапазон регулювання напруг, що додається, також поділяється на два піддіапазони. "Нижній" – від $\Delta U_0 \cdot 0$ до $\Delta U_0 \cdot J_A$ – реалізується комутацією тиристорів B_A у разі знаходження B_B в режимі "транзит". Першою вступає в дію секція W_{3A} з найменшою кількістю витків, додаючи до напруги генератора напругу ΔU_0 . "Верхній" піддіапазон від $\Delta U_0 \cdot (J_A + 1)$ до $\Delta U_0 \cdot (J_{AT} - 1)$ реалізується комутацією обох блоків. Оскільки першою у B_B вступає в дію найменша у ньому секція W_{3B} , додаючи до напруги генератора напругу $\Delta U_0 (J_{AT} + 1)$, то $W_{3B}^* = W_{3A}^* (J_A + 1) = J_{AT}$. Відповідно таким же чином зростають й кількості витків секцій W_{iB}^* та W_{2B}^* .

Результати декомпозиції єдиного БРВ на два блоки було прослідковано на конкретних прикладах з різними кількостями тиристорних стійок S та за деякого прийняттого варіювання співвідношень S_A та S_B з метою пошуку найкращого рішення. Дані по п'яти таких прикладах з $S=6..10$ представлено у табл. 1 (колонки праворуч).

Таблиця 1

S	РН+В			ЄБРВ		2 БРВ				
	S_1	S_2	J_{1T}	$W_i^*(m_i)$	J_{2T}	S_A	S_B	$W_{Bi}^*(m_{Bi})$	$W_{Bi}^*(m_{Bi})$	J_{MT}
6	3	3	10	3(1); 4(2); 1(1)	14	2	4	1(1)	4(1); 6(1); 2(1)	14
						3	3	2(1); 1(1)	8(1); 4(1)	16
						4	2	2(1); 3(1); 1(1)	7(1)	14
7	4	3	13	3(1); 4(3); 1(2)	18	3	4	2(1); 1(1)	8(1); 12(1); 4(1)	28
						4	3	2(1); 3(1); 1(1)	14(1); 7(1)	28
8	4	4	17	4(1); 5(3); 1(3)	23	3	5	2(1); 1(1)	8(1); 12(2); 4(1)	40
						4	4	2(1); 3(1); 1(1)	14(1); 21(1); 7(1)	49
						5	3	2(1); 3(2); 1(1)	20(1); 10(1)	40
9	5	4	21	4(1); 5(4); 1(3)	28	4	5	2(1); 3(1); 1(1)	14(1); 21(2); 7(1)	70
						5	4	2(1); 3(2); 1(1)	20(1); 30(1); 10(1)	70
10	5	5	26	5(1); 6(4); 1(3)	34	4	6	2(1); 3(1); 1(1)	21(1); 28(2); 7(2)	98
						5	5	2(1); 3(2); 1(1)	20(1); 30(1); 10(1)	100
						6	4	3(1); 4(2); 1(2)	28(1); 42(1); 14(1)	98

Аналіз отриманих даних дає змогу, по-перше, зробити певні висновки щодо доцільного формування блоків, а саме: за парної кількості тиристорних стійок треба обирати $S_A = S_B = S_A/2$, що дає змогу отримати найбільшу кількість рівнів напруги, яка додається; за будь-якої кількості стійок варіанти з $S_B = S_A + \Delta S$ та $S_B = S_A - \Delta S$ (ΔS дорівнює 2 за парних S та 1 за непарних S) рівноцінні за цим основним показником. По-друге, але це – головне, за незначного збільшення S спостерігається стрімке зростання коефіцієнта ефективності використання напівпровідникових приладів. Так, зі збільшенням S з 6 до 9, тобто на 50%, K_e зростає до 3,9, тобто майже у 3 рази.

Задля порівняння показників запропонованої двоблокової структури багаторівневого випрямляча з варіантами використання у вольтододавчому каналі системи живлення постійного струму інших ТКВС, у табл. 1 (колонки ліворуч) наведено також значення кількості рівнів вихідної напруги, що реалізуються комплексом регулятор змінної напруги – випрямляч (рис. 1) та єдиним багаторівне-

вим випрямлячем (рис. 2) за однакової кількості тиристорних стійок $S=0,5N$. Як видно, за коефіцієнтом ефективності використання напівпровідникових елементів запропонована структура ТКВС має суттєві переваги, які зростають зі збільшенням кількості необхідних рівнів напруги, що додається. Так, для $S=7$ маємо $J_{MT}/J_{2T}=28/18=1,55$; $J_{MT}/J_{1T}=28/13=2,13$; для $S=10$ маємо $J_{MT}/J_{2T}=100/34=2,94$; $J_{MT}/J_{1T}=100/26=3,84$.

Для конкретизації порівняння розглянутих схемотехнічних рішень можна перейти від відносних одиниць та відсотків до порівняння за кількістю тиристорів у них, необхідних задля досягнення певної однакової (чи приблизно однакової) кількості рівнів напруги J , або похибки регулювання $\Delta U=0,5 \Delta U_0=0,5\Delta U/J$ за однакового діапазону зміни напруги, що додається. З даних, наведених у табл. 2 (лише двох кращих варіантів – ЄБРВ та двоблокового випрямляча), видно, що задля досягнення похибки, меншої за $\pm 2\%$, у ЄБРВ потрібно мати 9 стійок (18 тиристорів), а у запропонованій структурі – 7 стійок (14 тиристорів), тобто на 4 тиристири менше; для $\Delta U_{II} \approx \pm 1\%$ ця економія сягає 8 тиристорів, для $\Delta U_{II} \approx \pm 0,7\%$ – 12, для $\Delta U_{II} \approx \pm 0,5\%$ – 16 тиристорів.

Щодо останніх двох значень похибок, то вони наведені лише як теоретично досяжні величини. Споживачі електроенергії в таких системах живлення практично не висувають такі жорсткі вимоги щодо точності регулювання напруги. Саме тому у цій роботі не пропонується подальше збільшення

Таблиця 2

		ЄБРВ	2БРВ	N_2/N_1	N_1-N_2
1	J_T	28	28	14/18=0,77	4
	N	18	14		
2	J_T	47	49	16/24=0,67	8
	N	24	16		
3	J_T	70	70	18/30=0,6	12
	N	30	18		
4	J_T	98	100	20/36=0,56	16
	N	36	20		

кількості працюючих блоків до, наприклад, трьох – вони будуть більш економічними за кількістю тиристорів лише за необхідності досягнення $\Delta U_{II} < \pm 0,4\%$. Дійсно, за $S=10$ триблоковий БРВ може реалізувати $J_{3T}=112$ рівнів напруги, що співмірно з $J_{MT}=100$; лише за $S=11$ його перевага стає суттєвою – $S_{3T}=195 \gg 139=J_{MT}$, але, як вже зазначалося вище, такі значення лежать за практично потрібними межами.

Наостанок доцільно зупинитися на одній цікавій особливості багаторівневого випрямляча,

яка ілюструє ще один аспект багатоваріантності ТКВС. За двох або трьох тиристорних стійок в одному блоці одну з них можна замінити діодною стійкою. У такому разі у випадку, коли вимкнені всі тиристири, діодна стійка забезпечує режим "транзит", а в інших випадках випрямлення напруги здійснюють не чотири, а два тиристири та два діоди. На рис. 4 наведено двоблоковий БРВ ($S_A=S_B=0,5S=3$, $J_M=15$) з заміною тиристорних стійок обох блоків двома діодними стійками. Крім зазначеного вище спрощення керування, гарантованого забезпечення режиму "транзит" та, як наслідок, неперервності силового струму навіть за випадкових збоїв у системі управління, цей варіант відзначається певною економічністю. У запропонованій структурі похибка регулювання відносно діапазону зміни напруги, що додається, становить $\Delta U_{II}=0,5\Delta U/J_M = \pm 3,36\%$. Проте, якщо ми хочемо стабілізувати вихідну напругу системи живлення, що розглядається, на рівні номінальної напруги генератора U_{II} , то за її "просідання" (в разі зменшення енергії первинного джерела) до 40%, вольтододавчий канал повинен "компенсувати" недостатні 60% напруги, тобто $\Delta U=0,6$, і похибка стабілізації відносно U_{II} буде становити $\Delta U_C = \pm 0,5 \times 0,6/15 = \pm 2,0\%$, а за "просідання" напруги на 30% – лише $\pm 1,0\%$. Таким чином, саме цей варіант ТКВС з 8 тиристорами та 4 діодами може за комплексом своїх характеристик виявитися найбільш прийнятним у багатьох випадках.

Висновки. Одним з доцільних шляхів забезпечення унормованої роботи споживачів електроенергії за нестабільності потужності первинного джерела живлення є організація відповідного вольтододавчого каналу. Запропонована у роботі декомпозиція трансформаторно-ключової виконавчої структури у вигляді багаторівневого випрямляча у вольтододавчому каналі джерела живлення постійного струму у разі секціонування обвоток його трансформатора за запропонованим у [14] законом, дала змогу синтезувати нові схемотехнічні рішення ТКВС цього типу, що відзначаються високою ефективністю використання напівпровідникових приладів та надійністю роботи.

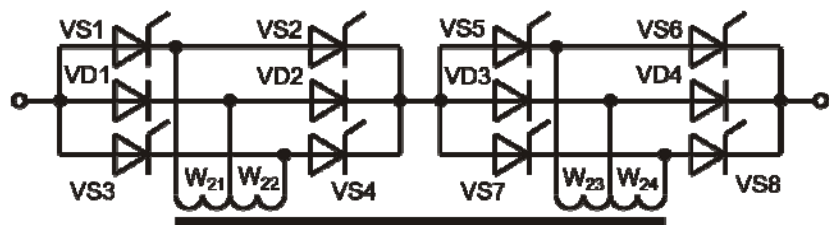


Рис. 4

Стаття написана під час виконання НДР "Бар'єр-2" (Розділ "Розвиток та узагальнення теорії трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) перетворювачів напруги з урахуванням багатоваріантності схемотехнічних рішень та мультифізичності процесів"), державний реєстраційний номер 0117U007714 (КПКВК 6541030).

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в слабкі електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 25-26.
2. Statistics Time Series. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (дата звернення 01.09.2020).
3. Young Choon Chung. Alternating current power control device. US Patent 5808454, 1998.
4. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. April 2012. Vol. 1. No 10. Pp. 767-772.
5. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. International Conference on *Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*. Gorakhpur, India, February 14-15, 2020. Pp. 211-215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>
6. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. US Patent 4739466, 1988.
7. Crane A.D., Blewi W.M. Power converters. US Patent 9800161B2, 2017.
8. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216с.
9. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe 2013)*. Lyngby, Denmark, October 6-9, 2013. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
10. Trentini A. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018.
11. 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.
12. Липковський К.А. Исполнительный орган дискретного стабилизатора напряжения переменного тока с декомпозицией ключевых элементов коммутатора. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 2. С. 35-41.
13. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Організація вольтододавчого каналу в структурі відновлюваного джерела енергії постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 31-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.031>
14. Липківський К.О., Можаровський 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>

IMPROVEMENT OF A MULTILEVEL RECTIFIER AS PART OF A BOOSTER CHANNEL OF A DC POWER SUPPLY SYSTEM BY DECOMPOSITION OF ITS ELEMENTS

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

In power systems with renewable energy sources, the output voltage level depends on a priori unstable meteorological environmental conditions. This requires the introduction of an energy storage device (storage battery) into such systems and the organization of an appropriate booster channel (BC). In the output stage of the BDK, various types of transformer-and-switches executive structure (TSES) are used, in particular, multilevel rectifiers (MLR), one of the quality indicators of which is the efficiency of using semiconductor devices. In order to increase this indicator, it is proposed to perform the decomposition of the MLU from two series-connected blocks, which made it possible to synthesize new circuitry solutions for the TSES of this type. The possibility of achieving the desired accuracy of maintaining the output voltage with a limited number of semiconductor devices has been confirmed on specific examples. References 14, tables 2, figures 4.

Key words: transformer-and-switches executive structure, DC power systems, booster channel, multi-level rectifier, decomposition of elements.

1. Kirilenko O.V., Pavlovsky V.V., Lukanenko L.M., Trach I.V. Problems of integration of renewable energy sources into weak electric grids. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 25-26. (Ukr)

2. Statistics Time Series. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (accessed at 01.09.2020)
3. Young Choon Chung. Alternating current power control device. US Patent 5808454, 1998.
4. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. 2012. Vol. 1. No 10. Pp. 767-772.
5. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. International Conference on *Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*. Gorakhpur, India, February 14-15, 2020. Pp. 211-215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>
6. Timothy F. Glennon, Byron R. Mehl. Regulated AC/DC converter. US Patent 4739466, 1988.
7. Crane A.D., Blewi W.M. Power converters. US Patent 9800161B2, 2017.
8. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).
9. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe 2013)*. Lyngby, Denmark, October 6-9, 2013. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
10. Trentini, Andrea. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, 2018.
11. 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.
12. Lypkivskiy K.O. Executive body of discrete AC voltage stabilizer with decomposition of key switch elements. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2006. No 2. Pp. 35-41. (Rus)
13. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Organization of a boost channel in the structure of a renewable DC energy source. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 31-34. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.031> .
14. 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/techned2020.06.031> .

Надійшла 07.09.2020