

ВАРІАТИВНІСТЬ ВИБОРУ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ БАГАТОРІВНЕВОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ОБМЕЖЕНИМ ДІАПАЗОНОМ РЕГУЛЮВАННЯ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровський****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ-57, 03057, Україна

e-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Виконавчі структури багаторівневих випрямлячів (multilevel rectifiers) на основі трансформатора, що має секціоновані обвитки ("tapping transformer"), та напівпровідникового комутатора з метою підвищення ефективності використання задіяних у ньому силових електронних приладів доцільно поділяти на окремі регульовальні блоки. Проаналізовано варіанти такого поділу та особливості отриманих у результаті декомпозиції виконавчих структур. Виконано оцінку двоблокового багаторівневого випрямляча з обмеженим діапазоном регулювання вихідної напруги за двома критеріями ефективності використання напівпровідникових приладів. Показано можливість вирівнювання їхніх максимальних напруг у двох блоках. Підтверджено багатоваріантність побудови таких трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів напруги з дискретно-разовим керуванням (discrete time control) ключовими елементами. Бібл. 14, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, багаторівневий випрямляч, multilevel rectifier, дискретно-разове керування, декомпозиція, регульовальні блоки, ефективність.

У системах живлення споживачів електроенергії (ЕЕ) особливе місце посідають перетворювачі параметрів ЕЕ, зокрема напруги, виконавчі структури яких містять трансформуючі елементи з секціонованими обвитками – або з поділом на окремі секції, або з проміжними відводами (taps), до яких приєднані напівпровідникові ключові елементи. У цих трансформаторно-ключових виконавчих структурах (ТКВС [1], або tap switching [2, 3], tap changing transformers [4, 5]) реалізується функціонування у необхідній множині J робочих станів з наперед визначеними нетотожними коефіцієнтами передачі по напрузі. Зміна робочого стану супроводжується відповідною зміною коефіцієнта передачі, що дає змогу здійснювати потрібну цілеспрямовану зміну рівня вихідної напруги у заданому діапазоні її регулювання. Застосування у цих виконавчих структурах дискретно-разового керування (discrete time control [6]) з природною комутацією ключових елементів виключає генерування у мережу високочастотних (ВЧ) завад. Ще однією позитивною властивістю таких структур є неможливість виникнення при переключеннях короткозамкнених секцій. До того ж, випадкове одночасне введення у дію будь-яких сполучень ключових елементів не призведе до аварійної ситуації, наслідком цього буде лише перехід у незапланований робочий стан з вихідною напругою в межах визначеного діапазону регулювання. Згідно з [7], основним шляхом розвитку та вдосконалення таких структур задля підвищення ефективності використання напівпровідникових приладів є декомпозиція структури на окремі послідовно з'єднані блоки, яка дає змогу скористатися принципом мультиплікативності зв'язків їхніх станів та збільшити кількість станів структури без збільшення кількості ключових елементів.

У [8] було обґрунтовано доцільність виокремлення з ТКВС цього призначення структур, у яких обидві функції – випрямлення та регулювання напруги – покладено на одні й ті ж напівпровідникові прилади у складі так званого багаторівневого випрямляча – БРВ (по аналогії з multilevel converter/inverter [9, 10]), що складається з S паралельно з'єднаних пар ("стіжок"), відповідної пари ключових елементів, послідовно з'єднаних тиристорів/діодів та трансформатора, секціонована вторинна обвитка якого має крім двох крайніх ($S - 2$) проміжні відводи, кожний з яких з'єднано зі спільною точкою. Для БРВ, як і для інших ТКВС, також доцільним є зазначений поділ на окремі блоки. (Зауважимо, що оскільки такі структури не призначені для прецизійного регулювання з дрібним кроком зміни напруги, переважно достатнім є поділ на два блоки). Реалізація та позитивні наслідки декомпозиції БРВ з широким (повним – від 0 до $U_{2\max}$) діапазоном регулювання вихідної напруги детально проаналізовано

у [11]. Щодо БРВ з обмеженим діапазоном регулювання ($\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{2\min}$), то ця операція була розглянута лише частково у [12], для одного варіанту декомпозиції – з розміщенням тільки в одному з блоків витків секції обвитки W_0 , яка розраховується на напругу нижньої межі діапазону регулювання і задіяна при формуванні всіх рівнів вихідної напруги.

Метою роботи є порівняльний аналіз декомпозиції багаторівневого випрямляча з обмеженим діапазоном регулювання вихідної напруги за різними оцінками ефективності використання напівпровідникових ключових елементів.

Вихідна обвитка трансформатора багаторівневого випрямляча, що призначений для живлення споживачів із заданим обмеженим діапазоном регулювання вихідної напруги, повинна складатися, згідно з [12], з секції W_0 , що розраховується на напругу нижньої межі діапазону регулювання, та двох груп регулювальних секцій. Перша з них, що з'єднана з одним кінцем секції W_0 , складається з m_1 регулювальних секцій, кожна з яких має найменшу кількість витків, яка розраховується на напругу кроку регулювання $U_{кр}$ (відстань між двома суміжними рівнями напруги). Друга група, що з'єднана з іншим кінцем секції W_0 , містить m_2 регулювальних секцій, кожна з яких має у (m_1+1) разу більше витків, ніж секції першої групи. Таке секціонування обвитки забезпечує неперервність лінійного регулювання напруги в усьому діапазоні. У результаті декомпозиції/поділу вихідного єдиного БРВ отримуємо структуру з двох регулювальних блоків РБА та РББ, кожен з яких подібний за конфігурацією до вихідного багаторівневого випрямляча (див. рис. 1) (первинна несекціонована обвитка трансформатора не показана). Вона дає змогу проаналізувати обидва можливі варіанти декомпозиції БРВ – з розміщенням секції W_0 тільки у одному регулювальному блоці ($\alpha=1, \beta=1-\alpha=0$) та з поділом цієї секції на дві розміщені у різних блоках секції (αW_0 та βW_0).

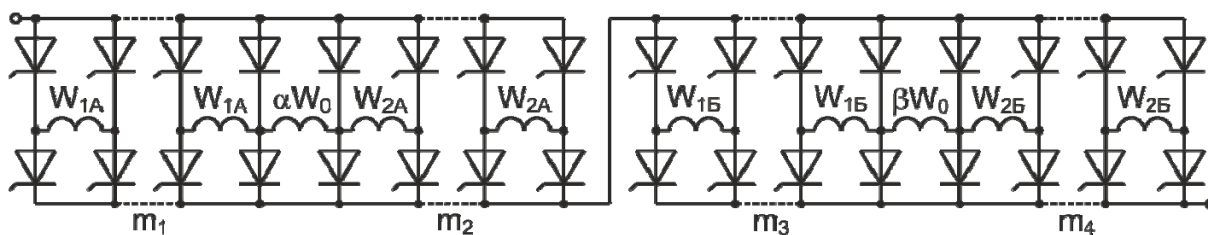


Рис. 1. Багаторівневий випрямляч з двома регулювальними блоками

Для РБА з m_1 секціями першої групи та m_2 секціями другої групи блоку сумарна напруга на всіх регулювальних секціях складе

$$U_{рсА} = m_1 U_{1A} + (m_1+1)m_2 U_{1A} = (m_1 + m_2 + m_1 m_2) U_{1A}, \quad (1)$$

де $U_{1A} = U_{кр}$ – напруга на регулювальній секції з найменшою для усього БРВ кількістю витків. Відповідно для РББ з m_3 секціями першої групи та m_4 секціями другої групи блоку сумарна напруга на всіх регулювальних секціях становитиме

$$U_{рсБ} = m_3 U_{1B} + (m_3+1)m_4 U_{1B} = (m_3 + m_4 + m_3 m_4) U_{1B}, \quad (2)$$

де U_{1B} – напруга на регулювальній секції з найменшою для цього блоку кількістю витків, яка згідно з [12] визначається таким чином:

$$U_{1B} = U_{рсА} + U_{1A} = (m_1 + 1)U_{1A} + (m_1 + 1)m_2 U_{1A} = (m_1+1)(m_2+1)U_{1A}. \quad (3)$$

Для сумарної напруги всіх регулювальних секцій обох блоків $U_{рс}$, яка дорівнює діапазону регулювання ΔU_2 , отримуємо:

$$U_{рс} = U_{рсА} + U_{рсБ} = \Delta U_2 = U_{кр} \{ (m_1+m_2+m_1 m_2) + (m_1+1)(m_2+1)(m_3+m_4+m_3 m_4) \}. \quad (4)$$

За умови однакових кількостей регулювальних секцій у всіх чотирьох групах ($m_1=m_2=m_3=m_4=m_0$) ця залежність значно спрощується:

$$U_{рс} = U_{кр} m_0 (4+6m_0 + 4m_0^2 + m_0^3), \quad (5)$$

звідки випливає, що при $m_0=1$ (по одній регулювальній секції) $U_{рс}=15$; при $m_0=2$ – $U_{рс}=80$; при $m_0=3$ – $U_{рс}=255$. Проміжні значення $U_{рс}$ отримуємо при додаванні різної кількості регулювальних секцій до окремих груп. Зауважимо, що додавання однієї секції до будь-якої групи (4 варіанти) дає однаковий оптимальний результат; додавання двох секцій дає оптимальний результат тільки якщо додається по одній секції до різних груп (6 варіантів).

У формулі (4) співмножник у фігурних дужках – це кількість кроків регулювання $K_{кр}$, яких на один менше кількості рівнів вихідної напруги/кількості станів структури J , тобто

$$J = 1 + U_{ср}/U_{кр}. \quad (6)$$

Виходячи з того, що за прийнятих оптимальних законах секціонування обох частин обвитки у РБА та РББ, кількість витків (напруга) кожної регулювальної секції пропорційна кількості витків (напрузі) секції W_{1A} ($U_{1A}=U_{кр}$), доцільно оперувати їхніми відносними значеннями, які наводяться у звичайних дужках, а межі блоків позначаються квадратними дужками. Так, наприклад, варіант БРВ з двома секціями у кожній з чотирьох груп регулювальних секцій можна представити таким чином: [(1) (1) (αW_0) (3) (3)] [((9) (9) (βW_0) (27) (27))]. З урахуванням цього у табл. 1 наведено обчислені для обох варіантів декомпозиції (вар. 1 – $\alpha=1$, $\beta=0$ та вар. 2 – $\alpha<1$, $\beta>0$) значення J при зміні кількості напівпровідникових приладів N (тиристорів T , діодів D) у прийнятному діапазоні $N = 12 \dots 28$. Користуючись цією таблицею, можна для будь-якої заданої кількості рівнів вихідної напруги $J_{зад}$ вибрати варіант виконавчої структури БРВ з найближчим значенням $J \geq J_{зад}$.

Таблиця 1

T	D	N	Б1	Б2	J	K_T	K_N
8	4	12	[(W_0) (1)]	[(2) (4)]	8	1	0,67
	8	16	[(1) (αW_0) (2)]	[(4) (βW_0) (8)]	16	2	1
10	4	14	[(1) (W_0) (2)]	[(4) (8)]	16	1,6	1,14
	8	18	[(1) (αW_0) (2)]	[(4) (βW_0) (8) (8)]	24	2,4	1,33
12	4	16	[(1) (W_0) (2)]	[(4) (12) (8)]	28	2,33	1,75
	8	20	[(1) (αW_0) (2) (2)]	[(6) (βW_0) (12) (12)]	36	3	1,8
14	4	18	[(1) (1) (W_0) (3)]	[(6) (18)(12)]	42	3	2,33
	8	22	[(1) (1) (αW_0) (3)]	[(6) (6) βW_0) (18) (18)]	54	3,86	2,45
16	4	20	[(1) (1) (W_0) (3) (3)]	[(9) (27) (18)]	63	3,94	3,15
	8	24	[(1) (1) (αW_0) (3) (3)]	[(9) (9) (βW_0) (27) (27)]	81	5,06	3,38
18	4	22	[(1) (1) (W_0) (3) (3)]	[(9) (27) (27) (18)]	90	5	4,09
	8	26	[(1) (1) (1) (αW_0) (4) (4)]	[(12) (12) (βW_0) (36) (36)]	108	6	4,15
20	4	24	[(1) (1) (W_0) (3) (3)]	[(9) (9) (36) (36) (27)]	126	6,3	5,25
	8	28	[(1) (1) (1) (αW_0) (4) (4)]	[(12) (12) (βW_0) (36) (36) (36)]	143	7,15	5,11

У попередніх роботах, зокрема у [11, 12], автори для оцінки схемотехнічного рішення БРВ (та взагалі ТКВС) за критерій приймали коефіцієнт ефективності використання всіх силових напівпровідникових приладів (тиристорів та діодів), що задіяні у пристрої, який визначається наступним чином – $K_{eN} = J/N$. Проте можливим є й інший варіант оцінки, а саме ефективності використання тільки тиристорів з введенням відповідного коефіцієнта $K_{eT}=J/T$. Застосування цього показника можна виправдати (обґрунтувати), виходячи з порівняння важливих характеристик тиристорів та діодів. По-перше, надійність діодів значно вища, ніж тиристорів. (Так, згідно з [13], інтенсивність відмов тиристорів у кілька разів більша, ніж діодів). Це є наслідком більш простої конструкції діодів, в той час як структура тиристорів більш складна з більшою кількістю компонентів. До того ж надійність роботи тиристорів залежить від надійності системи керування, яка у складі електротехнічного устаткування знає впливу різних факторів, зокрема ВЧ завад. По-друге, діоди значно стійкіші до перевантажень [14]. По-третє, у діодів більш стійкі теплові характеристики; у тиристорів більші втрати, тобто й більше виділення тепла, вони потребують більшого теплового контролю. По-четверте, тиристири є дещо більш вартісними напівпровідниковими приладами.

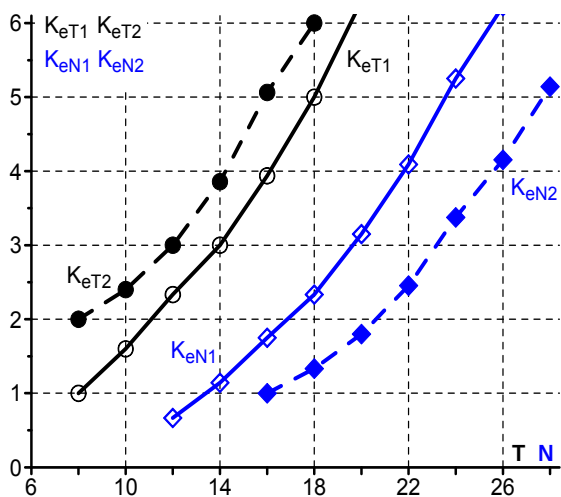


Рис. 2. Коефіцієнт ефективності використання всіх компонентів (N) і тиристорів (T)

Залежності зазначених коефіцієнтів ефективності використання у БРВ всіх силових електронних компонентів, або тільки тиристорів, обчислені за даними табл. 1 для обох варіантів декомпозиції структури, наведено на рис. 2, відповідно – K_{eN1} , K_{eN2} та K_{eT1} , K_{eT2} (суцільна лінія – перший варіант, пунктирна лінія – другий варіант). Хоча $K_{eN1} > K_{eN2}$, а $K_{eT2} > K_{eT1}$, ця обставина не є визначальною для вибору доцільної структури БРВ, але її треба враховувати (разом з наведеними міркуваннями) при розробці та підборі комплектуючих елементів у кожному конкретному випадку згідно з специфікою вимог до пристрою.

Слід зупинитися ще на одній обставині, яка відрізняє виконавчі структури БРВ, отримані

за різними варіантами декомпозиції. А саме – різниці співвідношень максимальних напруг, що прикладаються під час роботи до напівпровідникових приладів у двох регульовальних блоках $U_{\Sigma A}$ та $U_{\Sigma B}$, які визначаються наступним чином:

$$U_{\Sigma A} = (U_{\max} - \Delta U_2)\alpha + \Delta U_2 U_{pcA} / (U_{pcA} + U_{pcB}) = U_{\max} \{ (1 - \delta)\alpha + \delta U_{pcA} / (U_{pcA} + U_{pcB}) \}, \quad (7)$$

$$U_{\Sigma B} = (U_{\max} - \Delta U_2)(1 - \alpha) + \Delta U_2 U_{pcB} / (U_{pcA} + U_{pcB}) = U_{\max} \{ (1 - \delta)(1 - \alpha) + \delta U_{pcB} / (U_{pcA} + U_{pcB}) \}, \quad (8)$$

де δ – відносне значення напруги діапазону регулювання ($\delta = \Delta U_2 / U_{2\max}$). Співвідношення $U_{\Sigma A}$ та $U_{\Sigma B}$ при заданому δ та обраних законах секціонування обвитки визначається розподілом секції W_0 між блоками, тобто параметром α

$$\mu = \frac{(1 - \delta)\alpha + \delta U_{pcA} / (U_{pcA} + U_{pcB})}{(1 - \delta)(1 - \alpha) + \delta U_{pcB} / (U_{pcA} + U_{pcB})}. \quad (9)$$

Для першого варіанту декомпозиції ($\alpha = 1$) ця залежність суттєво спрощується

$$\mu = \frac{(1 - \delta)(U_{pcA} + U_{pcB}) + \delta U_{pcA}}{\delta U_{pcB}} = \frac{U_{pcA} + U_{pcB}}{\delta U_{pcB}} - 1. \quad (10)$$

З викладеного видно, що два регульовальні блоки такого БРВ ($\alpha = 1$) при однаковому струмовому завантаженні відрізняються значеннями максимальних напруг на напівпровідникових приладах. Ця нерівність визначається заданим параметром ΔU_2 . У табл. 2 наведено залежності $\mu = f(\delta)$ для трьох варіантів структури, що призначені для отримання $J = 16$, $J = 36$ та $J = 81$ рівня напруги. Аналіз свідчить, що напруги $U_{\Sigma A}$ та $U_{\Sigma B}$ однакові лише для конкретного кожного варіанту відносного значення діапазону регулювання: $\delta = 0,625$ ($J = 16$), $\delta = 0,583$ ($J = 36$), $\delta = 0,555$ ($J = 81$). Причому найбільший "перекіс" напруг спостерігається при малих ($\delta \leq 0,4$) або при надшироких ($\delta \geq 0,7$) діапазонах регулювання вихідної напруги.

Таблиця 2

$J \backslash \delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,555	0,583	0,6	0,625	0,7	0,8	0,9
16	11,5	5,25	3,17	2,13	1,5	1,31	1,2	1,03	1,0	0,78	0,56	0,39
36	10,7	4,83	2,89	1,92	1,33	1,1	1,0	0,94	0,87	0,67	0,46	0,29
81	10,1	4,55	2,74	1,78	1,22	1,0	0,91	0,85	0,78	0,59	0,39	0,23

У обраній за другим варіантом декомпозиції структури БРВ ($\alpha < 1$, $\beta > 0$) цю ситуацію можна змінити відповідним розподілом витків обвитки W_0 між блоками, визначаючи для конкретних значень δ , на які проектується БРВ, значення параметру α , який можна вирахувати, якщо прийняти у формулі (9) $\mu = 1$:

$$\alpha_0 = \frac{0,5(U_{pcA} + U_{pcB}) - \delta U_{pcA}}{(1 - \delta)(U_{pcA} + U_{pcB})}. \quad (11)$$

У табл. 3 наведено розраховані за (11) значення α_0 для варіантів структур БРВ, що й у табл. 2. Згідно з даними табл. 3, досягти задекларованої рівності максимальних напруг на напівпровідникових приладах регулювальних блоків ($U_{\Sigma A} = U_{\Sigma B} = U_{2\max}$) можна лише у зоні, обмеженій $\delta_{\max} = 0,555 \dots 0,625$ (залежно від кількості станів J), до того, як значення α сягає одиниці, тобто відбудеться перехід до структури, отриманої за першим варіантом декомпозиції. Другий варіант найбільш доцільний при $\delta_{\max} \leq 0,5$, коли μ наближається до одиниці. Якщо БРВ орієнтується на роботу з декількома діапазонами регулювання напруги без зміни структури, а саме $\delta = 0,1 \dots 0,4$, можна обрати $\alpha = 0,6$, тоді на межах цієї зони досягається прийнятне співвідношення максимальних напруг блоків $\mu = 1 \pm 0,27$. Цю особливість декомпозиції доведеться враховувати при побудові БРВ з підвищеною вихідною напругою.

Таблиця 3

$J \backslash \delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,555	0,583	0,6	0,625
16	0,53	0,57	0,63	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
36	0,54	0,59	0,65	0,74	0,86	0,92	1,0	–	–
81	0,55	0,6	0,67	0,77	0,9	1,0	–	–	–

Таким чином, у роботі визначено та проаналізовано ще один аспект доцільного вибору виконавчої структури

багаторівневого випрямляча з обмеженим діапазоном регулювання вихідної напруги. Він ґрунтується на можливості реалізації різних варіантів декомпозиції виконавчої структури БРВ при виборі доцільного з позицій споживача критерію ефективності використання задіяних у ній напівпровідникових приладів з дискретно-разовим керуванням. Отримані результати порівняльного аналізу та зроблені рекомендації слід враховувати згідно з вимогами конкретного споживача. Робота ще раз підтверджує багатоваріантність побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур як перетворювачів напруги, так і перетворювачів параметрів електроенергії взагалі.

Статтю підготовлено в рамках виконання НДР "Бар'єр-3", розділ "Електромагнітні системи з імпульсними дискретно-разовим принципом керування" (реєстраційний номер 0117U007714), КПКВК 6541030.

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.
2. Adasur, Mr Pramod Prakash, and D. G. Chougule. A review of power transformer tap switching using semiconductor devices. *Journal NX*, 2016. 2(6), 16–18. Retrieved from <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>
3. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 31.10.2024).
4. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Barthlein, E. M. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies. *16th International Conf. Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, IEEE, 21–24 Sep. 2014, Antalya, Turkey. Pp. 918–923. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>
5. 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*. V.2. № 9, Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
6. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V.19. № 4. Pp. 11–20.
7. 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>
8. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Вдосконалення багаторівневого випрямляча у складі вольтододавчого каналу системи живлення постійного струму шляхом декомпозиції його елементів. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 2. С. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.035>
9. Peng, Fang Z.; Qian, Wei. Recent advances in multilevel converter/inverter topologies and applications. *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-*. IEEE, 2010. Pp. 492–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5544625>
10. Lee Hyun-woo etc. A Multi-Level Converter. KR Patent KR100750341B1. 2007.08.17.
11. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Узагальнення основних положень декомпозиції трансформаторно-ключових виконавчих структур регуляторів напруги з дискретно-разовим керуванням напівпровідниковими елементами. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 3. С. 36–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>

12. Липківський К.О., Можаровський А.Г. 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>
13. Бардин В.М. Надежность силовых полупроводниковых прибором. М.: Энергия, 1978. 96 с.
14. <https://imrad@imrad.com.ua>

FEATURES OF DECOMPOSITION OF MULTI-LEVEL RECTIFIERS UNDER CONDITIONS OF THE SPECIFIC LIMIT OF THE RANGE OF OUTPUT VOLTAGE REGULATION

K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

e-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Harmonization of the requirements of certain groups of electrical and electrotechnological consumers of electricity with the current supply conditions requires in many cases the use of converters. Prominent among the systems designed to purposefully change the supply voltage of such consumers (regulation, stabilization) are converters with transformer-and-switches executive structure or tap changing (smart) transformers, which use discrete-time control, in particular so-called multi-level AC rectifiers (MLR). In the synthesis of MLR the main problem is to determine the optimal law of sectioning of the secondary envelope of its transformer. The paper analyzes the features of MLR decomposition into two functionally identical blocks under the given limitation of the output voltage control range and its difference from the decomposition of wide-range MLRs. The a priori variety of circuit technical solutions of such MLRs is determined. New MLRs with high efficiency of semiconductor switch elements use are offered. Ref. 14, fig. 2, tables 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, multilevel rectifier, discrete time control, decomposition, adjustment blocks, efficiency.

1. Lypkivskyi K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus)
2. Adasur, Mr Pramod Prakash, and D. G. Chougule. A review of power transformer tap switching using semiconductor devices. *JournalNX*, 2016. 2(6), Pp. 16–18. Retrieved from <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>
3. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator> (accessed 31.10.2024).
4. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Barthlein, E. M. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies. *16th International Conf. Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, IEEE, 21–24 Sep. 2014, Antalya, Turkey. Pp. 918–923. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>
5. 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*. V.2. № 9. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
6. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. № 4. Pp. 11–20.
7. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi 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 Electrodynamika*. 2020. № 6. Pp. 25–31. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.025>
8. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.G., Improvement of a multilevel rectifier as part of a booster channel of a DC power supply system by decomposition of its elements. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2021. № 2. Pp. 35–41. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.035>
9. Peng, Fang Z.; Qian, Wei. Recent advances in multilevel converter/inverter topologies and applications. *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA- IEEE*, 2010. Pp. 492–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5544625>
10. Lee Hyun-woo etc. A Multi-Level Converter. KR Patent KR100750341B1. 2007.08.17.
11. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.G., Generalization of the main provisions of the decomposition of transformer-and-switches executive structures of voltage regulators with discrete time control of semiconductor elements. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2024. № 3. Pp. 36–40. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>
12. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.G., Features of decomposition of multilevel rectifiers under condition of the specific limit of the range of output voltage regulation. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2022. № 2. Pp. 21–26. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.021>
13. Bardin V.M. Reliability of power semiconductor devices. M.: Energiya, 1978. 96 p. (Rus)
14. <https://imrad@imrad.com.ua>

Надійшла: 01.04.2025

Прийнята: 09.04.2025

Submitted: 01.04.2025

Accepted: 09.04.2025