

## ОСОБЛИВОСТІ РЕКОНФІГУРАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ СТАБІЛІЗАТОРА-РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

К.О. Липківський\*, докт.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
 e-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net)

*Трансформуючі елементи з секціонованими обвитками (tap changing transformers) є складовими трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) перетворювачів напруги змінного струму, яким притаманна багатоваріантність схемотехнічних та алгоритмічних рішень. У роботі запропоновано базову ТКВС стабілізатора з регулюванням рівня напруги, що стабілізується. Реконфігурація цієї структури дозволяє цілеспрямовано змінювати межі регулювання зазначених рівнів. Розглянуто кілька варіантів такої реконфігурації. Визначено доцільний закон секціонування обвитки автотрансформатора ТКВС, який при реконфігурації не змінюється. Також залишається незмінним і алгоритм дискретно-разового керування ключовими елементами.*

Бібл. 10, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** трансформуючий елемент, секціонована обвитка, tap changing transformer, трансформаторно-ключова виконавча структура, стабілізатор напруги, регулювання рівня, discrete-time control.

Значна частина трансформуючих елементів систем перетворення параметрів електричної енергії, особливо перетворювачів напруги змінного струму, мають або секціоновані обвитки, або обвитки з відводами (відпайками). У технічній літературі для позначення цих пристроїв використовують різні терміни, зокрема tap changing, [7, 9], tap switching [6, 8], tap changing [1], discrete smart transformer [10]. Проте ці терміни не є достатньо повними, бо не враховують їхньої визначальної характеристики, а саме те, що вони є "сукупністю стійких зв'язків обвиток або секцій обвиток одного чи декількох трансформуючих елементів (трансформаторів, автотрансформаторів, вольтододавчих трансформаторів) та ключових елементів (зокрема – напівпровідникових з переважно дискретно-разовим керуванням – "discrete-time control" [5]), що забезпечує цілісність і тотожність самій собі такої виконавчої структури при певних зовнішніх та внутрішніх змінах". Електромагнітну та напівпровідникову складові такої структури не можна аналізувати, моделювати, розраховувати окремо. У [4] для неї було запропоновано термін – "трансформаторно-ключова виконавча структура (ТКВС)", який є найбільш прийнятним і який ми використовуємо при дослідженні перетворювачів напруги цього типу.

У попередніх роботах, зокрема у [3], було досліджено особливості реалізації функції перетворення у ТКВС подвійної дії – стабілізатора напруги змінного струму з регулюванням її рівня. Вона складалася з автотрансформатора, обвитка якого мала відводи, та двох комутаторів – у вхідному і вихідному контурах схеми відповідно, кожен з яких мав по три ключі ( $N_1=N_2=3$ ). При їх відповідних комутаціях забезпечувалася реалізація дев'яти нетотожних коефіцієнтів передачі за напругою ( $J=9$ ), що обиралися за законом геометричної прогресії  $K_j=K_1\gamma^{1-j}$  ( $j=1, J$ ), де  $K_1$  – перший (найбільший) коефіцієнт передачі, а  $\gamma$  – коефіцієнт, що визначається параметром  $\delta$  – значенням похибки стабілізації вихідної напруги:  $\gamma=(1+\delta)/(1-\delta)$ . Розглянута у [3] ТКВС була розрахована на регулювання рівня напруги, що стабілізується, тільки у бік зменшення відносно номінального її значення. Видається доцільним проаналізувати можливість зміни в разі необхідності меж регулювання напруги, що стабілізується, без внесення принципів внутрішніх змін у цю виконавчу структуру.

Мета роботи полягає у реконфігурації трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора-регулятора напруги змінного струму для розширення можливості забезпечення потреб споживача при зміні вимог щодо живлячої напруги.

Усі можливі режими роботи такої ТКВС у [3] розглядалися на так званому "полі перетворення" (ПП) – прямокутній зоні на координатній площині  $U_1^* U_2^*$  ( $U_1^*$ ,  $U_2^*$  – вхідна та вихідна напруги, нормовані за номінальним значенням  $U_n$ ). Ця зона (рис. 1) складається з  $Q \times F$  чарунків, де  $Q$  – кількість піддіапазонів зміни вхідної напруги, у межах яких відбувається стабілізація вихідної напруги на

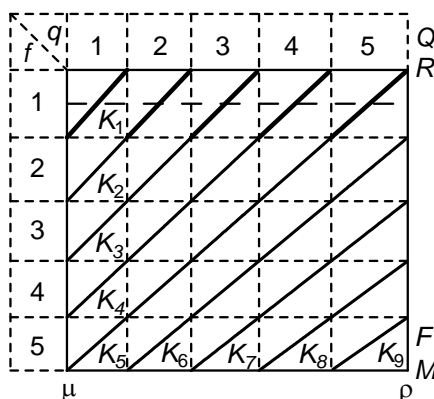


Рис. 1

$f$ -му рівні, а  $F$  – кількість цих розрахункових рівнів (як зазначалося раніше, принципово можливою є стабілізація напруги на будь-якому рівні, який можна регулювати плавно, незважаючи на дискретно-разовий принцип керування ТКВС [5]).

Оскільки обраній множині коефіцієнтів передачі  $J=9$  відповідає  $Q=F=5$ , то ПП має 25 чарунків (рис. 1), в межах кожного з яких ТЕ працює як двохобвитковий трансформатор з певним коефіцієнтом передачі (трансформації)  $K_j=U_{2j}/U_{1j}$ . Усі необхідні перетворення відбуваються шляхом зміни цих коефіцієнтів, значенням яких відповідають тангенси кутів нахилу дев'яти відрізків променів, що виходять з початку координат. ПП обмежується нормованими за  $U_n$  найбільшими та найменшими значеннями вхідної ( $U_{1max}/U_n = \rho$  і  $U_{1min}/U_n = \mu$ ) та вихідної напруг ( $U_{2max}/U_n = R$  і  $U_{2min}/U_n = M$ ), причому  $\rho = \mu\gamma^5$ ,  $R = M\gamma^5$ .

На цьому полі перетворення штриховою лінією позначено рівень номінальної напруги, що свідчить, як уже зазначалося вище, що рівень напруги, який стабілізується (він припадає на  $f = f_0=1$ ), можна тільки зменшувати, збільшуючи  $f$ . У разі необхідності реалізації регулювання рівня напруги у бік збільшення (що візуально відповідає зміщенню ПП – збільшенню значення  $f_0$ , бо рівень номінальної напруги залишається незмінним) необхідно здійснити певну реконфігурацію ТКВС. Отримані у результаті цього декілька варіантів зведено до однієї базової структури, зображеної на рис. 2. У ній обвитка АТ має основну (найбільшу) секцію  $W_{01}$  (по ній нормуються всі інші секції, тобто  $W_{01}^* = W_0/W_0 = 1$ ) та 6 секцій ( $D=6$ ), введенням в дію певної сукупності яких відбувається цілеспрямована зміна коефіцієнта передачі за напругою. Ці секції можна умовно назвати регульовальними ( $W_d$ ).

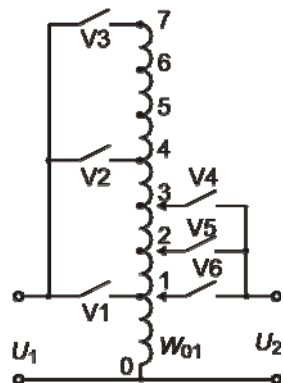


Рис. 2

Відводи від спільних точок секцій обираються таким чином, що кількість витків між точкою О та  $i$ -тим відводом змінюється згідно з законом геометричної прогресії  $W_{0i} = \gamma^{i-1}$ . Тому кількість витків у кожній  $d$ -й регульовальній секції у  $\gamma$  разів більша ніж у попередній

$$W_d = (\gamma - 1) \gamma^{d-1}, \quad d=1, D. \quad (1)$$

Ключі вхідного комутатора (V1, V2, V3) завжди підключені до відводів 1, 4, 7, а ключі вихідного можуть підключатися до будь-яких трьох обраних послідовно відводів: якщо до 1, 2, 3 – то маємо випадок  $f_0=1$ , який розглядався у [3], якщо до 2, 3, 4 – то  $f_0=2$ , якщо до 3, 4, 5 – то  $f_0=3$ , якщо до 3, 4, 5 – то  $f_0=4$ , якщо до 4, 5, 6 – то  $f_0=5$ , причому з кожним зростанням  $f_0$  межі поля перетворення  $R$  та  $M$  зростають у  $\gamma$  разів

$$R_{f_0} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \gamma^{f_0-1} = \frac{2\gamma^{f_0}}{\gamma+1}, \quad M_{f_0} = \frac{2\gamma^{f_0-5}}{\gamma+1}. \quad (2)$$

Хоча при цьому відносно значення діапазону регулювання напруги, що стабілізується, залишається незмінним ( $R_5/M_5 = R_5/M_5 = \gamma$ ), площа ПП суттєво зростає за рахунок збільшення абсолютної різниці між межами вихідної напруги  $(R_5 - M_5)/(R_1 - M_1) = \gamma^4$ . При зміні  $f_0$  змінюється (зростає) також і перший (найбільший) коефіцієнт передачі ТКВС за напругою (який припадає на чарунок  $q=f=1$  ПП)

$$K_{1f_0} = \gamma^{f_0+1}, \quad (3)$$

проте алгоритм керування ключовими елементами не змінюється.

Параметри  $\rho$  та  $\mu$ , що визначають діапазон зміни вихідної напруги, у межах якого відбувається стабілізація вихідної напруги, залишаються незмінними

$$\rho = \frac{2\gamma^3}{\gamma+1}, \quad \mu = \frac{2\gamma^{-2}}{\gamma+1}. \quad (4)$$

З цього випливає, що мінімальна напруга, яка прикладається до основної секції обвитки  $W_{01}$  при замкнених ключах V1 та V4, завжди (при будь-яких  $f_0$ ) дорівнює  $\mu$ . При збільшенні вхідної напруги у  $\gamma$  разів вмикається V5 замість V4, напруга на  $W_{01}$  зростає до  $\mu\gamma$ . При подальшому зростанні  $U_1^*$  у  $\gamma^2$  рази вмикається V6 замість V5, та до обвитки  $W_{01}$  прикладається максимальна напруга

$$U_{W_{01max}}^* = \mu\gamma^3 = \frac{2\gamma^{-2}}{\gamma+1} \gamma^3 = \frac{2\gamma}{\gamma+1} = 1 + \delta. \quad (5)$$

Саме за цією напругою, яка приймається за розрахункову, обчислюється згідно з (1) й максимальні напруги на регульовальних секціях обвитки АТ

$$U_{W_d}^* = \frac{2\gamma^2}{\gamma+1} (\gamma-1)\gamma^{d-1} = 2 \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \gamma^{d+1} = 2\delta \left( \frac{\delta+1}{\delta-1} \right)^{d+1}, \quad (6)$$

а також максимальна індукція в осерді АТ. Тобто при роботі ТКВС в інших режимах (в інших чарунках ПП) індукція може бути дещо меншою, отже меншими будуть і втрати в осерді АТ, що необхідно враховувати при обчисленні повних втрат у АТ.

Щодо струмів у секціях обвитки, то вони залежать як від місця чарунку у ПП та значення  $f_0$ , так і від того, за яких умов відбувається регулювання рівня напруги, що стабілізується. Наприклад, якщо прийняти, що опір навантаження при цьому не змінюється, то вихідний струм буде змінюватися за тим самим законом, що й напруга

$$I_{df}^*(f_0) = U_{df}^*(f_0) = \gamma^{f_0 - f}. \quad (7)$$

Виходячи з цього, для максимальної вихідної потужності ТКВС (максимальної потужності навантаження, тобто коли  $f=1$ ) можна записати

$$P_{Hmax f_0}^* = \left( \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \gamma^{2(f_0-1)} = P_{H nom}^* \gamma^{2(f_0-1)}, \quad f_0 = \overline{1, D}. \quad (8)$$

Аналіз режимів усіх п'яти конфігурацій ТКВС, що розглядаються, дозволив визначити залежності від єдиного параметра  $\gamma$  струмів у всіх секціях обвитки АТ для кожного з  $f_q$  чарунків ПП, а потім – відповідні нормовані розрахункові встановлені потужності автотрансформатора

$$P_{f_q}^*(f_0) = 0,5 \left( U_{W_{01 max}}^* I_{W_{01 max}}^* + \sum_{d=1}^6 U_{W_d max}^* \cdot I_{W_d f_q}^*(f_0) \right), \quad (9)$$

які він мав би, якщо б працював тільки у цьому  $f_q$  режимі.

Вираз (9) для знаходження  $P_{f_q}^*(f_0)$  з урахуванням (8) можна подати таким чином:

$$P_{f_q}(f_0) = P_{H max}(f_0) \cdot K_{f_q}(f_0), \quad (10)$$

де  $K_{f_q}(f_0)$  – коефіцієнт, що визначає, яку автотрансформатор повинен мати розрахункову потужність для забезпечення живлення споживача максимальною потужністю або, яку максимальну потужність можна споживати від ТКВС з обраним типорозміром осердя АТ, розрахункова потужність якого становить  $P_{f_q}^*(f_0)$ . Масив цих коефіцієнтів, що визначається функціональною складністю та глибиною перетворення напруги, а формально – площею ПП та варіантом конфігурації ТКВС, можна представити у вигляді матриць  $K_{f_q}(f_0)$ , що має п'ять стовпчиків ( $q=1 \dots Q$ ) та п'ять рядків ( $f=1 \dots F$ ).

$$K_{f_q}(f_0=1) = \begin{vmatrix} (\gamma^2-1)\gamma^0 & (\gamma-1) & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma & (\gamma^2-1)\gamma^{-1} \\ (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1) & (\gamma^2-1)\gamma^{-2} & (\gamma^3-1)\gamma^{-4} \\ (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^2-1)\gamma^{-3} & (\gamma^3-1)\gamma^{-5} & (\gamma^4-1)\gamma^{-4} \\ (\gamma-1)\gamma^{-2} & (\gamma^2-1)\gamma^{-4} & (\gamma^3-1)\gamma^{-6} & (\gamma^4-1)\gamma^{-5} & (\gamma^5-1)\gamma^{-7} \\ (\gamma^2-1)\gamma^{-5} & (\gamma^3-1)\gamma^{-7} & (\gamma^4-1)\gamma^{-6} & (\gamma^5-1)\gamma^{-8} & (\gamma^6-1)\gamma^{-10} \end{vmatrix}$$

$$K_{f_q}(f_0=2) = \begin{vmatrix} (\gamma^3-1)\gamma^{-1} & (\gamma^2-1)\gamma^{-1} & (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1) \\ (\gamma^2-1)\gamma^{-2} & (\gamma-1)\gamma^{-2} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^2-1)\gamma^{-3} \\ (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-2} & (\gamma^2-1)\gamma^{-4} & (\gamma^3-1)\gamma^{-3} \\ (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1)\gamma^{-5} & (\gamma^3-1)\gamma^{-4} & (\gamma^4-1)\gamma^{-6} \\ (\gamma-1)\gamma^{-4} & (\gamma^2-1)\gamma^{-6} & (\gamma^3-1)\gamma^{-5} & (\gamma^4-1)\gamma^{-7} & (\gamma^5-1)\gamma^{-9} \end{vmatrix}$$

$$K_{fq}(f_0=3) = \begin{vmatrix} (\gamma^4-1)\gamma^{-2} & (\gamma^3-1)\gamma^{-2} & (\gamma^2-1)\gamma^{-2} & (\gamma-1)\gamma & (\gamma^0-1)=0 \\ (\gamma^3-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1)\gamma^{-3} & (\gamma-1) & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-2} \\ (\gamma^2-1)\gamma^{-4} & (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1)\gamma^{-2} \\ (\gamma^0-1)\gamma^{-2} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-4} & (\gamma^2-1)\gamma^{-3} & (\gamma^3-1)\gamma^{-5} \\ (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-5} & (\gamma^2-1)\gamma^{-4} & (\gamma^3-1)\gamma^{-6} & (\gamma^4-1)\gamma^{-8} \end{vmatrix}$$

$$K_{fq}(f_0=4) = \begin{vmatrix} (\gamma^5-1)\gamma^{-3} & (\gamma^4-1)\gamma^{-3} & (\gamma^3-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1) & (\gamma-1) \\ (\gamma^4-1)\gamma^{-4} & (\gamma^3-1)\gamma^{-4} & (\gamma^2-1)\gamma^{-1} & (\gamma-1)\gamma^{-1} & (\gamma^0-1)=0 \\ (\gamma^3-1)\gamma^{-5} & (\gamma^2-1)\gamma^{-2} & (\gamma-1)\gamma^{-2} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-1} \\ (\gamma^2-1)\gamma^{-3} & (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-2} & (\gamma^2-1)\gamma^{-4} \\ (\gamma-1)\gamma^{-4} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1)\gamma^{-5} & (\gamma^3-1)\gamma^{-7} \end{vmatrix}$$

$$K_{fq}(f_0=5) = \begin{vmatrix} (\gamma^6-1)\gamma^{-4} & (\gamma^5-1)\gamma^{-4} & (\gamma^4-1)\gamma^{-4} & (\gamma^3-1)\gamma^{-1} & (\gamma^2-1)\gamma^{-1} \\ (\gamma^5-1)\gamma^{-5} & (\gamma^4-1)\gamma^{-5} & (\gamma^3-1)\gamma^{-2} & (\gamma^2-1)\gamma^{-2} & (\gamma-1)\gamma^{-2} \\ (\gamma^4-1)\gamma^{-6} & (\gamma^3-1)\gamma^{-3} & (\gamma^2-1)\gamma^{-3} & (\gamma-1)\gamma^{-3} & (\gamma^0-1)=0 \\ (\gamma^3-1)\gamma^{-4} & (\gamma^2-1)\gamma^{-4} & (\gamma-1)\gamma^{-4} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-3} \\ (\gamma^2-1)\gamma^{-5} & (\gamma-1)\gamma^{-5} & (\gamma^0-1)=0 & (\gamma-1)\gamma^{-4} & (\gamma^2-1)\gamma^{-6} \end{vmatrix}$$

Тепер для кожної конфігурації (кожного  $f_0$ ) треба знайти той режим (той чарунок ПП), у якому коефіцієнт  $K_{fq}(f_0)$  буде найбільшим, і за ним визначити встановлену потужність автотрансформатора для цієї конфігурації.

Виходячи з того, що потужність АТ та його масогабаритні показники тим більші, чим більша різниця  $\Delta K$  між одиницею (режим прямої передачі) та необхідним коефіцієнтом трансформації, розглянемо режими з найбільшими  $K_1(f_0)$  та найменшими коефіцієнтами трансформації – чарунки  $q=f=1$  (для яких  $\Delta K(f_0)=\Delta K_1(f_0)-1$ ) та  $q=f=5$  (для яких  $\Delta K(f_0)=\Delta K_9(f_0)-1$ ). Обираючи для порівняльної оцінки прийнятне значення похибки стабілізації/регулювання  $\pm 3\%$  ( $\delta=0,03$ ,  $\gamma=1,0618$ ), зведемо результати розрахунку у таблицю.

$f_0$	$K_1(f_0)-1$	$K_{11}(f_0)$	$1-K_9(f_0)$	$K_{55}(f_0)$
1	$\gamma^2-1=0,1275$	0,1275	$1-\gamma^{-6}=0,3022$	0,2375
2	$\gamma^3-1=0,1973$	0,1858	$1-\gamma^{-5}=0,2592$	0,2039
3	$\gamma^4-1=0,2713$	0,2406	$1-\gamma^{-4}=0,2123$	0,1678
4	$\gamma^5-1=0,35$	0,2923	$1-\gamma^{-3}=0,1648$	0,1296
5	$\gamma^6-1=0,433$	0,341	$1-\gamma^{-2}=0,1131$	0,089

У перших двох конфігураціях ( $f_0=1, f_0=2$ ) маємо  $(K_1-1) < (1-K_9)$ , тому логічним є те, що визначальним для розрахунку встановлених потужностей АТ є коефіцієнти  $K_{55(1)}$  та  $K_{55(2)}$ , які більші за  $K_{11(1)}$  та  $K_{11(2)}$ . Для трьох інших конфігурацій ( $f_0=3, f_0=4, f_0=5$ ), навпаки,  $(1-K_9) > (K_1-1)$ , тобто визначальними будуть коефіцієнти  $K_{11(3)}$ ,

$K_{11(4)}$  та  $K_{11(5)}$ . У випадку, якщо один АТ планується використовувати у всіх п'яти можливих конфігураціях, то слід орієнтуватися на "найтяжчий" (з точки зору глибини перетворення напруги) варіант з найбільшим значенням коефіцієнта  $K_{11(5)}=0,341$ .

Якщо прийняти, наприклад, що встановлена потужність АТ дорівнює 1 кВт (тобто використати для нього осердя трансформатора, розрахованого на 1 кВт), то стабілізатор/регулятор з таким АТ дозволить згідно з (10) жити споживача з максимальною потужністю  $P_{\text{нмак}}=P_{\text{АТ}}/0,341=1/0,341=2,93$  кВт. Зауважимо, що ця оцінка є орієнтовною – більш точно визначити цей показник можна лише при використанні викладеної у [2] методики розрахунку трансформуючих елементів з секціонованими обвитками, яка враховує не тільки обмежуючі втрати енергії у секціях обвитки, але й втрати в осерді, про які мова йшла раніше.

За необхідності розширення меж перетворення напруги (збільшення площі поля перетворення) при незмінній похибці підтримання (встановлення) напруги  $\delta$  або її зменшення при незмінному ПП необхідне збільшення кількості ключових елементів та регулювальних секцій АТ, що призведе до поглиблення багатоваріантності як у конфігураційному плані, так і в плані побудови ПП.

Додавання, наприклад, лише одного ключового елемента ( $N=7$ , тобто зростає на 16,7%) дозволить отримати збільшення кількості нетотожних станів структури (кількості коефіцієнтів передачі) до  $J=12$  (зростання у 1,67 разу) та практично такого самого збільшення кількості чарунків ПП – до 42. Доцільними видаються два варіанти структури: з  $N_1=4, N_2=3$  (рис. 3) та  $N_1=3, N_2=4$  (рис. 4).

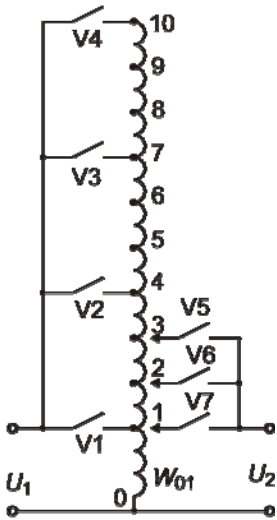


Рис. 3

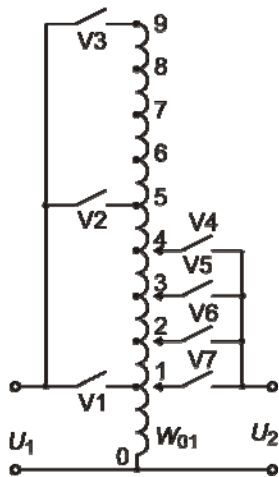


Рис. 4

Секціонування обвитки АТ виконується за тим самим законом (1), що й у попередньому випадку (рис. 2), тільки дещо збільшується кількість регулювальних секцій – до 9 (рис. 3) та 8 (рис. 4). Обидва варіанти можуть забезпечити формування будь-якого поля перетворення. Найбільш доцільним є вибір таких параметрів ПП:  $f=6, g=7$  або  $f=7, g=6$ , коли  $6 \times 7 = 7 \times 6 = 42$ . За необхідності змінити форму ПП можна брати, наприклад,  $f(g)=5, g(f)=8$  або  $f(g)=4, g(f)=9$ , але при цьому кількість чарунків ПП зменшиться до  $5 \times 8 = 40$  або  $4 \times 9 = 36$  відповідно, тобто буде спостерігатися певне "недовикористання" площі ПП. У граничному випадку –  $f=1, g=9$  – маємо стабілізацію напруги на одному рівні з похибкою  $\delta$  при зміні вхідної напруги у діапазоні  $\approx 17,6\delta$ .

Зауважимо, що у разі "прямолинійного підходу" – використанні одного комутатора (наприклад, у вхідному колі) для забезпечення тієї самої кількості

коєфіцієнтів передачі  $J=12$  – необхідне встановлення 12 ключових елементів та наявність відповідно 12 регулювальних секцій обвитки АТ, проте закон її секціонування (1) не змінюється.

**Висновки.** Запропонована базова трансформаторно-ключова виконавча структура стабілізатора напруги змінного струму з регулюванням рівня напруги, що стабілізується, дозволяє реалізовувати її реконфігурацію в разі необхідності зміни меж регулювання зазначених рівнів. При цьому алгоритм дискретно-разового керування ключовими елементами змін не потребує. Визначено доцільний закон секціонування обвитки автотрансформатора ТКВС, який при реконфігурації структури також залишається незмінним.

1. Глоссарий электротехнических терминов. Available at: <http://chillers.ru/glossary/electro.php> (accessed 16.05.2017).
2. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Моделювання трансформуючих елементів з секціонуванням обвиток у складі перетворювачів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 3. – С. 39–44.
3. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Особливості реалізації функції перетворення трансформаторно-ключової виконавчої структури регулятора-стабілізатора напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 35–39.
4. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 1983. – 216 с.
5. 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.
6. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 16.05.2017).
7. 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 9. – P. 98.
8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer, US Patent 6417651 B1, G05F1/14, 2002.
9. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Bärthlein, E.M. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies // 16th International Conf. IEEE "Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition" (PEMC), 21-24 Sep.2014, Antalya, Turkey. – Pp. 918–923.
10. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid // IEEE PES ISGT Europe 2013. – IEEE, 2013. – Pp. 1–5.

## ОСОБЕННОСТИ РЕКОНФИГУРАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СТАБИЛИЗАТОРА-РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

К.А. Липковский, докт.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net)

*Трансформирующие элементы с секционированием обмоток (tap changing transformers) являются составляющими трансформаторно-ключевых исполнительных структур (ТКИС) преобразователей напряжения переменного тока, которым присуща многовариантность схмотехнических и алгоритмических решений. В работе предложена базовая ТКИС стабилизатора с регулировкой уровня стабилизированного напряжения. Реконфигурация этой структуры позволяет целенаправленно изменять границы регулирования указанных уровней. Рассмотрены несколько вариантов такой реконфигурации. Определен целесообразный закон секционирования витков автотрансформатора ТКИС, который при реконфигурации не изменяется. Также остается неизменным и алгоритм дискретно-разового управления ключевыми элементами. Библ. 10, табл. 1, рис. 4.*

**Ключевые слова:** трансформирующий элемент, секционированная обмотка, tap changing transformer, трансформаторно-ключевая исполнительная структура, стабилизатор напряжения, регулирование уровня, discrete-time control.

## FEATURES OF THE RECONFIGURATION OF THE TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE OF THE STABILIZER-AC VOLTAGE REGULATOR

K.O. Lypkivskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net)

*Transforming elements with sectioning of windings are components of transformer-and-switches executive structures (TSES) of AC voltage converters, to which are inherent in the multivariate of circuit and algorithmic solutions. The basic TSES of stabilizer with regulation of the stabilized voltage level is proposed. Reconfiguration of this structure allows to purposefully change the limits of regulation of these levels. Several variants of such reconfiguration are considered. The expedient law of sectioning the turns of the TSES autotransformer is determined, which does not change during reconfiguration. Also, the algorithm of discrete-time control of switch elements remains unchanged.*

References 10, table 1, figures 4.

**Key words:** transforming element, sectionalized winding, tap changing transformer, transformer-and-switches executive structure, voltage stabilizer, level control, discrete-time control.

1. Glossary of electrical terms. Available at: <http://www.chillers.ru/glossary/electro.php> (accessed 16.05.2017).
2. Lypkivskyi K.O., Mozharovskiy A.G. Simulation of the transformative elements with sectioning of the windings as part of AC voltage source converters // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2016. – No 3. – Pp. 39–44. (Ukr)
3. Lypkivskyi K.O., Mozharovskiy A.G. Implementation features of the transfer function of the transformer-and-switches executive structure of the AC voltage regulator-stabilizer // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2017. – No 2. – Pp. 35–39. (Ukr)
4. Lypkivskyi K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
5. 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.
6. *Electronic Tap Switching Voltage Regulator*. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 16.05.2017).
7. 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 9. – Pp. 98.
8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. *US Patent* 6417651 B1, G05F1/14, 2002.
9. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Bärthlein, 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.
10. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J.D., Vandeveldel L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid // *IEEE PES ISGT Europe 2013*. – IEEE, 2013. – Pp. 1–5.
7. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. *US Patent* 6417651 B1, G05F1/14, 2002.

Надійшла: 17.05.2017

Остаточний варіант 26.05.2017