

## ВПЛИВ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ НАПРУГИ, ЩО СТАБІЛІЗУЄТЬСЯ, НА ПОТУЖНІСТЬ ТРАНСФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

**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](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*Проаналізовано множини можливих режимів роботи стабілізатора напруги змінного струму з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою, що містить у своєму складі трансформуючий елемент (ТЕ) з секціоновою обвиткою (tap changing transformer). Обґрунтовано можливість й доцільність обважнення робочих режимів шляхом збільшення розрахункової щільності струму в секціях обвитки з метою підвищення ефективності використання встановленої потужності обраного трансформуючого елемента. Визначена залежність цього показника від варіанта регулювання рівня напруги, що стабілізується. Проведено мультифізичне моделювання теплового режиму ТЕ. При цьому досягається збільшення максимальної вихідної потужності пристрою на рівні 12,5–27% без зміни обраного типорозміру осердя при забезпеченні його штатного теплового режиму. Бібл. 10, табл. 3, рис. 4.*

**Ключові слова:** трансформаторно-ключова виконавча структура, tap changing transformer, стабілізатор, поле перетворення, мультифізичне моделювання, ефективність використання трансформатора.

Для трансформуючих елементів (ТЕ) з секціонованими обвитками (discrete smart transformer [8], tap changing [10], tap switching [9]), що входять до складу систем перетворювальної техніки, зокрема перетворювачів напруги, у [3] було запропоновано методику розрахунку, яка, на відміну від відомих [1], враховує неоднаковість струмового завантаження окремих секцій обвитки у різних режимах роботи та неможливість одночасного максимального струмового завантаження всіх секцій. Доведено, що застосування цієї методики для розрахунку ТЕ трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) стабілізаторів напруги змінного струму на одному визначеному рівні дозволяє підвищити ефективність використання встановленої потужності таких ТЕ [3].

Якщо виникає необхідність реалізації більш складного виду перетворення, а саме стабілізації напруги при зміні рівня, за якого вона повинна відбуватися, підхід до розробки відповідної ТКВС буде відрізнятися певними особливостями.

У [4] для цього випадку запропоновано розглядати різні режими роботи ТКВС на так званому "полі перетворення" (ПП) – прямокутній зоні на площині  $U_1U_2$  ( $U_1U_2$  – вхідна та вихідна напруги перетворювача відповідно). Ця зона складається з  $Q \times F$  чарунків, де  $Q$  – кількість піддіапазонів зміни вхідної напруги, у межах яких відбувається стабілізація на  $f$ -му рівні, а  $F$  – кількість цих розрахункових рівнів (як зазначалося раніше, принципово можливою є стабілізація напруги на будь-якому необхідному рівні, який можна регулювати плавно, незважаючи на дискретно-разовий принцип керування [6] трансформаторно-ключовими виконавчими структурами).

На рис. 1 наведено приклад ПП з  $Q=F=5$ , тобто з 25 чарунками, в межах кожного з яких ТЕ працює як звичайний двообвитковий трансформатор із певним коефіцієнтом передачі (трансформації)  $K_j = U_{2j}/U_{1j}$ . Усі необхідні перетворення відбуваються шляхом зміни коефіцієнтів передачі (їхня кількість  $J=Q+F-1=9$ ), значенням яких відповідають тангенси кутів нахилу дев'яти відрізків променів, що виходять із центру координат. Реалізується ця процедура ТКВС з шістьма ключовими елементами – по три у вхідному та вихідному комутаторах (рис. 2). Це забезпечує отримання необхідних дев'яти станів ТКВС з нетотожними коефіцієнтами передачі ( $J=3 \times 3=9$ ), які обираються згідно з законом геометричної прогресії  $K_j = K_1 \gamma^{1-j}$  ( $j=1, \overline{J}$ ), де  $K_1 = K_{max}$  – перший (найбільший) коефіцієнт передачі, а  $\gamma$  – коефіцієнт, що визначається параметром  $\delta$  – значенням похибки стабілізації вихідної напруги:  $\gamma = (1 + \delta)/(1 - \delta)$ . Оскільки  $j=q+f-1$ , де  $q$  – номер піддіапазону стабілізації, а  $f$  – номер рівня регулювання напруги, коефіцієнт передачі можна представити у вигляді  $K_j = K_1 \gamma^{2-q-f}$ .

© Липківський К.О., Можаровський А.Г., 2017

\*ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-3292-1360>; \*\* <http://orcid.org/0000-0001-9801-2728>

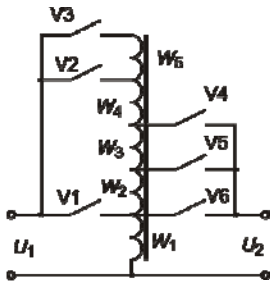


Рис. 1

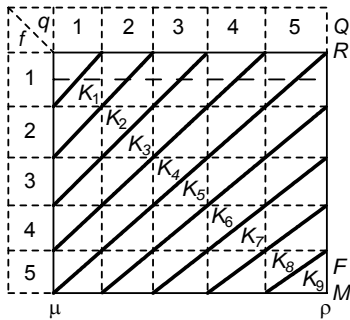


Рис. 2

Аналіз представленої на рис. 1 принципової схеми трансформаторно-ключової виконавчої структури ускладнюється не тільки тим, що на кожному рівні стабілізації доводиться визначати максимальні струми у кожній секції обвитки (й втрати в ній), але й тим, яким саме чином, тобто за яких умов, відбувається регулювання рівнів – залишається при цьому величина опору навантаження постійною, чи змінюється; а якщо так – то за яким законом.

Метою роботи є аналіз впливу умов регулювання рівня напруги, що стабілізується трансформаторно-ключовою виконавчою структурою, на встановлену (розрахункову) потужність трансформуючого елемента та визначення можливості підвищення ефективності її використання при відповідному контролі теплового стану елементів ТЕ.

У полі перетворення, що розглядається, реалізується варіант регулювання рівня напруги, яка стабілізується, тільки у бік зменшення відносно номінальної величини напруги  $U_n$ . Її нормованому значенню  $U_n^* = 1$  відповідає штрихова лінія у чарунках першого ряду, тобто при  $f_0 = 1$ . За необхідності регулювання рівня напруги у бік збільшення ця лінія буде зміщуватися, тобто  $f_0$  може зростати до  $F = 5$ . При цьому будуть змінюватися й виткові співвідношення секцій обвитки, проте процес (порядок) розрахунку значення коефіцієнтів передачі залишиться незмінним. (Зауважимо, що V1 та V6 на рис. 2 приєднані до однієї відпайки обвитки ТЕ лише з метою уникнення появи секції з малою кількістю витків, що ускладнювало б її реалізацію, але саме таке під'єднання не є

обов'язковим).

Поле перетворення, як видно з рис. 1, обмежується нормованими по  $U_n$  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  $U_{2min}/U_n = M$ ). Вказані у [4] параметри ПП пов'язані залежностями  $\rho = \mu\gamma^0 = \mu\gamma^5$ ,  $R = M\gamma^F = M\gamma^5$ . У режимі, коли працюють V1 та V6, коефіцієнт передачі  $K_3$  дорівнює одиниці, звідки маємо:  $K_2 = \gamma$  (V1, V5);  $K_1 = \gamma^2$  (V1, V4);  $K_4 = \gamma^{-1}$  (V2, V4);  $K_5 = \gamma^{-2}$  (V2, V5);  $K_6 = \gamma^{-3}$  (V2, V6);  $K_7 = \gamma^{-4}$  (V3, V4);  $K_8 = \gamma^{-5}$  (V3, V5);  $K_9 = \gamma^{-6}$  (V3, V6). Оскільки у третьому режимі до секції  $W_1$  прикладається вхідна напруга  $\mu\gamma^3$ , яка дорівнює вихідній напрузі  $R$  (на яку, власне, й буде розраховуватися  $W_1$ ), отримуємо  $\mu\gamma^3 = R = 1 + \delta = 2\gamma(\gamma + 1)^{-1}$ , звідки знаходимо  $M = 2(\gamma + 1)^{-1} \gamma^4$  та  $\rho = 2\gamma^3(\gamma + 1)^{-1}$ ,  $\mu = 2(\gamma + 1)^{-1} \gamma^{-2}$ .

Маючи значення коефіцієнтів передачі  $K_1 \div K_9$ , з аналізу режимів знаходимо нормовані по  $W_1$  кількості витків усіх секцій обвитки:  $W_1^* = 1$ ;  $W_2^* = \gamma - 1$ ;  $W_3^* = \gamma(\gamma - 1)$ ;  $W_4^* = \gamma^2(\gamma - 1)$ ;  $W_5^* = \gamma^3(\gamma^3 - 1)$  та відповідно максимальні напруги на них  $U_{W1}^* = 2\gamma(\gamma + 1)^{-1}$ ,  $U_{W2}^* = 2\gamma(\gamma - 1)(\gamma + 1)^{-1}$ ;  $U_{W3}^* = 2\gamma^2(\gamma - 1)(\gamma + 1)^{-1}$ ,  $U_{W4}^* = 2\gamma^3(\gamma - 1)(\gamma + 1)^{-1}$ ,  $U_{W5}^* = 2\gamma^4(\gamma - 1)(\gamma + 1)^{-1}$ .

Для подальшого аналізу задаємося прийнятною величиною похибки стабілізації/регулювання. Візьмемо, наприклад,  $\delta = 0,03$  ( $\pm 3\%$ ), для якої  $\gamma = 1,0618$ . Тоді будемо мати такі параметри поля перетворення:  $\mu = 0,8603$ ;  $\rho = 1,1614$ ;  $M = 0,7629$ ;  $R = 1,03$ . При цьому максимальні значення напруг на секціях обвитки ТЕ дорівнюватимуть  $U_{W1}^* = 1,03$ ;  $U_{W2}^* = 0,0637$ ;  $U_{W3}^* = 0,0676$ ;  $U_{W4}^* = 0,0718$ ;  $U_{W5}^* = 0,2432$ . Хоча у процесі роботи перетворювача ці напруги можуть у деяких режимах зменшуватися (наприклад, на  $W_1$  до  $\mu\gamma^2$  та  $\mu\gamma$ ), саме за ними розраховується кількість витків окремих секцій обвитки ТЕ.

Регулювання рівня напруги, що стабілізується, у випадку, коли він змінюється тільки у бік зменшення відносно номінальної напруги, визначається законом  $U_{2f}^* = U_{2max}^* \cdot \gamma^{1-f} = 2\gamma^{2-f}(\gamma + 1)^{-1}$  ( $f = 1, \bar{F}$ ). При цьому можливі різні вимоги з боку споживача щодо способу живлення навантаження. Розглянемо три найбільш очевидні варіанти.

1. Опір навантаження залишається незмінним, тобто максимальний вихідний струм при зміні рівня напруги змінюється за тим самим законом  $I_{2f}^* = I_{2max}^* \cdot \gamma^{1-f}$ , де  $I_{2max}^* = 2\gamma(\gamma + 1)^{-1}$ .

2. На всіх рівнях споживач може житися максимальним струмом  $I_{2f}^* = I_{2max}^*$ .

3. На всіх рівнях вихідна потужність може бути максимальною  $P_f^* = P_{nmax}^* = 4\gamma^2(\gamma + 1)^{-2}$ , тобто вихідний струм при зміні рівнів буде змінюватися за законом  $I_{2f}^* = I_{2max}^* / \gamma^{f-1}$ . (Зауважимо, що при роз-

рахунку струмів можна нехтувати втратами в АТ, які складають 1–2% від номінальної, і вважати, що потужність навантаження дорівнює потужності, що споживається з мережі. Проте саме втрати будуть основним об'єктом дослідження при визначенні теплового стану елементів АТ).

Для цих трьох варіантів реалізації регулювання (позначимо їх літерами **А**, **Б**, **В** відповідно) необхідно знайти максимальні струми у всіх секціях обвитки для кожного з  $fq$  чарунків поля перетворення, а потім визначити відповідні нормовані розрахункові потужності автотрансформатора

( $P_{fq}^* = 0,5 \sum_{i=1}^5 U_{W_{imax}}^* I_{W_{ifq}}^*$ ), які він мав би, якщо працював би тільки у цьому  $fq$ -му режимі.

Табл. 1 визначає, які саме струми протікають у кожній з п'яти секцій обвитки у конкретному режимі – вихідний  $I_{2f}^*$ , вхідний  $I_{1fq}^* = I_{2f}^* K_j$  або їхня різниця  $I_{0qf}^* = I_{2f}^* |K_j - 1|$ . Ця таблиця є придатною для всіх трьох зазначених вище підходів до регулювання рівня напруги, що стабілізується. Зрозуміло, що однаковим значенням коефіцієнта передачі в ній відповідають однакові конфігурації ТКВС (однакові сполучення працюючих ключових елементів), тобто колонки позначень струмів при однакових  $K_j$  будуть дублюватися. Проте, це не буде свідчити, що значення цих струмів будуть однаковими. Наприклад, у разі незмінного опору навантаження для  $j = f + q - 1 = 2$  ( $f + q = 3$ ), коли  $K_2 = \gamma^{f-1} = \gamma$ ,  $f=1$ ,  $q=2$ , матимемо  $I_2^* = I_{2max}^* = 2\gamma(\gamma+1)^{-1}$ , звідки  $I_1^* = 2\gamma^2(\gamma+1)^{-1}$ ,  $I_0^* = 2\gamma(\gamma-1)(\gamma+1)^{-1}$ , а при  $f=2$ ,  $q=1$  – відповідно  $I_2^* = I_{2max}^* \gamma^{-1} = 2(\gamma+1)^{-1}$ , звідки  $I_1^* = 2\gamma(\gamma+1)^{-1}$ ,  $I_0^* = 2(\gamma-1)(\gamma+1)^{-1}$ .

Таблиця 1

$f$	$q$								
1	1	2	3	4	5				
2		1	2	3	4	5			
3			1	2	3	4	5		
4				1	2	3	4	5	
5					1	2	3	4	5
$K = \gamma^{f+q}$	$\gamma^2$	$\gamma$	1	$\gamma^{-1}$	$\gamma^{-2}$	$\gamma^{-3}$	$\gamma^{-4}$	$\gamma^{-5}$	$\gamma^{-6}$
$W_1$	$I_0$	$I_0$	0	$I_0$	$I_0$	$I_0$	$I_0$	$I_0$	$I_0$
$W_2$	$I_2$	$I_2$	0	$I_0$	$I_0$	$I_1$	$I_0$	$I_0$	$I_1$
$W_3$	$I_2$	0	0	$I_0$	$I_1$	$I_1$	$I_0$	$I_1$	$I_1$
$W_4$	0	0	0	$I_1$	$I_1$	$I_1$	$I_1$	$I_1$	$I_1$
$W_5$	0	0	0	0	0	0	$I_1$	$I_1$	$I_1$

Розрахунок струмових завантажень різних секцій обвитки у всіх  $F \times Q$  чарунках поля перетворення підтвердив задекларовану на початку статті тезу про неможливість одночасного обтікання всіх секцій відповідними максимальними струмами. Так, наприклад, для варіанта регулювання рівня напруги, що стабілізується, при незмінному опорі навантаження найбільший можливий струм у першій секції  $I_{W1max}$  припадає на чарунок з  $f=5$ ,  $q=5$ ;  $I_{W2max}$  – на чарунки з  $f=1$ ,  $q=1$  або  $f=1$ ,  $q=2$ ;  $I_{W3max}$  – на чарунок з  $f=1$ ,  $q=1$ ;  $I_{W4max}$  – на чарунок з  $f=1$ ,  $q=4$ ;  $I_{W5max}$  – на чарунок з  $f=3$ ,  $q=5$ . При двох інших видах регулювання максимальні струми у секціях обвитки можуть припадати на інші чарунки, проте й тоді номери цих чарунків не будуть співпадати.

Наведений раніше вираз для знаходження  $P_{fq}^*$  можна подати таким чином:  $P_{fq}^* = P_{nmax}^* \cdot K_{fq}$ , де  $K_{fq}$  – коефіцієнт, що визначає, яку розрахункову потужність повинен мати автотрансформатор для забезпечення живлення споживача максимальною потужністю або – яку максимальну потужність можна споживати від ТКВС з обраним типорозміром осердя АТ, розрахункова потужність якого становить  $P_{fq}^*$ . Масив цих коефіцієнтів, що визначається функціональною складністю та глибиною перетворення напруги, а формально – площею поля перетворення та варіантом регулювання напруги, що стабілізується, для режиму регулювання **А** можна представити у вигляді матриці  $K_{fqA}$ , що має п'ять стовпців ( $q=1 \dots Q$ ) та п'ять рядків ( $f=1 \dots F$ ).

$$K_{fqA} = \begin{pmatrix} \gamma^2 - 1 & \gamma - 1 & 0 & (\gamma - 1)\gamma & (\gamma^2 - 1)\gamma^{-1} \\ (\gamma - 1)\gamma^{-1} & 0 & \gamma - 1 & (\gamma^2 - 1)\gamma^{-2} & (\gamma^3 - 1)\gamma^{-4} \\ 0 & (\gamma - 1)\gamma^{-1} & (\gamma^2 - 1)\gamma^{-3} & (\gamma^3 - 1)\gamma^{-5} & (\gamma^4 - 1)\gamma^{-4} \\ (\gamma - 1)\gamma^{-2} & (\gamma^2 - 1)\gamma^{-4} & (\gamma^3 - 1)\gamma^{-6} & (\gamma^4 - 1)\gamma^{-5} & (\gamma^5 - 1)\gamma^{-3} \\ (\gamma^2 - 1)\gamma^{-5} & (\gamma^3 - 1)\gamma^{-7} & (\gamma^4 - 1)\gamma^{-6} & (\gamma^5 - 1)\gamma^{-4} & (\gamma^6 - 1)\gamma^{-10} \end{pmatrix}$$

Як видно, складові цієї матриці  $K_{fqA}$ , визначені при аналізі всіх  $FQ$  станів ТКВС (всіх чарунків ПП), залежать лише від параметра  $\gamma$  (опосередковано – від похибки  $\delta$ ). Для двох інших варіантів регулювання рівня напруги, що стабілізується, маємо  $K_{fqB} = K_{fqA} \cdot \gamma^{(f-1)}$ ,  $K_{fqB} = K_{fqA} \cdot \gamma^{2(f-1)}$ . Для гіпотетичного

режиму **М** (якби у всіх секціях одночасно протікав максимальний струм), по якому розраховується встановлена потужність автотрансформатора, що визначає вибір типорозміру осердя, цей коефіцієнт можна записати наступним чином:  $K_{MA}=(\gamma^6-1)\gamma^{-10}+(2\gamma^5-\gamma^4-1)\gamma^{-3}$ ;  $K_{MB}=(\gamma^6-1)\gamma^{-6}+(3\gamma^3-\gamma^2-\gamma-1)\gamma^{-1}$ ;  $K_{MB}=(\gamma^6-1)\gamma^{-2}+\gamma(\gamma^5+\gamma^4-2\gamma^2+\gamma-1)$ .

Для визначення відносного завантаження АТ, обраного за режимом **М** у кожному окремому  $fq$ -му режимі роботи ТКВС, доцільно використовувати коефіцієнт  $K_{3fq} = K_{fq}/K_M$ .

Обраховані при прийнятому значенні  $\delta = \pm 3\%$  ( $\gamma = 1,0618$ ) нормовані за номінальною потужністю  $P_{fq}^*$  відносні розрахункові потужності АТ для всіх  $FQ$  чарунків ПП у варіанті **А** зведено у табл. 2.

Таблиця 2

fq	1	2	3	4	5
1	0,135	0,066	0	0,070	0,127
2	0,062	0	0,066	0,120	0,165
3	0	0,062	0,113	0,155	0,226
4	0,058	0,106	0,146	0,213	0,244
5	0,100	0,138	0,201	0,230	0,252

З таблиці видно, що найбільш завантаженим АТ виявляється у режимах  $f=q=5$  – відповідно 0,252 (**А**); 0,321 (**Б**); 0,408 (**В**), тобто розрахункові потужності АТ, нормовані за максимальним значенням вихідної потужності  $P_{nmax}^*$ , складала б відповідно – 23,77%; 30,13%; 38,43%. У гіпотетичному режимі **М** ці показники були б дещо більшими – 0,316; 0,361; 0,449 (29,8%; 34,03%, 42,3%). Таким чином, у режимі  $f=q=5$  автотрансформатор

виявляється інтегрально менше завантаженим по струму, ніж у режимі **М**:  $K_{355A}=0,252/0,316=0,796$ ;  $K_{355B}=0,321/0,361=0,889$ ;  $K_{355B}=0,408/0,445=0,917$ .

Це свідчить про доцільність (з метою визначення можливості підвищення цього коефіцієнта) проведення розрахунку такого АТ за запропонованою у [3] методикою, яка враховує як електричні, так і теплові процеси в ТЕ. Вона полягає у тому, що при певних заданих значеннях індукції в осерді та густини струму в секціях обвитки ТЕ, вибраних згідно з діючими рекомендаціями [1], розв'язується електрична задача та вираховуються втрати потужності в елементах АТ у всіх робочих режимах, а також у гіпотетичному режимі **М** – одночасного максимального струмового завантаження всіх секцій. Для нього за допомогою програм мультифізичного моделювання (наприклад, Comsol Multiphysics [7]) знаходиться значення максимальної температури в елементах АТ (це, по суті, та температура, яка була б у трансформаторі того самого типорозміру в номінальному режимі **М**) і температури в робочих режимах, які менші за максимальну. Далі обраховується, за яких об'єктів (при збільшенні густини струму в секціях обвитки) у робочому режимі з найбільшими втратами досягається ця максимальна температура. За інших величин струмів у секціях обчислюється нове збільшене припустиме значення потужності навантаження без зміни типорозміру осердя ТЕ.

Для порівняльної оцінки означених варіантів побудови і режимів роботи АТ доцільно визначити, яку максимальну потужність можна отримати у кожному випадку від конкретного автотрансформатора з встановленою потужністю  $P_{AT}^*$ . Згідно з наведеними вище залежностями максимальні потужності навантаження будуть визначатися таким чином:  $P_{HA}^* = P_{AT}^*/K_{MA} = 3,16 P_{AT}^*$ ,  $P_{HB}^* = P_{AT}^*/K_{MB} = 2,77 P_{AT}^*$ ,  $P_{HB}^* = P_{AT}^*/K_{MB} = 2,25 P_{AT}^*$ .

При подальшому дослідженні АТ оберемо, як і у [3], магнітопровід ШЛ40×80. Для ілюстрації взаємного розташування основних конструктивних елементів на рис. 3 показано (виходячи з симетрії АТ) чверть його перерізу по горизонтальній та вертикальній площинам, що проходять через центр мас О. Порядок розміщення секцій обвитки, починаючи від центрального стрижня осердя –  $W_1, W_2,$

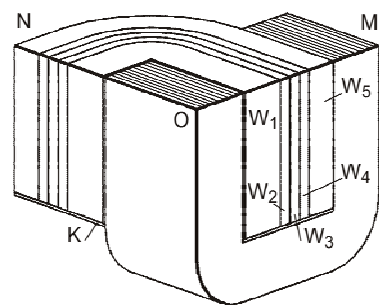


Рис. 3

$W_3, W_4, W_5$ . Для обраного типорозміру довжина ортогональних відрізків ON та OQ однакові й дорівнюють 0,08 м. Літерою К позначено каркас котушки з текстоліту товщиною 1 мм.

За тих самих, як і у [3], величин номінальної напруги  $U_{ном} = 220$  В та максимальної індукції в осерді 1,2 Тл, що виконано з електротехнічної сталі 3411 [5], отримуємо такі значення максимальних напруг на секціях обвитки та кількості їхніх витків:  $U_{W1} = 226,6$  В,  $W_1 = 307$ ;  $U_{W2} = 14,02$  В,  $W_2 = 19$ ;  $U_{W3} = 14,88$  В,  $W_3 = 20$ ;  $U_{W4} = 15,8$  В,  $W_4 = 21$ ;  $U_{W5} = 53,5$  В,  $W_5 = 72$ .

Обираючи, як і у [3], значення густини струму у секціях обвитки  $j=1,5 \text{ А/мм}^2$ , визначасмо для варіантів регулювання **А**, **Б** та **В** параметри секцій (поперечний переріз проводів, середню довжину витка, опір), максимальні значення струмів у них. Розрахована при цьому встановлена потужність обраного автотрансформатора становить 0,79 кВт, відповідно максимальні потужності навантаження для всіх режимів регулювання напруги, що стабілізується –  $P_{HA}^*=0,79 \text{ кВт} \cdot 3,16=2,5 \text{ кВт}$ ,  $P_{HB}^*=0,79 \text{ кВт} \cdot 2,77=2,18 \text{ кВт}$ ,  $P_{HB}^*=0,79 \text{ кВт} \cdot 2,25=1,77 \text{ кВт}$ .

Також були розраховані втрати потужності  $\Delta P$  (одиниця виміру Вт) для всіх секцій обвитки  $\Delta P_{W1} \dots \Delta P_{W5}$ , втрати в осерді  $\Delta P_{OC}$  та їхня сумарна величина  $\Delta P_{\Sigma}$  (див. табл. 3). Зауважимо, що при визначенні втрат в осерді АТ було враховано, що вхідна напруга, яка прикладається до однієї й тієї самої комбінації секцій обвитки, навіть при однаковому коефіцієнті передачі може бути різною у різних режимах роботи. Так, наприклад, при реалізації режимів з коефіцієнтом  $K_5=\gamma^{-1}$  вхідна напруга, що прикладається до секції ( $W_1+W_2+W_3+W_4$ ), зі зростанням  $f$  від 1 до 5 зменшується у  $\gamma^4$  рази, аналогічно зменшується й значення індукції в осерді та відповідно втрати потужності. Індукція в магнітопроводі найбільша ( $B_{\max}=1,2 \text{ Тл}$ ) у режимі  $f=1, q=3$  (саме на неї треба розраховувати осердя) і найменша ( $B_{\max} \cdot \gamma^{-6}=0,837 \text{ Тл}$ ) у режимі  $f=5, q=3$ . У робочому режимі ( $f=5, q=5$ ), який ми будемо далі розглядати, індукція має величину  $B_{5,5}=B_{\max} \cdot \gamma^{-4}=0,94 \text{ Тл}$ . Для цього режиму втрати в осерді дорівнюватимуть 6,64 Вт, в той час, як для режиму **М** – 8,44 Вт.

Таблиця 3

Варіант	А		Б		В	
Режим	$f=q=5$	М	$f=q=5$	М	$f=q=5$	М
$\Delta P_{W1}$	8,32	8,32	9,42	9,42	9,78	9,78
$\Delta P_{W2}$	0,79	2,62	1,14	2,35	1,42	2,04
$\Delta P_{W3}$	0,89	2,96	1,28	2,63	1,49	2,41
$\Delta P_{W4}$	1,06	3,14	1,51	2,76	1,65	2,67
$\Delta P_{W5}$	5,50	8,88	6,90	8,77	7,10	9,03
$\Delta P_{\Sigma W}$	16,56	25,92	20,25	25,92	21,44	25,92
$\Delta P_{OC}$	6,64	8,44	6,64	8,44	6,64	8,44
$\Delta P_{\Sigma}$	23,20	34,36	26,89	34,36	28,08	34,36

потужності самого АТ.

Отримані при розв'язанні електричної задачі значення втрат потужності у елементах автотрансформатора дозволяють розпочати мультифізичне моделювання для розв'язання теплової задачі та визначення теплового стану АТ у варіантах **А**, **Б**, **В**, як це було зроблено у [3], за тих самих спрощень,

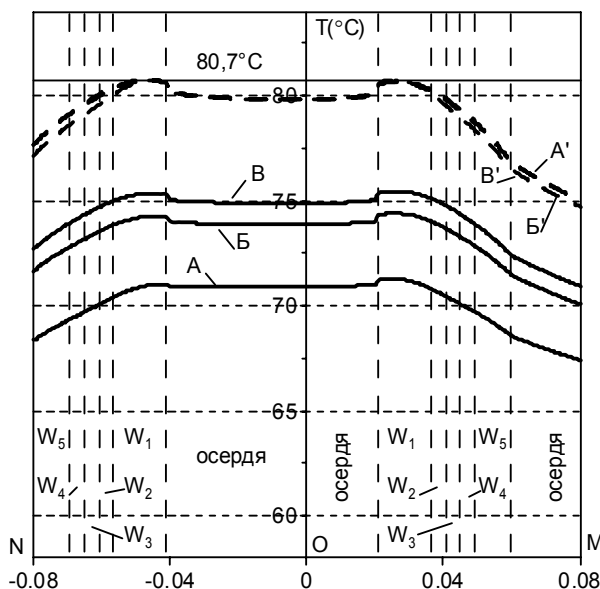


Рис. 4

умов і значень теплопровідності осердя ( $\lambda_{оср} = 4 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$ ), обвиток ( $\lambda_{обв} = 2 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$ ) й котушки ( $\lambda_{катуш} = 0,2 \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$ ) та загального коефіцієнта теплопередачі з поверхні  $\alpha = 11,77 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$ , еквівалентного сумі коефіцієнта тепловідведення з поверхні за рахунок конвекції  $\alpha_{кв} = 5 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$  та випромінювання при степені чорноти  $\epsilon = 0,8$  [2].

На рис. 4 показано графіки розподілу температури в елементах АТ вздовж ортогональних відрізків МО та ОН (див. рис. 3) для режиму  $f=q=5$  (з найбільшими втратами) трьох варіантів регулювання напруги, що стабілізується – **А**, **Б** та **В**. Ці графіки об'єднано та розміщено в одній координатній площині. На рис. 4 позначено суцільною прямою лінією температуру  $T_0=80,7^\circ\text{C}$  (це та величина, якої досягає АТ у режимі **М** в усіх варіантах), обрану нами за максимальне припустиме значення при до-

слідженні та порівняльній оцінці АТ у перетворювачах напруги з ТКВС.

Як видно, меншу температуру мають ділянки на зовнішній поверхні осердя ( $T_{AOC}=67,4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{BOC}=70,1^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{COOC}=71^{\circ}\text{C}$ ) та обвитки  $W_5$  ( $T_{AW_5}=68,3^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{BW_5}=71,7^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{CW_5}=72,7^{\circ}\text{C}$ ). Максимальна температура завжди спостерігається у обвитці  $W_1$ , причому  $T_{Amax}=71,3^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{Bmax}=74,4^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{Vmax}=75,5^{\circ}\text{C}$ , що значно менше за  $T_0$ . Тобто, тепловий стан АТ дозволяє у всіх трьох варіантах здійснити згідно з методикою [3] обважнення режимів (збільшення густини струму у секціях обвитки АТ у порівнянні з початковою), що призведе до збільшення втрат та відповідно зростання максимальних температур до обмежуючого значення  $T_0=80,7^{\circ}\text{C}$  (графіки розподілу температури при обважненні **А**, **Б**, **В** показано у верхній частині рис. 4 штриховими лініями). Головне, що при цьому досягається, – це підвищення вихідної потужності АТ обраного типорозміру до 3,18 кВт (на 27%) у варіанті **А**, до 2,52 кВт (на 16%) – у варіанті **Б** та до 1,99 кВт (на 12,5%) – у варіанті **В**. Наведені значення свідчать, що при функціональному ускладненні перетворення напруги обраний єдиний типорозмір трансформуючого елемента може забезпечити живлення споживача меншою потужністю або, що те саме, живлення споживача певної потужності потребуватиме переходу до ТЕ більшого типорозміру.

Аналізуючи графіки рис. 4, можна побачити перспективу подальшого збільшення ефективності використання встановленої потужності обраного АТ. Наприклад, якщо зменшити щільність струму у найбільш "гарячій" секції  $W_1$ , яка має найгірші умови для тепловідведення, підвищити щільність струму у "холодній" секції  $W_5$ , то це призводить до деякого "вирівнювання" температурних графіків рис. 4 та зменшення максимальних температур. Проте для оцінки величини очікуваного вирашу треба окреме дослідження.

#### **Висновки.**

До багатоваріантності, принципово притаманної всім трансформаторно-ключовим виконавчим структурам перетворювачів напруги змінного струму (зокрема, щодо схемотехнічних рішень, секціонування та розміщення обвиток трансформуючого елемента, типу магнітопроводу, режимів роботи тощо), у разі ускладнення функціонального перетворення напруги (стабілізація на будь-якому рівні в межах поля перетворення) додається багатоваріантність реалізації регулювання рівня напруги, що стабілізується.

Розроблена у [3] методика розрахунку трансформуючого елемента систем стабілізації виключно номінальної напруги дозволяє і для таких ТКВС (в залежності від варіанта функціонального перетворення) суттєво (для прикладу, що розглядається, на 12,5÷27%) підвищити ефективність використання встановленої потужності обраного типорозміру автотрансформатора.

1. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
2. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
3. 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.
4. 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.
5. ГОСТ 27427.1-83. Сталь электротехническая тонколистовая.
6. 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.
7. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
8. 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. – Pp. 1–5.
9. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 15.03.2017).
10. Engineering articles. Tap changing transformers. Available at: <http://top10electrical.blogspot.com/> (accessed 15.03.2017).

**ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**К.А. Липковский**, докт.техн.наук, **А.Г. Можаровский**, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,**

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

*Проанализировано множество возможных режимов работы стабилизатора напряжения переменного тока с трансформаторно-ключевой исполнительной структурой, содержащей в своем составе трансформирующий элемент (ТЭ) с секционированной обмоткой (tap chancing transformer). Обоснована возможность и целесообразность подгрузки рабочих режимов путем увеличения расчетной плотности тока в секциях обмоток с целью повышения эффективности использования установленной мощности выбранного трансформирующего элемента. Определена зависимость этого показателя от варианта регулирования стабилизированного уровня напряжения. Проведено мультифизическое моделирование теплового режима ТЭ. При этом достигается увеличение максимальной выходной мощности устройства на уровне 12,5-27% без изменения выбранного типоразмера сердечника при обеспечении его штатного теплового режима. Библи. 10, табл. 3, рис. 4.*

**Ключевые слова:** трансформаторно-ключевая исполнительная структура, tap chancing transformer, стабилизатор, поле преобразования, мультифизическое моделирование, эффективность использования трансформатора.

**EFFECT OF THE FEATURES OF THE LEVEL CONTROL OF THE STABILIZED VOLTAGE ON THE POWER OF THE TRANSFORMING ELEMENT OF THE AC VOLTAGE CONVERTER**

**K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy**

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

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

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

*Many of possible modes of operation of the AC voltage stabilizer with a transformer-and-switches executive structure containing a transforming element (TE) with a sectioned winding (tap chancing transformer) have been analyzed. The possibility and expediency of loading of the operating modes have been substantiated by increasing the design current density in the winding sections to increase the efficiency of using the installed power of the selected transforming element. The dependence of this indicator on the version of control of the stabilized voltage level is determined. A multiphysics modeling of thermal conditions of TE was carried out. Herewith, an increase in the maximum output power of the device is achieved at the level of 12,5-27% without changing the selected core size while ensuring its nominal thermal regime. References 10, tables 3, figures 4.*

**Key words:** transformer-and-switches executive structure, tap chancing transformer, стабилизатор напряжения, converting field, stabilizer, multiphysics modeling, utilization efficiency of transformer.

1. *Belopolskiy I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G.* Calculation of low-power transformers and reactors. – Moskva: Energiia, 1973. – 400 p. (Rus)
2. *Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I.* Cooling of industrial electric machinery. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. (Rus)
3. *Lypkivskiy 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)
4. *Lypkivskiy 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)
5. GOST 27427.1-83 Rolled Electrical Steel. (Rus)
6. *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.
7. *Comsol Multiphysics* – <http://www.comsol.com>.
8. *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*. – Pp. 1–5.
9. *Electronic Tap Switching Voltage Regulator*. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 15.03.2017).
10. *Engineering articles. Tap chancing transformers*. Available at: <http://top10electrical.blogspot.com/> (accessed 15.03.2017).

Надійшла: 20.03.2017

Остаточний варіант 22.03.2017