

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ МЕЖ ДІАПАЗОНУ ВХІДНОЇ НАПРУГИ НА ПОТУЖНІСТЬ ТРАНСФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ З ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЮ ВИКОНАВЧОЮ СТРУКТУРОЮ

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 обраної для стабілізатора напруги змінного струму трансформаторно-ключової виконавчої структури (ТКВС), трансформуючий елемент (ТЕ) якої має секціоновану обвитку, можна в разі потреби необхідним чином змінювати масив коефіцієнтів передачі шляхом певної її реконфігурації. Необхідність цього може обумовлюватися зокрема варіюванням меж заданого діапазону зміни вхідної напруги стабілізатора. У роботі досліджено вплив такого варіювання на встановлену потужність трансформуючого елемента ТКВС та обґрунтовано можливість підвищення ефективності використання ТЕ при збереженні його теплового стану в попередньо визначених межах. Це дає змогу або обирати менший типорозмір магнітопроводу ТЕ, або збільшувати припустиму потужність навантаження. Бібл. 15, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, discrete smart transformer, tap changing transformer, voltage stabilizer, перетворювач напруги змінного струму, секціонована обвитка, теплові процеси.

Один з найбільш розповсюджених типів трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) [1] або discrete smart transformer [2, 3] (intelligent transformer [4, 5], tap changing transformer [6, 7], tap switching transformer [8], multiple winding transformer [9]) перетворювачів (у цій статті – тільки стабілізаторів) напруги змінного струму виконується на основі автотрансформатора (АТ) з обвиткою, що крім кінцевих виводів (початок і кінець обвитки) має n проміжних відводів, до яких можуть під'єднуватися N ключових елементів (КЕ) "вхідного" – N_1 та "вихідного" – N_2 комутаторів ($N_1 + N_2 = N$). У обвитці між сусідніми відводами утворюються елементарні (по суті – "структуроутворюючі") секції. З них формуються регульовальні секції, кількість витків у яких в багатьох випадках обирається розробниками без достатнього обґрунтування.

Доведено, зокрема у [10], що доцільним є таке розташування зазначених відводів, при якому потенціал кожного з них, нормований за напругою базової секції обвитки W_0 , повинен обиратися за законом $\varphi_i^* = \varphi_i / U_{W_0} = \gamma^{i-1}$, ($i=1, (n-1)$), де γ – параметр, що визначається або межами зміни вихідної напруги $\gamma = U_{2max} / U_{2min}$, або більш вживаним параметром – похибкою стабілізації $\delta = (\gamma - 1) / (\gamma + 1)$. Таким чином, обвитка АТ складається з базової секції W_0 та n елементарних секцій, відносна кількість витків яких змінюється за законом $W_i^* = W_i / W_0 = (\gamma - 1) \gamma^{i-1}$, ($i=1, (n-1)$). Зауважимо, що кількість проміжних відводів та відповідно елементарних секцій визначається залежністю $n = (N_1 - 1) N_2$.

За однієї й тієї самої загальної кількості КЕ можлива побудова певної множини виконавчих структур, що відрізняється розподілом КЕ між двома комутаторами та кроками зміни кількості витків секцій обвитки АТ у вхідному та вихідному колах ТКВС. У [10] доведено, що кращі масогабаритні показники мають перетворювачі на основі структур, у яких "вихідний" комутатор реалізує "дрібний" крок регулювання, перемикаючи елементарні секції у вихідному колі ТКВС, а "вхідний", що має $(N_1 - 1)$ комбіновану секцію – у N_2 рази більший крок, перемикаючи зазначені комбіновані секції, що складаються з $(N_2 - 1)$ відповідних елементарних секцій. При цьому структура залишається незмінною навіть за певної реконфігурації, а саме – зміни місця приєднання до відводів обвитки ключів вихідного комутатора. Кількість можливих конфігурацій такої ТКВС визначається залежністю $Q = (N_1 - 2) N_2 + 2$.

У [10] було проаналізовано, як шляхом реконфігурації ТКВС реалізується регулювання рівня напруги, що стабілізується у певному діапазоні зміни вхідної напруги, та зазначено, що аналогічною реконфігурацією можна також зміщувати межі зазначеного діапазону у випадку стабілізації вихідної напруги на потрібному рівні. Необхідність цього може виникнути тоді, коли в окремих мережах спостерігаються усталені відхилення напруги від номінальної або в бік збільшення (нові мережі), або у

бік зменшення ("слабкі", перевантажені мережі). Тобто, проектуючи стабілізатори напруги змінного струму на основі ТКВС, треба брати до уваги характер мережі, у якій вони будуть функціонувати.

Метою роботи є визначення залежності формування регульовальних секцій обвитки автотрансформатора ТКВС стабілізатора напруги змінного струму та розрахункової величини його встановленої потужності від зміни меж діапазону вхідної напруги, на якому відбувається стабілізація напруги живлення споживача.

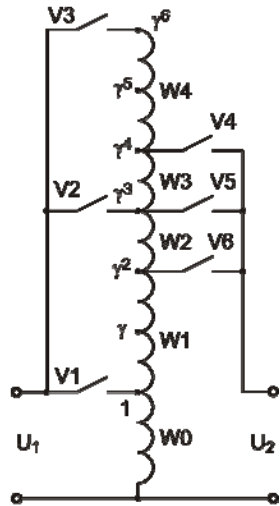


Рисунок 1

На рис. 1 показано, як приклад, ТКВС із шістьма ключовими елементами ($N_1=N_2=3$), у якій реалізується робота у дев'яти нетотожних станах ($J=N_1 \times N_2=9$) з відповідними дев'ятьма нетотожними коефіцієнтами передачі за напругою. (Зауважимо, що всі етапи дослідження особливостей реконфігурації ТКВС залишаються такими самими й при збільшенні кількості КЕ, яке може бути пов'язано як з підвищенням вимог до точності стабілізації вихідної напруги, так із розширенням припустимого діапазону зміни вхідної напруги).

Цю структуру із зафіксованим під'єднанням ключових елементів V1, V2, V3 до відводів обвитки з потенціалами 1, γ^3 , γ^6 можна відтворити у 5 конфігураціях ($Q=(3-2) \times 3+2=5$), у яких ключові елементи V4, V5, V6 під'єднуються відповідно до відводів з потенціалами ($\gamma^4, \gamma^5, \gamma^6$), ($\gamma^3, \gamma^4, \gamma^5$); ($\gamma^2, \gamma^3, \gamma^4$); ($\gamma, \gamma^2, \gamma^3$); (1, γ, γ^2). Алгоритм зміни станів ТКВС шляхом комутації КЕ для всіх конфігурацій однаковий. Так, наприклад, у разі підвищення вхідної напруги, яке вимагає зменшення коефіцієнта передачі АТ, послідовність введення у дію КЕ наступна: V1 (V4 \rightarrow V5 \rightarrow V6) \rightarrow V2 (V4 \rightarrow V5 \rightarrow V6) \rightarrow V3 (V4 \rightarrow V5 \rightarrow V6). Для кожної q -ої конфігурації ($q=1, \overline{Q}$) мінімальні

$U_{1q_{\min}}$ та максимальні $U_{1q_{\max}}$ межі діапазону зміни вхідної напруги, нормовані за номінальним значенням вихідної напруги $U_{2н}$, визначаються наступним чином:

$$\mu_q = U_{1q_{\min}} / U_{2н} = 2(\gamma+1)^{-1} \gamma^{q-7}, \quad (1)$$

$$\rho_q = U_{1q_{\max}} / U_{2н} = \mu_q \gamma^9 = 2(\gamma+1)^{-1} \gamma^{q+2}. \quad (2)$$

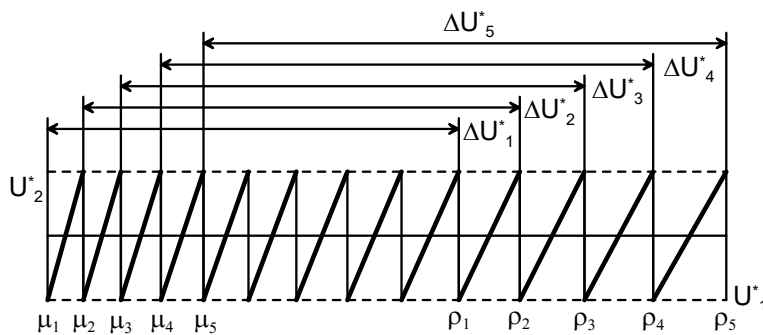


Рисунок 2

З цього рисунка, на якому також показано межі μ_1 та ρ_1 , μ_2 та ρ_2 , μ_3 та ρ_3 , μ_4 та ρ_4 , μ_5 та ρ_5 , видно, як з реконфігурацією відбувається необхідний зсув меж діапазону вхідної напруги. Його ширина ΔU_1^* при нормуванні за значенням $U_{2н}$ виявляється залежною від номера конфігурації

$$\Delta U_1^* = \Delta U_1 / U_{2н} = \rho_q - \mu_q = 2(\gamma^9 - 1)(\gamma + 1)^{-1} \gamma^{q-7} = f(q). \quad (3)$$

Проте слід зауважити, що при цьому змінюється й середнє значення вхідної напруги цього діапазону, відносно якої й відстежується її відхилення до визначених меж – нижньої μ_q та верхньої ρ_q

$$U_{1cp}^* = 0,5(\rho_q + \mu_q) = (\gamma^9 - 1)(\gamma + 1)^{-1} \gamma^{q-7} = f(q), \quad (4)$$

і яке можна трактувати як умовну номінальну вхідну напругу для q -ої конфігурації ТКВС. Тобто логічним видається нормування виразу для діапазону зміни U_1 саме за U_{1cp}^*

$$\Delta U_1^* / U_{1cp}^* = 2(\gamma^9 - 1)(\gamma + 1)^{-1} \neq f(q). \quad (5)$$

На рис. 3 зображено секціоновану обвитку трансформуючого елемента п'яти конфігурацій ТКВС, що розглядається, у якій, власне, й відбувається реконфігурація від варіанту з $q=1$ (рис. 3, а) до варіантів $q=2$ (рис. 3, б), $q=3$ (рис. 3, в), $q=4$ (рис. 3, г), $q=5$ (рис. 3, д).

Як видно, фактичні регулювальні секції W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 , що певним чином комплексуються з зазначених елементарних секцій, формуються у різних конфігураціях по-різному. При нормуванні кількості їхніх витків за кількістю витків базової секції для першої та другої конфігурації маємо

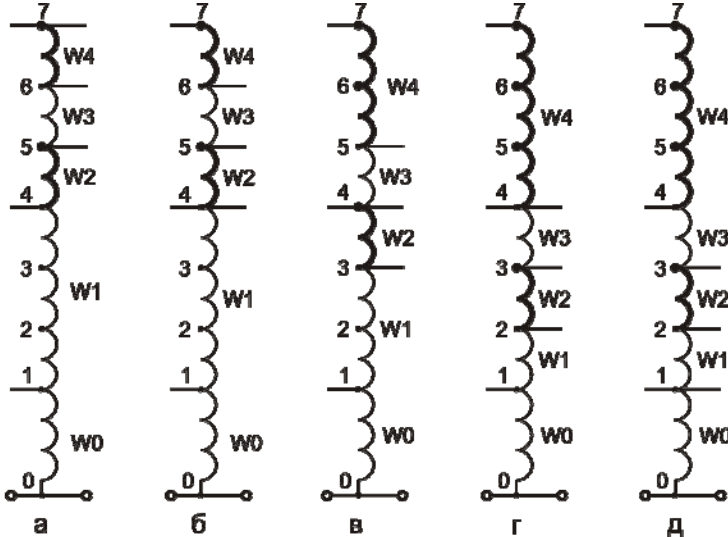


Рисунок 3

$W_1^* = W_1/W_0 = (\gamma^3 - 1)$, $W_2^* = (\gamma - 1)\gamma^3$, $W_3^* = (\gamma - 1)\gamma^4$, $W_4^* = (\gamma - 1)\gamma^5$; для третьої конфігурації – $W_1^* = (\gamma^2 - 1)$, $W_2^* = (\gamma - 1)\gamma^2$, $W_3^* = (\gamma - 1)\gamma^3$, $W_4^* = (\gamma^2 - 1)\gamma^4$; для четвертої та п'ятої конфігурацій – $W_1^* = (\gamma - 1)$, $W_2^* = (\gamma - 1)\gamma$, $W_3^* = (\gamma - 1)\gamma^2$, $W_4^* = (\gamma^3 - 1)\gamma^3$. Проте навіть за однакових виразів для визначення W_i^* (наприклад, для першої та другої конфігурацій) розрахункові абсолютні значення напруг цих секцій будуть відрізнятися внаслідок того, що вони нормуються за максимальною напругою базової секції ($U_{Wiq}^* = U_{W0q} \cdot W_i^*$), яка відповідає моментам переходів з третього ($j=3$) до

четвертого ($j=4$) стану, з шостого ($j=6$) до сьомого ($j=7$) стану або наприкінці дев'ятого та залежить від конфігурації

$$U_{W0q}^* \max = \mu_q \cdot \gamma^3 = 2(\gamma + 1)^{-1} \gamma^{q-4}. \quad (6)$$

Тобто, наприклад, для третьої конфігурації ($q=3$) ТКВС, що розглядається, максимальні розрахункові значення напруги на базовій та регулювальній секціях обвитки АТ будуть визначатися через параметр γ (опосередковано через похибку δ) наступним чином: $U_{W0}^* = 2/\gamma(\gamma + 1)$; $U_{W1}^* = 2(\gamma - 1)/\gamma$; $U_{W2}^* = 2\gamma(\gamma - 1)/(\gamma + 1)$; $U_{W3}^* = 2\gamma^2(\gamma - 1)/(\gamma + 1)$; $U_{W4}^* = 2\gamma^3(\gamma - 1)$.

Щодо струмів у всіх секціях, то вони у кожній конфігурації по-різному залежать від стану ТКВС, тобто від j . Для тієї ж третьої конфігурації маємо: у першому стані – ($j=1$) $I_{W0}^* = 2\gamma(\gamma^4 - 1)/(\gamma + 1)$, $I_{W1}^* = I_{W2}^* = I_{W3}^* = 2\gamma/(\gamma + 1)$, $I_{W4}^* = 0$; у четвертому стані – ($j=4$) $I_{W0}^* = I_{W1}^* = I_{W2}^* = 2\gamma(\gamma - 1)/(\gamma + 1)$, $I_{W3}^* = 2\gamma/(\gamma + 1)$, $I_{W4}^* = 0$; у сьомому стані – ($j=7$) $I_{W0}^* = I_{W1}^* = I_{W2}^* = I_{W3}^* = 2(\gamma - 1)/\gamma$, $I_{W4}^* = 2/\gamma(\gamma + 1)$. Аналогічно знаходяться струми у секціях обвитки для інших станів цієї конфігурації та всіх станів наступних чотирьох конфігурацій.

У жодному стані струми усіх секцій не набувають одночасно максимальних значень, хоча саме для такого гіпотетичного стану (позначеного буквою **М**) зазвичай і ведеться розрахунок встановленої потужності автотрансформатора, яка визначається напівсумою добутку максимальних напруг і струмів усіх секцій. Отримані для п'яти конфігурацій аналітичні залежності встановлених потужностей АТ, нормовані за номінальною потужністю споживача P_{qi}^* , представлено формулами (7)–(11)

$$P_{1M}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{\gamma^6 - 1}{\gamma^4}, \quad (7) \quad P_{11}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{\gamma^6 - 1}{\gamma^4}, \quad (7')$$

$$P_{2M}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{3\gamma^5 - \gamma^4 - 2}{2\gamma^3}, \quad (8) \quad P_{21}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{\gamma^5 - 1}{\gamma^3}, \quad (8')$$

$$P_{3M}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{3\gamma^4 - \gamma^2 - 2}{2\gamma^2}, \quad (9) \quad P_{31}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right)^2 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^2}, \quad (9')$$

$$P_{4M}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \frac{2\gamma^8 - \gamma^5 - 1}{2\gamma^2}, \quad (10) \quad P_{41}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \frac{\gamma^5 - 1}{\gamma^5}, \quad (10')$$

$$P_{5M}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \frac{3\gamma^8 - \gamma^7 - \gamma^5 - 1}{2\gamma^6}, \quad (11) \quad P_{51}^* = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \frac{\gamma^6 - 1}{\gamma^6}. \quad (11')$$

Аналіз всіх станів усіх зазначених конфігурацій ТКВС показав, що практично можливе найбільше сумарне струмове навантаження усіх секцій АТ припадає або на перший стан ($j=1$, працюють ключі V1, V4) – у першій ($q=1$), другій ($q=2$) та третій ($q=3$) конфігураціях або на останній дев'ятий стан ($j=1$) – у четвертій ($q=4$) та п'ятій ($q=5$) конфігураціях. Відповідні аналітичні залежності P_{qj}^* саме для цих випадків представлені формулами (7')–(11'). Це струмове завантаження секцій обвитки завжди (виняток – перша конфігурація) у тій чи іншій мірі менше завантаження у режимі **М**. Тобто у разі розрахунку встановленої потужності ТЕ з орієнтацією на режим **М** вона у випадках, які реалізуються на практиці, виявляється недовикористаною. Виходячи з цього, в [11] було запропоновано методику розрахунку трансформаторного елемента такого ТКВС, що дає змогу підвищити ефективність використання магнітопроводу АТ (або при заданій потужності споживача обрати менший типорозмір магнітопроводу, або при тому самому його типорозмірі живити більш потужне навантаження).

Ця методика передбачає використання мультифізичного підходу до розрахунку автотрансформатора. В ній можна виокремити основні етапи.

На першому етапі залежно від заданого діапазону зміни вхідної напруги, у межах якого відбувається стабілізація вихідної напруги з обумовленою похибкою δ (та відповідним параметром γ), визначається необхідна кількість станів структури J (опосередковано – кількість ключових елементів N_1, N_2) та обирається відповідна конфігурація ТКВС.

Для зазначеного гіпотетичного режиму **М** з отриманих вище аналітичних залежностей знаходяться нормовані за номінальними значеннями параметрів величини напруг та струмів у секціях обвитки АТ, відносні значення площ, які вони займають у вікні магнітопроводу. Згідно із заданою величиною потужності навантаження стабілізатора напруги за однією з формул (7)–(11) визначається орієнтовна величина встановленої потужності автотрансформатора, обирається типорозмір та матеріал осердя магнітопроводу. Для загальноприйнятих (унормованих) значень індукції в осерді та щільності струму в проводі обвитки розраховуються кількість витків, геометричні розміри та активні опори секцій обвитки, визначаються максимальні втрати енергії у кожній секції обвитки і в осерді магнітопроводу.

На другому етапі проводиться моделювання теплових процесів у автотрансформаторі (наприклад, з використанням програми Comsol) і визначається максимальна температура у його елементах, яка могла би бути у випадку повного одночасного струмового завантаження всіх секцій обвитки та максимальної індукції в осерді (режим **М**). Ця температура приймається за максимально допустимим для ТЕ з обраним магнітопроводом (T_{Mmax}).

На третьому етапі розраховуються реальні втрати енергії в елементах автотрансформатора у визначальному для обраної конфігурації стані (першому або дев'ятому) та знаходиться найбільша для цього стану температура T_{jmax} . Потім виконується "обважнення" режиму шляхом збільшення густини струму (тобто й втрат) в обвитці доти, поки температура T_{jmax} не досягне T_{Mmax} . Ця процедура фактично означає, що зростають значення всіх струмів, зокрема й струму навантаження, збільшується потужність, яка може споживатися від обраного автотрансформатора, що свідчить про підвищення ефективності його використання.

Для аналізу впливу на цей показник варіювання меж діапазону зміни вхідної напруги стабілізатора, яка визначає відповідну реконфігурацію його структури, перейдемо до конкретного прикладу. Розглянемо ТКВС (за схемою рис. 1) стабілізатора напруги змінного струму, призначеного для споживачів з низьковольтним живленням ($U_{2n}=220$ В), що забезпечує похибку стабілізації $\pm 3\%$ ($\delta=0,03$, $\gamma=1,0618$). Розраховані згідно з формулами (3), (4) і (7)–(11), (7')–(11') можливі параметри діапазону зміни вхідної напруги та нормовані за номінальним значенням вихідної потужності величини встановленої потужності автотрансформатора для гіпотетичного варіанта **М** (P_{qM}^*) і для станів з найбільшим струмовим завантаженням секцій обвитки (P_{qj}^*) зведено у табл. 1.

З аналізу отриманих даних випливає, що орієнтований на режим **М** автотрансформатор у реальних режимах для чотирьох конфігурацій недозавантажений, коефіцієнт ефективності його викорис-

Таблиця 1

q	$U_1, \text{В}$	P_{qM}^*	P_{qj}^*	$K_e, \%$
1	202±53	0,362	0,363	100
2	214±56	0,345	0,310	89,9
3	228±60	0,326	0,256	79,0
4	242±64	0,327	0,275	84,2
5	257±68	0,369	0,320	88,7

Таблиця 2

q	1	2	3	4	5
$S_{W0} (\%)$	50,0	45,0	39,5	39,6	44,4
$S_{W1} (\%)$	22,7	25,3	18,6	9,5	9,1
$S_{W2} (\%)$	8,6	9,5	10,1	10,0	9,6
$S_{W3} (\%)$	9,0	10,1	10,8	10,7	9,6
$S_{W4} (\%)$	9,7	10,1	21,0	30,2	27,3

тання K_e буде менший 100%. Це свідчить про можливість і доцільність певного перерахунку параметрів автотрансформатора (шляхом задекларованого вище обважнення режиму) з метою збільшення цього показника. Проте висновок про можливий ступінь обважнення можна буде зробити лише після визначення теплового стану (максимальної температури) елементів автотрансформатора – обвитки та магнітопроводу.

Представляючи через обране значення γ аналітичні залежності напруг та струмів секцій обвитки для всіх конфігурацій, що розглядаються, знаходимо також співвідношення площ S , які займають у вікні осердя магнітопроводу ці секції (з врахуванням каркасу обвитки) незалежно від абсолютного значення потужності навантаження (див. табл. 2).

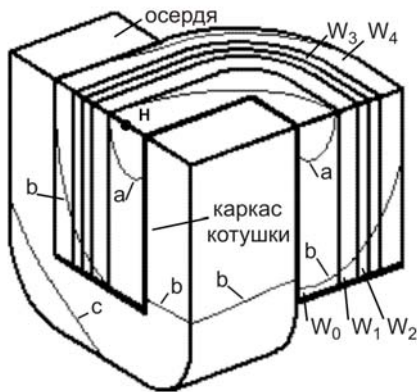


Рисунок 4

При дослідженні оберемо для автотрансформатора, як і у попередніх роботах (зокрема, в [11]), магнітопровід ШЛ40×80. Виходячи з симетрії об'єкта відносно трьох ортогональних площин, для спрощення розглядаємо одну восьму його частину, що зображена на рис. 4 (зауважимо, що у реальному трансформуючому елементі всі три площини симетрії – горизонтальна та дві вертикальні – є внутрішніми). Порядок розміщення секцій обвитки у всіх конфігураціях однаковий – починаючи від центрального стрижня осердя – W_0, W_1, W_2, W_3, W_4 . На рис. 4 співвідношення їхніх перерізів відповідають конфігурації $q=3$.

Приймаючи те саме значення індукції в осерді ($B=1,2 \text{ Тл}$), за отриманими вище формулами (7')–(11') обчислюємо значення максимальних напруг на секціях та кількості їхніх витків. За тієї самої, як і раніше, величини щільності струму у секціях обвитки

($1,5 \text{ А/мм}^2$) розраховуємо для усіх конфігурацій ТКВС втрати потужності в елементах АТ (ΔP_W – обвитці, ΔP_{cm} – сталі магнітопроводу, ΔP_Σ – сумарні) у найбільш завантажених робочих станах ТКВС: першому ($j=1$) або дев'ятому ($j=9$) – в залежності від конфігурації. Отримані значення наведено у табл. 3 (три перші рядки). Як видно, характер залежності $\Delta P_\Sigma=f(q)$ корелюється з характером залежності коефіцієнта ефективності використання АТ від отриманої конфігурації (див. табл. 2). Сумарні втрати енергії в елементах автотрансформатора у гіпотетичному режимі **М** не залежать від конфігурації і дорівнюють 34,95 Вт. Порівняння отриманих значень втрат опосередковано чисельно підтверджує можливість підвищення щільності струму і, власне, струмів у секціях обвитки АТ, збільшення припустимих значень струму та відповідно максимальної потужності навантаження при незмінному обраному осерді магнітопроводу.

Таблиця 3

q	1		2		3		4		5	
j	1	1 _{обв}	1	1 _{обв}	1	1 _{обв}	9	9 _{обв}	9	9 _{обв}
$\Delta P_W (\text{Вт})$	26,5	27,3	22,9	26,8	19,3	25,7	19,2	25,5	20,4	25,7
$\Delta P_{cm} (\text{Вт})$	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	8,4	8,4	8,4	8,4
$\Delta P_\Sigma (\text{Вт})$	33,9	34,7	30,4	34,3	26,8	33,2	27,6	34,0	28,8	34,1
$t_{max} (\text{°C})$	80,4	81,0	77,7	81,0	74,9	81,0	75	81,0	76,1	81,0
$t_{min} (\text{°C})$	71,4	71,6	68,7	71,2	66,2	70,3	66,9	71,1	67,6	71,1
$P_n (\text{кВА})$	1,98	2,06	2,21	2,39	2,36	2,72	2,33	2,70	2,24	2,51
$\delta P_n (\%)$		4		8		16		15		12

З метою конкретизації розмірів зазначеного обважнення необхідно перейти до наступної частини дослідження – мультифізичного моделювання для розв'язання теплової задачі – визначення теплового стану елементів автотрансформатора для усіх конфігурацій ТКВС з застосуванням програми

Comsol Multiphysics [12].

До складу моделі автотрансформатора ввійшли основні елементи: осердя магнітопроводу, каркас котушки обвиток і власне обвитки W_0-W_4 . Моделювання проводилося за умови, що зовнішня температура становить 50°C , теплообмін із зовнішнім середовищем є однаковим вздовж всієї поверхні об'єкта. При цьому для теплопровідності елементів вибрано наступні величини: осердя магнітопроводу $\lambda_{\text{маг}}=4 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, для всіх секцій обвитки прийнято однакове значення $\lambda_{\text{обв}}=2 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ і каркас котушки з найменшим з усіх складових величиною $\lambda_{\text{катуш}}=0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ [13, 14]. Крім того, для спрощення взято незмінний загальний коефіцієнт теплопередачі з поверхні $\alpha=11,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2\times\text{К})$ [15], еквівалентний результату одночасної дії від природної конвекції з поверхні з коефіцієнтом тепловідведення $\alpha_{\text{кв}}=5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\times\text{К})$ та випромінюванню за степені чорноти $\epsilon=0,8$.

Отримані в результаті математичного моделювання (симуляції) значення максимальної та мінімальної температур об'єкта дослідження у всіх п'яти конфігураціях ТКВС для робочих режимів $j=1$ ($q=1, q=2, q=3$), або $j=9$ ($q=4, q=5$) зафіксовані у четвертому та п'ятому рядках табл. 3. При цьому градієнт температур для них складає відповідно $9,0^\circ\text{C}$, $9,0^\circ\text{C}$, $8,7^\circ\text{C}$, $8,1^\circ\text{C}$, $8,5^\circ\text{C}$, а його відносна зміна лежить в межах від 10,8 до 11,6%, яка свідчить про те, що суперпозиція втрат у конфігураціях не однакова. Як видно, абсолютні значення максимальних температур у різних конфігураціях відрізняються мало, проте ступінь перегріву елементів АТ відносно температури навколишнього середовища ($t_{\text{maxq}}=50^\circ\text{C}$) також певним чином корелюється зі значеннями максимальних втрат. У режимі **М** ці показники внаслідок більших максимальних загальних втрат енергії у АТ дещо більші – $t_{\text{Mmax}}=81^\circ\text{C}$, $t_{\text{Mmin}}=71,7^\circ\text{C}$. Температурне поле у цьому гіпотетичному режимі представлено задля наочності на рис. 4 ізотермами **a** ($t=80,7^\circ\text{C}$), **b** ($t=77,5^\circ\text{C}$), **c** ($t=74,5^\circ\text{C}$), а точку з максимальною температурою t_{Mmax} (яку ми обрали за максимально припустимою при можливих змінах щільності струму в обвитці у процесі обважнення режимів) позначено літерою Н.

Такий характер розподілу температур визначається тим, що:

- різними є умови тепловідведення (охолодження) у різних точках об'єкта дослідження, зокрема у його центрі та периферії;
- основним джерелом тепловиділення є обвитка ТЕ (згідно з даними табл. 3 втрати енергії у ній складають $\sim 75\%$ від загальних втрат у ТЕ), причому найгарячіша її ділянка припадає на частину базової секції W_0 , що межує з горизонтальною площиною моделі;
- осердя, у якому втрати енергії втричі менші, виступає при цьому певним охолоджувачем (радіатором) для обвитки; за інших співвідношень втрат у елементах ТЕ найгарячішим може стати внутрішній стрижень осердя магнітопроводу;
- каркас котушки, що має малу теплопровідність, на деяких ділянках проявляє себе як тепловий щит між обвиткою й осердям.

Виходячи з цього, а також враховуючи положення точки Т, можна вважати достатнім та визначальним проведення оцінювання загального теплового стану об'єкта на основі аналізу ізотерм саме на горизонтальній площині моделі.

Задеклароване обважнення робочих режимів ТКВС, яке виконувалося і контролювалося шляхом симуляції теплового стану об'єкта (до досягнення максимальної температури $t_{\text{Mmax}}=81^\circ\text{C}$), дало змогу підвищити значення щільності струму в секціях обвитки до $1,56 \text{ А}/\text{мм}^2$ для $q=1$; до $1,61 \text{ А}/\text{мм}^2$ для $q=2$; до $1,73 \text{ А}/\text{мм}^2$ для $q=3$; до $1,74 \text{ А}/\text{мм}^2$ для $q=4$; до $1,68 \text{ А}/\text{мм}^2$ для $q=5$. Внаслідок цього зросли величини максимально припустимої потужності навантаження (табл. 3), де обважнені режими позначені як $j=1_{\text{обв}}$ або $j=9_{\text{обв}}$. Згідно з даними табл. 3 це підвищення δP_n для різних конфігурацій (тобто, різних меж діапазону відхилень вхідної напруги від умовного номінального значення) є різним, найбільш вагоме воно (більше 10%) у конфігураціях $q=3, q=4$ та $q=4$. Важливо, що це досягається без збільшення матеріалоемності ТЕ – лише шляхом розрахунку за запропонованою методикою [11].

Аналіз даних табл. 3 також дає змогу проаналізувати вплив зсуву меж діапазону вхідної напруги на величину вихідної потужності стабілізатора (вона найбільша для конфігурації $q=3$ – $2,72 \text{ кВт}$ і найменша для $q=1$ – $2,06 \text{ кВт}$). При заданому значенні вихідної потужності P_n розрахункова потужність АТ, нормована за P_n , відповідно складає після обважнення для згаданих вище конфігурацій 36,8 та 48,5%, що суттєво менше, ніж до обважнення – 42,4 та 48,5%.

Характер зміни температурного стану об'єкта, що, як зазначалося вище, визначається розподілом температур на горизонтальній площині моделі, проілюстровано на рис. 5, *a* ($q=2$), рис. 5, *б* ($q=3$),

рис. 5, в ($q=4$) – до обважнення, та на рис. 5, з ($q=2$), рис. 5, д ($q=3$), рис. 5, е ($q=4$) – після обважнення (для конфігурацій $q=1$, $q=5$ картина якісно не змінюється).

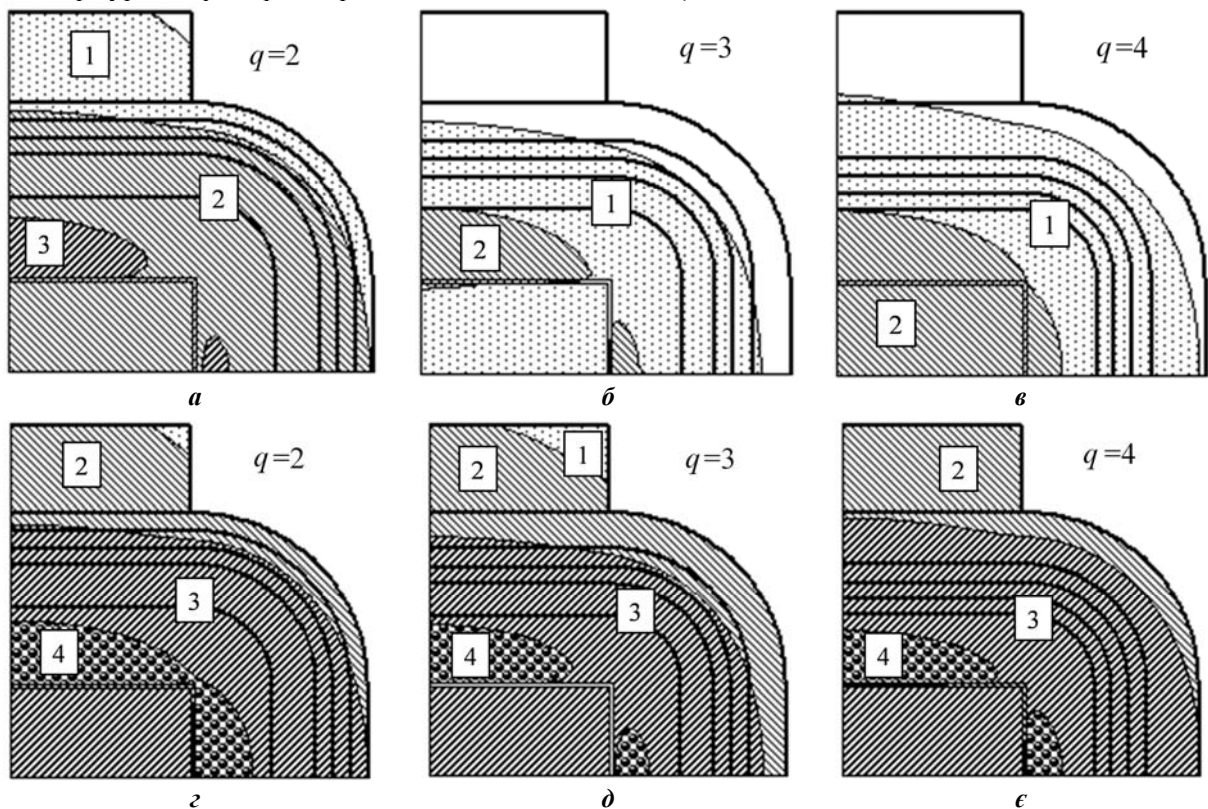


Рис. 5

Задля наочності на рисунках виокремлено ділянки, де температура змінюється в певних межах. Вони заштриховані по-різному та пронумеровані наступним чином: 1 – $72^{\circ}\text{C} < t \leq 74,5^{\circ}\text{C}$; 2 – $74,5^{\circ}\text{C} < t \leq 77,5^{\circ}\text{C}$; 3 – $77,5^{\circ}\text{C} < t \leq 80,7^{\circ}\text{C}$; 4 – $80,7^{\circ}\text{C} < t \leq 81^{\circ}\text{C}$. Форми та положення цих ділянок дещо різняться для різних конфігурацій. Це принципово не змінює характеристику теплового стану об'єкта дослідження, але вказує на можливість подальшого збільшення ефективності використання ТЕ шляхом варіювання щільності струму у різних секціях обвитки, наприклад, зменшенням її значення у найбільш "гарячій" секції W_0 та збільшенням її у секціях з кращими умовами охолодження.

Висновки. Зміна меж діапазону вхідної напруги стабілізатора з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою вимагає певної її реконфігурації та відповідної зміни параметрів секціонування обвитки трансформуючого елемента. Доведено можливість підвищення ефективності використання його встановленої потужності при застосуванні розробленої методики розрахунку, який враховує нерівномірність струмового завантаження окремих секцій. Зазначене підвищення досягається в межах попередньо визначеного припустимого теплового стану об'єкта дослідження.

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наук. думка, 1983. 216 с.

2. 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)*, IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>

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

4. Gehm, A.A., Quevedo, J.D.O., Mallmann, E.A., Fricke, L.A., Martins, M.L.D.S., & Beltrame, R.C. (2015). Development of a supervisory system for an intelligent transformer. In *Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015 IEEE 13th Brazilian. November, 2015. Pp. 1-6.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>.

5. Ratanapanachote, Somnida. Applications of an electronic transformer in a power distribution system. Diss. Texas A&M University, Texas. 2005. 92 p.

6. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
7. 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. 2014. Pp. 918–923. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>
8. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 05.12.2018).
9. García, S.M., Rodríguez, J.C.C., Jardini, J.A., López, J.V., Segura, A.I., & Cid, P.M.M. Feasibility of electronic tap-changing stabilizers for medium voltage lines. Precedents and new configurations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24(3). Pp. 1490-1503. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021032>
10. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Визначення потужності трансформуючих елементів при реконфігурації трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізаторів напруги змінного струму. Аналіз факторів впливу. *Техн. електродинаміка*. 2018. № 3. С. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.048>
11. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Моделювання трансформуючих елементів з секціонуванням обмоток у складі перетворювачів напруги змінного струму. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 3. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>
12. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
13. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 216 с.
14. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
15. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: ИП РадиоСофт, 2005. 320 с.

УДК 621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНИЦ ДИАПАЗОНА ВХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

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 ; AnatMozhrvsk@ukr.net

В выбранной для стабилизатора напряжения переменного тока трансформаторно-ключевой исполнительной структуре (ТКИС), трансформирующий элемент (ТЭ) которой имеет секционированную обмотку, можно, в случае необходимости, необходимым образом менять массив коэффициентов передачи посредством определенной ее реконфигурации. Необходимость этого может обуславливаться, в частности, варьированием границ заданного диапазона изменения входного напряжения стабилизатора. В работе исследовано влияние такого варьирования на установленную мощность трансформирующего элемента ТКВС и обоснована возможность повышения эффективности использования ТЭ при сохранении его теплового состояния в предварительно определенных пределах. Это позволяет или выбирать меньший типоразмер магнитопровода ТЭ, или увеличивать допустимую мощность нагрузки. Библ. 15, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, discrete smart transformer, tap changing transformer, voltage stabilizer, преобразователь напряжения переменного тока, секционированная обмотка, тепловые процессы.

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF CHANGES IN THE LIMITS OF THE INPUT VOLTAGE RANGE ON THE POWER OF A TRANSFORMER ELEMENT OF A VOLTAGE STABILIZER WITH A TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE

K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

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

In the transformer-and-switches executive structure (TSES) selected for the AC voltage stabilizer, a transforming element (TE), which has a sectioned winding, it is possible, if necessary, to change the array of transmission coefficients as necessary by means of a certain reconfiguration. The need for this may be due in particular to the variation of the boundaries of a given range of changes in the input voltage of the stabilizer. In the work, the influence of such variation

on the installed capacity of the transforming element of the TSES is investigated and the possibility of increasing the efficiency of using TE while maintaining its thermal state within pre-determined (predetermined) limits is substantiated. This allows you to either choose a smaller size of the TE core or increase the allowable power of the load. References 15, tables 3, figures 5.

Key words: transformer-and-switches executive, discrete smart transformer, tap changing transformer, voltage stabilizer, voltage stabilizer, AC voltage converter, partitioned winding, thermal processes.

1. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus)
2. 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), IEEE, 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. 2013. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
3. Trentini, Andrea. The use of smart transformer in the presence of dispersed generation. Diss. Politecnico di Torino, Torino. 2018. 90 p.
4. Gehm, A.A., Quevedo, J.D.O., Mallmann, E.A., Fricke, L.A., Martins, M.L.D.S., & Beltrame, R.C. (2015). Development of a supervisory system for an intelligent transformer. In *Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015 IEEE 13th Brazilian. November, 2015. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>.
5. Ratanapanachote, Somnida. Applications of an electronic transformer in a power distribution system. Diss. Texas A&M University, Texas. 2005. 92 p.
6. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
7. 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. 2014. Pp. 918–923. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>
8. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 05.12.2018).
9. García, S.M., Rodríguez, J.C.C., Jardini, J.A., López, J.V., Segura, A.I., & Cid, P.M.M. Feasibility of electronic tap-changing stabilizers for medium voltage lines. Precedents and new configurations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24(3). Pp. 1490-1503. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021032>
10. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Determination of the power of transforming elements in the reconfiguration of the transformer-and-switches executive structures of AC voltage stabilizers. Analysis of influence factors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 48-55. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.048>
11. 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) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>
12. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Instytut elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2015. 305 p. (Rus)
13. Gurevych Y.I., Rybin Yu.L. Transient thermal processes in electric machine. Leningrad: Energoatomizdat, 1983. 216 p. (Rus)
14. Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. Cooling of industrial electric machinery. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 296 p. (Rus)
15. Starodubtsev Yu.N. Theory and calculation of low-power transformers. Moskva: IP RadioSoft, 2005. 320 p. (Rus)

Надійшла: 15.11.2018
Остаточний варіант: 14.12.2018