

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СЕКЦІОНОВАНИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ З КОМУТАТОРОМ НА ВИХОДІ У СКЛАДІ СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

К.О. Липківський, докт.техн.наук, **А.Г. Можаровський**, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: lypkivskyk@ukr.net

З метою підвищення ефективності використання автотрансформатора (АТ) з секціонуванням обвитки у складі трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) стабілізаторів напруги змінного струму виконано мультифізичне моделювання АТ з напівпровідниковим комутатором на виході. Проведено порівняльну оцінку його з ТКВС, у якого комутатор розміщено на вході АТ. Доведено перевагу за зазначеним показником ТКВС другого типу. Прослідковано можливість впливу на нього цілеспрямованої зміни позиціонування секцій обвитки АТ. Бібл. 15, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, tap chancing transformer, ефективність використання автотрансформатора, позиціонування обвиток.

Серед трансформаторних елементів (ТЕ), що входять до складу засобів перетворення параметрів електричної енергії, можна виокремити ті, коефіцієнт трансформації яких при необхідності може змінюватися в процесі роботи. Їхні обвитки або мають відводи (так звані tap chancing transformers [13, 15]), або поділяються на окремі секції, розташування яких може варіюватися. Перші – це, зокрема, автотрансформатори у інтерактивних джерелах гарантованого живлення (Line-Interactive UPS, які ще називають Smart UPS [7, 14]). Другі – ТЕ трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) регуляторів (стабілізаторів) змінного струму [4], яким притаманна багатоваріантність виконання. Всі вони реалізують цілеспрямовану зміну вихідної напруги шляхом введення в дію (підключення) тих чи інших сполучень секцій обвитки ТЕ, при цьому струмові завантаження секцій змінюються по-різному в процесі роботи, проте вони не можуть бути максимальними одночасно у всіх секціях.

Діючі методики розрахунку і проектування ТЕ з незмінними в процесі роботи коефіцієнтами трансформації (див. зокрема [1, 6, 9]) не дозволяють врахувати зазначену особливість трансформуючих елементів, що розглядаються.

У [3] було викладено методику розрахунку таких ТЕ, яка враховує як електричні, так і теплові процеси в АТ. Вона полягає у тому, що при певних значеннях індукції в осерді та густини струму в секціях обвитки ТЕ, обраних згідно з діючими рекомендаціями [1], розв'язується електрична задача та вираховуються втрати потужності в елементах ТЕ в усіх робочих режимах, а також у гіпотетичному режимі одночасного максимального струмового завантаження всіх секцій. Для нього за допомогою відповідних програм мультифізичного моделювання [5] (наприклад, Comsol Multiphysics [12]) знаходиться значення максимальної температури T_{\max} в елементах АТ (це, по суті, та температура, яка була б у трансформаторі того самого типорозміру в номінальному режимі) і максимальні температури в робочих режимах, які менші за T_{\max} . Далі обраховується, за яких обважнень (при збільшенні густини струму в секціях обвитки) у робочому режимі з найбільшим струмовим завантаженням досягається ця температура. Для нових величин струмів у секціях обчислюється нове припустиме значення потужності навантаження. При цьому досягається підвищення ефективності використання ТЕ – збільшення питомої потужності автотрансформатора.

У [3] це було проілюстровано на прикладі АТ стабілізатора напруги змінного струму на основі ТКВС, у якому напівпровідникові ключові елементи (КЕ) з природною комутацією [8] (пари тиристорів, симістори), що працюють у режимах дискретно-разового керування [11], розміщені у первинному колі автотрансформатора (АТ). Для узагальнення видається доцільним дослідити у цьому сенсі й другий можливий тип ТКВС, де комутатор з КЕ розміщується на виході АТ.

Мета роботи полягає в аналізі мультифізичних процесів у секціонованому автотрансформаторі з комутатором на виході щодо можливості підвищення його енергетичних показників, зокрема шляхом цілеспрямованої зміни позиціонування секцій його обвитки.

На рис. 1 показано узагальнену схему простого ТКВС на основі автотрансформатора (АТ) з трьома секціями обвитки W_1, W_2, W_3 та двох комутаторів – К1 (у вхідному колі) з ключами V1, V2, V3 та К2 (у вихідному колі) з ключами V4, V5, V6. Як зазначалося вище, у [3] було розглянуто роботу перетворювача з комутатором К1 (на рис. 1 це відповідає випадку постійно замкненого V5 та розімкнених V4 та V6). При роботі з комутатором К2 ключ V2 вважається постійно замкненим, а V1, V3 – розімкненими. Діаграму роботи ТКВС (рис. 2) обрано такою самою, як і у [3].

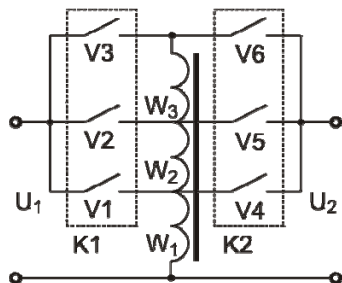


Рис. 1

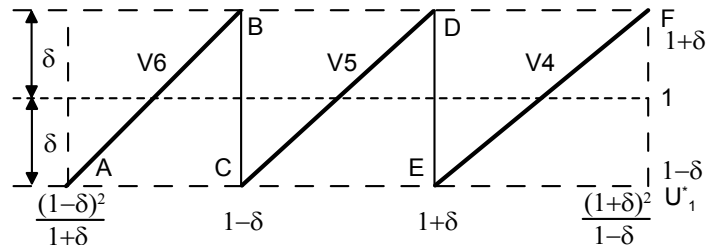


Рис. 2

Такими самими залишаються й співвідношення витків секцій обвитки АТ як функції похибки стабілізації $\delta = (U_{2max} - U_{2min}) / (U_{2max} + U_{2min})$ та базової величини W_1 : $W_2^* = W_2 / W_1 = 2\delta / (1 - \delta)$, $W_3^* = W_3 / W_1 = 2\delta(1 + \delta) / (1 - \delta)^2$. Проте залежності від δ напруг і струмів у секціях суттєво відрізняються. У табл. 1 наведено ці залежності, нормовані по номінальних значеннях напруги і струму навантаження, для режимів, що відповідають точкам А, В, Е, F на діаграмі роботи (рис. 2). (Зауважимо, що точки С і D відповідають режиму прямої передачі енергії до навантаження, коли по секціях W_1 та W_2 тече лише незначний струм холостого ходу). Ця таблиця відображає математичну модель процесу стабілізації напруги змінного струму за допомогою ТКВС з дискретно-разовим керуванням [11].

Таблиця 1

i	A (V6)		B (V6)		E (V4)		F (V4)	
	U_{Wi}^*	I_{Wi}^*	U_{Wi}^*	I_{Wi}^*	U_{Wi}^*	I_{Wi}^*	U_{Wi}^*	I_{Wi}^*
1	$\frac{(1-\delta)^3}{(1+\delta)^2}$	2δ	$\frac{(1-\delta)^2}{1+\delta}$	$2\delta \frac{1+\delta}{1-\delta}$	$1-\delta$	$2\delta \frac{1-\delta}{1+\delta}$	$1+\delta$	2δ
2	$2\delta \frac{(1-\delta)^2}{(1+\delta)^2}$	2δ	$2\delta \frac{1-\delta}{1+\delta}$	$2\delta \frac{1+\delta}{1-\delta}$	2δ	$\frac{(1-\delta)^2}{1+\delta}$	$2\delta \frac{1+\delta}{1-\delta}$	$1-\delta$
3	$2\delta \frac{1-\delta}{1+\delta}$	$1-\delta$	2δ	$1+\delta$	$2\delta \frac{1+\delta}{1-\delta}$	0	$2\delta \frac{(1+\delta)^2}{(1-\delta)^2}$	0

Виходячи з того, що ТКВС у кожному режимі може працювати як завгодно довго, розрахунок АТ зазвичай ведуть для найбільших значень напруги та струмів: $U_{W1p}^* = 1 + \delta$, $I_{W1p}^* = 2\delta(1 + \delta) / (1 - \delta)$; $U_{W2p}^* = 2\delta(1 + \delta) / (1 - \delta)$, $I_{W2p}^* = 1 - \delta$; $U_{W3p}^* = 2\delta(1 + \delta)^2 / (1 - \delta)^2$, $I_{W3p}^* = 1 + \delta$. При похибці стабілізації у 5% ($\delta = 0,05$) маємо: $U_{W1p}^* = 1,05$, $I_{W1p}^* = 0,115$; $U_{W2p}^* = 0,1105$, $I_{W2p}^* = 0,95$; $U_{W3p}^* = 0,1222$, $I_{W3p}^* = 1,05$; $U_{W1min}^* = 0,8595$, $U_{W1max}^* = 1,1605$.

При дослідженні було обрано для АТ, як і у [3], магнітопровід ШЛ40×80. Для ілюстрації взаємного розташування основних конструктивних елементів на рис. 3 наведено, виходячи з симетрії АТ, чверть його перерізу, що проходить через центр мас О. Первинний порядок розміщення секцій обвитки, починаючи від центрального стрижня осердя, – W_1, W_2, W_3 . Для обраного типоміналу довжини ортогональних відрізків ON та OQ однакові й дорівнюють 0,08 м. Літерою К позначено каркас котушки з текстоліту товщиною 1 мм.

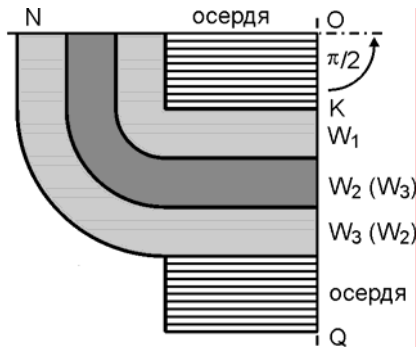


Рис. 3

За тих самих, як і у [3], величин номінальної напруги $U_{ном} = 220$ В та максимальної індукції в осерді 1,2 Тл отримуємо такі значення максимальних напруг на секціях обвитки та кількості їхніх витків: $U_{W1p} = 231$ В, $W_1 = 304$; $U_{W2p} = 24,3$ В, $W_2 = 32$; $U_{W3p} = 26,9$ В, $W_3 = 35$. При такій, як і у [3], потужності навантаження 4,93 кВт маємо $I_n = 22,4$ А, $I_{W1} = 2,47$ А, $I_{W2} = 21,27$ А, $I_{W3} = 23,494$ А. За наявної площі вікна осердя доводиться обирати такі перерізи проводів секції: $q_1 = S_W / W_1 = 1,5$ мм², $q_2 = 12,87$ мм², $q_3 = 14,2$ мм², що призводить до необхідності збільшення густини струму до 1,65 А/мм². При цьому секції займають відповідно 33,3%, 30,2% та 36,5% вікна магнітопроводу осердя, а їхні середні довжини витків становлять 280,2 мм, 358,6 мм та 440,2 мм.

Розраховані за цими чисельними даними втрати потужності у секціях обвитки для визначальних (найважчих) режимів, що відповідають точкам *B* та *F* діаграми, наведено у табл. 2. Остання колонка таблиці, позначена літерою *M*, відповідає гіпотетичному (як зазначалося – практично неможливому) режиму максимального одночасного струмового навантаження всіх секцій). У таблиці також наведено значення втрат у осерді з електротехнічної сталі 3411, які у цьому випадку розміщення комутатора на виході АТ є різними у різних робочих режимах. У режимі *F* індукція в осерді дорівнює розрахунковій (1,2 Тл) і, згідно з [10], $\Delta P_{cm} = 8,44$ Вт, а у режимі *B*, коли індукція зменшується у $(1 + \delta)^2 / (1 - \delta)^2 \approx 1,22$ разу, маємо $\Delta P_{cm} = 6,91$ Вт. Як видно з табл. 2, втрати у двох робочих режимах суттєво (у 1,19 разу) різняться, причому вони значно (у 1,37 та 1,63 разу відповідно) менші, ніж можливі втрати у гіпотетичному режимі *M*, коли вони дорівнюватимуть втратам у звичайному трансформаторі на тому самому магнітопроводі і при тій самій густині струму в обвитках.

Таблиця 2

<i>i</i>	ΔP_{Wi} (Вт)		
	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>M</i>
W_1	8,24	6,75	8,24
W_2	0,13	9,47	9,47
W_3	14,05	–	14,05
осердя	6,91	8,44	8,44
$\sum \Delta P$	29,33	24,66	40,20

Таблиця 3

<i>i</i>	ΔP_{Wi} (Вт)		
	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>M</i>
W_1	8,24	6,75	8,24
W_2	0,21	11,57	11,57
W_3	11,87	–	11,87
осердя	6,91	8,44	8,44
$\sum \Delta P$	27,23	26,76	40,12

Отримані при розв'язанні електричної задачі значення втрат потужності у елементах АТ дозволяють перейти до наступної частини мультифізичного моделювання – розв'язання теплової задачі та визначення теплового стану АТ у робочих режимах *B* та *F* за допомогою спеціалізованої програми моделювання Comsol Multiphysics аналогічно тому, як це було зроблено у [3], за тих самих спрощень, умов, значень теплопровідності осердя ($\lambda_{оср} = 4$ Вт/(м×К)), обвиток ($\lambda_{обс} = 2$ Вт/(м×К)) й котушки ($\lambda_{ктуш} = 0,2$ Вт/(м×К)) та загального коефіцієнта теплопередачі з поверхні $\alpha = 11,77$ Вт/(м²×К), еквівалентного сумі коефіцієнта тепловідведення з поверхні за рахунок конвекції $\alpha_{кв} = 5$ Вт/(м²×К) та випромінювання при степені чорноти $\epsilon = 0,8$ [2].

Рис. 4, б, в ілюструють, відповідно, розподіл втрат енергії в елементах АТ згідно з табл. 2 для режимів *B* і *F* та значення температур (рис. 4, а) вздовж обох ортогональних відрізків *MO* і *ON* (рис. 3). Задля наочності вони об'єднані та розміщені в одній площині. Як видно, максимальна температура спостерігається у секції W_1 , причому у режимі *B* (76,1°С) вона майже на 3°С більша, ніж у режимі *F* (у втратах це перевищення складає 1,19 разу).

За розробленою методикою для більш ефективного використання АТ треба обважнити режим *B*, який має більшу максимальну температуру, тобто збільшити густину струму та, відповідно, струми, що викличе зростання втрат у секціях обвитки до значень, при яких максимальна температура досягне рівня 80,9°С – значення, обраного нами у [3] за максимально припустиме при дослідженні

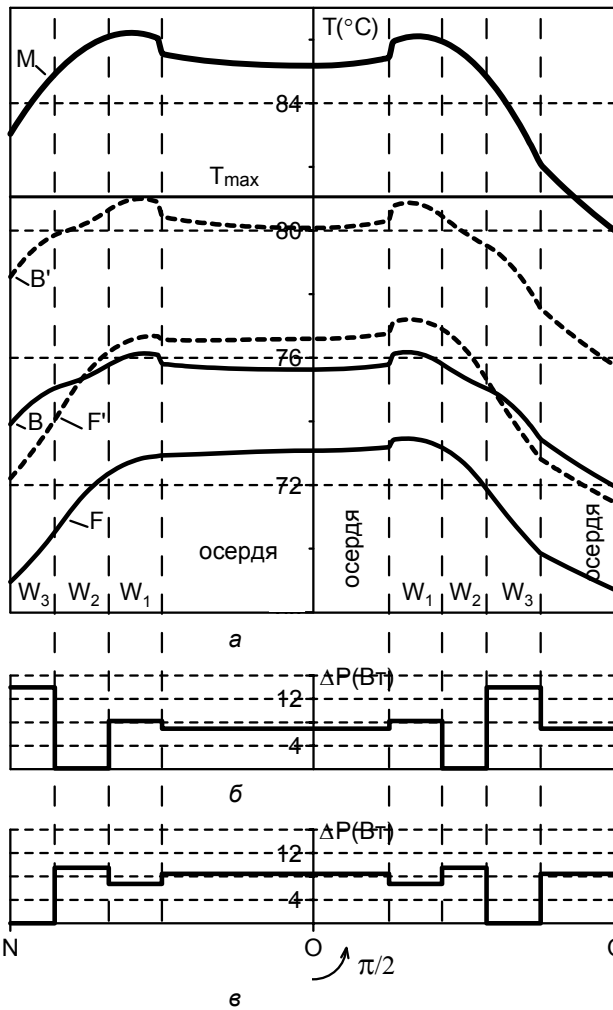


Рис. 4

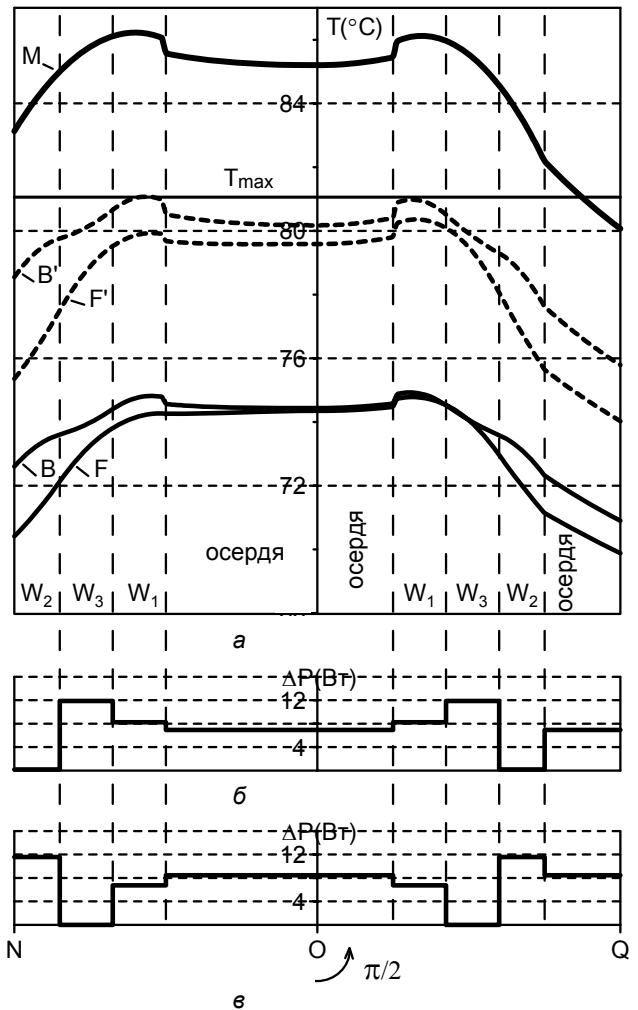


Рис. 5

АТ, та порівнянні їхніх температур у всіх варіантах обох типів ТКВС – з комутатором у вхідному або вихідному колі АТ.

У результаті цієї процедури отримуємо нове збільшене значення густини струму $j=1,83 \text{ А/мм}^2$, підвищення значення струмів у секціях і номінального струму та нове припустиме значення максимальної потужності навантаження 5,48 кВт, що на 11% перевищує початкове (4,93 кВт). Новий температурний розподіл в обох режимах відображається кривими B' та F' . Зрозуміло, що й при цьому температура у режимі B теж вища, ніж у режимі F ($77,2^\circ\text{C}$) внаслідок того, що у ньому задіяна секція W_3 , яка має більший активний опір, ніж секція W_2 за рахунок більшої середньої довжини витка (вона розміщена далі від центрального стрижня магнітопроводу). До того ж, її струм більший, ніж $I_{W3}^* (I_{W3}^* = I_{W2}^* \times (1 + \delta) / (1 - \delta) \approx 1,2 I_{W2}^*)$, тобто втрати у цій секції є визначальними.

Для подальшого підвищення ефективності використання АТ видається доцільним, виходячи з задекларованої раніше можливості багатоваріантної побудови ТКВС, здійснити зміну розташування секцій W_2 та W_3 – другою біля W_1 розмістити W_3 , а третьою – W_2 (на рис. 3 ці зміни зазначено у дужках). Обраховані для цього варіанту значення втрат у секціях (при збереженні початкової густини струму) наведено у табл. 3 та представлено на рис. 5, б, в, а температури в елементах АТ – на рис. 5, а. Як видно, різниця між втратами потужності в елементах АТ у режимах B та F зменшилася до 2%, а максимальні температури практично зрівнялися ($74,6^\circ\text{C}$). При цьому, застосування аналогічної процедури обважнення дозволяє збільшити густину струму до $j=1,9 \text{ А/мм}^2$, що забезпечує збільшення максимальної величини вихідної потужності до 5,7 кВт, тобто у 1,15 разу. Це ще раз свідчить про позитивні властивості, які ТКВС надає притаманна їм багатоваріантність.

Таким чином прослідковано вплив виконання ТКВС на максимальний рівень вихідної потужності, проте остання визначає й необхідну масу та об'єм трансформуючого елемента. Тому більш ін-

формативним та обґрунтованим відносно ефективності використання АТ буде співвідношення вихідної потужності P_n навантаження та загального об'єму автотрансформатора $V_{AT} - K_E = P_n / V_{AT}$. Максимальне значення цього показника у ТКВС з комутатором у вихідному колі дорівнює $K_E = 5,7 \text{ кВт}/2,6 \text{ дм}^3 = 2,22 \text{ кВт}/\text{дм}^3$, в той час, як у ТКВС з комутатором у вхідному колі, згідно з [3], цей показник при використанні того самого магнітопроводу і при тому самому об'ємі елементів АТ сягає $K_E = 6,2 \text{ кВт}/2,6 \text{ дм}^3 = 2,42 \text{ кВт}/\text{дм}^3$. Слід нагадати, що у цьому типі ТКВС у прикладі, що розглядався у [3], можливо виконання АТ на меншому типорозмірі магнітопроводу з тією самою величиною допустимої робочої температури ($T_{\max} = 80,9^\circ\text{C}$). І у цьому випадку отримаємо досить високе значення показника $K_E = 5,1 \text{ кВт}/2,2 \text{ дм}^3 = 2,31 \text{ кВт}/\text{дм}^3$. Звернемо увагу на те, що ці показники необхідно співставляти не тільки між собою, але й з базовим варіантом, коли не враховується струмове навантаження секцій у робочих режимах, де він становить $K_E = 4,9 \text{ кВт}/2,6 \text{ дм}^3 = 1,93 \text{ кВт}/\text{дм}^3$.

Таким чином, виконане порівняння ТКВС двох типів – з напівпровідниковим комутатором на вході АТ [3] та розглянутого у цій роботі АТ з комутатором у вихідному контурі вказує на більш високу ефективність використання ТКВС першого типу. Саме їх доцільно застосовувати у стабілізаторах напруги змінного струму, особливо при збільшенні δ або, що рівнозначно, при розширенні можливого діапазону зміни вхідної напруги. Проте, в деяких випадках, якщо виникають труднощі при забезпеченні безаварійної комутації напівпровідникових ключів [9], можна використовувати й ТКВС другого типу з припустимим зменшенням потужності навантаження.

Наприкінці зауважимо, що у цій роботі, так само як і у [3], мова йшла по найбільш прості ТКВС з АТ, що мають три секції обвитки, – лише задля спрощення пояснень та наочності. Розроблена методика розрахунку секціонованих АТ придатна для застосування при будь-якій кількості секцій і ключових елементів та при будь-якому їхньому з'єднанні і будь-якому типі магнітопроводу.

Висновки. Ефективність використання автотрансформатора у ТКВС стабілізатора напруги змінного струму з комутатором на вході АТ більша, ніж у ТКВС з комутатором на виході АТ. Ця різниця зростає зі збільшенням припустимої похибки стабілізації або при збільшенні можливого діапазону зміни вхідної напруги. Притаманна ТКВС багатоваріантність дозволяє максимально збільшити ефективність використання АТ шляхом зміни позиціонування секцій його обвитки. Розроблена методика розрахунку АТ у ТКВС придатна для будь-якого секціонування обвиток та виконання АТ.

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. Моделирование трансформирующих элементов с секционированием обмоток у складі перетворювачів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 3. – С. 39–44.
4. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 1983. – 216 с.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. – 305 с.
6. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.
7. Типы ИБП. Available at: <http://www.mos-invertor.ru/art.html> (accessed 27.05.2016).
8. Халіков В.А. Обзор stanu та возможностей поліпшення організації комутаційних процесів у силових трансформаторно-ключевих вузлах // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 28–37.
9. Хныков А.В. Теория и расчет многообмоточных трансформаторов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010. – 112 с.
10. ГОСТ 27427.1-83 Сталь электротехническая тонколистовая.
11. Bimal, K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter. – 2007. – Vol. 19. – No 4. – Pp. 11–20.
12. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
13. Automatic voltage regulation technologies. Available at: <http://www.sigmaelectricals.com/autotech01.htm> (accessed 27.05.2016).
14. IEC 62040-3 UPS Types and Methods. Available at: http://www.wilsonengineered.com/Tech/IEC_62040-3_UPS-Topology.pdf (accessed 27.05.2016).
15. US Patent 6472851 B2, G05F1/147. Hybrid tap-changing transformer with full range of control and high resolution / Peter Hammond. 29.10.2002.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ С КОММУТАТОРОМ НА ВЫХОДЕ В СОСТАВЕ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: lypkivskyk@ukr.net

С целью повышения эффективности использования автотрансформатора (АТ) с секционированием обмотки в составе трансформаторно-ключевых исполнительных структур (ТКИС) стабилизаторов напряжения переменного тока выполнено мультифизическое моделирование АТ с полупроводниковым коммутатором на выходе. Проведена сравнительная оценка его с ТКИС, у которого коммутатор размещен на входе АТ. Доказано преимущество по указанным показателям ТКИС второго типа. Прослежена возможность влияния на него целенаправленной смены позиционирования секций обмотки АТ. Библ. 15, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, tap chancing transformer, эффективность использования автотрансформатора, позиционирование обмоток.

IMPROVED UTILIZATION OF TAPPED AUTOTRANSFORMERS WITH THE OUTPUT COMMUTATOR AS A COMPONENT OF THE AC VOLTAGE STABILIZER

К.О. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine.

e-mail: lypkivskyk@ukr.net

In order to increase the efficiency of use of the autotransformer (AT) with tapped winding as a component of the transformer-and-switches executive structures (TSES) of AC voltage stabilizers, multiphysics simulation of the AT with the semiconductor commutator at the output has been fulfilled. The TSES, in which the commutator is placed at the input of the AT, has been compared with the proposed one. The advantage of the proposed TSES for certain parameters have been proven. The possibility of influence of purposeful change of positioning of the winding sections has been tracked. References 15, tables 3, figures 5.

Key words: transformer-and-switches executive structure, tap chancing transformer, utilization efficiency of autotransformer, winding positioning.

1. Belopolskyi 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. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi 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. Lypkivskyi K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
5. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering – Kiev: Institut Elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2015. – 305 p. (Rus)
6. Starodubtsev Yu.N. Theory and calculation of low-power transformers. – Moskva: PC RadioSoft, 2005. – 320 p. (Rus)
7. Types UPS. Available at: <http://www.mos-inventor.ru/art.html> (accessed 27.05.2016).
8. Khalikov V.A. Review of the status and opportunities to improve the organization of switching processes in the power transformer and the switches nodes // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 28–37. (Ukr)
9. Khnykov A.V. Theory and calculation of multiple winding transformer. – Moskva: SOLON-Press, 2010. – 112 p. (Rus)
10. GOST 27427.1-83 Rolled Electrical Steel. (Rus)
11. Bimal, K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter. – 2007. – Vol. 19. – No 4. – Pp. 11–20.
12. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
13. Automatic voltage regulation technologies. Available at: <http://www.sigmaelectricals.com/autotech01.htm> (accessed 27.05.2016).
14. IEC 62040-3 UPS Types and Methods. Available at: http://www.wilsonengineered.com/Tech/IEC_62040-3_UPS-Topology.pdf (accessed 27.05.2016).
15. US Patent 6472851 B2, G05F1/147. Hybrid tap-changing transformer with full range of control and high resolution / Peter Hammond. 29.10.2002.

Надійшла 02.06.2016

Остаточний варіант 06.06.2016