

УДК 621.314

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИХ ВИКОНАВЧИХ СТРУКТУР ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ З КЛЮЧОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ, ЩО ВИНЕСЕНІ З КІЛ СИЛОВОГО СТРУМУ

К.О.Липківський, докт.техн.наук, **А.Г.Можаровський**, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Проведено класифікацію трансформаторно-ключових виконавчих структур з ключовими елементами, що винесені з кіл силового струму. За способом виконання силового автотрансформатора та вольтододавчого трансформатора ці структури поділено на чотири групи, кожна з яких також є поліваріантною. Показано можливість трансформування структур однієї групи у структури інших груп та представлено рекомендації щодо доцільності застосування окремих варіантів. Доведено, що простіші структури цього класу мають повні аналоги у класі структур з ключовими елементами у колі силового струму. Бібл. 5, табл. 2.

Ключові слова: регулятор (стабілізатор) напруги змінного струму, трансформаторно-ключова виконавча структура, топологічне перетворення.

Вступ. Застосування трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС, *transformer switching structures*) є оптимальним рішенням проблеми побудови силового блока енергоефективних перетворювачів напруги змінного струму [3,5]. З метою узагальнення основних положень дослідження ТКВС, які характеризуються топологічним та параметричним розмаїттям, у [1] розпочато їхню систематизацію: за визначеною головною класифікаційною ознакою – місцем введення у електричне коло ключових елементів (КЕ) – ТКВС поділено на два принципово відмінні класи; виконано класифікацію ТКВС першого класу, а саме виконавчих структур, у яких КЕ обтікаються силовим струмом (вхідним чи вихідним); досліджено особливості виокремлення груп таких структур.

Мета роботи – провести класифікацію трансформаторно-ключових виконавчих структур другого класу, тобто ТКВС з ключовими елементами, які винесені з кіл силового струму; прослідкувати можливі топологічні перетворення цих структур та вплив таких перетворень на їхні технічні характеристики: виконати їхнє співставлення зі структурами першого класу.

Викладення основного матеріалу. Всі групи та можливі варіанти ТКВС цього класу обов'язково містять вольтододавчий трансформатор (ВДТ), вторинна обвитка якого знаходиться у одному з кіл силового струму, а напруга на первинну його обвитку (або її частини) подається через комутатор, найчастіше напівпровідниковий, що керується за потрібним законом.

Основні особливості та переваги цих ТКВС випливають саме з факту виведення ключових елементів з кіл силового струму, в результаті чого вони розраховуються на проходження менших (а переважно – значно менших) струмів. Наслідком цього є, по-перше, можливість вибору для ключових елементів, що працюють з природною комутацією, тиристорів (симісторів) менших типоміналів, а, по-друге, зменшення втрат енергії на напівпровідникових переходах і відповідне зниження вимог щодо площі охолоджуючих радіаторів. Це у сукупності зменшує вартість комутатора та позитивно впливає на енергетичні характеристики перетворювача напруги з такими ТКВС.

Крім того, слід додати, що у виконавчих структурах цього класу вихід з ладу будь-якого ключового елемента не призводить до припинення електроживлення споживача – електроенергія буде подаватись до нього, щоправда при дещо зменшеній напрузі внаслідок наявності у колі силового струму індуктивного опору вторинної обвитки ВДТ.

Дослідження показали, що, незважаючи на принципову відмінність двох визначених класів ТКВС, вони виконують одне й те саме функціональне перетворення величини напруги змінного струму, тобто як для споживача, так і для мережі живлення їх можна вважати єдиною "чорною скринькою" (*black box*). Щодо її "наповнення", то неважко довести, що простіші структури ТКВС другого класу мають відповідні аналоги серед структур ТКВС першого класу. Це наочно видно з табл. 1, де у верхньому рядку представлено п'ять структур ТКВС першого класу, а у нижньому – структури другого класу, що мають такі ж самі кількості нетотожних станів J (коефіцієнтів передачі по напрузі).

Таблиця 1

$K=1; (1+\alpha)$	$K=(1-\alpha/2); (1+\alpha/2)$	$K=(1-\alpha/2); 1; (1+\alpha/2)$	$K=(1-\alpha/2); 1; (1+\alpha/2)$	$K=(1-\alpha/2); (1+\alpha/4); (1-\alpha/4); (1+\alpha/4)$
ТКВС11 	ТКВС12 	ТКВС13 	ТКВС14 	ТКВС15
ТКВС21 	ТКВС22 	ТКВС23 	ТКВС24 	ТКВС25

Для компактності подальшого розгляду позначимо ТКВС першого класу як ТКВС11, ТКВС12, ... ТКВС 15, а другого – ТКВС21, ТКВС22, ... ТКВС 25. У перших двох колонках розміщено елементарні структури з двома КЕ. ТКВС11 та ТКВС21 забезпечують, у разі регулювання вихідної напруги при незмінній вхідній, два режими роботи: додавання (чи віднімання) напруги $\Delta U = \alpha U_1$, або безпосередню передачу вхідної напруги на вихід. Останньому режиму у ТКВС11 відповідає режим холостого ходу трансформуючого елемента (ТЕ), коли струм через вторинну обвитку ТЕ дорівнює нулю, а у ТКВС21 – режим короткого замикання ТЕ, при якому напруга на його вторинній обвитці дорівнює нулю.

ТКВС12 та ТКВС22 також забезпечують два режими роботи, але інші – додавання та віднімання $\Delta U = 0,5\alpha U_1$. У ТКВС13 та ТКВС23 за рахунок введення третього КЕ забезпечуються три режими роботи, причому режим прямого передавання напруги відбувається аналогічно варіантам ТКВС11 та ТКВС21. У ТКВС14 та ТКВС24 ті ж самі три режими реалізуються мостовим комутатором з чотирьох КЕ, але збільшення кількості КЕ "компенсується" суттєвим зменшенням встановленої потужності ТЕ. У ТКВС15 та ТКВС25 при тих самих чотирьох КЕ за рахунок модернізації мостового комутатора отримуємо вже чотири вихідні рівні, проте у них значно гірші показники використання трансформуючого елемента внаслідок збільшення його розрахункової встановленої потужності.

Аналізуючи табл. 1, можна зробити такий узагальнюючий висновок: якщо у ТКВС першого класу для переходу від одного типу структури до іншого ми маніпулюємо вторинною обвиткою ТЕ (її "подвоєння", секціонування, реверсування тощо), то у ТКВС другого класу такі ж маніпуляції відбуваються з первинною обвиткою ТЕ. Проте, як уже наголошувалося, головна відмінність – це зменшення струмів у ключових елементах. Якщо, наприклад, у ТКВС14 ключові елементи необхідно вибирати на струм, що дорівнює максимальному струму навантаження ($I_{KE} = I_{Hmax}$), то у ТКВС24 – на струм у $2/\alpha$ рази менший. Тобто, при $\alpha = 0,5$, що відповідає глибині діапазону регулювання $G = (1+\alpha/2)/(1-\alpha/2) = 1,25/0,75 = 1,666$, маємо чотирикратне зниження розрахункового значення струму напівпровідникових приладів КЕ з усіма позитивними наслідками, що виникають з цього факту.

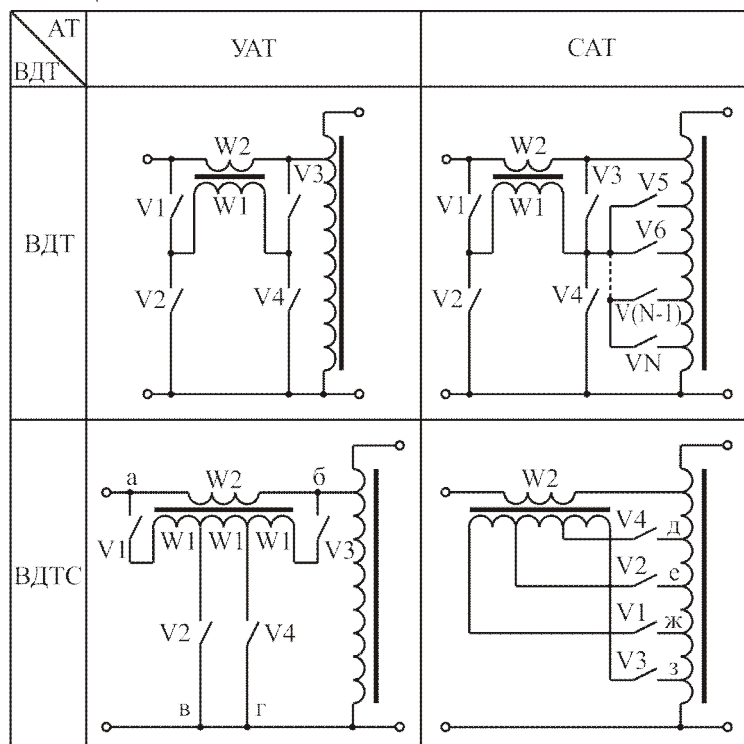
Перед тим, як перейти власне до систематизації ТКВС другого класу, зупинимося ще на одній особливості цих структур. При побудові ТКВС слід зважати на те, що середина діапазону зміни вхідної (при стабілізації) або вихідної (при регулювання) напруги здебільшого не збігається зі значенням номінальної напруги. Це вимагає певного узгодження ("симетрування") вхідної та вихідної напруг, що у ТКВС першого класу легко реалізується підключенням регульовальних секцій до потрібної проміжної відпайки основної обвитки W . У ТКВС другого класу для цього обов'язково необхідно вводити додатковий автотрансформатор, встановлена потужність якого залежить від наявної неузгодженості напруг і зазвичай є незначною.

Пропонується всі ТКВС другого класу за двома класифікаційними ознаками поділити на чотири групи, що відрізняються:

- функцією введеного додаткового автотрансформатора (такого, що виконує лише згадувану функцію узгодження напруг – УАТ, та секціонованого АТ, який крім того виконує функції живлення первинної обвитки ВДТ та зміни напруги, що до неї подається – САТ);
- реалізацією вольтододавчого трансформатора (простого двообмоткового ВДТ та ВДТ з секціонуванням первинної обвитки – ВДТС).

З урахуванням цього положення було виокремлено чотири трансформаторно-ключових виконавчих структури другого класу та сформовано відповідну класифікаційну таблицю 2.

Таблиця 2



Перша група цих структур (позиція 1 у табл. 2) складається з регульовальних блоків, кожний з яких містить простий двообмотковий ВДТ та УАТ і є видозміненим варіантом ТКВС14 – у ньому вторинна обвитка ВДТ розміщена між точками приєднання до фазного проводу двох ключів комутатора. Це зроблено з метою виключення не досить прийнятного режиму, в якому обвитки ВДТ вмикаються зустрічно. У запропонованому варіанті ці обвитки завжди вмикаються узгоджено послідовно, тільки у режимі підвищення напруга мережі подається на основну обвитку, а знімається з обох обмоток разом, а в режимі зниження напруга мережі подається на обидві обвитки, а знімається з основної.

Такі простіші з доцільних типів ТКВС другого класу можуть (з метою збільшення кількості стійких станів) вмикатися каскадно, що ілюструється пунктиром у схемі табл. 2 (при одному ВДТ маємо $J=3$, при двох $J=3 \times 3=9$, при трьох

$J=3 \times 3 \times 3=27$). Зауважимо, що при цьому встановлена потужність кожного наступного ВДТ та розрахункове значення струмів КЕ зменшуються приблизно у три рази відносно їхніх попередніх значень. Проте, збільшення кількості ВДТ конструктивно дещо ускладнює ТКВС, що не завжди є припустимим, і спонукає шукати інші варіанти збільшення кількості станів системи та підвищення точності регулювання.

Дослідження показали, що досягти цієї мети можна трансформуванням регульовального блоку цієї групи одним з двох шляхів. Перший пов'язаний з конструктивним ускладненням вольтододавчого трансформатора – секціонуванням його первинної обвитки, тобто переходом до ВДТС (поз. 2 табл. 2). У регульовальних блоках цієї другої групи ТКВС, що розглядаються, на відміну від ТКВС25 також змінено місце введення вторинної обвитки ВДТС. Даючи позитивний результат (збільшення кількості станів: при одному ВДТС $J=4$, при двох $J=16$, при трьох $J=64$), ВДТС мають суттєво більші розрахункові значення встановленої потужності внаслідок потроєння кількості витків первинної обвитки, що обмежує їхнє застосування. Хоча можливим залишається їхнє комплексування з блоками першої групи.

Другий шлях – залишити у ТКВС простий двообвитковий ВДТ, один кінець первинної обвитки якого підходить, як і раніше, до "стійки" з двох ключових елементів V1 та V2, а до другого підключаються додаткові KE, що іншими виводами підходять до відпайок секціонованого автотрансформатора САТ (позиція 3 табл. 2).

У таких структурах згадувані ключові елементи лівої "стійки" реалізують реверсування первинної обвитки ВДТ, а додаткові KE (V5, V6, ... VN) разом з двома ключами правої стійки V3 та V4 (до речі, вони також можуть підходити до якихось відпайок САТ) дозволяють змінювати величину напруги, що подається на W1, та, відповідно, величину напруги на W2, яка додається до (віднімається від) напруги живлення і тим самим змінює необхідним чином напругу, що надходить до споживача.

ТКВС цієї групи відрізняються широким розмаїттям варіантів [4]. Спільним для них є те, що у кожному випадку кількість секцій САТ та розрахункові кількості витків у кожній з них визначаються співвідношеннями заданих діапазонів зміни вхідної напруги (при стабілізації) або вихідної напруги (при регулюванні) та необхідною точністю здійснення конкретного функціонального перетворення. Будь-яке варіювання цих параметрів призводить до відповідної трансформації ТКВС. По-перше, можливим стає "виродження" однієї з крайніх секцій САТ внаслідок того, що розрахункове значення кількості її витків зменшиться до нуля. По-друге, одна з крайніх секцій може навіть стати "від'ємною", тобто такою, напрям обвитки якої повинен бути протилежним напрямку обвитки інших секцій. У [4] запропоновано таку секцію формувати з частини сусідньої "позитивної" секції, що дозволяє дещо зменшити значення розрахункової встановленої потужності САТ. Зауважимо, що, з метою зменшення встановленої потужності іншого трансформуючого елементу – ВДТ, параметри обох ТЕ розраховуються таким чином, щоб у крайніх режимах роботи ТКВС (при реалізації максимального та мінімального коефіцієнтів передачі) до первинної обвитки ВДТ прикладалася однакова за абсолютним значенням напруга.

У разі необхідності досягнення значних J вважається доцільним виконання ТКВС такого типу з двома ВДТ – один з комутатором K1 (N_1 ключових елементів, $J_1=2(N_1-2)$) та другий – з комутатором K2 (N_2 ключових елементів, $J_2=2(N_2-2)$). Ця структура дозволить отримати $J_2=J_1 \times J_2=4(N_1-2)(N_2-2)$. Щоб одержати таку ж кількість нетотожних станів при одному ВДТ, треба мати $N_3=(0,5J_2+2)=2[(N_1-2)(N_2-2)+1]$ ключових елементів. Якщо, наприклад, $N_1=N_2=6$, тобто $N_2=12$, то $N_3=2(4 \times 4 + 1)=34 \gg 12$. До того ж, тільки ключові елементи першого комутатора розраховуються на струм $I \times \alpha$, а другого – на струм ще у J_2 рази менший.

ТКВС четвертої групи (позиція 4 табл. 2) на перший погляд мають спільність з розглянутими трьома групами тільки за кількістю ТЕ, а не за топологією. Проте, вони просто трансформуються з ТКВС другої групи (позиція 2 табл. 2) – достатньо приєднати ключові елементи V1, V2, V3, V4 не до точок a, б, в, г, а до відпайок ж, е, з, д обвитки САТ. При цьому значно підвищується ефективність використання ключових елементів: за рахунок того, що в такій структурі (і тільки у ній одній!) можливою є одночасна робота будь-яких двох KE, для визначення кількості можливих станів маємо $J=N!/2(N-2)!=0,5N(N-1)$. Таким чином, при $N=4 - J=6$, при $N=5 - J=10$, при $N=6 - J=15$... [2]. На жаль, структурам цієї групи притаманні кілька серйозних недоліків: по-перше, конструктивна складність (обидва ТЕ мають секціоновані обвитки); по-друге, підвищена розрахункова встановлена потужність ВДТС; по-третє, точне дотримання необхідного закону перетворення напруги забезпечується лише при застосуванні чотирьох ключових елементів. Дійсно, при $N>4$ додавання кожного нового KE дозволяє отримати додаткову кількість станів $\Delta J=J_2-J_1$, що дорівнює вихідному (первинному) значенню N_1 ($N_2=N_1+1=4+1=5$, $J_2=J_1+N_1=6+4=10$...), в той час як кількість незалежних змінних (кількість секцій) збільшується кожного разу лише на дві. Все це не дозволяє очікувати досить широкого впровадження ТКВС четвертої групи, хоча досвід такий вже є.

Висновки. 1. Незважаючи на принципову відмінність двох класів трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС з ключовими елементами у колі силового струму та ТКВС з винесенням ключових елементів з цих кіл), простіші структури другого класу мають функціональні аналоги серед структур першого класу, що відрізняються тільки параметрами ключових елементів.

2. Обов'язковими складовими ТКВС другого класу є два електромагнітні елементи – вольто-дававший трансформатор та автотрансформатор.

3. З ТКВС другого класу можна виокремити чотири групи структур, що відрізняються поєднанням двох варіантів виконання автотрансформатора (простий двообвитковий узгоджуючий – УАТ чи багатофункціональний секціонований – САТ) та двох варіантів виконання вольтодавачого трансформатора (простий двообвитковий – ВДТ чи з секціонованою первинною обвиткою – ВДТС).

4. Всі складні структури ТКВС другого класу (позиції 2, 3, 4 табл. 2) можна синтезувати з простішої структури, що містить ВДТ та УАТ (позиція 1 табл. 2).

5. Найбільш доцільним для використання у перетворювачах напруги змінного струму (особливо у стабілізаторах) можна вважати трансформаторно-ключову виконавчу структуру другого класу, що містить ВДТ та УАТ (позиція 1 табл. 2).

1. *Липківський К.О.* Систематизація трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів напруги з ключовими елементами у колі силового струму // Техн. електродинаміка. – 2011. – №3. – С. 26–32.

Lypkivskiy K.O. Systematization of transformer switching executive structures for voltage converters with switches in the load current circuit // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2011. – №3. – P. 26–32. (Ukr.)

2. *Липковський К.А.* Синтез трансформаторно-ключевых исполнительных преобразователей переменного напряжения / Препринт АН УССР. Институт электродинамики; №353. – Киев, 1983. – 61 с.

Lipkovskii K.A. Synthesis of transformer switching executive structures of alternating current voltage converters / Preprint Akademii nauk USSR. Institut Elektrodinamiki; №353. – Kyiv, 1983. – 61 p. (Rus.)

3. *Липковський К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Київ: Наук. думка, 1983. – 216 с.

Lipkovskii K.A. Transformer switching executive structures of alternating current voltage converters. – Kyiv: Naukova dumka, 1983. – 216 p. (Rus.)

4. *Липковський К.А., Халиков В.А., Можаровський А.Г.* Двухтрансформаторная ТКИС – эффективный исполнительный орган дискретных стабилизаторов переменного напряжения // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.4. – 2008. – С. 59–63.

Lipkovskii K.A., Khalikov V.A., Mozharovskii A.G. Two-transformer TSES – effective executive authority of discrete alternating current voltage stabilizer // *Tekhnichna elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – Vol.4. – 2008. – P. 59–63. (Rus.)

5. *Kropacz W., Mikolajuk K., Tobola A.* Synthesis of passive networks containing periodically operated thyristors. – In.: *Circuit Theory and Applications*, 1984. – Vol.12. – P. 375–393.

УДК 621.314

К.А. Липковський, докт.техн.наук, **А.Г. Можаровський**, канд.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев–57, 03680, Украина.

Систематизація трансформаторно-ключевих исполнительних структур преобразователей напряжения с ключевыми элементами, вынесенными из цепей силового тока.

Проведена класифікація трансформаторно-ключевих исполнительних структур с ключевими елементами, вынесенными из цепей силового тока. По способу исполнения силового автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора эти структуры разделены на четыре группы, каждая из которых также является поливариантной. Показана возможность трансформирования структур одной группы в структуры других групп, даны рекомендации по целесообразному использованию отдельных вариантов. Доказано, что простейшие структуры этого класса имеют полные аналоги в классе структур с ключевыми элементами в цепи силового тока. Библ. 5, табл. 2.

Ключевые слова: регулятор (стабилизатор) напряжения переменного тока, трансформаторно-ключевая исполнительная структура, топологическое преобразование.

К.О. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv–57, 03680, Ukraine.

Systematization of transformer switching executive structures with switches learned from the power circuit current for voltage converters.

It is spent classification transformer switching executive structures the switch which have been taken out from chains of a power current. On a way of execution of the power autotransformer and the voltadding transformer these structures are divided into four groups, each of also is polyvariant. Possibility of transformation of structures of one group in structures of other groups is shown, recommendations about expedient use of separate variants are made. It is proved that the elementary structures of this class have full analogs in a class of structures with key elements in a chain of a power current. References 5, tables 2.

Key words: alternating current voltage regulator (stabilizer), transformer switching executive structure, topological conversion.

Надійшла 02.02.2011

Received 02.02.2011