

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ З ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИМИ ВИКОНАВЧИМИ СТРУКТУРАМИ

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

Перетворювачі напруги змінного струму (регулятори, стабілізатори) з ТКВС – трансформаторно-ключовими виконавчими структурами (tap changing transformer, discrete smart transformer) відрізняються високими енергетичними показниками та електромагнітною сумісністю з мережею живлення і споживачем. У роботі проаналізовано характерні об'єкти дослідження та патентування пристроїв цього класу, які внаслідок апріорної багатотоваріантності можуть суттєво відрізнитися типом побудови регулювальних блоків та їх комплексуванням, законом секціонування обвиток трансформуючого елемента. Обґрунтовано ефективність та доцільність чіткого дотримання вже апробованих основних положень теорії ТКВС та визначено шляхи їхнього подальшого вдосконалення з розширенням кола значущих показників якості перетворювачів напруги на їхній основі. Бібл. 24.

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

Постійне розширення форм і масштабів використання електричної енергії (ЕЕ) завжди вимагало розробки і реалізації різноманітних засобів узгодження й оптимізації функціонування її споживачів з умовами мереж живлення – перетворювачів параметрів електроенергії. Серед них чільне місце посідають перетворювачі напруги, які дають змогу здійснювати необхідну цілеспрямовану зміну рівня напруги (зауважимо, що ця функція притаманна – так чи інакше – й перетворювачам іншого призначення, зокрема перетворювачам частоти, випрямлячам тощо). Оскільки такі перетворювачі працюють у силових трактах, вони повинні мати високі енергетичні показники, зокрема коефіцієнт корисної дії, та не впливати негативно на електромагнітну сумісність із мережею живлення та споживачем.

Незважаючи на те, що значна частина сучасних споживачів ЕЕ внаслідок вдосконалення значно розширила припустимі межі відхилень живлячої напруги від номінальних значень, розробка, моделювання, патентування та практична реалізація нових перетворювачів напруги (особливо – змінного струму) наразі триває (щоправда, за кордоном це відбувається значно інтенсивніше, ніж в Україні). Патентний пошук та аналіз публікацій у цьому науково-технічному напрямку свідчить, що імпульсні перетворювачі напруги, які завдяки використанню ланки високої частоти мають хороші масогабаритні показники, аж ніяк не превалюють на електроринку (зрозумілими обмежуючими факторами їхнього використання можуть бути достатньо висока вартість, необхідність усунення виникаючих спотворень вихідної напруги та вхідного струму, незначна переважувальна здатність тощо). Разом із тим користувачам пропонується широкий спектр перетворювачів напруги з працюючими на частоті мережі трансформуючими елементами – ТЕ (трансформаторами, автотрансформаторами – АТ, вольтододавчими трансформаторами – ВДТ та їхніми комбінаціями), цілеспрямованою зміною коефіцієнта передачі яких виконується задане функціональне перетворення напруги – або її стабілізація на потрібному рівні при дії всіх дестабілізуючих факторів, або регулювання за певним фіксованим законом (наприклад, синусоїдальним у низькочастотних інверторах напруги з амплітудно-імпульсною модуляцією сигналу), або законом, що варіюється.

Такі ТЕ мають секціоновані обвитки або обвитки з відводами, при перемиканні (комутації) яких ключовими елементами КЕ, зокрема напівпровідниковими (хоча, незважаючи на постійний розвиток елементної бази силової електроніки, ключові елементи на основі електромеханічних релейних пристроїв продовжують використовувати, наприклад, у побутовій техніці) відбувається необхідна зміна коефіцієнта передачі перетворювача за напругою. Зазначені КЕ (це переважно тиристорні з природньою комутацією) у сталому режимі знаходяться в одному з двох станів – відкриті/закриті, тобто апріорі не вносять спотворень у форму вихідної напруги та вхідного струму. В разі потреби зміни напруги сигнали керування надходять на ключі у відповідності до певного алгоритму і здійснюються

їхнє переключення. Таке управління ключовими елементами отримало назву "дискретно-разового" ("discrete time control" [1]).

У закордонній технічній літературі цей клас трансформуючих елементів перетворювачів напруги змінного струму має назви, наприклад, пов'язані з принципом дії – tap changing (switching) transformer [2, 3], або такі, що характеризують їхні розширені функціональні можливості – discrete smart transformer [4]. При цьому нівелюється роль ключових елементів, тільки у сукупності з якими досягається кінцева мета – необхідна зміна коефіцієнта передачі за напругою. До того ж "розумними" (smart) вони стають лише завдяки відповідним (дійсно "розумним") системам керування.

Авторами з початку дослідження цього науково-технічного напрямку перетворювальної техніки було введено поняття ТКВС – трансформаторно-ключової виконавчої структури, яке, на наш погляд, є більш повним і коректним визначенням [5]. Це формулювання підкреслює неможливість окремого розгляду, моделювання, випробування трансформуючих та ключових елементів – вони складають єдину структуру, що залишається незмінною навіть при певних реконфігураціях, пов'язаних із необхідністю варіювання рівня напруги, що стабілізується, або діапазону її регулювання.

Такі виконавчі структури входять до складу численних перетворювачів напруги змінного струму, що фігурують під різними назвами, у яких або присутнє слово tap (відвід), або не використовується згадка про принцип дії, а фіксується функціональне призначення: voltage regulator [6, 7], – stabilizer [8], – deviation adjustor [9], – restorer [10], – compensator [11] тощо. Виходячи з того, що останнім часом збільшується кількість патентів та публікацій за цією тематикою, видається доцільним проаналізувати сучасний стан розвитку досліджень проблеми перетворення напруги змінного струму з використанням пристроїв з ТКВС, однією з позитивних рис яких є відсутність негативного впливу на електромагнітну сумісність зі споживачем та з мережею живлення.

Мета роботи полягає у визначенні на основі цього аналізу напрямків досліджень, найбільш важливих для вдосконалення трансформаторно-ключових виконавчих структур та перетворювачів напруги змінного струму на їхній основі.

Насамперед, доводиться констатувати, що з поля зору закордонних фахівців донедавна практично випадали дослідження зазначених перетворювачів, виконані вітчизняними вченими, зокрема найбільш системні роботи, що протягом багатьох років здійснюються в Інституті електродинаміки НАН України. Може тому у чималому числі іноземних наукових праць зустрічаються застарілі, найпростіші, далеко не найкращі схемотехнічні рішення, не враховуються напрацьовані у нас рекомендації щодо доцільних підходів до розробки ефективних перетворювачів напруги з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами.

З аналізу патентів та публікацій останніх років випливає, що зараз увага приділяється обом основним класам ТКВС – з трансформуючими елементами (трансформатори або автотрансформатори з секціонованими обвитками) і комутуючими ключовими елементами у колі/колах силового струму та з вольтододавчими трансформаторами, первинні обвитки яких живляться від відводів малопотужного узгоджуючого автотрансформатора з секціонованою обвиткою через ключові елементи, що розраховуються на обмежені струми.

Щодо ТКВС першого класу, то при їхньому розгляді необхідно зупинитися на двох основних аспектах. *Перший аспект* – це вибір місця розташування (введення) комутуючих ключів. У загальному випадку зміна коефіцієнта передачі за напругою може реалізовуватися введенням у дію секцій ТЕ (зміною кількості задіяних витків обвитки) як у первинному колі ("ключі по входу"), так і вторинному ("ключі по виходу"). Найбільша ефективність використання ТЕ досягається тоді, коли у процесі роботи індукція в його осерді змінюється у якомога меншому діапазоні, тобто, щоб кількість витків варіювалася у тому колі, де відбувається основна зміна напруги (це фундаментальне положення було чітко обґрунтовано у [12], де йшлося про дуальність процесів стабілізації та регулювання напруги змінного струму з використанням ТКВС). Тому перший варіант розміщення КЕ виявляється доцільним для стабілізації вихідної напруги при зміні вхідної напруги від мінімального (U_{1min}) до максимального (U_{1max}) значення, а другий – при її регулюванні. Якщо не дотримуватися цього принципу, то необхідна встановлена потужність ТЕ стабілізатора напруги P_{cm} зростає, і це зростання збільшується з розширенням заданого діапазону зміни вхідної напруги ($D = 2(U_{1max} - U_{1min}) / (U_{1max} + U_{1min})$), у межах якого відбувається стабілізація вихідної напруги, яке можна оцінити коефіцієнтом збільшення: $K_{зб} = P_{cm,вих} / P_{cm,вх} \approx 1 + 0,415D$ (тут $P_{cm,вих}$ та $P_{cm,вх}$ встановлена потужність ТЕ стабілізатора при розміщенні ключів "на виході" та "на вході" відповідно). Наприклад, при $D=0,4$ ($\pm 20\%$ від номінального

значення) $K_{30}=1,17$, при $D=0,6$ ($\pm 30\%$) $K_{30}=1,25$, при $D=0,8$ ($\pm 40\%$) $K_{30}=1,33$, при $D=1,0$ ($\pm 50\%$) $K_{30}=1,415$. Це підтверджує суттєвість впливу зазначеного коефіцієнта на масогабаритні показники перетворювача напруги.

На жаль, ці міркування не завжди беруться до уваги розробниками перетворювачів напруги змінного струму з ТКВС (див., наприклад, [13], де стабілізація вихідної напруги реалізується зміною кількості витків вторинної обвитки), при цьому не можна погодитися з твердженням, висловленим у [8], що у "звичайних стабілізаторах напруги комутація ключових елементів відбувається тільки на вторинному боці трансформатора, тобто кількість витків, до яких прикладається вхідна напруга, залишається незмінною".

Зауважимо, що зазначене положення [12] необхідно враховувати й при розробці більш складних ТКВС стабілізаторів напруги, що мають дві групи КЕ – комутатори у вхідному та вихідному колах. Ключові елементи першого з метою формування великих кроків регулювання під'єднуються до відводів автотрансформатора, між якими знаходяться кілька регулювальних секцій, а ключі другого – до відводів між цими секціями для реалізації менших (елементарних) кроків регулювання.

Другий аспект пов'язаний з вибором закону виткових співвідношень регулювальних секцій трансформуючого елемента ТКВС.

У тих структурах, обвитки ТЕ яких мають відводи, кількість витків усіх регулювальних секцій ($W_{p1}, W_{p2} \dots$) зазвичай обирається однаковою, тобто реалізується лінійний закон зміни кількості витків у первинній/вторинній обвитці. При цьому множина можливих нетотожних станів J (коефіцієнтів передачі) ТКВС дорівнює множині ключових елементів N ($J=N$), а коефіцієнт ефективності їхнього використання (J/N) – одиниці. Так, у [14] ТЕ перетворювача має чотири КЕ та три регулювальні секції, кількість витків кожної з яких складає 10% від кількості витків базової (W_0) секції. Така структура при обраному лінійному законі дає змогу реалізувати стабілізацію вихідної напруги з похибкою $\delta = \pm 4,76\%$ при зміні вхідної у діапазоні 33,3% ($-20,7\% \div +12,6\%$). Проте при застосуванні обґрунтованого ще у [5, 15] закону секціонування за геометричною прогресією $W_{pn} = W_{p1} \cdot \gamma^{n-1}$ ($\gamma = U_{2max}/U_{2min} = (1 + \delta)/(1 - \delta)$) можна було б при тій самій похибці збільшити діапазон зміни вхідної напруги, у якому відбувається стабілізація вихідної напруги, приблизно на 8% або при збереженні того ж діапазону – зменшити похибку на ~8% (зауважимо, що саме цей закон було використано у регуляторі напруги, запропонованому у [16]).

Схожа ситуація й у роботі [7], де розглядається стабілізатор напруги з автотрансформатором, обвитка якого має базову секцію $W_{0аз}$ та чотири регулювальні секції – $W_{p1}, W_{p2}, W_{p3}, W_{p4}$. Три ключі вхідного комутатора приєднуються до трьох спільних точок секцій $W_{0аз}$ та W_{p1}, W_{p1} та W_{p2}, W_{p2} та W_{p3} , а три ключі вихідного комутатора – до спільних точок секцій W_{p2} та W_{p3}, W_{p3} та W_{p4} , до W_{p4} та кінця обвитки. Кількості витків у секціях (у відсотках до кількості витків всієї обвитки) обрано у [7] довільно: $W_{0аз}^* = 79,7\%$, $W_{p1}^* = W_{p2}^* = 8,12\%$, $W_{p3}^* = W_{p4}^* = 2,03\%$. Така структура забезпечує отримання дев'яти коефіцієнтів передачі за напругою – від 1,0 до 1,2547. Проте зростання цих коефіцієнтів $\gamma_i = K_i/K_{i+1}$ не є рівномірним (їхні значення наступні: 1,0211; 1,0208; 1,0482; 1,0211; 1,0207; 1,0572; 1,0212; 1,0207), внаслідок чого на різних ділянках діапазону зміни вхідної напруги похибка стабілізації вихідної напруги може змінюватися від $\pm 1,0$ до $\pm 2,76\%$. У той самий час, при використанні згаданого вище закону секціонування за геометричною прогресією можна отримати незмінну похибку $\delta = \pm 1,43\%$. У цьому випадку секції обвитки повинні мати такі відносні кількості витків: $W_{0аз}^* = 79,7\%$, $W_{p1}^* = (\gamma^3 - 1)W_{0аз}^*$; $W_{p2}^* = \gamma^3(\gamma^3 - 1)W_{0аз}^*$; $W_{p3}^* = \gamma^6(\gamma - 1)W_{0аз}^*$; $W_{p4}^* = \gamma^7(\gamma - 1)W_{0аз}^*$. Оскільки $\gamma = \sqrt[8]{1,2547/1,0} = 1,0288$, то відповідно $W_{p1}^* = 7,04\%$; $W_{p2}^* = 7,73\%$; $W_{p3}^* = 2,73\%$; $W_{p4}^* = 2,8\%$. Таким чином, лише доцільним вибором місць розташування відводів обвитки, до яких приєднуються ключові елементи, можна майже вдвічі зменшити похибку стабілізації вихідної напруги.

У цьому плані видається цікавим і ґрунтовним, але, на жаль, єдиним серед розглянутих, патент [8], у якому спочатку робиться спроба "прямолінійного" схемотехнічного рішення побудови виконавчої структури стабілізатора напруги змінного струму шляхом приєднання п'яти КЕ вхідного комутатора та п'яти ключів вихідного комутатора ($N_{\Sigma} = N_1 + N_2 = 10$) до одних і тих самих п'яти відводів трансформуючого елемента. При цьому кількість можливих станів систем (співвідношень працюючих КЕ та відповідно коефіцієнтів передачі за напругою K) дорівнює $J = 5 \times 5 = 25$. Проте ці коефіцієнти несистемно розміщені між значеннями K_{min} та K_{max} (0,5; 0,56; 0,63; 0,65; 0,72; 0,77; 0,8; 0,81; 0,89; 0,9;

1,0; 1,11; 1,13; 1,23; 1,25; 1,3; 1,38; 1,54; 1,6; 1,8; 2,0) – п'ять коефіцієнтів передачі тотожні і дорівнюють одиниці, ще сім дуже мало відрізняються від сусідніх. Внаслідок цього похибка стабілізації, яка визначається найбільшою величиною співвідношення сусідніх коефіцієнтів передачі (тут це $\gamma_{max}=1,8/1,6=1,125$), сягає величини $\pm 5,88\%$ ($\delta=(1,25-1)/(1,25+1)=0,0588$). Тому в [8] далі робиться висновок про доцільність переходу до вибору масиву коефіцієнтів передачі за відомим, зокрема з [5], законом зворотної геометричної прогресії. При цьому для ТКВС з тими самими 10 ключовими елементами отримуємо $\delta=\pm 2,77\%$ ($\gamma=\sqrt[25]{4}=1,5702$), тобто точність стабілізації у цьому випадку більш ніж подвоюється. Навіть при зменшенні кількості КЕ, а внаслідок цього, і складності, і вартості пристрою можна мати достатньо прийнятні результати. Так, при $N=8$ ($J=4\times 4=16$) похибка стабілізації складає $\delta=\pm 4,33\%$, а при $N=7$ ($J=4\times 3=12$) $\delta=\pm 5,77\% < 5,88\%$.

У ТКВС, обвитки ТЕ яких мають гальванічно непов'язані між собою регульовальні секції, що разом із відповідними КЕ комплексуються в окремі регульовальні блоки (РБ), також використовується лінійний закон зміни кількості задіяних витків обвитки. Зазначені РБ за функціональністю поділяються на дві групи: перша реалізує лише збільшення (або зменшення), а друга – як збільшення, так і зменшення кількості витків відповідної обвитки ТЕ.

Щодо першої групи, то у найпоширенішому варіанті кожен із цих блоків складається з однієї регульовальної секції обвитки ТЕ та двох КЕ, один з яких реалізує у разі необхідності додавання її витків до витків базової секції, а другий виконує функцію обходу (bypass). Співвідношення витків цих секцій обирається за двійковим законом: $W_{pi}=W_{p1}\cdot 2^{i-1}$ ($W_{p1}\cdot 2^0, W_{p1}\cdot 2^1, W_{p1}\cdot 2^2, \dots$), де W_{p1} – мінімальна за кількістю витків секція, що визначає величину похибки стабілізації (крок регулювання) напруги. При цьому кількість станів дорівнює $J_2=2^{N/2}$. Наприклад, у [6] обвитка ТЕ перетворювача має чотири регульовальні секції ($W_{p1}, W_{p2}=2W_{p1}, W_{p3}=4W_{p1}, W_{p4}=8W_{p1}$) та вісім КЕ, що забезпечує отримання 16 коефіцієнтів передачі ($J=16$). Зауважимо, що при цьому у кожному БР працює один ключовий елемент, тобто одночасно струм обтікає половину всіх ключових елементів.

У [17] декларувалася доцільність переходу від таких регульовальних блоків до більш складних, кожний i -й з яких має чотири ключові елементи та три однакові регульовальні секції ($W_{p1}\cdot 4^{i-1}, W_{p1}\cdot 4^{i-1}, W_{p1}\cdot 4^{i-1}$). При збереженні того самого коефіцієнта використання КЕ (бо $2^4=4^2$) у цьому варіанті одночасно працює лише четверта частина усіх КЕ, тобто втрати потужності на них будуть вдвічі менші, ніж у [6], тому відповідно буде менша площа радіаторів для відведення тепла.

Також у [17] доведено, що найкращим за критерієм ефективності використання ключових елементів є комплексування блоків регулювання, кожний i -й з яких має три КЕ та дві однакові регульовальні секції ($W_{p1}\cdot 3^{i-1}, W_{p1}\cdot 3^{i-1}$). Дійсно, $J_3=3^{N/3}>2^{N/2}=J_2$, причому зазначений показник зростає зі збільшенням їхньої кількості: $J_3/J_2=(\sqrt[3]{3}/\sqrt{2})^N=1,0198^N$. Так при кількості ключів $N=6$ можна отримати кількість станів $J_2=8$ та $J_3=9$ і при цьому $J_3/J_2=1,11$; при $N=12$ маємо $J_2=64$, $J_3=81$ та $J_3/J_2\approx 1,266$. Перевагою такої структури є й те, що у ній одночасно працює лише третина всіх ключових елементів.

Комбінація в одній ТКВС цих трьох типів БР дає змогу при заданій кількості ключових елементів обрати найбільш оптимальне їх поєднання. При цьому також відкривається можливість для подальшої реконфігурації структури з метою зменшення не тільки необхідної площі радіаторів охолодження КЕ, але й їхньої кількості (зауважимо, що такий підхід прослідковується не завжди. Так, у [18, fig. 8c] показана виконавча структура, де послідовно з'єднані два БР з чотирма КЕ, один з трьох та один з двох КЕ. Вона забезпечує отримання $J=4\times 3\times 3\times 2=96$ рівнів напруги, що змінюється за лінійним законом. Хоча простою реконфігурацією – зміною одного БР з чотирма та одного БР з двома КЕ на два БР з трьома КЕ і відповідним перерахунком співвідношень секцій – можна отримати структуру, яка за тих самих $N=13$ та тієї ж загальної кількості витків секцій ТЕ забезпечує реалізацію $J=4\times 3\times 3\times 3=108$ рівнів напруги, тобто зменшення похибки регулювання приблизно на 11%).

У регульовальних блоках другої групи необхідний перехід від збільшення до зменшення кількості витків обвитки переважно реалізується реверсуванням (зміною напрямку підключення) регульовальної секції/секцій (інколи для цього використовують певну кількість БР першої групи, що вводяться у діагональ додаткового чотириключового моста, який, власне, й виконує реверс регульовальних секцій відносно базової секції, як це зроблено, наприклад, у [18, fig. 8c], але така побудова ТКВС не видається доцільною для реалізації.) У найпростішому варіанті i -й РБ складається з чотириклучового моста, у діагоналі якого знаходиться секція обвитки з кількістю витків, що обирається за законом $W_{pi}=W_{p1}\cdot 3^{i-1}$. Виконавча структура з такими РБ забезпечує роботу з $J=3^{N/4}$ коефіцієнтами пере-

дачі та відповідно зміну вихідної напруги за лінійним законом (проте й тут інколи ігнорують можливість максимально ефективно використовувати ключові елементи. Так, у [18, fig. 13] довільно обрано інші виткові співвідношення секцій трьох чотириклучових БР, а саме $W_{p1}, W_{p2}=2W_{p1}, W_{p3}=2W_{p1}$ (2%, 4%, 4%), що забезпечує регулювання напруги у діапазоні $0 \div 10,0\%$ з похибкою $\pm 1\%$. Проте при виборі цих співвідношень згідно з наведеним вище законом ($3^0 : 3^1 : 3^2$) можна або при тому самому діапазоні регулювання зменшити похибку у 2,6 разу (до 0,385%), або за тієї самої похибки розширити у 2,6 разу ($0 \div 26\%$) діапазон регулювання напруги).

Тут також, як і у регулювальних блоках першої групи, доцільним є використання більш складного схемотехнічного рішення, у якому i -й РБ складається з шести ключових елементів та регулювальної секції, що поділяється на дві підсекції з кількістю витків $W_{p1} \cdot 7^{i-1}$ та $2 \cdot W_{p1} \cdot 7^{i-1}$ відповідно. По суті, кожна підсекція знаходиться у діагоналі "свого" чотириклучового моста (два ключі є спільними для обох мостів), який реалізує її аверсне (збільшення кількості витків) або реверсне (зменшення кількості витків) приєднання [18]. У виконавчій структурі регулятора напруги з такими РБ кількість коефіцієнтів передачі $J_6=7^{N/6}$, тобто за коефіцієнтом ефективності використання КЕ вона у $J_6/J_4=(7^{1/6}/3^{1/4})^N=1,051^N$ разів перевищує структуру з чотириклучовими РБ. Так, для $N=12$ маємо $J_6/J_4=1,815$, для $N=24$ – $J_6/J_4=3,254$. До того ж зменшується кількість одночасно працюючих КЕ (та відповідно і втрати в них) з $N/4$ до $N/6$, тобто у 1,5 рази.

У двох регулювальних блоках структури, що розглядається у [18, fig. 2], для зміни напруги у діапазоні $\pm 10\%$ довільно обрано інше співвідношення витків у секціях – 1,2; 3,3 (1,25%, 2,5%, 3,125%, 3,125%). При цьому крок регулювання змінюється від 0,625% (у діапазоні від 0 до 7,5%) до 1,25% (у діапазоні 7,5 \div 10%). Проте простим перерозподілом виткових співвідношень згідно із задекларованим вище законом – $7^0, 2 \cdot 7^0; 7^1, 2 \cdot 7^1$ (0,417%, 0,834%: 2,919%, 5,838%) у тому самому діапазоні зміни напруги забезпечується незмінний і значно менший ніж у [18] крок регулювання – 0,417% ($\delta=\pm 0,209\%$).

Наразі досліджуються [4] та патентуються [20, 21, 22] й перетворювачі напруги змінного струму з вольтододавчими трансформаторами, первинна обвитка яких через ключові елементи пов'язана з відповідними відводами обвитки узгоджуючого трансформатора/автотрансформатора, варіюванням яких реалізується необхідна зміна або стабілізація напруги споживача. У цих роботах зазвичай використовуються відомі силові структури, хоча бувають і винятки, пов'язані з певною надлишковістю схемного рішення. Так, наприклад, у [9] вводиться додатковий автотрансформатор з обвиткою, що має відводи, хоча живити первинну обвитку ВДТ можна було б і від відводів обвитки силового трансформатора, вже наявного у схемі.

Цікавим є використання трансформатора з обвитками, що мають відводи, у системі стабілізатора/регулятора постійного струму. У [23] для цього створено вольтододавчий канал, що складається з високочастотного інвертора, який живиться від автономної мережі постійного струму (вітрогенератора), згадуваного трансформатора, двох комутаторів, ключові елементи яких під'єднані до відводів первинної та вторинної обвиток цього ТЕ відповідно та некерованого випрямляча, вихід якого послідовно приєднаний у коло між джерелом живлення та навантаження.

Зауважимо, що проаналізовані у цій роботі перетворювачі напруги змінного струму підтверджують тезу щодо багатоваріантності побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур, проте не вичерпують їхнього схемотехнічного розмаїття. Згідно із запропонованою у [19] класифікацією перспективними можуть стати й інші типи регулювальних блоків, зокрема комбіновані. Останні крім високої ефективності використання ключових елементів відзначаються "гнучкістю" побудови структури. Якщо при всіх інших РБ збільшити кількість коефіцієнтів передачі (нетотожних станів) можна лише "стрибком", додаючи ще один РБ (наприклад, від двох РБ з "трикувим" законом вибору кількості витків, коли $N=8$ та $J=3^{8/4}=9$, можна перейти до трьох таких РБ, коли $N=12$ та $J=3^{12/4}=27$), то у комбінованому РБ можна додавати по одному ключовому елементу. Наприклад, такий РБ з $N=8$ реалізує $J=17$ станів системи, при $N=9$ маємо $J=23$, при $N=10$ буде $J=39$, а при $N=12$ вже $J=49 \gg 27$. До того ж у комбінованому РБ з $J=49$ вдвічі менші втрати у КЕ, ніж у трьох згаданих БР з $J=27$, бо у ньому одночасно працює вдвічі менше КЕ – лише 3, а не 6. Комбіновані БР також можна з'єднувати послідовно й досягти ще більшої ефективності використання ключових елементів.

У подальших дослідженнях перетворювачів напруги змінного струму з секціонованими трансформуючими елементами для їхнього вдосконалення слід розширити коло критеріїв якості трансформаторно-ключових виконавчих структур. Обираючи схемотехнічні рішення ТКВС, вже недостатньо орієнтуватися лише на такі дійсно важливі показники як коефіцієнт ефективності використання ключових елементів.

чових елементів та величина встановленої потужності трансформуючого елемента, для визначення якої запропоновано методику [24], що базується на врахуванні зміни під час роботи струмового завантаження окремих секцій обвитки ТЕ та мультифізичності процесів у ньому. У разі тотожності цих показників перевагу треба віддати тим структурам, у яких одночасно працює менша кількість КЕ, наслідком чого є зменшення втрат у них та відповідно зменшення площі охолоджуючих радіаторів, а й інколи їхньої кількості, що, крім того, веде до спрощення реалізації системи керування ТКВС. Зокрема, у певних випадках виявляється можливим організація єдиної спільної шини для всіх напівпровідникових ключових елементів комутатора.

Висновки.

1. Дослідження, розробка, вдосконалення, моделювання, патентування та практична реалізація перетворювачів напруги змінного струму (регуляторів, стабілізаторів), у складі яких застосовуються трансформаторно-ключові виконавчі структури, продовжуються як за кордоном, так і в Україні (щоправда, менш інтенсивно).

2. Об'єктами патентування зазвичай обираються достатньо відомі схемотехнічні рішення (основні новації пов'язані з системами управління) без належного врахування вже апробованих способів формування та комплексування регулювальних блоків ТКВС, а також визначення оптимальних співвідношень витків регулювальних секцій трансформуючого елемента.

3. У описах патентів, на жаль, зустрічаються нечіткі формулювання, некоректні визначення точності стабілізації вихідної напруги (не за максимальною похибкою) і навіть помилки у розрахунках.

4. Поза увагою розробників залишаються питання мінімізації кількості одночасно працюючих ключових елементів у ТКВС з метою зменшення втрат у них та відповідно зменшення необхідної площі охолоджуючих радіаторів, а також їхньої кількості. Вирішення цих завдань буде ваговим кроком у вдосконаленні високоефективних перетворювачів напруги змінного струму.

1. 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.

2. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Bärthlein E.M. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies. *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*. 2014 16th International. IEEE. 21-24 Sept. 2014. Antalya, Turkey. Pp. 918-923.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>

3. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 01.03.2018).

4. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4-th International Conference *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT - Europe 2013). IEEE. 6-9 Oct. 2013. At Lyngby. Denmark. Pp. 1-5.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>

5. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.

6. William O. Kramer, Alireza Daneshpooy. Static voltage regulator and controller. US Patent 6351106B1. Feb. 26, 2002.

7. Robert C. Degeneff, Steven Raedy. Regulator with asymmetrical voltage increase/decrease capability for utility system. US Patent 5990667. Nov. 23, 1999.

8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. US Patent 6417651B1. 09.07.2002.

9. Liu Zhiyong. Voltage deviation adjustor. Patent CN103178527B. 2015.07.01.

10. Mohammad Sarvi, Haniyeh Marefatjou. Compensation of Voltage Single-Phase SAG and SWELL Using Dynamic Voltage Restorer and Difference Per-Unit Value Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 3. No 1. February 2013. Pp. 83-92.

11. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. Vol. 1. No 10. April 2012. Pp. 767-772.

DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj10.465>

12. Липківський К.О. Дуальність побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур дискретних стабілізаторів та регуляторів напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 16-23.

13. 5KVA Voltage Stabilizer Circuit. Available at: <https://makingcircuits.com/blog/5kva-voltage-stabilizer-circuit/> (accessed 01.03.2018).

14. Paul D. Brooks. Tap switching power supply apparatus and methods for supporting multiple input voltages. US Patent 9568931B1. Feb.14, 2017.

15. Tonkal V.E., Lipkovskiy K.A. Alternating voltage regulators and stabilizers with undistorted out-put voltage. *Electrical energy supply and other application*. 3rd Power electronics conference Budapest'77. 1977. Vol. 6.15. Pp. 1-15.
16. Шварц Д.Л., Шевелев В.А., Гендельман Г.А., Антонов Ю.Г., Гольберг Г.Ю. Трансформатор з ступінчастим регулюванням напруги. Патент України № 5107. 28.12.94.
17. Липковский К.А., Тонкаль В.Е., Озерянский А.А. Устройство для регулирования переменного напряжения. АС СССР № 413468. 30.01.1974.
18. Robert C. Degeneff, Friedrich K. Schaeffer; Robert H. Frazer, David A. Torrey, Osman Demirci. Tap changing system having discrete cycle modulation and fault rotation for coupling to an inductive device. US Patent 5604423. Feb. 18. 1997.
19. Липківський К.О. Систематизація трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів напруги з ключовими елементами у колі силового струму. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 26-32.
20. Steven M. Raedy. 3-Phase electronic tap changer commutation and device. US Patent 7737667B2. Jun. 15. 2010.
21. Коротецький Ю.Л. Пристрій для регулювання змінної напруги. Патент України № 36418. 15.07.2003.
22. Шестеренко В.Є., Шестеренко О.В. Спосіб дискретного регулювання напруги вольтододачними трансформаторами. Патент України № 72050. 10.08.2012.
23. Allan David Crane, Warren Mark Blewitt. Power converters. Patent US 2015/0295498A1. Oct. 15, 2015.
24. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Моделювання трансформуючих елементів з секціонуванням обмоток у складі перетворювачів напруги змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 39-44.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>

УДК 621.314

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВЫМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СТРУКТУРАМИ

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

Преобразователи напряжения переменного тока (регуляторы, стабилизаторы) с ТКИС – трансформаторно-ключевыми исполнительными структурами отличаются высокими энергетическими показателями и электромагнитной совместимостью с питающей сетью и потребителем. В работе проанализированы характерные объекты исследования и патентования устройств этого класса, которые в силу априорной многовариантности могут существенно отличаться типом построения регулировочных блоков и их комплексированием, законом секционирования обмоток трансформирующего элемента. Обоснована эффективность и целесообразность четкого соблюдения уже апробированных основных положений теории ТКИС и определены пути их дальнейшего совершенствования с расширением круга значимых показателей качества преобразователей напряжения на их основе. Библ. 24.

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

CURRENT STATE AND DEVELOPMENT TRENDS OF AC VOLTAGE CONVERTERS WITH TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

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

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

AC voltage converters (regulators, stabilizers) with TSES – transformer-and-switches executive structure are distinguished by high energy indices and electromagnetic compatibility with the supply network and the consumer. In the article, characteristic objects of research and patenting of devices of this class are analyzed which, due to a priori multivariance, can differ substantially in the type of construction of the control units and their integration, the law of sectioning of the windings of the transforming element. The effectiveness and expediency of strict adherence to the already approved basic provisions of the TSES theory is substantiated and the ways of their further improvement are defined with the expansion of the circle of significant quality indicators of voltage converters on their basis. References 24.

Key words: transformer-and-switches executive, AC voltage converter, sectionalized winding, tap changing transformer, discrete smart transformer, voltage stabilizer, regulator.

1. 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.
2. Ram G., Prasanth V., Bauer P., Barthlein E.M. Comparative analysis of on-load tap changing (OLTC) transformer topologies. *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*. 2014 16-th International. IEEE. 21-24 Sept. 2014. Antalya, Turkey. Pp. 918-923.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980624>
3. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 01.03.2018).
4. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4-th International Conference *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT - Europe 2013). IEEE. 6-9 Oct. 2013. At Lyngby. Denmark. Pp. 1-5.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
5. Lypkivskiy K.O. Transformer-and-switches executive structures of alternating current voltage converters. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus)
6. William O. Kramer, Alireza Daneshpooy. Static voltage regulator and controller. US Patent 6351106B1. Feb. 26, 2002.
7. Robert C. Degeneff, Steven Raedy. Regulator with asymmetrical voltage increase/decrease capability for utility system. US Patent 5990667. Nov. 23, 1999.
8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. US Patent 6417651B1. 09.07.2002.
9. Liu Zhiyong. Voltage deviation adjustor. Patent CN103178527B. 2015.07.01.
10. Mohammad Sarvi, Haniyeh Marefatjou. Compensation of Voltage Single-Phase SAG and SWELL Using Dynamic Voltage Restorer and Difference Per-Unit Value Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 3. No 1. February 2013. Pp. 83-92.
11. Santilio F.P., Silva T.V., Oliveira J.C., Barbosa J.A.F. A computational and experimental performance analysis of an electromagnetic voltage regulator proposal throughout controlled series voltage injection. *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*. Vol. 1. No 10. April 2012. Pp. 767-772.
DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj10.465>
12. Lypkivskiy K.O. Duality of construction of transformer-and-switches executive structures of discrete stabilizers and AC voltage regulators. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 6. Pp. 16-23. (Ukr)
13. 5KVA Voltage Stabilizer Circuit. Available at: <https://makingcircuits.com/blog/5kva-voltage-stabilizer-circuit/> (accessed 01.03.2018).
14. Paul D. Brooks. Tap switching power supply apparatus and methods for supporting multiple input voltages. US Patent 9568931B1. Feb.14, 2017.
15. Tonkal V.E., Lypkivskiy K.O. Alternating voltage regulators and stabilizers whit undistorted out-put voltage. *Electrical energy supply and other application*. 3rd Power electronics conference Budapest'77. 1977. Vol. 6.15. Pp. 1-15.
16. Shvarts D.L., Shevelev V.O., Gendelman G.A., Antonov Yu.G., Golberg G.Yu. Transformer with stepped voltage regulation. Patent UA No 5107. 28.12.94. (Ukr)
17. Lypkivskiy K.O., Tonkal V.E., Ozerianskiy A.O. Device for regulation of alternating voltage. Patent USSR No 413468. 30.01.1974. (Rus)
18. Robert C. Degeneff, Friedrich K. Schaeffer; Robert H. Frazer, David A. Torrey, Osman Demirci. Tap changing system having discrete cycle modulation and fauld rotation for coupling to an inductive device. US Patent 5604423. Feb. 18. 1997.
19. Lypkivskiy K.O. Systematization of transformer-and-switches executive structures of voltage converters with switches elements in the field of power current. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011. No 3. Pp. 26-32. (Ukr)
20. Steven M. Raedy. 3-Phase electronic tap changer commutation and device. US Patent 7737667B2. Jun. 15. 2010.
21. Korotetskiy Yu.L. Device for regulation of alternating voltage. Patent UA No 36418. 15.07.2003. (Ukr)
22. Shesterenko V.Ye., Shesterenko O.V. The method of discrete voltage regulation by booster transformers. Patent UA No 72050. 10.08.2012. (Ukr)
23. Allan David Crane, Warren Mark Blewitt. Power converters. Patent US 2015/0295498A1. Oct. 15, 2015.
24. 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>

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 03.05.2018