

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ РЕГУЛЯТОРІВ СПРЯМЛЕНОГО СТРУМУ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИХ ВИКОНАВЧИХ СТРУКТУР

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

Проаналізовано особливості дискретного регулювання напруги у трансформаторно-ключовій структурі зі спрямленим вихідним струмом. Розглянуто варіанти реалізації такої структури, що різняться діапазоном зміни вихідної напруги. Обґрунтовано можливість зменшення кількості напівпровідникових ключових елементів у цій структурі з метою спрощення керування та покращення вартісних характеристик. Доведено доцільність розширення сфери застосування досліджуваного регулятора на коло споживачів, що не висувають виключних вимог до виду живлячого струму. Бібл. 3, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, регулювання напруги, спрямлений струм.

У [2] обґрунтовано й прослідковано особливості побудови багаторівневих регуляторів спрямленої напруги, в яких зміна рівня вихідної напруги реалізується за допомогою трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) з використанням силових напівпровідникових ключових елементів (КЕ) – тиристорів з природною комутацією. В [1] виконано порівняльну оцінку ефективності використання КЕ у цих пристроях і у неспотворюючих регуляторах напруги змінного струму з дискретно-разовим керуванням [5] та наголошено на певних відмінностях цих двох типів перетворювачів параметрів електроенергії. Зокрема це стосується простоти комутації напівпровідникових КЕ [4] в регуляторах спрямленого струму, що обумовило можливість обґрунтування розширення традиційної сфери їхнього використання: від таких джерел можна живити не тільки виключно споживачів спрямленої напруги, а й тих, які зазвичай живляться напругою змінного струму, але без будь-яких обмежень можуть працювати й на спрямленому струмі. Це, наприклад, нагрівальне устаткування, печі опору [5], лампи розжарювання й деяке інше обладнання. У таких регуляторах, на відміну від регуляторів змінного струму, при будь-яких переключеннях струму й напруги у силових елементах ТКВС не перевищують номінальних значень, хоча комутаційні процеси мають свої особливості.

Мета цієї роботи полягає у аналізі особливостей процесів зміни рівня напруги в регуляторах напруги спрямленого струму, які побудовані на основі ТКВС, що працюють на активне або активно-індуктивне навантаження.

Зазначений аналіз проведемо для простої ТКВС з чотирма ($N=4$) парами тиристорів (чотирма «стійками» – C1, C2, C3, C4), на якій зручно прослідкувати всі можливі комутації КЕ (ускладнення схеми для зменшення кроку регулювання за рахунок збільшення кількості стійок принципово нічого не змінять). На рис. 1 показано вторинну секціоновану обвитку трансформуючого елемента (ТЕ) ТКВС – трансформатора або автотрансформатора з комутатором (VS1–VS8). Прийmemo для спрощення, що сумарна кількість витків всіх секцій обвитки дорівнює числу витків первинної обмотки, тобто максимальний коефіцієнт трансформації ТЕ $K_{max}=1,0$. Введенням у дію тієї чи іншої секції або

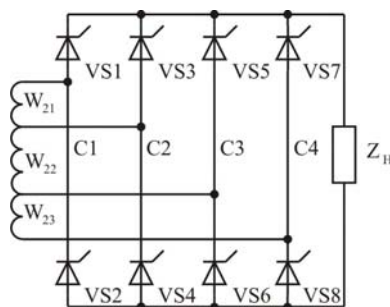


Рис. 1

їхньої комбінації реалізується зміна цього коефіцієнта та рівня напруги, що надходить до споживача.

Вибір виткових співвідношень секцій вторинної обвитки ТЕ визначається заданим діапазоном регулювання вихідної спрямленої напруги. Розглянемо два можливі варіанти: глибоке регулювання напруги – від нульового значення до максимального та регулювання в обмеженому діапазоні, в якому нижня межа вихідної напруги U_{2min} відмінна від нуля, а верхня сягає $U_{2max}=U_{1max}$.

Варіант 1. Оскільки в даному випадку одночасно можуть працювати будь-які дві стійки комутатора ($N=2$), то можлива кількість

станів ТКВС дорівнює шести ($J = N! / ((N - n)! \times n!) = 4! / (2! \times 2!) = 6$). У [1] доведено, що найкращим є таке співвідношення витків секцій обвитки W_2 : $W_{21}/W_2 = 1/6 = 0,166$; $W_{22}/W_2 = 3/6 = 0,5$; $W_{23}/W_2 = 2/6 = 0,333$. (Зауважимо, що будь-яка зміна цієї послідовності порушить лінійність регулювальної характеристики, що зазвичай неприпустимо). При цьому отримуємо шість (не враховуючи нульового) нетотожних станів ТКВС, в яких вихідна напруга, нормована по її максимальному значенню U_{2max} , дорівнює відповідно – 0,166; 0,333; 0,5; 0,666; 0,833; 1,0 (табл. 1). Таким чином, нормований по U_{2max} крок регулювання напруги $E_1^* = E_1/U_{2max}$ дорівнює тут 0,166. Тобто, за допомогою обраного ТКВС необхідне значення вихідної напруги можна виставити в діапазоні $0-U_{2max}$ з відносною похибкою $\delta = \pm 0,0833$ (8,33%).

Таблиця 1

стан	C1	C2	C3	C4	U_2^*
1	■	■	■	■	0,166
2	■	■	■	■	0,333
3	■	■	■	■	0,5
4	■	■	■	■	0,666
5	■	■	■	■	0,833
6	■	■	■	■	1,0

Таблиця 2

стан	C1	C2	C3	C4	U_2^*
1	■	■	■	■	0,6
2	■	■	■	■	0,733
3	■	■	■	■	0,866
4	■	■	■	■	1,0

Варіант 2. Регулювання вихідної спрямленої напруги в обмеженому діапазоні. Припустимо $U_{2min}^* = U_{2min}/U_{2max} = 0,6$. У першому стані ТКВС маємо $U_{21} = U_{2min}$. Саме на цю напругу необхідно розраховувати середню секцію вторинної обвитки ТЕ – W_{22} . Перша регулювальна секція розраховується на напругу кроку регулювання $E_2^* = 0,4/3 = 0,133$, а друга W_{23} – на $2E_2^* = 0,266$. Таким чином, кількість станів при фіксованій нижній межі діапазону регулювання зменшується при тій самій кількості стійок з шести до чотирьох, тобто вихідну напругу у діапазоні $(0,6-1,0)U_{2max}$ можна виставити з відносною похибкою $\delta = \pm 0,066$ (6,6%) (табл. 2).

Цей варіант цікавий тим, що у двох середніх стійках тиристорів можна замінити менш вартісними некерованими діодами. При цьому за відсутності керуючого сигналу на тиристорах, що залишилися, споживач буде житися напругою найнижчого рівня. При вмиканні першої стійки діоди другої закриваються природним шляхом. При знятті керуючого сигналу з C1 і подачі його на C4, діоди стійки C3 зачинаються і ТКВС переходить у третій стан з $U_2^* = 0,866$. Найбільша напруга подається до споживача при одночасній роботі першої та четвертої тиристорних стійок.

Виходячи з задекларованої мети, розглянемо особливості такої важливої складової роботи регулятора як процес зміни величини вихідної напруги, перехід з одного її рівня на інший. Форма напруги при цьому залежить від різних факторів, зокрема, з якого і на який рівень такий перехід здійснюється, від напрямку його зміни. Як силові ключі тут застосовуються тиристори (прилади, що неповністю керуються), роботі яких притаманні відповідні властивості. Їхнє вмикання здійснюється за певних умов: по-перше, напруга на тиристорі повинна мати пряму полярність, а, по-друге, на нього повинен подаватися відповідний керуючий сигнал. Вимкання тиристора також здійснюється за певних умов: напруга на ньому повинна мати зворотну полярність, струм у ньому повинен завершитися, від керуючого сигналу цей режим не залежить. Нагадування про ці властивості тиристора обумовлене тим, що оскільки при перемиканні використовується природня комутація, то саме від цього суттєво залежить форма напруги та струму на виході регулятора.

Перемикання здійснюється асинхронно в будь-який момент часу, а алгоритм управління організовано наступним чином: керуючі сигнали знімаються одночасно з обох тиристорів стійки, яку треба вимкнути, та подаються на обидва тиристора стійки, яку треба ввімкнути.

Аналіз переключень свідчить, що характер процесу переходу з одного рівня на інший (з попередньої величини U_{2i}^* на потрібну U_{2j}^*) не є однаковим для всіх випадків. Якщо навантаження має активний характер, то форма вихідного струму співпадає з формою напруги. Переключення може бути миттєвим (тобто момент переключення t_{nep} співпадає з моментом подавання керуючого сигналу t_c), «затягнутим» (тобто вихідна напруга зберігається на попередньому рівні до моменту $t = \pi/2$, коли відбувається природний перехід до U_{2j}^*) або мати проміжну стадію, коли протягом часу $\Delta t = \pi/2 - t_c$ до навантаження буде прикладатися напруга з рівнем U_{2np}^* , причому $U_{2i}^* < U_{2np}^* > U_{2j}^*$.

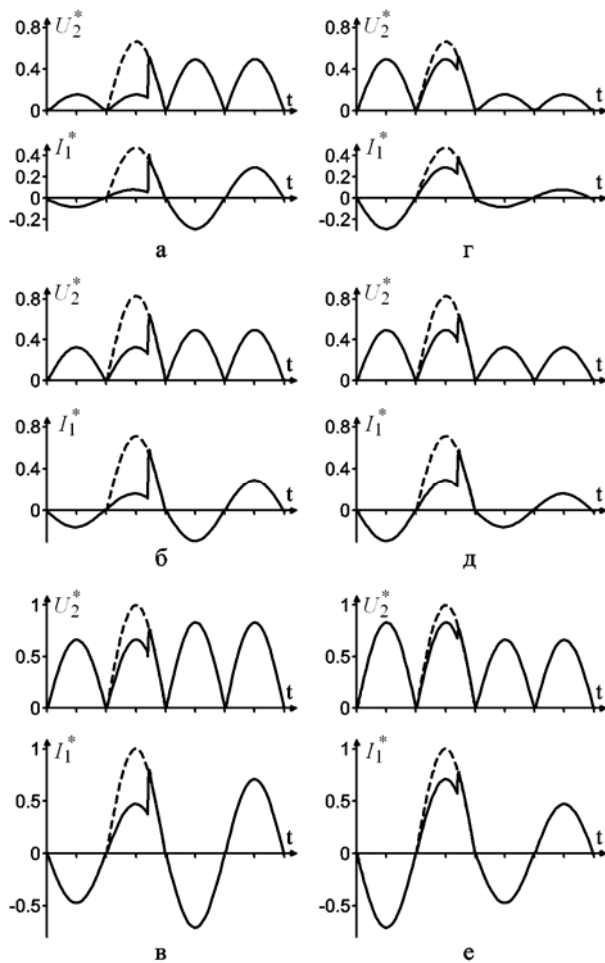


Рис. 2

нено крайні стійки. При цьому видно, що при будь-якому алгоритмі керування силовими ключами напруга на виході регулятора не може перевищувати максимального робочого значення.

При зміні величини напруги з вищого рівня на нижчий ($U_{2j}^* < U_{2i}^*$) стадія тимчасового прикладання проміжної напруги U_{2np}^* спостерігається у тих самих переходах (тільки у зворотньому напрямку), як і при збільшенні напруги. Дійсно, $U_{2np}^* = 0,666$ для переходу $0,5 \rightarrow 0,166$ (рис. 2, з); $U_{2np}^* = 0,866$ для переходу $0,5 \rightarrow 0,166$ (рис. 2, е); $U_{2np}^* = 1,0$ для переходів $0,333 \rightarrow 0,166$; $0,666 \rightarrow 0,333$; $0,833 \rightarrow 0,166$ та $0,833 \rightarrow 0,666$ (рис. 2, е). Інші переходи відбуваються з запізненням, тобто тоді, коли вихідна напруга (струм) спаде до нуля.

Для наочності можливі переходи напруги з одного рівня на інший зведено у табл. 3, де представлено проміжні значення вихідної напруги, а літерам "М" та "З" відповідають випадки миттєвого переключення та переключення з запізненням. (Зазначимо, що у варіанті 2, коли вихідна напруга регулюється в обмеженому діапазоні, є лише два переходи, що мають проміжну стадію: це $0,633 \rightarrow 0,866$ та $0,866 \rightarrow 0,633$, коли $U_{2np}^* = 1,0$. Інші переходи у бік збільшення відбуваються миттєво, а у бік зменшення – затягуються до моменту, коли вихідна напруга (струм) зменшиться до нуля).

На рис. 2 показано також вхідні струми ТКВС, зміна яких при переключеннях якісно подібна до зміни вихідних струмів. Проте кількісно вони суттєво відрізняються через наявність ТЕ зі змінним коефіцієнтом трансформації. Оскільки розглядається варіант ТКВС без втрат в елементах, потужність на виході ТЕ в i -му режимі $P_{2i} = U_{2i} \times I_{2i} = P_{1i} = U_{1i} \times I_{1i}$. Виходячи з того, що вхідна напруга при будь-яких переключеннях залишається незмінною ($U_{1i} = U_{2i}$), з цієї рівності випливає, що $I_{1i} = I_{2i} \times U_{2i} / U_{1i}$.

Спочатку розглянемо переходи у бік збільшення вихідної напруги, тобто коли $U_{2i}^* < U_{2j}^*$. Перехід від нульового до будь-якого іншого рівня або від будь-якого рівня до максимальної напруги 1,0 відбувається миттєво. Також миттєво відбуваються ще чотири переходи, а саме: $0,166 \rightarrow 0,666$; $0,333 \rightarrow 0,833$; $0,5 \rightarrow 0,666$; $0,5 \rightarrow 0,833$. При переході $0,166 \rightarrow 0,5$ до споживача прикладається проміжна напруга $U_{2np}^* = 0,666$ (рис. 2, а); при переході $0,333 \rightarrow 0,5$ маємо $U_{2np}^* = 0,866$ (рис. 2, б), а при переходах $0,166 \rightarrow 0,333$; $0,166 \rightarrow 0,833$; $0,333 \rightarrow 0,666$; $0,666 \rightarrow 0,833$ (рис. 2, в) проміжний рівень напруги має максимальне значення $U_{2np}^* = 1,0$.

Такий перебіг процесу перемикання обумовлений конфігурацією виконавчого органу регулятора та властивостями силових ключів, про які згадувалося вище. Дійсно, якщо в даний момент часу початково ввімкнено будь-які дві стійки тиристорів, а потім подається керування на нову стійку, то виникають умови для включення ключів нової стійки і вони вмикаються. Хоча керування на початкових стійках вже відсутнє, тиристор ще не вимкнувся, бо немає умов для закриття. Нова стійка і одна з початкових стійок утворюють коло з більшою напругою. Коли струм у ключі, з якого знято керування, досягне нульового значення, він вимкнеться і залишиться ввімкненими ключі, на які подано керування, й які визначають надалі величину напруги на виході регулятора. Очевидно, що найбільшого значення напруга набуває у випадку, коли ввімкнено крайні стійки.

Таблиця 3

$U_{ni}^* \setminus U_{nj}^*$	0	0,166	0,333	0,5	0,666	0,833	1,0
0	М	М	М	М	М	М	М
0,166	3	М	1,0	0,666	М	1,0	М
0,333	3	1,0	М	0,833	1,0	М	М
0,5	3	0,666	0,833	М	М	М	М
0,666	3	3	1,0	3	М	1,0	М
0,833	3	1,0	3	3	1,0	М	М
1,0	3	3	3	3	3	3	М

$I_{1j}^* = (0,5)^2 = 0,25$, тобто у 9 разів.

Такі більш глибокі зміни вхідного струму у порівнянні зі змінами вихідного під час переключень КЕ рівня напруги живлення споживача не мають негативних наслідків, тому що все це відбувається у діапазоні, верхньою межею якого є номінальні (максимальні) для цього пристрою значення параметрів електроенергії. Крім того, слід враховувати те, що зміни вхідних струмів відбуваються внаслідок використання дискретно-разового керування [3] і тільки у моменти необхідних переключень протягом не більше півперіоду живлячої напруги, а у стаціонарних режимах і напруги, і струми мають синусоїдальну форму.

Всі попередні міркування стосувалися роботи регуляторів на активне навантаження, на яке, як вже наголошувалося, і вважається найбільш доцільним їхнє використання. Проте, в багатьох випадках в навантаженні присутня індуктивна складова.

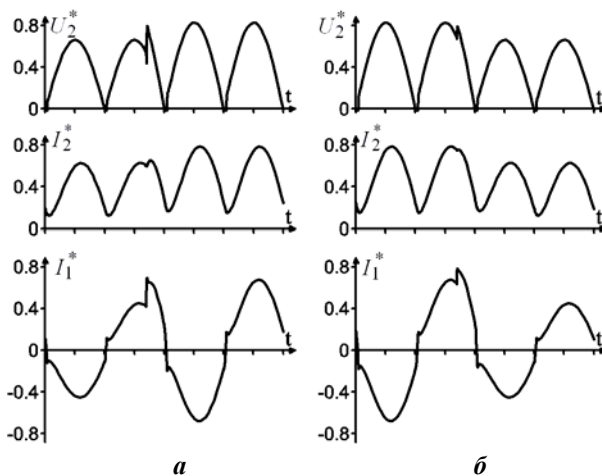


Рис. 3

На рис. 3 проілюстровано процес переходу з рівня $U_{2i}^* = 0,666$ на рівень $U_{2j}^* = 0,833$ (рис. 3, а) і у зворотньому напрямку (рис. 3, б) при активно-індуктивному характері навантаження ($\cos \varphi = 0,95$). Представлені графіки свідчать, що форма вихідної напруги (у порівнянні з активним навантаженням) не змінилася, а вихідний струм очікувано згладжується, тобто перехід між рівнями відбувається без будь-яких сплесків. Вхідний струм також залишається у припустимих межах.

Розглянуті випадки переключень КЕ найпростішого варіанту регулятора спрямованої напруги підтверджують задеклароване у [1] положення щодо можливої реалізації в них перемикачів між рівнями без перевищення вихідною напругою та вихідним та

вхідним струмами своїх максимальних (номінальних) значень. Слід також ще раз наголосити на тому, що ніякої якісної зміни процесів переключення КЕ не відбудеться при переході до більш складних конфігурацій регулятора, спричиненому підвищенням вимог до точності регулювання напруги. Наприклад, при додаванні тільки однієї регульовальної секції ТЕ і однієї тиристорної стійки крок регулювання у варіанті $U_{2i}^* = 0 \div 1,0$ зменшується у 1,5 рази (з 8,33% до 5,44% при співвідношенні витків ТЕ 0,111 – 0,111 – 0,444 – 0,333), а у варіанті $U_{2i}^* = 0,6 \div 1,0$ – у 1,66 рази (з 6,66% до 4% при співвідношенні витків ТЕ 0,08 – 0,08 – 0,6 – 0,24).

Висновки. Регулятори напруги спрямованого струму побудовані на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур з природною комутацією силових ключів, які пропонується використовувати для зміни режимів роботи споживачів, що мають активний характер і живляться зазвичай змінним струмом, відрізняються відсутністю у перехідних процесах перевищень струмами й напругами меж розрахункових номінальних значень, тобто простотою та надійністю комутацій без вживання додаткових обмежуючих заходів.

1. *Литківський К.О.* Порівняльна оцінка ефективності використання ключових елементів у неспотворюючих регуляторах напруги змінного та спрямованого струмів // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – Вип. 36. – С. 82–85.

2. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 1983. – 216 с.
3. Митяков Ф.Е., Горячих Е.В. Исследование влияния переключения ступеней напряжения трансформатора на работу регуляторов температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Электротехника. – 2013. – № 7. – С. 33–37.
4. Новиков М.А., Панфилов Д.И., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов в преобразователях с многообмоточными трансформаторами // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 29–35.
5. Bimal K.Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society News – letter / Forth Quarter. – 2007. – Vol. 19. – №4. – Pp. 11–20.

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

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

Проанализированы особенности дискретного регулирования напряжения в трансформаторно-ключевой структуре с выпрямленным выходным током. Рассмотрены варианты реализации такой структуры, отличающиеся диапазоном изменения выходного напряжения. Обоснована возможность уменьшения количества полупроводниковых ключевых элементов в этой структуре с целью упрощения управления и улучшения стоимостных характеристик. Доказана целесообразность расширения сферы использования исследуемого регулятора на круг потребителей, не выдвигающих строгих требований к виду питающего тока. Библ. 3, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, регулирование напряжения, выпрямленный ток.

FEATURES OF THE PROCESSES OF CHANGE OF OUTPUT VOLTAGE REGULATORS RECTIFIED CURRENT BUILT OF TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE

К.О.Лыпківський, А.Г.Можаровський
 Institute of Electrodynamics national Academy of Science of Ukraine
 pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine.
 e-mail: lypkivskyk@ukr.net

Analyzed features of discrete voltage regulation of transformer-and-switches executive structure of a rectified output current. The variants of the implementation of such a structure, which are distinguished by a range of output voltage. The opportunity of reducing the amount of semiconductor switch elements in this structure in order to simplify and improve the management of cost-tion characteristics. Proved the feasibility of increasing the scope of use of the test controller on the range of consumers that do not put forward strict requirements to the form of the supply current.

References 3, tables 3, figures 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, voltage regulation, rectified current.

1. Лыпківський К.О. Comparative evaluation of the efficiency of the use of the switch elements in nespotvoryuyuchyh AC voltage regulator and straightened currents // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2013. – № 36. – Pp. 82–85. (Ukr)
2. Lipkovskii K.A. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
3. Mitiakov F.E., Goriachikh E.V. Investigation of the influence of switching voltage steps transformer temperature controllers to work in high temperature vacuum furnaces resistance // Elektrotehnika. – 2013. – № 7. – Pp. 33–37. (Rus)
4. Novikov M.A., Panfilov D.I., Remizevich T.V., Rashitov P.A. Analysis of the processes of simultaneous switching thyristor bridge converters with multiple winding transformer // Elektrichestvo. – 2013. – №6. – Pp. 29–35. (Rus)
5. Bimal K.Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society News – letter / Forth Quarter. – 2007. – Vol. 19. – № 4. – Pp. 11–20.

Надійшла 03.01.2014