

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ У НЕСПОТВОРЮЮЧИХ РЕГУЛЯТОРАХ НАПРУГИ ЗМІННОГО ТА СПРЯМЛЕНОГО СТРУМІВ

К.О. Липківський, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Прослідковано особливості побудови та функціонування неспотворюючих регуляторів напруги змінного та спрямленого струмів на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур. Розглянуто можливість розширення традиційної сфери використання регуляторів спрямленої напруги, обумовленої зручністю комутації напівпровідникових ключових елементів у перетворювачах напруги цього типу. Бібл. 3, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: регулятор напруги, спрямлений струм, трансформаторно-ключова виконавча структура, сфера використання, зручність комутації.

Регулювання напруги змінного струму без генерування у вихідну напругу чи у вхідний струм вищих гармонічних складових можливо лише при застосуванні трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) [1], які за допомогою напівпровідникових ключів з природньою комутацією реалізують так зване дискретно-разове керування [3] – цілеспрямовану зміну рівня напруги. Всі інші пристрої силової електроніки, що використовують з метою регулювання напруги її фазову або високочастотну модуляцію, обов'язково вносять небажані (або навіть неприпустимі) спотворення форми електричного сигналу, усунення яких вимагає використання різних засобів фільтрування, що ускладнює такі перетворювачі напруги.

Регулятор з ТКВС, що має J нетотожних станів, які відрізняються коефіцієнтами передачі по напрузі, в кожному з цих станів виступає як звичайний трансформатор з коефіцієнтом трансформації, що відповідає коефіцієнту передачі по напрузі у цьому стані. (Якщо ТКВС складається з кількох трансформуючих елементів (ТЕ) – трансформаторів, автотрансформаторів, вольтододавчих трансформаторів у різних сполученнях, то коефіцієнт передачі є певною функцією коефіцієнтів трансформації усіх ТЕ). Внаслідок цього форма вихідної напруги такого регулятора повторює форму вхідної, а форма вхідного струму – форму струму навантаження. Перехід від одного стану в іншій відбувається дискретно шляхом відповідної зміни стану та коефіцієнта передачі.

Найпростіші та найуживаніші регулятори напруги (РН) змінного струму складаються з трансформатора (автотрансформатора) з секціонованою вторинною обвиткою, до виводів якої приєднані напівпровідникові ключі змінного струму (переважно зустрічно паралельно з'єднані тиристри, бо, як уже зазначалося, комутація цих ключів відбувається на частоті мережі, тобто необхідність у використанні швидкодіючих, але дорогих та не маючих достатнього запасу по перевантаженню транзисторних ключів тут відсутня).

Якщо інші виводи ключових елементів (КЕ) з'єднуються разом, створюючи єдиний комутатор, то кількість можливих станів ТКВС J_1 дорівнює кількості КЕ N ($J_1 = N$). Для підвищення ефективності використання КЕ вдаються до їхньої декомпозиції: комутатор зазвичай поділяють на дві частини (найкраще – однакові за кількістю КЕ – $N_1 = N_2 = 0,5N$) і отримують при тому ж N більшу кількість станів ($J_1 = (0,5N)^2 > J$, бо завжди $N > 4$) [1].

Саме такий варіант ТКВС регулятора змінного струму зображено на рис. 1 а. Якщо регулювання відбувається у діапазоні $\Delta U_2 = U_{2\min} \dots U_{2\max}$, то секцію обвитки W_0 розраховують на величину мінімальної вихідної напруги $U_{2\min}$, дві регулювальні секції W_1 та W_2 виконують однаковими, розрахованими кожна на крок регулювання напруги E_1 , а дві інші регулювальні секції W_3 та W_4 виконують теж однаковими, але розрахованими на напругу,

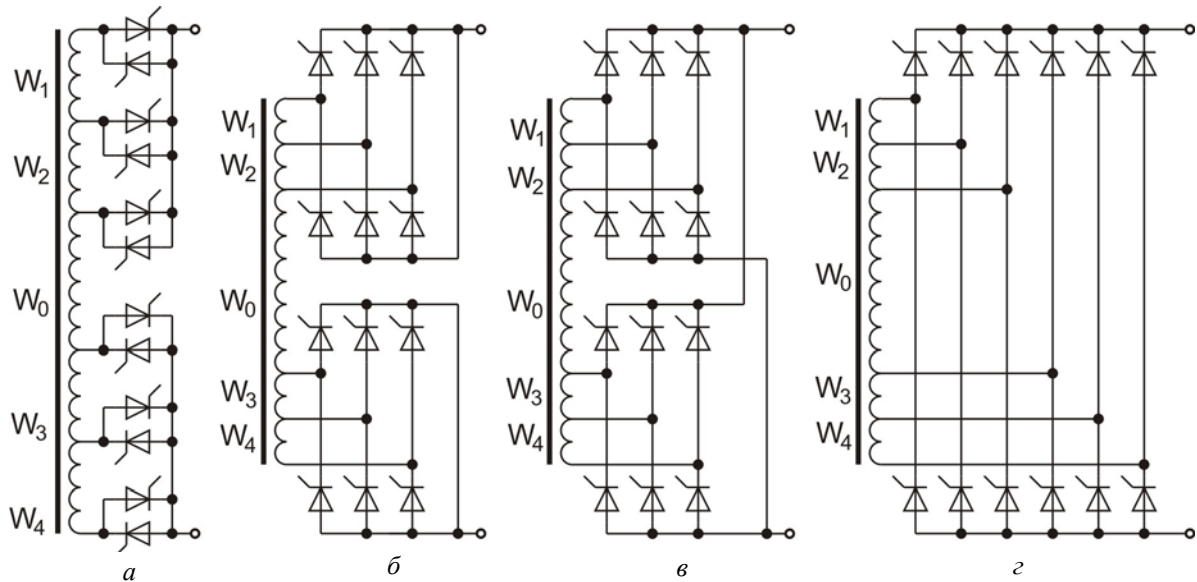


Рис. 1

що втричі перевищує крок регулювання ($3 E_1$), який, виходячи з того, що $J=3 \times 3=9$, має таке значення:

$$E_1 = \frac{U_{2\max} - U_{2\min}}{J-1} = \frac{\Delta U_2}{J-1} = 0,125 U_{2\max} (1 - U_{2\min}^*), \quad (1)$$

де $U_{2\min}^* = U_{2\min} / U_{2\max}$.

Якщо необхідне глибоке регулювання ($U_{2\min} = 0$), то секцію W_0 доцільно розраховувати теж на напругу, що відповідає кроку регулювання. При цьому додається ще один стан ТКВС ($J=10$) за рахунок того, що додатковий нульовий рівень відповідає закритому положенню всіх КЕ. Крок регулювання зменшується до

$$E_2 = U_{2\max} / 9 = 0,111 U_{2\max}, \quad (2)$$

тобто у межах $0 \dots U_{2\max}$ можливо отримати будь-яке потрібне значення вихідної напруги з похибкою $\delta = 5,55 \% U_{2\max}$. (Прийняти напругу на W_0 , що дорівнює мінімальній у цьому випадку напрузі – нулю, тобто фактично ліквідувати цю секцію, нелогічно, бо у такому разі похибка δ згідно з (1) була б вищою і дорівнювала б $6,25 \% U_{2\max}$).

Щоб перейти від РН змінного струму до РН спрямленого струму, зобразимо комутатори першого у вигляді двох мостів (рис. 1 б). З'єднаючи анодні та катодні групи цих мостів так, як показано на рис. 1 в, отримуємо РН спрямленого струму. Для більшої компактності переходимо до іншого його зображення – так званого багаторівневого випрямляча (рис. 1 г). Тут при регулюванні напруги від $U_{2\min}$ до $U_{2\max}$ вибір витків секцій ТЕ збігається з тим, який був у РН рис. 1 а, тією ж залишається і кількість можливих станів ТКВС (див. таблицю).

№	Рис. 1	$U_{2\min}$	U_{W1}	U_{W2}	U_{W0}	U_{W3}	U_{W4}	J	E
1	а, б, в, г	>0	E_1	E_1	$U_{2\min}$	$3 E_1$	$3 E_1$	9	$\Delta U_2 / 8$
2	а	0	E_2	E_2	E_2	$3 E_2$	$3 E_2$	10	$U_{2\max} / 9$
3	б		E_3	E_3	$4 E_3$	$3 E_3$	$3 E_3$	13	$U_{2\max} / 12$
4	г		E_4	E_4	$4 E_4$	$3 E_4$	–	10	$U_{2\max} / 9$

Проте при глибокому регулюванні напруги, коли $U_{2\min} \rightarrow 0$, доцільно вже по-іншому вибирати витки основної секції W_0 , її необхідно розраховувати на напругу, що дорівнює $4 E_3$, залишаючи регульовальні секції такими, як і були. Тоді кількість станів ТКВС зросте до

13 (дванадцять станів за рахунок різних сполучень увімкнених КЕ, а тринадцятий – нульовий – при їх повному відключенні). Крок регулювання тут буде значно меншим:

$$E_3 = U_{2\max}/12 = 0,0833 U_{2\max}, \quad (3)$$

тобто максимальна помилка, з якою ми можемо виставити необхідне значення вихідної напруги, буде дорівнювати $4,17\% U_{2\max}$.

Якщо немає потреби підвищувати точність регулювання вихідної напруги, можна залишити її на тому ж рівні з похибкою $5,55\% U_{2\max}$, але зменшити кількість секцій до трьох та скоротити кількість КЕ до п'яти, тобто дещо спростити ТКВС (четвертий рядок таблиці).

Для розглянутих РН з шістьма КЕ (дванадцятьма тиристорами) залежність похибки регулювання δ від діапазону зміни вихідної напруги ΔU_2 , обчисленої за (1), зображено на рис. 2 (позначено літерою А). Тут також показано рівні похибок, які отримуються при виборі витків секцій згідно з рядками 2, 4 таблиці (позначено літерою В), та згідно з рядком 3 таблиці (позначено літерою Б). Як видно, з позиції зменшення δ (без будь-яких ускладнень схеми), останні два варіанти вибору кількості витків основної секції W_0 доцільні не тільки при необхідності регулювання у повному діапазоні (від нуля). Так, варіант, що відповідає рядку 3 таблиці, дає вигреш щодо δ при $\Delta U_2 \geq 0,67$, а варіант, що відповідає рядку 4, при $\Delta U_2 \geq 0,86$.

За необхідності подальшого зменшення похибки регулювання ТКВС повинен забезпечувати більшу кількість нетотожних робочих станів, для чого треба збільшити кількість КЕ та регулювальних секцій і змінити їх виткові співвідношення. Так, при $N=7$ у випадку $U_{2\min} \neq 0$ маємо $J=3 \times 4=12$ (секція W_0 розраховується на $U_{2\min}$, дві регулювальні секції – на напругу E_4 , а інші три регулювальні секції – на напругу $3E_4$), або, що рівноцінно, маємо $J=4 \times 3=12$ (секція W_0 – така ж, три регулювальні секції розраховуються на напругу E_4 , а дві – на напругу $4E_4$). Цій залежності на рис. 2 відповідає штрихова лінія, позначена літерою Г. У випадку $U_{2\min}=0$ регулювальні секції вибираються такими ж, як в останньому варіанті, а секція W_0 розраховується на напругу $5E_4$. При цьому маємо $J=16$, $E_4=0,0666 U_{2\max}$, $\delta=3,33\% U_{2\max}$ (лінія Д на рис. 2). Така точність регулювання напруги (без внесення будь-яких спотворень) є задовільною для більшості споживачів.

Необхідно відзначити цікаву особливість такого типу регуляторів напруги спрямованого струму – при $U_{2\min} \neq 0$ можна чотири тиристори, які підходять до виводів секції W_0 , замінити менш вартісними нерегульованими напівпровідниковими приладами – звичайними діодами: при переході ТКВС з одного стану в інший введення в дію будь-якої пари тиристорів "закриє" найближчу діодну пару, і, навпаки, при вимкненні якоїсь тиристорної пари відбудеться автоматичне введення в дію найближчої до них діодної пари. При цьому дещо спрощується й система керування ТКВС.

Все це свідчить про те, що РН спрямованого струму мають такі ж або кращі характеристики, як і РН змінного струму щодо ефективності використання напівпровідникових ключових елементів. Це дає змогу при заданих глибині та точності регулювання залучити меншу кількість КЕ або при тому ж числі отримувати більшу точність регулювання напруги.

Проте є ще й більш цікава і вагома особливість РН спрямованого струму, а саме зручність реалізації комутацій (перемикань) КЕ при цілеспрямованій зміні коефіцієнта передачі ТКВС по напрузі. Дійсно, у РН змінного струму при одночасному знятті сигналу керування з працюючого тиристора і подачі відповідного сигналу на увімкнення наступного КЕ можливе

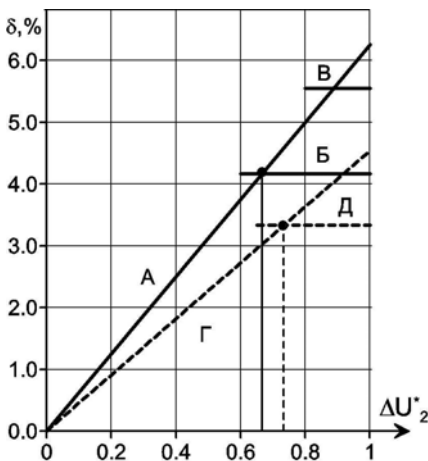


Рис. 2

виникнення короткозамкненого кола, струм у якому обмежується лише активним опором секції (або секцій), що комутується, і внаслідок цього може значно перевищувати відповідний струм у нормальному режимі. Це, по-перше, небезпечно для самих ключових елементів, а по-друге, може призвести до небажаних сплесків вхідного струму ТКВС.

З метою уникнення короткозамкнених кіл в РН змінного струму доводиться або жорстко розвести керуючі сигнали, що подаються на тиристори, у часі (при цьому споживач може опинитись на якийсь проміжок часу без електропостачання), або покласти на систему керування додаткову функцію стеження за напругою та струмом, що призводить до апаратного ускладнення. Проте, маючи цю інформацію, можна реалізувати безпечну комутацію, якщо дотримуватися певних правил, а саме: перехід з нижчого рівня на вищий робити при співпадінні полярностей напруги та струму, а зворотний перехід – у період, коли їхні фази протилежні [2].

У РН спрямленого струму при комутаціях априорі неможливим є виникнення короткозамкнених кіл. Певна річ, у таких РН будуть відбуватися при комутаціях перехідні процеси, але вони будуть короткочасними і ніколи не супроводжуватимуться перевищенням номінальних значень напруги та струму на всіх елементах ТКВС. (Проте це питання заслуговує окремого дослідження).

Окреслені вище позитивні властивості регуляторів напруги спрямленого струму, побудованих на основі високоефективних ТКВС, спонукають спробувати розглянути питання перспективності розширення їхньої традиційної сфери використання. Підставою для цієї спроби може бути аналіз вимог споживачів до умов електроживлення. Річ у тім, що є певні групи споживачів, реалізація основного функціонального призначення яких не залежить від типу джерела напруги – чи воно змінного, чи постійного (спрямленого) струму. В першу чергу – це численні різноманітні нагрівальні пристрої (зокрема, ТЕН'и – теплоелектронагрівачі), печі опору. Крім того – це освітлювальна апаратура з лампами розжарювання, потужні спеціалізовані джерела світла тощо.

Якщо для нормального функціонування цих споживачів, що допускають "альтернативне" живлення, необхідне регулювання рівня напруги (струму) навантаження без негативного впливу на мережу, то видається доцільним використання для цієї мети саме регуляторів напруги спрямленого струму на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур.

1. *Липковский К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1983. – 216 с.
2. *Халиков В.А.* Перехідні процеси при комутації трансформаторів і можливості їх уникнення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2008. – Вип. 20. – С. 46–47.
3. *Bimal K. Bose.* Power Electronics – Why the Field is so Exciting // IEEE Power Electronics Society News – letter / Forth Quarter – 2007. – Vol. 19, № 4. – P. 11–20.

УДК 621.314

К.А. Липковский, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Сравнительная оценка эффективности использования ключевых элементов в неискажающих регуляторах напряжения переменного и выпрямленного токов

Прослежены особенности построения и функционирования неискажающих регуляторов напряжения переменного и выпрямленного токов на основе трансформаторно-ключевых исполнительных структур. Рассмотрена возможность расширения традиционной сферы применения регуляторов выпрямленного напряжения, обусловленного удобством коммутации полупроводниковых ключевых элементов в преобразователях напряжения этого типа. Библ. 3, рис. 2, таблица.

Ключевые слова: регулятор напряжения, выпрямленный ток, трансформаторно-ключевая исполнительная структура, сфера применения, удобство коммутации.

К.О. Lypkivskyi

Institute of Electrodynamics national Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine

Comparative evaluation of the effectiveness of the use of the switching elements in a non-distortionary voltage regulators alternating and the rectified currents

The article traces the features of construction and operation of non-distortionary controls the voltage regulator alternating and rectified current transformer switching executive structures. Consider the possibility of expanding the scope of application of traditional regulators rectified voltage due to the convenience of the switching elements of semiconductor switching converters the voltage of this type. References 3, figures 2, table.

Key words: voltage regulator, rectified current, transformer switching executive structure, scope of application, ease of switching.

Надійшла 7.08.2013

Received 7.08.2013