

## ОРГАНІЗАЦІЯ ВОЛЬТОДОДАВЧОГО КАНАЛУ В СТРУКТУРІ ВІДНОВЛЮВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

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](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*Нестабільність роботи відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), яка зумовлена зміною метеорологічних умов, вимагає відповідного коригування вихідної напруги. Один з варіантів здійснення такого коригування полягає в організації вольтододавчого каналу, що пропонується виконувати на основі напівпровідникового перетворювача енергії, трансформаторно-ключова виконавча структура (ТКВС) якого складається з трансформатора з секціонованою вторинною обвиткою та багаторівневого випрямляча. Ця ТКВС шляхом дискретно-разового керування ключовими елементами реалізує необхідну цілеспрямовану зміну рівня вихідної напруги. Проаналізовано множину сталих станів функціонування (коефіцієнтів передачі по напрузі) ТКВС та визначено доцільні варіанти переходів між ними. Обґрунтовано високу ефективність використання ключових елементів у цій ТКВС та малі сумарні втрати на напівпровідникових приладах. Бібл. 6, рис. 2, табл. 1.*

**Ключові слова:** відновлюване джерело енергії, вольтододавчий канал, перетворювач напруги, трансформаторно-ключова виконавча структура, секція обвитки, багаторівневий випрямляч.

Останні десятиріччя у світовій енергетиці відбувається стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – за даними [1] їхня загальна встановлена потужність зросла з 1228 ГВт у 2010 році до 2350 ГВт у 2018 році, тобто майже вдвічі. Відновлювані джерела енергії відзначаються практичною невичерпністю та екологічною чистотою, що сприяє поліпшенню екологічного стану і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті [2]. Проте апріорна залежність роботи всіх ВДЕ від метеорологічних умов довкілля вимагає для забезпечення унормованої роботи системи застосування в ній певних технічних засобів стабілізації вихідної напруги.

У [3] запропоновано цікаве схемотехнічне рішення цієї проблеми для ВДЕ з виходом на постійному струмі (рис. 1). Воно полягає в організації вольтододавчого каналу живлення навантаження (ВДК), яким, за необхідності, реалізується додаткове подавання енергії від окремого джерела. У ВДК

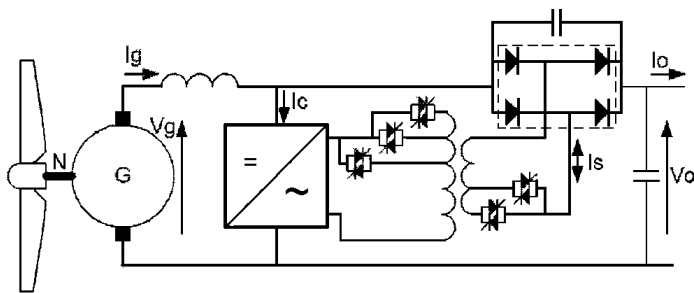


Рис. 1

вхідну напругу постійного струму інвертор (зазвичай високочастотний) перетворює на енергію змінного струму, яка подається на трансформаторно-ключову виконавчу структуру ТКВС [4], що складається з трансформатора (Tr) з секціонованими обвитками та двох напівпровідникових комутаторів (три пари зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів у вхідному колі Tr та дві – у вихідному). Рівень вихідної напруги Tr, яка подається у діагональ діодного моста, увімкнено-

го послідовно з навантаженням, можна цілеспрямовано змінювати шляхом дискретно-разового керування [5] тиристорами в діапазоні  $(1 \div 6)\Delta U_1$ , де  $\Delta U_1$  – крок регулювання. Ця напруга додається до напруги генератора у випадку її зниження, тобто досягається певне нівелювання відхилень вихідної напруги ВДЕ від номінального значення. (Мова йде саме про відхилення, а не коливання напруги, бо система не є прецизійною та швидкодіючою). Особливістю цього рішення є достатньо велика кількість напівпровідникових елементів (10 тиристорів, 4 діоди), причому одночасно обтікаються струмом чотири напівпровідникові переходи, що негативно позначається на коефіцієнті корисної дії ВДК.

У роботі пропонується функції цілеспрямованої зміни додаткової напруги змінного струму та її випрямлення покласти на так званий багаторівневий тиристорний випрямляч [6], який реалізує вольтододавання у тому ж діапазоні, але має лише вісім тиристорів, з яких одночасно працює лише два.

© Липківський К.О., Можаровський А.Г., 2020

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0002-3292-1360>; \*\* <https://orcid.org/0000-0001-9801-2728>

Метою роботи є визначення доцільного принципу керування тиристорами трансформаторно-ключової виконавчої структури з багаторівневим випрямлячем у вольтододавчому каналі відновлюваного джерела енергії постійного струму.

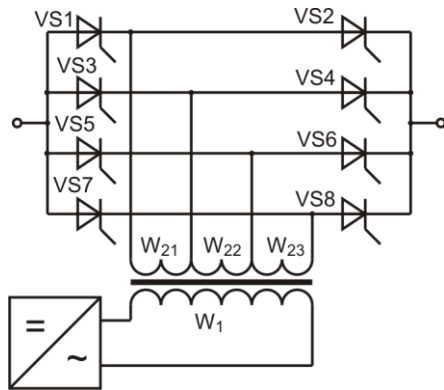


Рис. 2

На рис. 2 показано один з множини варіантів схемотехнічної реалізації такого вузла вольтододавання на основі ТКВС перетворювача постійної напруги. До його складу входить трансформатор, що має первинну обмотку  $W_1$ , вторинну з трьох секцій –  $W_{21}$ ,  $W_{22}$ ,  $W_{23}$  та чотири стійки, що складаються з двох послідовно з'єднаних тиристорів: C1 – тиристири VS1, VS2; C2 – VS3, VS4; C3 – VS5, VS6; C4 – VS7, VS8. Для забезпечення лінійної зміни вихідної напруги співвідношення кількості витків секцій вторинної обмотки трансформатора наступне:  $W_{22}=3W_{21}$ ,  $W_{23}=2W_{21}$ . Місця з'єднання пари тиристорів у стійках підключено до відповідних відводів секцій вторинної обмотки. Даний вузол виконує ту ж саму функцію, що й вищенаведений пристрій, й забезпечує ті ж самі сім станів ( $J=7$ ) з нетотожними дискретними коефіцієнтами передачі, яким відповідає сім рівнів вихідної напруги перетворювача.

Це насамперед стан прямої передачі або "транзит" ( $j=0$ ) – увімкнено ключі тільки однієї будь-якої стійки (у аналога цей стан буде у випадку, коли вимкнено ключі комутатора у вторинній обмотці), де  $j$  – номер стану. Решта станів формується, якщо вмикаються дві стійки. Представимо їх в порядку пропорційного збільшення вихідної напруги вузла вольтододавання (падіння на тиристорах не враховуються):  $j=1$ ,  $\Delta U = \Delta U_1 - C1, C2$ ;  $j=2$ ,  $\Delta U = 2\Delta U_1 - C3, C4$ ;  $j=3$ ,  $\Delta U = 3\Delta U_1 - C2, C3$ ;  $j=4$ ,  $\Delta U = 4\Delta U_1 - C1, C3$ ;  $j=5$ ,  $\Delta U = 5\Delta U_1 - C2, C4$ ;  $j=6$ ,  $\Delta U = 6\Delta U_1 - C1, C4$ . Зазначимо, що номер стану співпадає з напругою вузла вольтододавання, нормованою по напрузі секції  $W_{21}$ . Слід звернути увагу на те, що, коли буде одночасно увімкнено групу з трьох або чотирьох стійок, величину вихідної напруги визначають крайні стійки в групі.

$j_n \backslash j_n$	0	1	2	3	4	5	6
0	C2	+C1	+C3-C2 +C4	+C3	+C1-C2 +C3	+C4	+C1-C2 +C4
1	-C1	C1C2	+C3-C1 +C4-C2	+C3-C1	+C3-C2	+C4-C1	+C4-C2
2	-C3+C2 -C4	-C3+C1 -C4+C2	C3C4	+C2-C4	+C1-C4	+C2-C3	+C1-C3
3	-C3	+C1-C3	+C4-C2	C2C3	+C2-C4	+C4-C3	+C1-C2 +C4-C3
4	-C1+C2 -C3	+C2-C3	+C4-C1	+C4-C2	C1C3	+C2-C1 +C4-C3	+C4-C3
5	-C4	+C1-C4	+C3-C2	+C3-C4	+C1-C2 +C3-C4	C2C4	+C1-C2
6	-C1+C2 -C4	+C2-C4	+C3-C1	+C2-C1 +C3-C4	+C3-C4	+C2-C1	C1C4

забезпечує "транзит", обрано стійку C2). Введення в дію стійки позначається знаком "+", а виведення з дії – знаком "-".

Застосування дискретно-разового керування ключами дозволяє у ТКВС використовувати природню комутацію тиристорів, що спрощує реалізацію керування. Оскільки, як вже зазначалося, перехід з одного стану структури в інший необхідно проводити без переривання силового струму, вибір моменту зняття сигналів керування з працюючих тиристорів треба здійснювати в середині півперіоду змінної напруги, одночасно подаючи сигнал керування на ключі, які вступають у роботу. Такий алгоритм враховує властивості роботи неповністю керованих елементів – тиристорів: залежності від наявності сигналу керування, від полярності напруги на ньому та протікання струму в колі.

Реалізація такого алгоритму багатоваріантна. У деяких випадках він може відбуватися одноетапно (за один крок). Наприклад, перехід від стану "транзит" (C2), за якого  $\Delta U=0$ , до стану  $j=1$ ,  $\Delta U = \Delta U_1$  вимагає лише подачі імпульсів керування на тиристири стійки C1. Перехід від стану  $j=1$  до стану

Операції переходу структури з будь-якого початкового стану ( $j_n$ ) у будь-який необхідний інший стан ( $j_n$ ) відображено у таблиці, де лівий стовпчик визначає  $j_n$ , верхній рядок –  $j_n$ , а по діагоналі виділено чарунки, у яких наведено позначення сполучень працюючих стійок у кожному з семи штатних станів (при цьому  $j_n=j_n$ ); вище і праворуч від цієї діагоналі реалізується збільшення  $\Delta U$ , нижче і ліворуч – зменшення (тут за стійку, що

$j=3$  реалізується шляхом одночасного зняття сигналів керування з тиристорів стійки С1 та подачею відповідних сигналів на тиристори стійки С3 тощо.

Проте, в деяких випадках переходи доводиться здійснювати через "нештатний" проміжний стан. Наприклад, у разі переходу з  $j=1$  у  $j=2$ . Початково увімкнено стійки С1 та С2 й, відповідно на випрямляч подається напруга  $\Delta U_1$ . Для переходу діємо за алгоритмом, наведеним вище: знімаємо керування з С1 та С2 й подаємо керування на тиристори стійок С3 та С4. Але тиристори стійки С1 ще продовжують проводити струм, а для тиристорів С4 виникають умови для вмикання, і вони починають проводити струм. Величина напруги для випрямлення визначатиметься увімкненими в даний час С1 та С4, тобто відповідатиме  $j=6$  (проміжний "нештатний" стан). Коли тиристори С1 закриються, залишаються відкритими тиристори С3 та С4, тобто відбувається перехід у стан  $j=2$ , на випрямляч подається напруга  $2\Delta U_1$ . Якщо при цьому переході не бажано мати нештатний стан з високою напругою ( $2\Delta U_1$ ), то можна діяти наступним чином.

Спочатку включаємо С3 – на виході маємо  $\Delta U=4\Delta U_1$  (працюють С1, С2, С3, але стан визначають крайні стійки); виключаємо С1, С2 – на виході  $\Delta U=0$ , ("транзит", працює С3.); включаємо С4 – на виході  $\Delta U=2\Delta U_1$  (працюють С3, С4). Це кінцевий стан  $j=2$ , який потрібен, тобто задача вирішена. Але, по-перше, перехід здійснено не за один крок, а за три; по-друге, на "шляху" було два проміжних стани  $j=0$  та  $j=4$  з  $\Delta U=4\Delta U_1 < 6\Delta U_1$ . Перехід з  $j=1$  у  $j=2$  можна виконати і з меншим значенням проміжного стану, але перехід потребує більшої кількості кроків – чотирьох. Тобто, тривалість переходу зросла, але найбільша величина проміжної напруги зменшилася до  $\Delta U=3\Delta U_1$ .

Наявність альтернативних варіантів переходу від одного стану ТКВС до іншого вимагає у кожному конкретному випадку порівнювати вагомість можливих наслідків – або "розтягування" переходу в часі у півтора-два рази, або певного збільшення вихідної напруги у проміжному стані. Проте цей короткотривалий "стрибок" напруги не є надто критичним.

Таким чином, багатоваріантність реалізації дискретно-разових переходів між станами є ще одним аспектом задекларованої [4] апріорної схемотехнічної, алгоритмічної та практичної багатоваріантності трансформаторно-ключових виконавчих структур перетворювачів напруги, що відзначаються високою ефективністю використання напівпровідникових ключових елементів та встановленої потужності трансформуючого елемента.

Наостанок зазначимо, що розглянуте у структурі відновлювального джерела живлення схемотехнічне рішення ТКВС може мати широку сферу застосування у всіх тих випадках, коли в системі живлення постійного струму доцільним є використання вольтододавчого каналу. До того ж, за необхідності можливим є варіювання глибини регулювання вихідної напруги при заданому кроці зміни її рівня, або ж зменшення цього кроку при заданій глибині шляхом збільшення кількості стійок випрямляча та відповідним збільшенням кількості секцій вихідної обвитки трансформуючого елемента. Вибір доцільних виткових співвідношень цих секцій є предметом окремого дослідження.

**Висновки.** Прослідковано особливості переходів між сталими станами трансформаторно-ключової виконавчої структури у складі вольтододавчого каналу постійного струму відновлювального джерела енергії при регулюванні вихідної напруги. Виявлено багатоваріантність реалізації цих переходів та сформовано принципові положення дискретно-разового керування такої ТКВС.

*Роботу виконано за держбюджетною темою "Бар'єр-2", державний реєстраційний номер 0117U007714 (КПКВК 6541030).*

1. Statistics Time Series.

URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (дата звернення 25.01.2020).

2. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в слабкі електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 25-26.

3. Allan David Crane, Warren Mark Blewi. Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.

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

5. Vimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter*. 2007. Vol. 19.No 4. Pp. 11-20.

6. Липковский К.А., Озерянский А.А., Градоблянский В.М. Особенности построения трансформаторно-тиристорных регуляторов выпрямленного напряжения. Методы и средства преобразования параметров электрической энергии. К.: Наукова думка, 1977. С. 24–28.

## ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО КАНАЛА В СТРУКТУРЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*Нестабильность работы возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которая обусловлена изменением метеорологических условий, требует соответствующей корректировки выходного напряжения. Один из вариантов осуществления такой корректировки заключается в организации вольтодобавочного канала, который предлагается выполнять на основе полупроводникового преобразователя энергии, трансформаторно-ключевая исполнительная структура (ТКИС) которого состоит из трансформатора с секционированной вторичной обмоткой и многоуровневого выпрямителя. Эта ТКИС путем дискретно-кратного управления ключевыми элементами реализует необходимое целенаправленное изменение уровня выходного напряжения. Проанализировано множество постоянных состояний функционирования (коэффициентов передачи по напряжению) ТКВС и определены целесообразные варианты переходов между ними. Обосновано высокую эффективность использования ключевых элементов в этой ТКИС и малые суммарные потери на полупроводниковых приборах. Библ. 6, рис. 2, табл. 1.*

**Ключевые слова:** возобновляемый источник энергии, вольтодобавочный канал, преобразователь напряжения, трансформаторно-ключевая исполнительная структура, секция обмотки, многоуровневый выпрямитель.

## ORGANIZATION OF A BOOST CHANNEL IN THE STRUCTURE OF A RENEWABLE DC ENERGY SOURCE

K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*The instability of the work of renewable energy sources (RES), which is caused by a change in meteorological conditions, requires appropriate adjustment of the output voltage. One of the options for implementing this adjustment is to organize a boost channel, which is proposed to be performed on the basis of a semiconductor energy converter, the transformer-and-switches executive structures (TSES) of which consists of a transformer with a partitioned secondary winding and a multi-level rectifier. This TSES through discrete-time control of key elements implements the necessary purposeful change in the level of output voltage. The set of constant functioning states (voltage transfer coefficients) of the TSES is analyzed and the appropriate transition options between them are determined. The high efficiency of the use of switches elements in this TSES and low total losses on semiconductor devices are substantiated. References 6, figures 2, table 1.*

**Key words:** renewable energy source, boost channel, voltage converter, transformer-and-switches executive structure, winding section, multi-level rectifier.

1. Statistics Time Series.

URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series> (accessed 25.01.2020)

2. Kyrylenko O.V., Pavlovsky V.V., Lukanenko L.M., Trach I.V. Problems of integration of renewable energy sources into weak electric grids. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 25-26. (Ukr)

3. Allan David Crane, Warren Mark Blewi . Power converters. US Patent 9800161B2. Oct. 27, 2017.

4. Lypkovskyi K.A. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).

5. Bimal, K Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter*. 2007. Vol. 19.No 4. Pp. 11-20.

6. Lypkovskyi K.A., Ozerianskyi A.A., Gradoblianskyi V.M. Features of the construction of transformer-thyristor regulators of rectified voltage. Methods and means of converting electrical energy parameters. Kiev: Naukova Dumka, 1977. Pp. 24-28.

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 16.04.2020