

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.095>**ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗІ ШТУЧНОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

В.В. Голубєв *, канд. техн. наук, **В.М. Губаревич** **, канд. техн. наук,
В.І. Зозульов ***, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня** ****, канд. техн. наук, **А.І. Сторожук**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: marunia@ied.org.ua

У роботі представлено перспективні схеми тиристорних трансформаторних і безтрансформаторних перетворювачів змінної та постійної напруги зі штучною модернізованою комутацією та наведено докладний опис роботи останньої. Бібл. 2, рис. 7.

Ключові слова: перетворювачі, вузли комутації, тиристори, трансформатори, якість вихідної енергії.

Тиристорні перетворювачі (ТП) змінної напруги однофазні і трифазні будуються на основі тиристорів із природною або штучною комутацією [1, 2]. Їхня загальна перевага – висока надійність унаслідок великої перевантажувальної здатності та великого коефіцієнта посилення ланцюга керування тиристором, що знижує втрати на керування. ТП можуть бути побудовані з урахуванням великих і надвеликих потужностей.

Загальними особливостями ТП є проблеми комутації тиристорів. ТП із природною комутацією (ПК) можуть працювати тільки в режимі фазового і низькочастотного (нижче частоти мережі) керування. До того ж, у разі фазового глибокого керування виникає відставання струму навантаження (мережі) від напруги мережі за активного й активно-індуктивного навантаження, що спричиняє низький вхідний коефіцієнт потужності перетворювача. У разі роботи на активно-індуктивне навантаження вони мають зону нечутливості до керування, рівну куту зсуву фази. ТП-ПК не вимагають систем скидання накопиченої в схемі енергії, застосовуються для регулювання напруги в печах нагріву і в асинхронному параметричному електроприводі, для побудови пускачів і перетворювачів частоти (циклоконверторів) в асинхронному частотному електроприводі, у резонансних інверторах для високочастотного нагріву металів та ін.

ТП зі штучною комутацією (ШК) і високочастотним широтно-імпульсним керуванням позбавлені зазначених недоліків. Однак схеми, розроблені та досліджені раніше [1, 2], мають властивість накопичення енергії у вузлах комутації (ВК) під час роботи на високій частоті, що вимагає розробки нових методів побудови ВК і способів управління ними.

Ураховуючи вищезазначене, **метою роботи** є визначення нових схемотехнічних рішень та принципів побудови тиристорних перетворювачів змінної та постійної напруги різного функціонального призначення на основі мостових ключів з удосконаленими вузлами штучної комутації та їхньої роботи за результатами дослідження останніх на комп'ютерних моделях.

Мостові ключі за великої кількості ланцюгів, що перемикаються, мають можливість знизити масу, габарити і вартість перетворювачів побудовою схем із загальним вузлом ШК для всіх ланцюгів. Крім того, ТП-ШК порівняно з ТП-ПК мають істотно більшу швидкодію перемикавання, більш високий вхідний коефіцієнт потужності, а також широкі функціональні можливості [1, 2]. У відомих і нових схемах ТП-ШК, описаних нижче, застосовані удосконалені ВК, новизна яких полягає в застосуванні двох додаткових зарядних (блокуючих) тиристорів. Останні дають змогу за високочастотної комутації контролювати й усувати зайві накопичення зарядів у комутуючих конденсаторах і дроселях, підвищуючи водночас надійність та економічність роботи ВК. ТП-ШК доцільно застосовувати для побудови *швидкодійних* регуляторів-стабілізаторів і перемикачів змінної напруги в системах гарантованого (резервованого) і безперебійного електропостачання, в асинхронному (параметричному і частотному)



електроприводі та системах симетрування струмів і напруг у трифазних електричних мережах.

На рис. 1 наведено схему регулятора змінної напруги із загальним вузлом ШК, що дає змогу перемикаати навантаження з одного виведення трансформатора на інший, число ланцюгів, що перемикаються за такої умови нічим не обмежене.

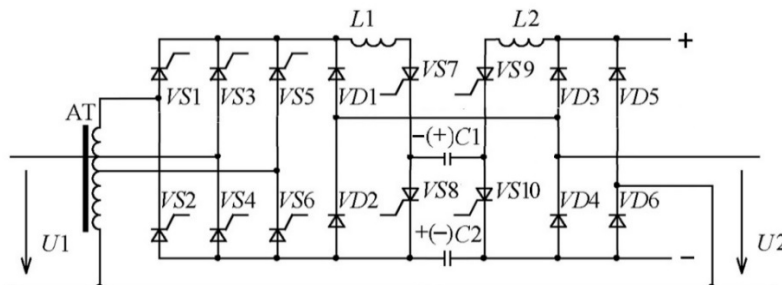


Рис. 1. Регулятор змінної напруги із загальним вузлом штучної комутації (ШК)

Перетворювач містить мережевий автотрансформатор АТ, вхідний тиристорно-діодний багатофазний міст ($VS1-VS6$, $VD1$, $VD2$), вихідний діодний міст ($VD3-VD6$), зарядні (блокуючі) $VS7$, $VS9$, силовий (робочий) $VS8$ і комутуючий $VS10$ тиристири, комутуючі конденсатори ($C1$, $C2$) і комутуючі дроселі ($L1$, $L2$).

Для наочності опису процесів, що відбуваються в схемі, на рис. 2 наведено діаграми сигналів управління тиристорами вузла комутації, струмів у тиристорних ключах і напруг на комутуючих конденсаторах.

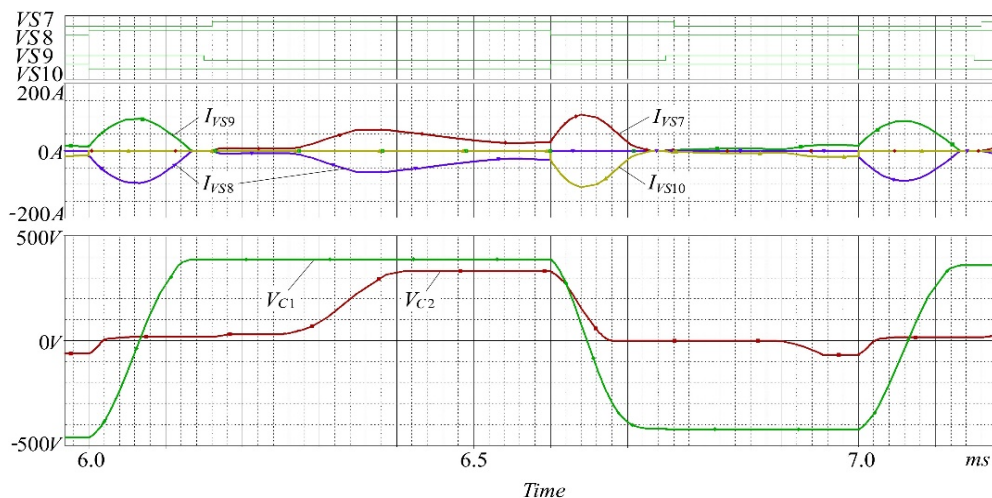


Рис. 2. Діаграми сигналів управління тиристорами $VS7-VS10$, струмів $I_{VS7}-I_{VS7}$ у тиристорних ключах $VS7-VS10$ і напруг V_{C1} , V_{C2} на комутуючих конденсаторах $C1$, $C2$

Перетворювач працює таким чином. **На першому** (умовно), зарядному інтервалі часу, вмикаються робочий тиристор $VS8$ і зарядний тиристор $VS9$. Комутуючі конденсатори $C1$ і $C2$ перезаряджаються через навантаження ланцюгом $VD3-L2-VS9-C1-VS8-C2-VD6$ до полярності, зазначеної на лівих обкладках конденсаторів поза дужками. Унаслідок резонансного перезаряду $C1$ (конденсатор $C2$ залишається розрядженим) запираються тиристири $VS8$ і $VS9$, а вузол комутації готовий до вимикання робочого тиристора $VS8$ на початку третього інтервалу.

На другому, робочому інтервалі часу, керування подається на одну із трьох пар тиристорів вхідного мосту, наприклад $VS1$ і $VS2$, а також $VS7$ і $VS8$. Припустимо, що для тиристора $VS1$ напруга мережі позитивна. Тоді струм буде проходити ланцюгом $VS1-L1-VS7-VS8-VD2$ -навантаження-нуль мережі. У напрузі навантаження $U2$ формується імпульс, рівний за величиною напрузі мережі. На другому інтервалі заряджається конденсатор $C2$ (рис. 2).

На третьому інтервалі включається комутуючий тиристор $VS10$, зворотна напруга конденсаторів $C1$ і $C2$ вмикає робочий тиристор $VS8$, перезаряджається конденсатор $C1$ ланцюгом $VS1-L1-VS7-C1-VS10-VD6$, розряджається конденсатор $C2$ ланцюгом $VD2-VD3-L2-VS9-VS10$.

На четвертому інтервалі включається тиристор $VS9$, який спільно із включеним $VS10$ і вихідним діодним мостом $VD3-VD6$ утворює закоротку для реактивного струму навантаження й нульову паузу в останній.

Наприкінці паузи процес повторюється. Від того, яка пара вхідних тиристорів вмикається і на який час, залежить форма та величина основної гармоніки вихідної напруги, а також спосіб регулювання: вузько- або широкодіапазонний. Описана схема може використовуватися як джерело змінного та постійного струму.

У випадку побудови вузькодіапазонного регулятора-стабілізатора із метою підвищення якості вхідного струму й вихідної напруги перетворювача використовують вольтододаткові трансформатори (ВДТ) із однією або декількома первинними обмотками. В останньому випадку схема набуває більшої кількості ступенів (рівнів) регулювання, що дає змогу підвищити точність і якість регулювання вихідної напруги, особливо за наявності двох трансформаторів. Приклад такої схеми показано на рис.3, де застосування загального вузла комутації дає змогу здійснювати швидкодіюче (період мережі та вище) регулювання напруги із кількістю станів (рівнів вихідної напруги), що перевищує кількість пар силових тиристорів, замикання накоротко первинної обмотки ВДТ у період нульової паузи задля уникнення *дросельного ефекту*, що призводить до додаткових спотворень вихідної напруги.

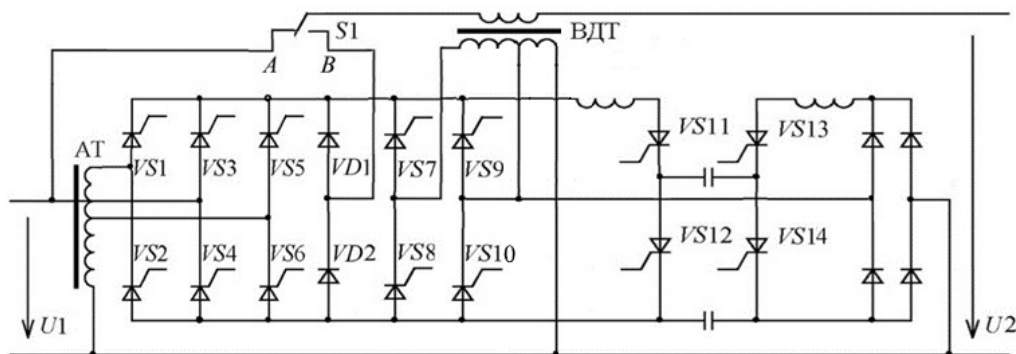


Рис. 3. Вузькодіапазонний регулятор-стабілізатор з вольтододатковим трансформатором

Перетворювач за схемою, зображеною на рис. 3, має два режими роботи A і B , які попередньо встановлюються ключем $S1$. У режимі A напруга вторинної обмотки ВДТ підсумовується з нерегульованою напругою мережі, тобто здійснюється вузькодіапазонне регулювання вихідної напруги. У режимі B здійснюється широкодіапазонне регулювання завдяки широтно-імпульсному регулюванню (ШІР) напруги мережі та ШІР ВДТ. Кількість можливих станів схеми в обох режимах незмінна й дорівнює семи (з урахуванням нульового).

Загальний вузол комутації може бути використаний у перетворювачах різного функціонального призначення. Так, на рис. 4 наведена схема, за якою можна будувати перетворювачі частоти, пристрої, що симетрують, пристрої для підключення однофазних навантажень до трифазної електричної мережі, а на рис. 5 – швидкодіючі перемикачі резервних мереж для агрегатів безперебійного живлення.

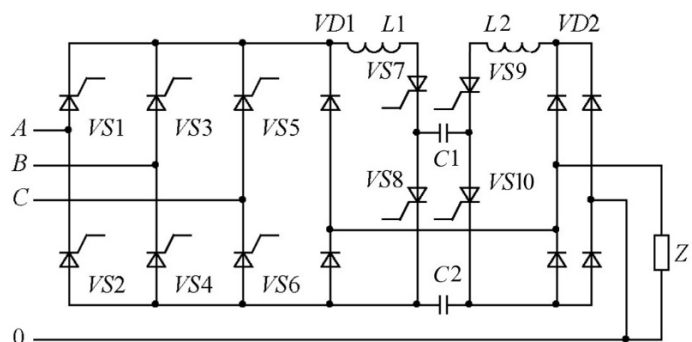


Рис. 4. Тиристорний перетворювач із загальним вузлом комутації

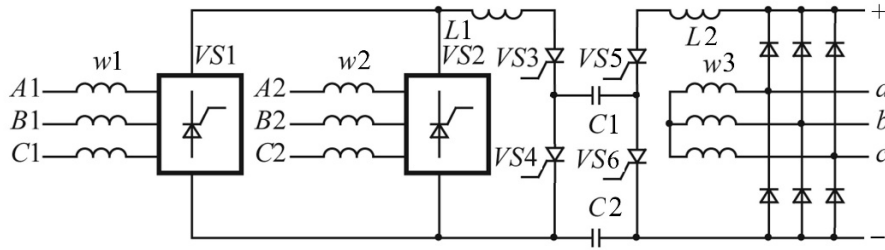


Рис. 5. Швидкодіючий перемикач резервних мереж для агрегатів безперебійного живлення на основі тиристорного перетворювача із загальним вузлом комутації

Найбільш поширеними структурами перетворювачів є ті, які дають змогу змінювати рівень вихідної напруги в широкому діапазоні вгору і вниз від номінального з високою точністю і малими спотвореннями. Такі системи, як показано на прикладі рис. 3, вимагають застосування трансформаторів, що можуть поєднувати в одному пристрої і широке, і вузькодіапазонне регулювання. Трансформатори працюють як на основній, так і на підвищених частотах. У разі використання трансформаторів на підвищеній частоті знижуються маса й габарити пристроїв, але збільшується кількість напівпровідникових елементів для подвійного перетворення енергії та відповідно зростають втрати енергії й вартість перетворювача [1].

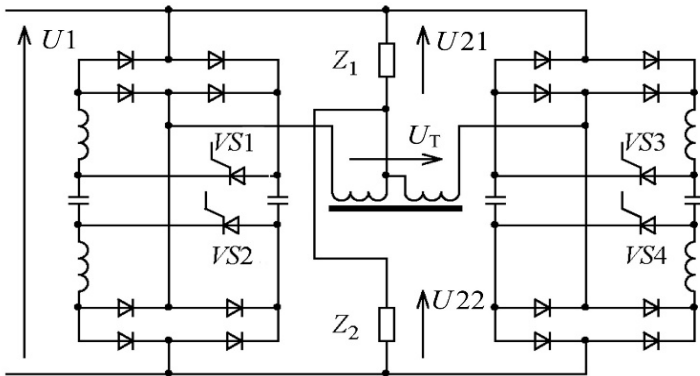


Рис. 6. Однофазний тиристорний перетворювач з автотрансформатором

На рис. 6 показана спрощена схема однофазного перетворювача, здатного мінімізувати вказаний недолік шляхом об'єднання в одному блоці функцій модулятора (інвертора) і демодулятора. Перетворювач за схемою рис. 5 містить чотири мостових діодно-тиристорних ключа $VS1-VS4$ змінного струму із комутуючими дроселями й конденсаторами, а також автотрансформатор, що працює на підвищеній частоті. Навантаження $Z1$ і $Z2$ підключені до середньої точки обмотки автотрансформатора та до різних затискачів живлення для ілюстрації

можливостей перетворювача. У [1] запропоновані варіанти описаної схеми, що розширюють функції перетворювачів, побудованих на їхній основі з метою підвищення якості вихідної енергії.

На рис. 7 показані діаграми напруг на крайніх затискачах автотрансформатора U_T і на навантаженнях $U21$ і $U22$ за живлення перетворювача напругою змінного струму ($U1 = 100$ В). Як видно з

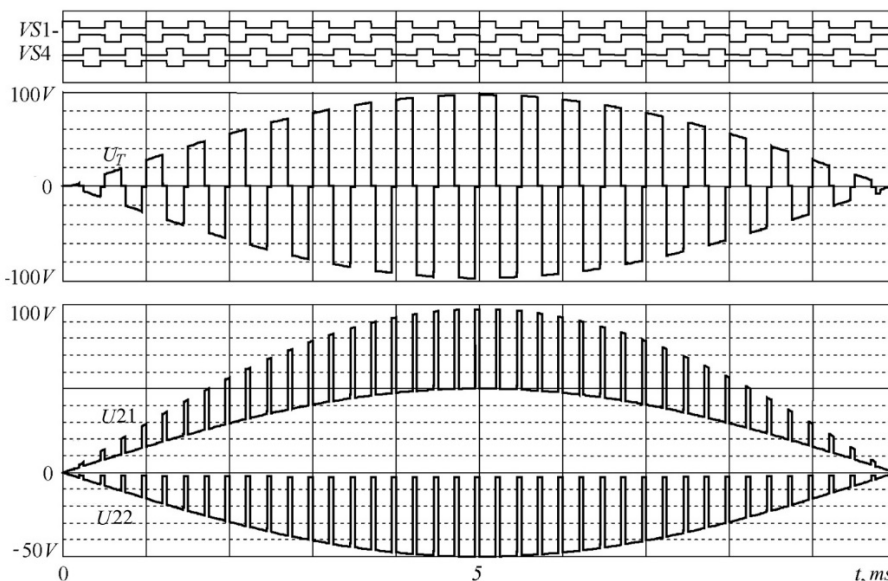


Рис. 7. Діаграми сигналів управління тиристорами $VS1-VS4$, напруг на крайніх затискачах автотрансформатора U_T і на навантаженнях $U21$ і $U22$

діаграм, вихідну напругу можна регулювати як частотно-імпульсним, так і широтно-імпульсним способами у двох взаємнозонах, що доповнюють в діапазоні напруг $U_{21} = (0,5-1)U_1$ і $U_{22} = (0-0,5)U_1$. У першому випадку отримуємо вузькодіапазонне регулювання, а в другому – глибоке в діапазоні $(0-0,5)U_1$ та гіршу вдвічі якість вихідної напруги.

Слід зазначити, що перетворювачі, розроблені в Інституті електродинаміки НАН України на основі цих схем, досліджені на PSpice-моделях, випробувані на дослідних і мало-серійних зразках.

Висновки. 1. Описані вище схеми і принципи побудови перетворювачів змінної і постійної напруги підтверджують широкі можливості успішного використання штучної комутації тиристорів у малій і великій електроенергетиці.

2. ТП-ШК доцільно застосовувати для побудови швидкодіючих регуляторів-стабілізаторів і перемикачів змінної напруги в системах гарантованого (резервованого) і безперебійного електропостачання, в асинхронному (параметричному і частотному) електроприводі і системах симетрування струмів і напруг в трифазних електричних мережах.

1. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. Наукова думка. Киев, 2014. 248 с.
2. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Київ, Інститут електродинаміки НАН України. 2013. 378 с.

THYRISTOR CONVERTERS WITH ARTIFICIAL SWITCHING

V.V. Golubev, V.M. Gubarevich, V.I. Zozulev, Yu.V. Marunya, A.I. Storozhuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: marunia@ied.org.ua

Promising schemes of thyristor converters of alternating and direct voltage with artificial switching are presented. Detailed descriptions of the operation of artificial switching units in transformer and transformer-free, single-phase and three-phase circuits of various functional purposes, comparison of their operational characteristics with circuits with natural switching and multi-zone pulse modulation are given. Ref. 2, fig. 7.

Key words: converters, switching units, thyristors, transformers, output energy quality.

1. Golubev V.V. Pulse conversion of alternating voltage. Scientific thought. Kyiv, 2014. 248 p. (Rus)
2. Shidlovsky A.K., Novsky V.A., Zharkin A.F. Stabilization of electric energy parameters in three-phase systems with semi-conductor correction devices. Kiev, Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. 378 p.

Надійшла: 03.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 03.08.2024

Accepted: 27.08.2024