

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.108>

## СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ СУЧАСНИХ ІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**В.В. Голубєв\***, 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: [dep8ied@ied.org.ua](mailto:dep8ied@ied.org.ua)

У статті розглянуто запропоновані пристрої силової електроніки з оцінюванням їхніх базових показників якості та функціонального призначення. Визначено такі пристрої, у разі застосування яких помітно підвищується енергоефективність електричних мереж. Показано, що ці пристрої за своїми поліпшеними функціонально-параметричними даними також широко використовуються в засобах електроспоживачів. Наведено такі зі згаданих пристроїв: комбіновані та керовані випрямлячі Латура-Греца; магнітно-напівпровідникові регулятори імпульсів; імпульсні перетворювачі постійної напруги – DC/DC перетворювачі; імпульсні перетворювачі постійної напруги в змінну – DC/AC перетворювачі; транзисторний ключ з повним тиристорним керуванням – VTS; керований магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів; удосконалена структурна схема магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів. Зроблено висновок, що для підвищення енергоефективності електричних мереж найбільш прийнятними є такі показники якості вищенаведених пристроїв: високий ККД; поліпшена електромагнітна сумісність; захист від коротких замикань та комутаційних перенапруг; керованість згідно з вимогами щодо навантаження; буферна протидія обриву вхідного струму. Бібл. 7, рис. 7.

**Ключові слова:** енергоефективність електричних мереж, комбіновані та керовані випрямлячі Латура-Греца, магнітно-напівпровідникові регулятори та генератори імпульсів, імпульсні перетворювачі DC/DC, DC/AC.

**Вступ.** Енергоефективність електричних мереж (ЕМ) певною мірою залежить від режимів роботи та базових показників якості пристроїв силової перетворювальної техніки (СПТ). Такими показниками за цим напрямком роботи для пристроїв СПТ визначено: ККД; прийнятні комутаційні характеристики; електромагнітна сумісність (ЕМС); захист від коротких замикань та комутаційних перенапруг; керованість пристроїв СПТ за вимогами їхніх навантажень; буферна протидія обриву вхідного струму під час роботи пристроїв СПТ.

**Метою статті** є опис і оцінювання розроблених пристроїв СПТ стосовно їхніх можливостей підвищувати енергоефективність ЕМ, від яких вони живляться.

**Результати представлених матеріалів.** Для підвищення енергоефективності ЕМ з боку пристроїв СПТ, призначених для сучасних електроімпульсних технологій, що живляться від ЕМ, розглядаються найбільш поширені серед них.

**1. Комбіновані випрямлячі однофазного живлення.** У пристроях СПТ нині застосовуються переважно випрямлячі змінної напруги однофазного живлення [1]. Використання

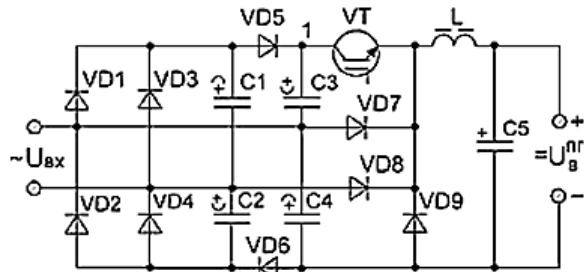


Рис. 1

оновлених випрямлячів [2] з підвищеними функціонально-параметричними показниками помітно поліпшує показники якості пристроїв СПТ та певною мірою підвищує енергоефективність ЕМ.

Для різних умов реалізації системи ЕМ разом з пристроями СПТ доцільно використовувати: дискретно-керований випрямляч Латура-Греца; однотактний керований випрямляч Латура-Греца; двотактний керований випрямляч Латура-Греца; керований випрямляч Латура (здвоєний)-Греца (КВ-2ЛГ).

У схемі КВ-2ЛГ, зображеній на рис. 1, для керування потрібні були б два двонаправлені ключі, що нераціонально. Тому запропоновано керувати підзарядкою конденсаторів С1,

$C2$  одним ключем  $VT$ , використовуючи фазоімпульсне керування. При відкритому ключі  $VT$  протягом повного часу підзарядки конденсаторів  $C1...C4$  від позитивної напівхвилі напруги  $\sim U_{BX} (\cap)$  заряджаються одночасно  $C1$  і  $C4$ , а від негативної напівхвилі  $\sim U_{BX} (\cup)$  –  $C2$  і  $C3$ . Тобто, випрямляч стає двотактним із помноженням напруги приблизно в  $1,1...0,9$  раза залежно від співвідношення ємностей  $C1...C4$  і  $C5$ . Керованість КВ-2ЛГ (рис. 1) витікає з того, що при відкритому ключі  $VT$  випрямлення напруги відповідно до схем Латура і Греца знаходиться у співвідношенні ( $U_B^I > U_B^r$ )  $B$ , що призводить до запирання діодів  $VD7$ ,  $VD8$  і блокування конденсатора  $C5$  від моста  $VD2$ ,  $VD4$ ,  $VD7$ ,  $VD8$ . При замкненому ключі  $VT$  діоди моста  $VD7$ ,  $VD8$  розблоковуються, і напруга  $U_B^{II} \approx U_B^r$ . Діоди  $VD 5$ ,  $VD 6$  потрібні для блокування перерозподілу зарядів між  $C3$ ,  $C1$  і  $C2$ ,  $C4$ . Проміжні стани ключа  $VT$  (між «0» і «1»), задані зміною його фазового кута в межах  $a \approx (0,3...0,9)\pi$ , визначають регулювання вихідної напруги КВ-2ЛГ в межах  $U_B(2ЛГ) = U_B^{\min} \dots U_B^{\max}$ , де значення цих граничних напруг встановлюються згідно з вибором співвідношення між ємностями  $C1...C4$  і  $C5$  для вибраного дискретного номінального значення  $U_B^{nom}(2ЛГ)$ .

З викладеного випливає, що КВ-2ЛГ щодо його потужності має орієнтовно рівні обмеження з випрямлячем Греца, що разом із керованістю КВ-2ЛГ зумовлює розширене застосування цієї схеми. До того ж керування КВ-2ЛГ здійснюється тільки одним однонаправленим ключем  $VT$ .

У підсумку визначено, що для таких пристроїв СПТ, наприклад, як магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів [3], інвертори та конвертори [4], доцільно використовувати відповідні варіанти розглянутих комбінованих та керованих випрямлячів (ККВ), що передбачає покращення основних показників згаданих пристроїв СПТ внаслідок:

- регулювання випрямленої напруги в межах приблизно від 300 до 600 В за живлення від  $\sim 220$  В, що спрощує певну частину пристроїв СПТ;
- можливості формування спектра зовнішніх характеристик, що відповідають вимогам до електроживлення окремих технологій;
- створення на базі схем Латура-Греца більш простого стабілізованого випрямляча з дворівневою ШІМ, яка порівняно з однорівневою ШІМ має покращені ЕМС, якість стабілізації та зменшені втрати на ключах;
- компенсації провалів випрямленої напруги схемою Греца ( $U_B^r$ ), оскільки випрямлена напруга схемами ККВ має співвідношення ( $U_B^I > U_B^r$ ).

**2. Магнітно-напівпровідникові регулятори імпульсів (МНРІ).** Пристрої СПТ, що перетворюють вхідні електроімпульси (напівхвилі змінного струму) до їхніх функціональних призначень – випрямлення, «однополярна мікро- та наносекундних імпульсів», інвертування, регулювання (стабілізація) – застосовуються в переважній частині СПТ. Пропонується короткий розгляд МНРІ, застосування яких у відповідних пристроях СПТ сприяє поліпшенню їхніх вищезгаданих функціональних призначень, що зі свого боку збільшить певною мірою енергоефективність ЕМ. На рис. 2 зображена схема МНРІ-2, що дає можливість регулювати амплітуду різнополярних імпульсів (або змінної напруги) на навантаженні  $Z_H$  від нуля до  $U_D^m > U_{in}^m$ , до того ж за допомогою тільки двох однонаправлених НПІ-ключів  $VS1$ ,  $VS2$ .

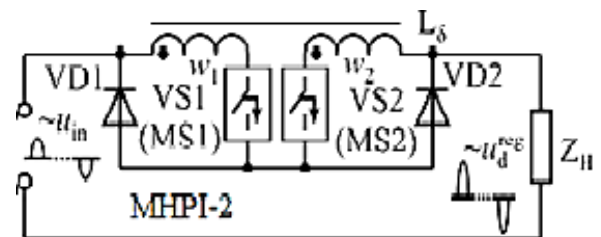


Рис. 2

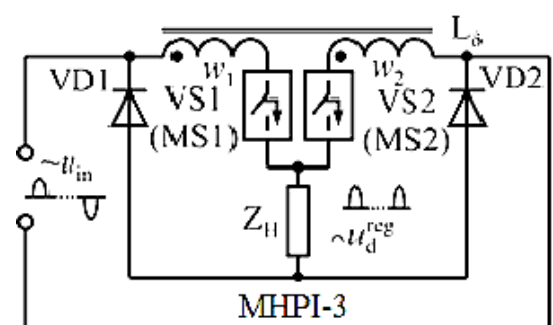


Рис. 3

На рис. 3 зображено МНПІ-3. У цій схемі формуються «випрямлені» імпульси (напівхвилі) напруги. Амплітуда імпульсів цієї напруги регулюється також у діапазоні від нуля до  $U_d^{\max}$ . Водночас за допомогою двох однонаправлених ключів в одному процесі формування уніполярних імпульсів проводиться їхнє регулювання й блокування їхньої негативної складової. А оскільки трансформовані в кожному такті керуючі струми замикаються через навантаження  $Z_H$ , то даний регулятор володіє певною параметричною стабілізацією напруги  $\cap u_d^{\text{reg}}$  за зміни навантаження  $Z_H$ . МНПІ-3 рекомендується ефективно використовувати: у мілісекундному діапазоні імпульсів – у зарядних пристроях із великою накопичувальною ємністю, під час пуску електродвигунів постійного струму та в інших пристроях, що вимагають плавного пуску з подальшою стабілізацією напруги; у мікросекундному діапазоні імпульсів – для навантажень, що мають помітно менший стартовий опір порівняно з режимним.

**3. Імпульсні перетворювачі постійної напруги.** Імпульсні перетворювачі постійної напруги (ППН, *DC/DC* перетворювачі) широко використовуються для регулювання й стабілізації напруги в різноманітних пристроях силової електроніки [5, 6]. Забезпечення максимально можливого ККД, високої якості електроенергії на вході й виході, м'якої комутації транзисторів є пріоритетними завданнями під час розробки таких пристроїв. Особливо це стосується перетворювачів з поздовжнім ключем *VT*, який, крім основної, виконує також функцію захисту перетворювача від коротких замикань і перенапруг. ППН з поздовжнім транзисторним ключем пропонується використовувати для комплексного поліпшення якості вхідної та вихідної напруг ППН, зниження комутаційних втрат електроенергії, а також розширення їхніх функціональних можливостей та областей застосування, наприклад, як ефективних вхідних складових у структурі високовольтних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів струму.

3.1. Модифікований знижувальний *DC/DC* перетворювач із двообмотковим дроселем і поздовжнім транзисторним ключем (ППН-1). Схema ППН-1 зображена на рис. 4. Приєднання

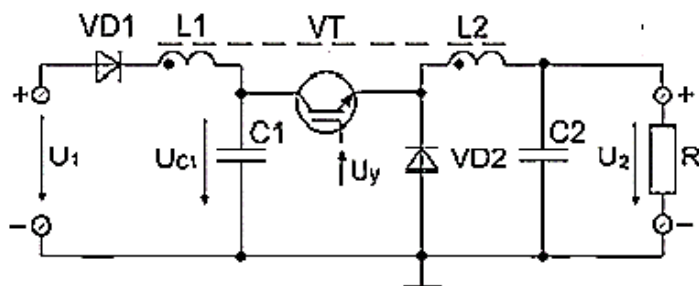


Рис. 4

конденсатора  $C1$  та діода  $VD2$  до мінусової шини дає можливість використовувати вхідний вузол як буферний, що протидіє негативним наслідкам обриву вхідного струму під час замикання ключа  $VT$ . Проведено комп'ютерне моделювання схеми цього перетворювача та математичний аналіз електромагнітних процесів. Встановлено, що ємність конденсатора  $C1$  є значно меншою порівняно з ємністю конденсаторів фільтрів у

класичних схемах ППН [5]. Створюється такий режим роботи ключа, що сприяє зменшенню динамічних утрат електроенергії на ньому та підвищенню її якості на вході та виході ППН-1.

Розглянуто також інші створені схемні рішення *DC/DC* перетворювачів з поліпшеними показниками якості, які рекомендується оптимально використовувати в системах: ЕМ – комбінований випрямляч – ППН – навантаження. Це – знижувальний *DC/DC*-перетворювач, підвищувальний *DC/DC* перетворювач та перетворювач постійної напруги з буферним вхідним вузлом.

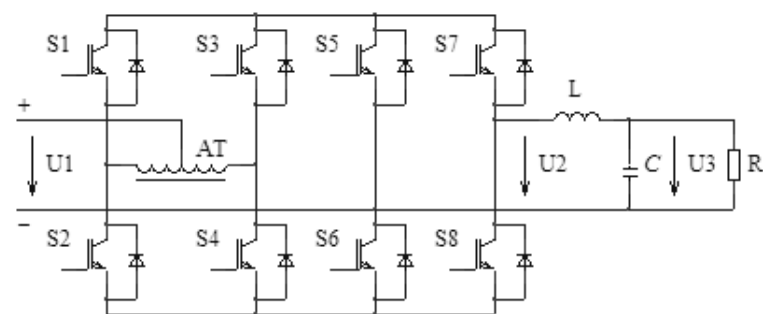


Рис. 5

**4. Імпульсні перетворювачі постійної напруги в змінну (*DC/AC* ПН) [7].** У значній частині пристроїв СПТ використовуються *DC/AC* ПН. Серед них найбільш поширеними є автономні інвертори напруги (АІН). Вони застосовуються здебільшого в діапазонах середніх і великих потужностей. Це зу-

мовлює відповідні вимоги до АІН – високі ККД, якість вихідної напруги, а також спроможність знижувати чи підвищувати її значення порівняно з напругою джерела електроживлення АІН, водночас забезпечувати двосторонню передачу електроенергії. Саме такі властивості має розроблений АІН, схема електрична принципова якого наведена на рис. 5.

### 5. Транзисторний ключ із повним тиристорним керуванням на IGBT-транзисторі (VTS-IGBT)

Для розширення функціональних можливостей та зменшення втрат електроенергії на напівпровідникових ключах (НП-ключах) пропонується як найбільш показовий приклад *VTS-IGBT*. Його схемне рішення наведено на рис. 6. Цей ключ має зменшений спад напруги на VT1 порівняно з тиристором і можливість повного керування слабкострумними короткими імпульсами (увімкнення  $U_{on}$  та вимкнення  $U_{off}$ ), водночас вимкнення *VTS* можливе в будь-який момент його роботи. Також *VTS-IGBT* зберігає регенеративну властивість. Рекомендується залежно від конкретних умов використовувати розроблені *VTS*-транзистори, в яких силовими транзисторами є біполярні або польові транзистори – *VTS-BT*, *VTS-MOS*.

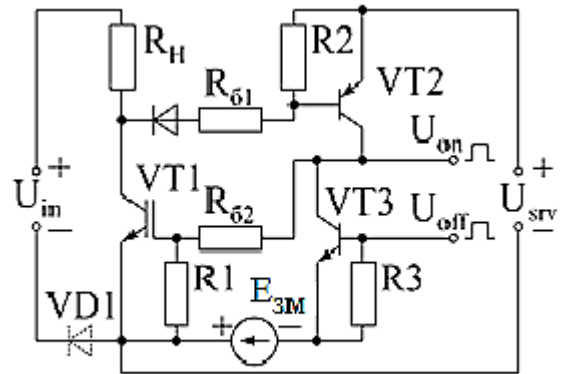


Рис. 6

Слід зауважити, що досліджено ключі *VTS* в дискретному виконанні. Для пристроїв СПТ та ЕМ з метою підвищення їхньої енергоефективності планується напрацювати рекомендації щодо *інтегрального* виконання вищезгаданих ключів.

**6. Керований магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів (МНГІ).** МНГІ є одним із найскладніших пристроїв СПТ і застосовується переважно в межах середніх та великих потужностей, характерних для сучасних електроімпульсних технологій. Тому важливим для ЕМ є поліпшення енергетичних та комутаційних показників МНГІ. Як приклад на рис. 7 показано схемне рішення керованого МНГІ, який має такі основні переваги: регулювання та стабілізація вихідних імпульсів струму; захист від коротких замикань; відсутність комутаційних перенапруг. Ці властивості МНГІ в процесі його застосування сприяють поліпшенню енергоефективності ЕМ.

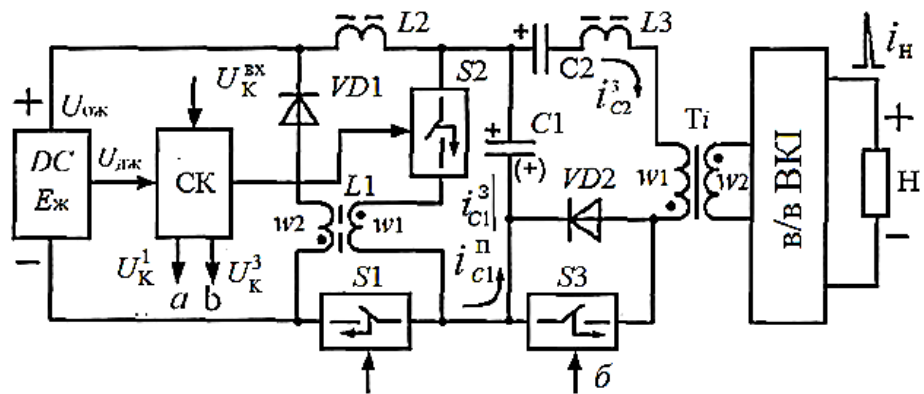


Рис. 7

**7. Вдосконалена структурна схема МНГІ.** Структурна схема такого МНГІ має складові пристрої СПТ, розглянуті вище з погляду їхнього впливу щодо підвищення енергоефективності ЕМ.

Починаючи зі вхідного вузла, що живиться від ЕМ ( $\sim U_{in}$ ), і до навантаження, ця структура має такі складові: комбінований випрямляч Латура-Греца (ЛГ); перетворювач постійної напруги (ППН *DC/DC*); вузол компресії імпульсів із подвоєнням напруги (ВКІ-2*U*) з ключем *VTS*; імпульсний підвищувальний трансформатор ( $T_i$ ); вузол компресії імпульсів із двообмотковим дроселем (ВКІ- $L/2w$ ); вузол компресії імпульсів із формуванням цугу з двох вихідних імпульсів (ВКІ- $Ц/2i$ ) для окремих навантажень; навантаження (Н), наприклад, газорозрядна трубка ГРТ лазера або розрядна камера (РК) обробки води, а також інші пристрої сучасних електроімпульсних технологій.

**Висновки.** За результатами розгляду запропонованих пристроїв силової електроніки, оцінювання їхніх базових показників якості та функціонального призначення, внаслідок застосування яких є можливість помітно підвищити енергоефективність електричних мереж, визначено такі з вищезгаданих пристроїв із відповідними функціонально-параметричними показниками.

*По-перше*, комбіновані та керовані випрямлячі Латура-Греца: регулювання випрямленої напруги в межах від 300 до 600 В за живлення від  $\sim 220$  В; можливість формування спектра зовнішніх характеристик навантажень; компенсація провалів випрямленої напруги; обмеження щодо максимальної потужності, рівнозначне схемі Греца за однофазного живлення.

*По-друге*, магнітно-напівпровідникові регулятори імпульсів: за повного регулювання вхідної напруги, напруга на навантаженні за своєю формою мінімально відрізняється від вхідної; кількість керованих напівпровідникових ключів зменшено з 4-х до 2-х; можливість ефективного використання в зарядних пристроях з великою накопичувальною ємністю; під час пуску електродвигунів постійного струму та в інших пристроях, що потребують плавного пуску з подальшою стабілізацією напруги, а також в навантаженнях, що мають помітно менший стартовий опір порівняно з режимним.

*По-третє*, імпульсні перетворювачі постійної напруги: зменшення динамічних утрат електроенергії на ключі; протидія обриву вхідного струму; підвищення якості напруги на виході.

*По-четверте*, імпульсні перетворювачі постійної напруги в змінну: підвищені ККД та якість вихідної напруги; двостороння передача електроенергії; зниження та підвищення вихідної напруги.

*По-п'яте*, транзисторний ключ із повним тиристорним керуванням порівняно з тиристорами має: зменшені втрати електроенергії; керування слабкострумовими імпульсами в будь-який момент його роботи при збереженні регенеративних можливостей.

*По-шосте*, керований магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів: регулювання та стабілізація вихідних імпульсів струму; захист від коротких замикань, відсутність комутаційних перенапруг.

*По-сьоме*, вдосконалена структурна схема магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів: починаючи від вхідного вузла і до навантаження така структура має переважно вищезгадані складові, внаслідок чого цей генератор може вигідно застосовуватись для електроімпульсного живлення засобів сучасних електроімпульсних технологій.

*Фінансується коштом держбюджетної теми «Дослідження та розробка спеціалізованих магнітно-напівпровідникових імпульсних пристроїв силової електроніки та засобів їх живлення від відновлювальних джерел енергії порівняної потужності та зі смарткеруванням» (шифр «Домен-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України від 9.07.20 р. Протокол № 6.*

1. Шрайберг Г. 300 схем источников питания. Выпрямители. Импульсные источники питания. Линейные стабилизаторы и преобразователи. Москва: ДМК, 2000. 224 с.
2. Зозулев В.И., Бондаренко А.Ф., Юрчишин В.Я. Комбинированные управляемые выпрямители однофазного электропитания. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*: 2018. Вип. 51. С. 75–81.
3. Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А.. Магнитно-полупроводниковые импульсные устройства преобразовательной техники. К.: Наук. думка, 2016. 230 с.
4. Ирвинг М. Готтлиб Источники питания. Инверторы. Конверторы. Линейные и импульсные стабилизаторы. М.: Постмаркет, 2002. 44 с.
5. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания: М: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
6. Чашко М.В. Особенности импульсной электропередачи. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Електротехніка і енергетика*. 2017. № 1. С. 50–55.
7. Кобзев А. В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1989. 304 с.

## **METHODS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF SPECIALIZED ELECTRICITY CONVERTERS FOR MODERN PULSE TECHNOLOGIES**

**V.V. Golubev, 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: [dep8ied@ied.org.ua](mailto:dep8ied@ied.org.ua)

*The article examines the proposed power electronics devices with an assessment of their basic quality indicators and functional purpose. The following of these devices have been identified, the use of which increases the energy efficiency of electrical networks the most. It is shown that these devices, due to their improved functional and parametric data, are also widely used in electrical consumer devices. Here are some of the mentioned devices. Combined and Controlled Latour-Gretz Rectifiers, Magnetic Semiconductor Pulse Regulators, DC/DC Pulse Converters, DC/AC Converters, DC/AC Converters, Full Thyristor Transistor Switch - VTS, Controlled Magneto-Semiconductor Generator pulses, an improved structural diagram of a magnetic semiconductor pulse generator. It was concluded that the following quality indicators of the above devices are the most acceptable for increasing the energy efficiency of electrical networks on the part of devices that are powered by them: high efficiency; improved electromagnetic compatibility; protection against short circuits and switching overvoltages; controllability according to load requirements; buffer resistance against interruption of the input current. Ref. 7, fig. 7.*

**Keywords:** energy efficiency of electrical networks, combined and controlled Latour-Gretz rectifiers, magnetic semiconductor regulators and pulse generators, pulse converters DC/DC, DC/AC.

1. Shreiberg G. 300 schemes of power sources. Rectifiers. Pulse power sources. Linear stabilizers and converters. Moscow: DMK, 2000. 224 p.
2. Zozulev V.I., Bondarenko A.F., Yurchyshyn V.Ya. Combined controlled rectifiers of single-phase electricity. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2018. No 51. Pp. 75–81.
3. Volkov I.V., Zozulev V.I., Sholokh D.A. Magnetic-semiconductor impulse devices of transforming technology. K.: Nauk. dumka, 2016. 230 p.
4. Irving M. Gottlieb Power sources. Inverters. Converters. Linear and impulse stabilizers. M.: Postmarket, 2002. 544 p.
5. Severns R., Blum G. Pulse constant voltage converters for secondary power supply systems: M: Energoatomizdat, 1988. 294 p.
6. Chashko M.V. Peculiarities of impulse electric transmission. *Naukovi pratsi Donetskogo nacionalnogo tekhnichnogo universytetu. Elektrotekhnika i energetyka*. 2017. No 1. Pp. 50–55.
7. Kobzev A. V. Multi-band pulse modulation. Theory and application in systems of conversion of electrical energy parameters. Novosibirsk: Nauka, 1989. 304 p.

Надійшла: 31.05.2023  
Прийнята: 15.06.2023

Submitted: 31.05.2023  
Accepted: 15.06.2023