

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

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 розглянуто показові магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів (МНГІ), включно з їхніми вдосконаленими вузлами, та регулятор напруги уніполярного струму. Наведено переваги МНГІ-1 із модернізованим вхідним вузлом DC/AC; МНГІ-2 із дросельним вихідним вузлом формування одноктактних імпульсів; МНГІ-3 із трансформаторним вихідним вузлом формування одноктактних імпульсів порівняно з відомими аналогами, в яких здійснюється на їхньому високовольтному виході уніполяризація біполярних імпульсів за допомогою численних напівпровідникових приладів (МНГІ-ППІ). Встановлено, що надійність МНГІ-2 та МНГІ-3 є принаймні на порядок більшою, ніж надійність МНГІ-ППІ. До того ж за допомогою МНГІ-ППІ неможливо реалізувати функції щодо гальванічних розв'язок, синхронізації навантажень, спрощення захисту навантажень та узгодження без ускладнень МНГІ-ППІ з низькоомними та ємнісними навантаженнями. Показано, що регулятор напруги змінного струму спроможний регулювати напругу на навантаженні від нуля до максимального значення, блокувати навантаження, відводити невикористану електроенергію, опрацьовувати імпульси від наносекундного до мілісекундного діапазонів. У підсумку одержано матеріали для подальшого опрацювання узагальненого комплексного синтезу щодо вдосконалення вищезгаданих пристроїв та інших імпульсних пристроїв силової електроніки. Бібл. 5, рис. 4.

Ключові слова: магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів, регулятор напруги уніполярного струму, вхідний вузол DC/AC, вихідний дросельний вузол AC/DC, вихідний трансформаторний вузол AC/DC, узагальнений комплексний синтез.

Вступ. Магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів (МНГІ) базуються на поєднанні в них ключів різних видів: магнітних, напівпровідникових та комбінованих. Ці МНГІ призначені для застосовування за умов формування ними високовольтних (до 50 кВ), сильноточових імпульсів мікро- та наносекундних діапазонів. Водночас слід зазначити, що МНГІ мають порівняно низьку надійність, ускладнені схемні рішення та проблемні питання щодо ефективного використання окремими споживачами електроімпульсного живлення стосовно гальванічної розв'язки, синхронного живлення двох і більше навантажень, а також щодо захисту навантажень та узгодження МНГІ з низькоомними та ємнісними навантаженнями [1]. За підсумками напрацювань у напрямку підвищення ефективності МНГІ в цілому та їхніх визначних вузлів встановлено: у вихідному вузлі МНГІ замість численних напівпровідникових приладів застосовувати дросельні чи трансформаторні вузли формування одноктактних імпульсів; якщо в МНГІ немає згаданих дросельних чи трансформаторних вузлів, то доцільно на виході МНГІ використовувати регулятор напруги уніполярного струму, який спроможний регулювати вихідні імпульси від нуля до максимального значення, блокувати навантаження, відводити від нього невикористану електроенергію; в МНГІ перед імпульсним трансформатором Т1 вигідно застосовувати авторський вузол DC/AC, що дає можливість спростити схеми МНГІ та



підвищити їхню надійність. Визначено, що найбільш перспективним для МНГІ є комплексна побудова їхніх структур із використанням елементів, ключів та вузлів, які попередньо підібрані взаємодоповнювальними для досягнення найбільш вигідному результату, тобто відповідно до їхнього узагальненого комплексного синтезу (УКС). У роботі тезово розглянуто вступні аспекти щодо УКС та представлено найбільш показові пристрої, що побудовані згідно з УКС. Актуальність роботи визначається тим, що МПГІ, попри широке застосування у засобах сучасних електроімпульсних технологій, мають зменшені показники якості. Тому питання помітного поліпшення основних показників якості МНГІ стало нагальним.

Метою роботи є обґрунтування розвитку та підвищення ефективності МНГІ як пристроїв силовій електроніці із використанням опрацьованих показових МНГІ та їхніх вдосконалених базових вузлів, приклади реалізації яких сприятимуть поліпшенню показників якості МНГІ та забезпеченню вимог до сучасного імпульсного електроживлення засобів передових технологій.

Обґрунтування та результати досліджень

1. Вступні визначення узагальненого комплексного синтезу (УКС) стосовно проектування розглянутих далі магнітно-напівпровідникових імпульсних пристроїв (МНІП) та інших імпульсних пристроїв силовій електроніки. Такий УКС вимагає попереднього підбору компонентів для побудови (синтезу) згаданих пристроїв таким чином, щоб ці компоненти за своїми параметрами були взаємодоповнювальними та в разі їхнього об'єднання в структури пристроїв сприяли підвищенню ефективності цих пристроїв. УКС передбачає можливість його застосування практично в будь-яких пристроях силовій електроніки (ПСЕ), тобто можна вважати його узагальненим. УКС базується на значному досвіді створення ПСЕ, винахідництві, розрахунках, фізичному та комп'ютерному моделюванні. Практичне використання УКС сприяє помітному поліпшенню функціональних можливостей та пріоритетних параметрів ПСЕ, що відображається в цій роботі далі представленими ПСЕ, визначеними як найбільш показові щодо застосування УКС.

2. Магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів. Магнітно-напівпровідникові генератори високовольтних імпульсів (МНГІ) є невід'ємною складовою обладнання сучасних передових електроімпульсних технологій. Підвищення ефективності цих технологій та розширення їхніх застосувань безпосередньо пов'язано із необхідністю помітного поліпшення основних показників МНГІ. Також слід відмітити, що МНГІ відносяться до одних з найбільш складних імпульсних пристроїв силовій електроніки. Тому відповідно до згаданого вище далі наведено два зразково-показових МНГІ.

2а. Високовольтний наносекундний МНГІ із компресійним потроєнням напруги та діодним перервником струму (рис. 1). Схема, що зображена на рис. 1, відрізняється від відомої [2] тим, що вхідний вузол DC/AC має тільки один транзистор VT замість чотирьох

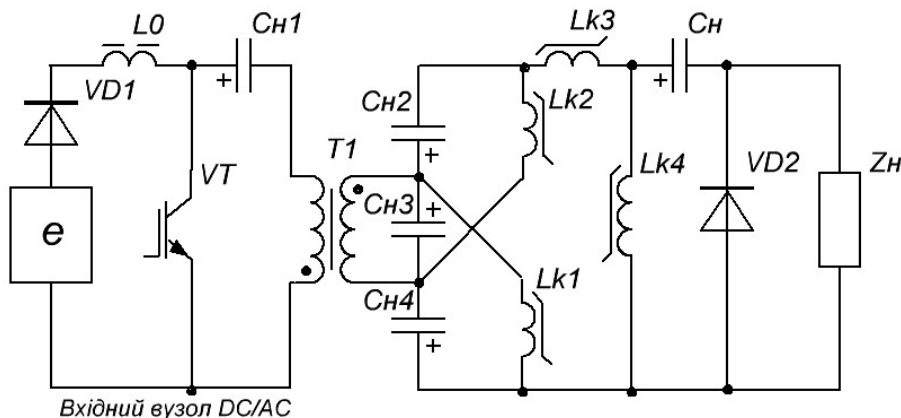


Рис. 1. Високовольтний наносекундний МНГІ із компресійним потроєнням напруги та діодним перервником струму

транзисторів згаданої відомої схеми МНГІ. Це дає можливість зменшити тривалість імпульсів через первинну обмотку Т1 і відповідно зменшити його встановлену потужність та в цілому досягти спрощення схеми (рис. 1) та підвищення її надійності.

2б. Модернізований магнітно-напівпровідниковий генератор із дросельним вузлом формування двотактних однополярних вихідних імпульсів (рис. 2). На рис. 2 а – вхідний вузол DC/AC, наведений на рис. 1; рис. 2 б – вузли компресії імпульсів ВК1-1. ВК1-п (від одного до трьох); рис. 2 в – схема вихідного дросельного вузла формування двотактних однополярних імпульсів.

У переважній більшості навантаженнями МПГІ є такими, що потребують однополярного імпульсного живлення. Помітна частина відомих МНГІ, наприклад [3, 4], мають після імпульсного трансформатора Т1 структуру з однополярними ВКІ, що є негативним для магнітних елементів МПГІ, або ж однополяризують (випрямляють) вихідні двополярні імпульси за допомогою напівпровідникових приладів за напруги до (20...30) кВ. Тобто функціонування ВКІ, що мають магнітні елементи за однополярних імпульсів, а також однополяризація двополярних імпульсів із використанням напівпровідникових приладів, є неприйнятними [5].

Основною показовою властивістю вузла рис. 2 в є те, що він спроможний ефективно функціонувати як «випрямляч» двополярних високовольтних імпульсів, а також здатний виконувати необхідні регулювання створених імпульсів (їхню амплітуду, асиметричність, полярність, передімпульсну модуляцію) та реалізовувати деякі інші спецфункції.

Все це дає підставу розглядати МНГІ (рис. 2) як найбільш універсальний МНГІ. Особливо, коли передбачені високі напруги з великими потужностями генерування імпульсів, підвищені частоти проходження імпульсів, формування спеціалізованих імпульсів, включно з чергуванням уніполярних імпульсів і біполярних, висока надійність МНГІ. У доповнення до цього МНГІ проектно опрацьовані для нього позитивні властивості: додаткова гальванічна розв'язка із навантаженням, електроімпульсне живлення декількох навантажень синхронізованими імпульсами за різних рівнів напруги та з гальванічною розв'язкою цих навантажень між собою.

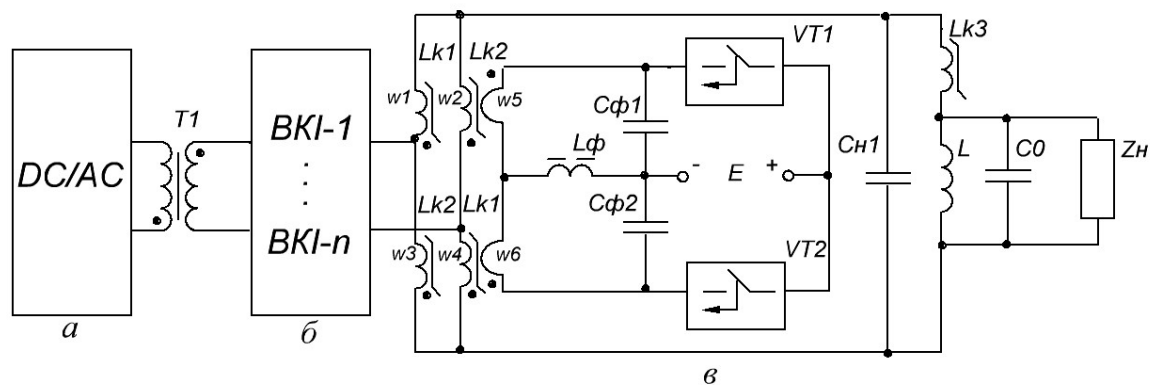


Рис. 2. Модернізований магнітно-напівпровідниковий генератор із дросельним вузлом формування двотактних однополярних вихідних імпульсів

Викладений матеріал щодо МНГІ (рис. 2) дає підставу стверджувати, що його схемне рішення зі згаданими доповненнями в ряді випадків є одним із найефективніших у разі його реалізації, а при вирішенні особливо складних задач щодо проектування спеціальних МНГІ – навіть незамінним (щодо використання суттєвих принципів побудови схеми МНГІ, рис. 2). На науково-технічне рішення щодо МНГІ і особливо щодо вузла рис. 2 в одержано відповідно патент України (№51753 Н03К 7/00, Н03К 3/00).

3. Регулятор напруги уніполярного струму (рис. 3). У випадках, коли в структурі МНГІ до кінцевого вузла із навантаженням формуються біполярні імпульси, а на виході МНГІ мають бути уніполярні імпульси, доцільно застосовувати як вихідний вузол МНГІ

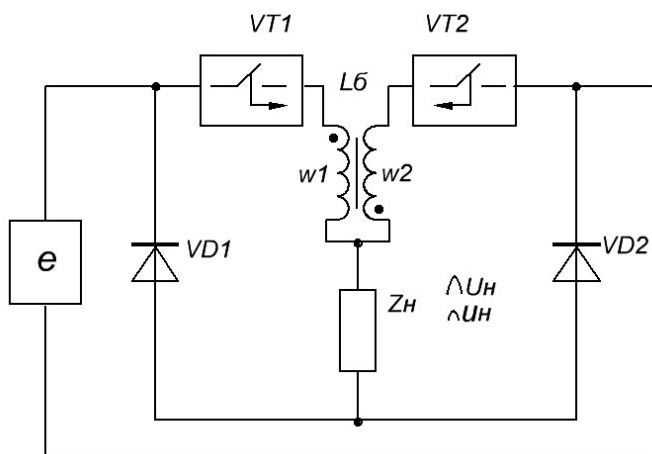


Рис. 3. Регулятор напруги уніполярного струму

пропонованого регулятора напруги уніполярного струму. До того ж за умов, коли джерело e генерує напівхвилі напруг U (+) та U (-) або біполярних імпульсів u (+) та u (-), за яких можливо застосовувати напівпровідникові прилади. Цей регулятор, завдяки введенню до нього двообмоткового дроселя другого напівпровідникового ключа та двох діодів, дає змогу досягти регулювання напруги на навантаженні від нуля до максимального значення, яке мінімально відрізняється від вхідної напруги; блокування навантаження від джерела біполярних імпульсів; відвід невикористаної електроенергії в навантаження; опрацювання імпульсів від наносекундного до мілісекундного діапазонів.

Параметричні та функціональні показники цього регулятора дають підставу ефективно використовувати його не тільки в МНГІ, а також відповідно в інших засобах силової електроніки. Щодо регулятора (рис. 3) одержано патент (№155941 Н02М 5/00, Н02М 7/00).

4. Формування двотактних уніполярних імпульсів за допомогою комутуючих трансформаторів (патент №93925 Н03К 7/00, Н03К 3/53). Фрагмент схеми з трансформаторним вузлом формування двотактних уніполярних імпульсів, вхідні біполярні імпульси цього вузла та сформовані ним уніполярні імпульси наведено на рис. 4.

Цей вузол має такі самі позитивні властивості, як і вихідний дросельний вузол МНГІ (рис. 2). Але йому властиві додаткові важливі функції:

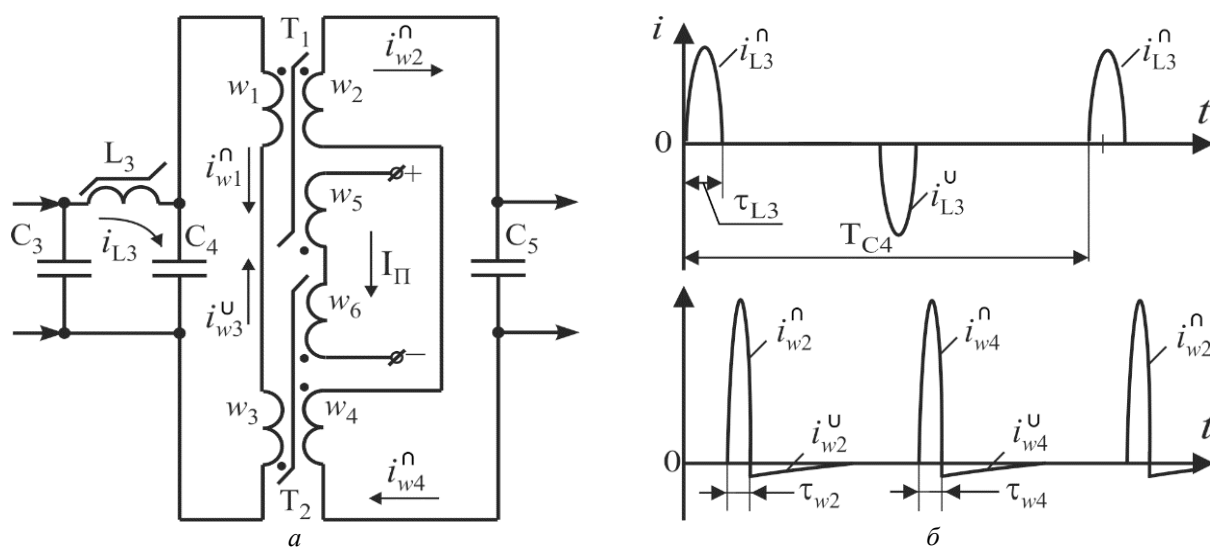


Рис. 4. Трансформаторний вузол формування двотактних уніполярних імпульсів (а) та епюри вхідних та вихідних імпульсів цього вузла (б)

- 1) гальванічна розв'язка навантаження з напругою джерела електроживлення;
- 2) забезпечення імпульсним синхронізованим електроживленням декількох гальванічно розв'язаних між собою навантажень;
- 3) спрощено здійснюються захисні функції;
- 4) без додаткових ускладнень можливе узгодження з низькоомними та ємнісними навантаженнями.

Слід також зазначити, що затрати на уніполяризацію («випрямлення») біполярних імпульсів за допомогою дросельних (рис. 2) чи трансформаторних (рис. 4) вузлів є співрозмірними з МНГІ (ПП), в яких здійснюється згадана уніполяризація біполярних імпульсів за допомогою напівпровідникових приладів. Але заміна численних напівпровідникових приладів у високовольтній частині МПГІ (ПП) збільшує принаймні на порядок надійність функціонування розглянутих МПГІ (рис.2) та МПГІ (рис. 4). Крім того, за допомогою МПГІ (ПП) неможлива або вкрай невигідна реалізація функції зазначених вище пунктів 1) – 4).

Висновки. Щодо представлених МНГІ, що мають у своїй структурі вузли, які відзначаються більш широкими можливостями та зменшеними економічними затратами на свою реалізацію, з'ясовано більш надійне покращене функціонування в порівнянні з напівпровідниковими аналогами таких вузлів, що визначається отриманими покращеними показниками якості сформованих імпульсів та електромагнітною сумісністю з мережею живлення, а також спроможністю забезпечення вимог до імпульсного електроживлення засобів передових технологій.

У підсумку визначено, що: 1) введення як вихідного для МНГІ комутуючих дросельного чи трансформаторного вузлів виключає вкрай невигідне застосування за високих напруг (до 50кВ) численних напівпровідникових приладів. Водночас збільшується принаймні на порядок надійність функціонування МНГІ та покращуються вартісні та інші показники якості. А забезпечення низки вимог для імпульсного електроживлення можливо тільки МНГІ зі згаданим трансформаторним вузлом; 2) на вході МНГІ доцільно встановлювати вхідний вузол DC/AC, що дає можливість спрощення схеми МНГІ та підвищення її надійності; 3) якщо на виході МНГІ немає згаданих дросельного чи трансформаторного вузлів, то доцільно ввести в структуру МНГІ регулятор напруги уніполярного струму, за допомогою якого можливо значно розширити вимоги для імпульсного електроживлення навантаження МНГІ. Щодо розглянутих МНГІ та їхніх вузлів визначено, що найбільш прийнятним для МНГІ є узагальнена побудова їхніх структур із використанням об'єктів, які попередньо вибрані взаємодоповнювальними згідно з узагальненим комплексним синтезом (УКС), який тезово наведено у вступній частині цієї роботи.

1. Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Магнитно-полупроводниковые импульсные устройства преобразовательной техники. К.: Наук. думка, 2016. 230 с.
2. Переверзев А.В., Семенов В.В., Литвиненко Т.Г. Высоковольтный наносекундный генератор с устроением напряжения в ячейке магнитной компрессии. *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2006. С. 13–18.
3. Бойко Н.І. Потужні генератори імпульсів високої напруги з наносекундними фронтами. *Електротехніка та електромеханіка*. 2018. Вип. 1. С. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09>
4. Патент на КМ №73733 України, МПК B21D 26/14. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів. Батигін Ю.В., Дробінін О.М., Чаплигін Є.О., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Дзюбенко О.А. Заявл. 24.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №19.
5. Balcerak M., Hoiub M., Paika R. High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering*, 2013. Vol. 62. No. 3. Pp. 463–472. DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2013-0037>

METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PULSE POWER ELECTRONICS DEVICES

V. V. Golubev, V. M. Gybarevich, V. I. Zozulev, Yu. V. Marunia, A. I. Storozhuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: marunia@ied.org.ua

The paper examines demonstrative magnetic-semiconductor pulse generators (MSPGs), including their improved assemblies and a unipolar current voltage regulator. The advantages are given: MSPGs -1 with a modernized DC/AC input unit; MSPGs -2 with a throttle output unit for the formation of single-stroke pulses; MSPGs -3 with a transformer output unit for the formation of single-cycle pulses in comparison with known analogues, in which unipolarization of bipolar pulses is carried out at their high-voltage output using numerous semiconductor devices (MSPGs -SD). It was established that the reliability of MSPGs -2 and MSPGs -3 is, at least, an order of magnitude greater than the reliability of MSPGs -SD. In addition, with the help of MSPGs -SD, it is impossible to implement functions related to galvanic isolation, synchronization of loads, simplification of load protection and uncomplicated matching of MSPGs -SD with low-resistance and capacitive loads. It is shown that the AC voltage regulator is able to regulate the voltage on the load from zero to the maximum value, block the load, divert unused electricity, process pulses from nanosecond to millisecond ranges. As a result, materials were obtained for the further processing of the generalized complex synthesis for the improvement of the above-mentioned devices and other impulse devices of power electronics. Ref. 5, fig. 4.

Key words: magnetic semiconductor pulse generators, unipolar current voltage regulator, DC/AC input node, AC/DC output choke node, AC/DC output transformer node, generalized complex synthesis.

1. Volkov I.V., Zozulev V.I., Sholoh D.A. Magnetic-semiconductor impulse devices of converting technology. K.: Naukova dumka, 2016. 230 p. (Rus)
2. Pereverzev A.V., Semenov V.V., Lytvynenko T.G. High-voltage nanosecond generator with voltage tripling in a magnetic compression cell. *Tekhnichna elektrodynamika*. Tem. issue Problems of modern electrical engineering. 2006. Pp. 13–18. (Rus)
3. Boyko N.I. Powerful generators of high voltage pulses with nanosecond fronts. *Elektrotehnika ta elektromekhanika*. 2018, vol. 1. Pp. 59–61. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09> (Ukr)
4. Patent on KM No. 73733 of Ukraine, МПК B21D 26/14. Generator of multiple unipolar current pulses for magnetic pulse processing of metals. Batygin Y.V., Drobinin O.M., Chaplygin E.O., Hnatov A.V., Argun Sh.V., Dzyubenko O.A. Application 24.02.2012; published 10.10.2012. Bull. No. 19.
5. Balcerak M., Hoiub M., Paika R. High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering*, 2013. Vol. 62. No. 3. Pp. 463–472. DOI: <https://doi.org/10.2478/aee-2013-0037>

Надійшла: 10.10.2024

Прийнята: 25.10.2024

Submitted: 10.10.2024

Accepted: 25.10.2024