

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСОВ

В.И. Зозулев¹, канд.техн.наук, Д.А. Шолох¹, канд.техн.наук, В.В. Кобыльчак¹, А.И. Христо²

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

E-mail: dimashol@ukr.net

² – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, Николаев, 54018, Украина.

Изложены результаты исследований и систематизации публикаций, обобщающих основные тенденции дальнейшего развития современных магнитно-полупроводниковых генераторов высоковольтных импульсов наносекундного диапазона. Рассмотрены основные новые и характерные узлы генераторов, которые определяют улучшенные показатели данных генераторов. Сформулировано семь основных тенденций развития магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор импульсов, узел компрессии импульсов.

Введение. В последнее десятилетие возрастающая потребность в генераторах мощных высоковольтных импульсов вызвала необходимость поиска рациональных решений по разработке магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов (МПГИ) с улучшенными энергетическими, динамическими и другими основными показателями. Таким исходным научно-техническим решением соответствуют, например, известные [4,6, 8-10] и авторские [2,3] работы. В дополнение к последним обоснованы новые принципы позвенного построения МПГИ, выявлены соответствующие им отличительные процессы, определены недостающие сведения по отдельным режимам работы рассмотренных МПГИ, что в целом предопределило целесообразность авторского обобщенного изложения тенденций прогресса в создании современных МПГИ.

Целью работы является обобщение основных тенденций развития магнитно-полупроводниковых генераторов мощных высоковольтных субмикросекундных импульсов, отражающих способы улучшения их типовых показателей.

Результаты исследований. *Тенденция 1 – исключение узла подмагничивания индуктивных элементов (УПИЭ).* Этот узел изначально применялся в МПГИ для восстановления исходного магнитного состояния индуктивных элементов (ИЭ). Согласно результатам моделирования МПГИ [5], содержащего УПИЭ в его первичной цепи, сердечник импульсного трансформатора характеризуется наиболее продолжительной динамикой его перемагничивания, что ограничивает частотные возможности такого МПГИ. К тому же УПИЭ является достаточно затратным, а генератор в целом имеет меньшие функциональные возможности по его улучшению. Поэтому в современных МПГИ, как правило, избегают схем подмагничивания. Альтернативными к МПГИ с подмагничиванием ИЭ являются МПГИ с последовательно-параллельным звеном во входном контуре – типа Б. Схема для анализа такого генератора показана на рис. 1. Модель коммутирующих дросселей (КД) и параметры схемы описаны в [5]. Моделирование схемы показывает, что в ней возможен режим несимметричных колебаний, которые устанавливаются при неравных индуктивностях зарядного и разрядного контуров ($L_0 > L_1$). При этом подтверждено восстановление исходного магнитного состояния трансформатора TV и выявлено, что приемлемо также восстанавливается магнитное состояние дросселей L_2 и L_3 . Исследован режим включения данного МПГИ, а в стационарном режиме установлены электрические и энергетические характеристики звена типа Б и условия работы ключа K_2 в зависимости от значения нагрузки R_H .

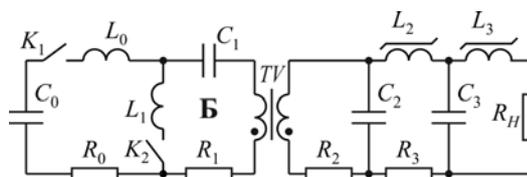


Рис. 1

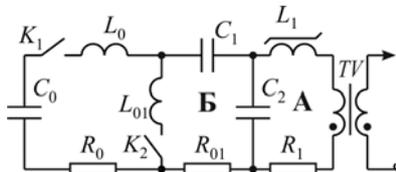


Рис. 2

Тенденция 2 – расширение возможностей МПГИ без УПИЭ. В схеме (рис. 1) предлагается установить звено А, как это показано на рис. 2. Моделирование и эксперименты показали, что здесь дроссель L_1 также перемагничивается при заряде продольной емкости C_1 . Такое решение позволит заметно уменьшить дроссель L_1 , разгрузить по току ключ K_2 и улучшить режим работы TV при значительно меньшей длительности трансформируемых импульсов [2]. Такая схема выгодна при необходимости увеличения мощности генератора.

Тенденция 3 – увеличение числа узлов умножения напряжения, начиная с низковольтной цепи. Так, если параллельно цепочке L_1, K_2 (рис. 1) включить емкость $C_{Л}$, а последовательно с C_1 – КД, то прикладываемое к первичной обмотке TV напряжение в пределе удваивается. Также моделирование схемы рис. 1 определило возможность усиления напряжения на емкости C_1 при создании на последней ненулевых начальных условий. На входе МПГИ предполагается комбини-

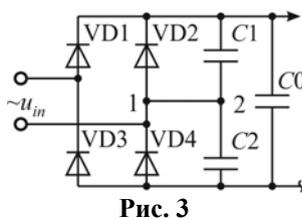


Рис. 3

рованный вариант схемы Латура-Греца, представленный на рис. 3 [1]. Эксперименты показали, что, выбирая соотношения между емкостями $(C_1, C_2) \parallel C_0$, можно установить напряжение в пределах $U_{C_0} = (1,1 \dots 1,8) U_{C_0}^r$, где $U_{C_0}^r$ – выпрямленное напряжение схемы Греца. Предлагается также в русле данной тенденции прибегать к индуктивным зарядно-накопительным узлам (ЗНУ-L), усиливающим напряжение задающих импульсов на входе МПГИ. На рис. 4 показана схема ЗНУ-L, в которой дроссели

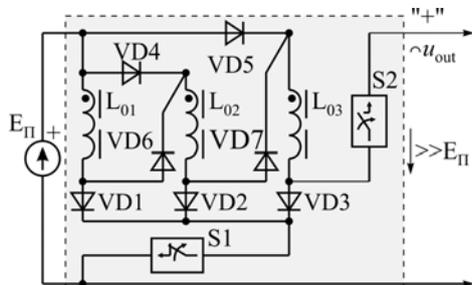


Рис. 4

$L_{01} \dots L_{03}$ накапливают энергию параллельно при S1("1"), S2("0"), а сбрасывают ее при их последовательном соединении в нагрузку при S1("0"), S2("1"), что в пределе обеспечивает утроение напряжения на нагрузке.

Тенденция 4 – минимизация импульсного трансформатора вплоть до его исключения. Трансформатор *TV* (рис. 1) является самым затратным элементом. Выбор звена с *TV* и длительность трансформируемых импульсов определяюще влияют на объем всех КД и конденсаторов МПГИ. Если исключение *TV* нецелесообразно, то предлагается максимально снизить его коэффициент трансформации K_{Tr} . Расчеты

показали, что, выбирая отмеченные способы умножения напряжения в сочетании с известными, например, способом утроения напряжения после *TV* [4], можно уменьшить значение K_{Tr} с (16...20) до (4...8). В конкретных условиях может быть выгодным решение, когда *TV* заменяется дроссельной схемой умножения напряжения аналогичной схеме (рис. 4).

Тенденция 5 – применение диодных прерывателей тока (ДПТ). В их качестве могут использоваться: SOS-диоды, дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ). Лучшие известные МПГИ содержат, как правило, ДПТ в оконечном звене [9,10]. Основное преимущество МПГ с ДПТ – формирование выходных импульсов с минимальным фронтом при одновременном усилении напряжения. Авторами разработан и исследован МПГИ с ДПТ (30 последовательно соединённых диодов HFA30PB120PBF), формирующий на

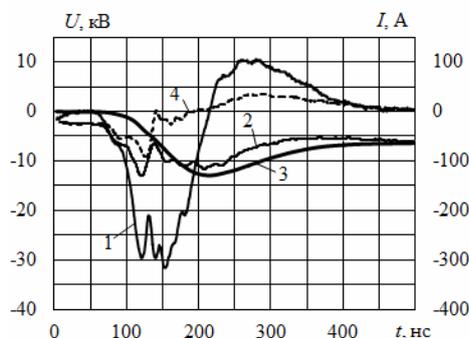


Рис. 5

выходе импульсы с амплитудой до 30 кВ, длительностью до 50...100 нс и крутизной до 20 нс (рис. 5), предназначенный для технологии выработки озона и прямой обработки воды импульсным барьерным разрядом.

Исследуется применение этого МПГИ для возбуждения лазера на парах меди (при снижении амплитуды напряжения импульсов до $\approx 5 \dots 7$ кВ). В целом, исходя из проведенных исследований и поисковых работ, данная тенденция является наиболее значимой для современных МПГИ [7].

Тенденция 6 – исключение из высоковольтной части МПГИ полупроводниковых ключей (кроме ДПТ). Очевидно, что при напряжениях 10 кВ и более применять ПП-ключи можно только в достаточно обоснованных случаях. В работе [3] обосновано применение двухтактных МПГИ, в которых биполярные высоковольтные импульсы наносекундного диапазона “выпрямляются” с помощью только одних ИЭ. Причем отрицательная составляющая “выпрямленных” импульсов не превышает 2...3 %. В сравнении с однотактными МПГИ двухтактные обладают рядом отличительных свойств. На их основе предложена новая разновидность импульсных устройств – магнитно-полупроводниковые преобразователи импульсов (МППИ), в которых сочетаются магнитно-полупроводниковый узел “выпрямления” с ПП-ключами. Т.е. двухтактные МПГИ и МППИ дают возможность обойти проблему применения ПП-ключей в высоковольтных цепях или применять их с магнитными ключами в составе МППИ.

Тенденция 7 – формирование параметров выходных импульсов МПГИ для конкретных нагрузок. Наш опыт показывает, что эффективный МПГИ может быть создан только с учетом знания всех нюансов нагрузки. Например, была использована барьерная емкость разрядной камеры для повышения выработки озона. Предложено формировать цуги выходных импульсов МПГИ в нескольких вариантах для существенного повышения КПД лазера на парах меди, а с помощью двухтактных МПГИ – генерировать практически любые реально требуемые импульсы для потенциальных нагрузок.

Заключение. Выделение основных семи тенденций развития магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов, подкрепленное обоснованными реализованными примерами, позволило создать теоретические и практические базовые предпосылки для выбора и разработки эффективных магнитно-полупроводниковых генераторов высоковольтных импульсов, отвечающих современным требованиям.

1. Векслер Г.С. Электропитание спецаппаратуры. – К.: Вища школа, 1975. – 376 с.

2. Волков И.В., Зозулев В.И., Спирин В.М., Шолох Д.А. Особенности формирования импульсов в согласующих узлах магнитно-полупроводниковых генераторов // Техн. электродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 73-74.

3. Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Двухтактные магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов: принципы построения и основные процессы // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2012. – Вип. 32. – С. 76-82.
4. Переверзев А.В., Семенов В.В., Литвиненко Т.Г. Высоковольтный наносекундный генератор с утроением напряжения в ячейке магнитной компрессии // Техн. електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.2 – С. 13–18.
5. Христо А.И., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Численное моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 76-79.
6. Bluhm H. Pulsed Power Systems, Principles and Applications. – Germany: Springer-Verlag, 2006. – 326 p.
7. Fedorov K.V., Fedorov V.F., Gubarev F.A., Evtushenko G.S. Long-pulse copper bromide laser // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Russian Federation, Altai. – 2014. – Pp. 333-336.
8. Nakhe S.V., Rajanikanth B.S., Bratnagar R. Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes // Measurement Science and Technology. – 2003. – No 14. – Pp. 608.
9. Pokryvailo A., Wolf M., Yankelevich Y., Wald S., Grabowski L.R., E.M. van Veldhuizen, Rutgers W.R., Reiser M., Glocker B., Eckhardt T., Kempenaers P., Wellemann A. High-Power Pulsed Corona for Treatment of Pollutants in Heterogeneous Media // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2006. – 34(5). – Pp. 1731-1743.
10. Vasil'ev P.V., Lyubutin S.K., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Sabitov A.K., Slovikovskii B.G., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N., Cholakh S.O. A SOS-Generator for technological applications // Electronics And Radio Engineering Instruments and Experimental Techniques. – 2011. – Vol. 54. – No 1. – Pp. 54-60.

УДК 621.314

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МАГНІТНО-НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІМПУЛЬСІВ

В.І. Зозульов¹, канд.техн.наук, Д.О. Шолох¹, канд.техн.наук, В.В. Кобильчак¹, О.І. Христо²

¹Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

E-mail: dimashol@ukr.net

²Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,

пр. Жовтневий, 43-А, Миколаїв, 54018, Україна.

Викладено результати досліджень і систематизації публікацій, узагальнюючих основні тенденції подальшого розвитку сучасних магнітно-напівпровідникових генераторів високовольтних імпульсів наносекундного діапазону. Розглянуто основні нові і характерні вузли генераторів, які визначають поліпшені показники даних генераторів. Сформульовано сім основних тенденцій розвитку магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів, вузол компресії імпульсів.

THE MAIN TRENDS OF SEMICONDUCTOR MAGNETIC-PULSE GENERATORS

V.I. Zozulev¹, D.A. Sholokh¹, V.V. Kobylchak¹, A.I. Khristo²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

E-mail: dimashol@ukr.net

² Institute of Pulses Processes and Technologies of National Academy of Science of Ukraine,

pr. Zhovtnevyi, 43-A, Mykolayiv, 54018, Ukraine.

The results of research and systematization of publications, which summarize the main trends in the further development of modern high-voltage semiconductor magnetic-pulse generators in the nanosecond range are set out. The main new and specific nodes of generators that determine the improved performance was considered. Seven main trends in the development of semiconductor magnetic-pulse generator was formulated. References 10, figures 5.

Key words: semiconductor magnetic-pulse generator, impulse-compression node.

1. Vexler G.S. Power supply special equipment. – Kyiv: Vyshcha Shkola, 1975. – 376 p. (Rus)
2. Volkov I.V., Zozulev V.I., Spirin V.M., Sholokh D.O. Features of formation pulses in matching nodes of magnetic semiconductor generators // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 2. – Pp. 73-74. (Rus)
3. Volkov I.V., Zozulev V.I., Sholokh D.O. Push-pull magnetic semiconductor pulse generators: principles of construction and basic processes // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2012. – No 32. – Pp. 76-82. (Rus)
4. Pereverzev A.V., Semenov V.V., Lytvynenko T.G. The high-voltage nanosecond generator with a tripling of voltage in the cell of magnetic compression // Tekhnichna Elektrodynamika. "Problemy suchasnoi elektrotekhniky". – 2006. – Part. 2. – Pp. 13-18. (Rus)
5. Khristo A.I., Zozulev V.I., Sholokh D.O. Numerical simulation of electromagnetic processes in the scheme of magnetic pulse generator // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 2. – Pp. 76-79. (Rus)
6. Bluhm H. Pulsed Power Systems, Principles and Applications. – Germany: Springer-Verlag, 2006. – 326 p.
7. Fedorov K.V., Fedorov V.F., Gubarev F.A., Evtushenko G.S. Long-pulse copper bromide laser // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Russian Federation, Altai. – 2014. – Pp. 333-336.
8. Nakhe S.V., Rajanikanth B.S., Bratnagar R. Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes // Measurement Science and Technology. – 2003. – No 14. – Pp. 608.
9. Pokryvailo A., Wolf M., Yankelevich Y., Wald S., Grabowski L.R., E.M. van Veldhuizen, Rutgers W.R., Reiser M., Glocker B., Eckhardt T., Kempenaers P., Wellemann A. High-Power Pulsed Corona for Treatment of Pollutants in Heterogeneous Media // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2006. – 34(5). – Pp. 1731-1743.
10. Vasil'ev P.V., Lyubutin S.K., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Sabitov A.K., Slovikovskii B.G., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N., Cholakh S.O. A SOS-Generator for technological applications // Electronics And Radio Engineering Instruments and Experimental Techniques. – 2011. – Vol. 54. – No 1. – Pp 54-60.

Надійшла 03.02.2016
Остаточний варіант 11.04.2016