

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314: 621.373

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕДТРАНСФОРМАТОРНОЙ ЧАСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСОВ

И.В. Волков¹, чл.-корр. НАН Украины, **В.И. Зозулев**², канд. техн. наук, **Н.И. Кускова**³, докт. техн. наук, **А.И. Христо**⁴, канд. техн. наук
1,2 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
3,4 – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Богоявленский, 43-А, Николаев-18, 54018, Украина
e-mail: dep8ied@ied.org.ua

Выполнен сравнительный анализ электромагнитных процессов и принципов построения предтрансформаторной части (ПТЧ) высоковольтных магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов (МПИ) с параллельным, параллельно-последовательным и параллельно-перезарядным звеньями компрессии импульсов. Показано, что оптимизация ПТЧ генераторов является основополагающей для решения проблем повышения КПД и улучшения других основных показателей МПИ, а также, что решение этих проблем наиболее полно реализуется при использовании ПТЧ генератора с параллельно-перезарядным звеном. Сформулированы положения концепции повышения КПД МПИ. Библиограф. 12, рис. 6.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор импульсов, узел компрессии импульсов, коммутирующий дроссель, численное моделирование.

Введение. Магнитно-полупроводниковые генераторы высоковольтных импульсов (МПИ) являются неотъемлемой составляющей оборудования современных передовых электроимпульсных технологий, повышение эффективности которых и расширение их применения непосредственно связаны с проблемой улучшения основных показателей МПИ. Схемотехника МПИ базируется на экспериментально проверенных решениях применительно к технологиям электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов, электрофильтрации газовых выбросов, обработки воды, выработки озона и возбуждения лазеров на парах металлов (ЛПМет) [1, 3, 10, 12]. Освоение сфер применения МПИ имеет важное научно-техническое и практическое значение, так как предъявляемые к ним требования являются приемлемыми для ряда других электроимпульсных технологий. Такими, в первую очередь, являются характерные параметры выходных импульсов МП-генераторов расширенного применения с установленной мощностью от 0,5 до 5...10 кВт (а в перспективе и более): амплитуда напряжения – до 20...50 кВ; амплитуда тока – до 0,2...1,0 кА; длительность импульсов – до 70...100 нс; частота повторения импульсов – 0,1...25 кГц и более, например, для высокочастотных ЛПМет. Относительно остальных показателей МПИ, наиболее проблемной является задача повышения его КПД и улучшения других энергодинамических параметров. Исходя из этого видим, что решение этой проблемы связано с оптимизацией предтрансформаторной части МПИ, включая предложенные реконфигурации ее распределенных структур, выпрямители с умноженным напряжением и силовые ключи с низкими потерями энергии [3, 4].

Эта публикация является первым этапом решения проблемы улучшения основных показателей МПИ и их функциональных характеристик, поскольку следует объяснить особенности протекания электромагнитных процессов в вариантах предтрансформаторной час-

ти МПГИ, их влияния на устойчивые режимы колебаний в выбранных схемах МПГИ и дать обобщенные оценки эффективности преобразования энергии в них.

Целью работы являются определение и сопоставление закономерностей электромагнитных процессов в известном и предложенных вариантах предтрансформаторной части высоковольтных магнитно-полупроводниковых генераторах и формирование на их основе развития принципов построения данных генераторов с улучшенными основными показателями.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) провести численное моделирование электромагнитных процессов в цепях предложенных схем предтрансформаторной части МПГИ и в цепях известной схемы-аналога; 2) изложить основные сопоставительные выводы по схеме-аналогу и результаты моделирования по предложенным схемам; 3) представить обобщенные оценки рассмотренных схем по эффективности преобразования энергии и выбору улучшенных основных параметров МПГИ.

Магнитно-полупроводниковый генератор с параллельным звеном компрессии импульсов в предтрансформаторной части – МПГИ.1 (рис. 1).

Это известная схема МПГИ [11]. Благодаря принципу ее построения, появилась возможность в большинстве случаев исключить затратное подмагничивание индуктивных элементов МПГИ, необходимого для восстановления их исходного магнитного состояния. Поэтому эта схема получила свое развитие [3]. Чтобы улучшить ее, необходимо сначала выяснить основные электромагнитные процессы, протекающие в ее цепях. Путем численного моделирования [7] подтверждено, что МПГИ.1 является альтернативой МПГИ с подмагничиванием. Кроме того, были получены электрические и энергетические характеристики генератора в зависимости от питающего напряжения и эквивалентного сопротивления нагрузки, а также установлен диапазон эквивалентных сопротивлений нагрузки генератора, при котором достигается наибольшая эффективность преобразовательного звена. К тому же в этой схеме обнаружен режим самовозбуждения, который характеризуется увеличением амплитуды колебаний на продольном конденсаторе C_1 преобразовательного звена и увеличением амплитуды и энергии инверсного импульса на нагрузке.

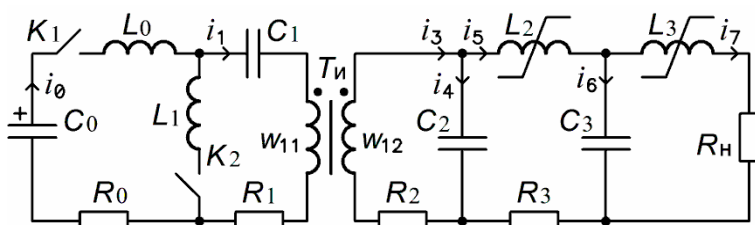


Рис. 1

Переходный процесс самовозбуждения генератора направлен на то, чтобы выравнять пути протекания зарядного и разрядного токов. Он установится только тогда, когда значительная часть разрядного тока пройдет последовательно через обмотки высоковольтных коммутационных дросселей и замкнется на нагрузку. Установлены также условия усиления напряжения на конденсаторе C_1 , увеличения передачи энергии в нагрузку и увеличения амплитуды напряжения на ней.

В результате определились пути расширения функциональных возможностей МПГИ.1 и целевого улучшения его основных показателей.

Магнитно-полупроводниковый генератор с параллельным и последовательным звеньями компрессии импульсов в предтрансформаторной части – МПГИ.2 (рис. 2).

Представленная схема дополняет схему МПГИ.1 путем введения последовательного звена магнитного сжатия импульса в первичной обмотке трансформатора – элементы L_1, C_2 .

Расчетные параметры МПГИ.2: емкость конденсатора источника питания $C_0 = 870$ мкФ; емкость конденсатора параллельного преобразовательного звена $C_1 = 1$ мкФ; емкость конденсатора последовательного звена сжатия $C_2 = 1$ мкФ; емкости высоковольтных конденсаторов равны $C_3 = C_4 = 2,4$ нФ; сопротивление зарядного и разрядного контуров $R_{0l} = 0,01$ Ом; сопротивление первичной цепи трансформатора $TV - R_1 = 0,01$ Ом; сопротивление вторичной обмотки трансформатора $R_2 = 1$ Ом; сопротивление обмотки дросселя $L_2 - R_3 = 0,8$ Ом; соп-

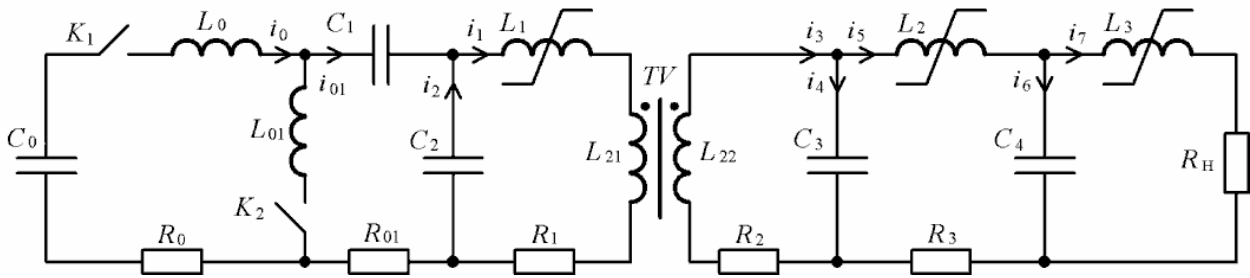


Рис. 2

ротивление нагрузки $R_H=100$ Ом; объем сердечника предтрансформаторного дросселя $L_1-V_2=3,48 \cdot 10^{-6}$ м³; объемы сердечников высоковольтных дросселей L_2 и L_3 равны $V_2=V_3=31,7 \cdot 10^{-6}$ м³ ($50 \times 34 \times 30$); объем сердечника импульсного трансформатора $V_{TV}=84,8 \cdot 10^{-6}$ м³ ($100 \times 80 \times 30$); количество витков обмоток трансформатора $w_{21}=14$, $w_{22}=290$; количество витков обмоток дросселей L_1, L_2, L_3 , – $w_1 = 20$, $w_2=120$, $w_3=35$; напряжение на конденсаторе C_0 $U_{C0}=480$ В.

Для осуществления асимметричного режима колебаний также, как в работе [7] для МПГИ.1, необходимы соблюдение неравенства $L_0 \gg L_1$ и рассогласование выходного звена сжатия с нагрузкой. То есть для однополяризации выходных импульсов МПГИ выбрано: $L_0 = 128$ мкГн; $L_1 = 6$ мкГн, период коммутации ключа $K_1 - T_{K1} = 100$ мкс, задержка отпирания ключа K_2 относительно момента отпирания ключа $K_1 - T_{K2} = 36$ мкс.

Расчетная система алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0^{k+1} = i_0^k + \Delta t (U_2 - U_0 - U_1 - R_0 \cdot i_0^k) / L_0; \\ i_{01}^{k+1} = i_{01}^k + \Delta t (U_2 - U_1 - R_{01} \cdot i_{01}^k) / L_{01}; \\ i_1^{k+1} = i_1^k + \frac{a_2 \cdot \Delta t}{L_1 + L_{21} - \frac{M_2^2}{L_{22}}}; \\ i_3^{k+1} = i_3^k + \frac{M_2 (i_0^{k+1} - i_0^k) - (R_2 \cdot i_3^k + s_2) \cdot \Delta t}{L_{22}}; \\ i_5^{k+1} = i_5^k + \frac{(U_2 - U_3 - R_3 \cdot i_5^k) \cdot \Delta t}{L_3}; \\ i_7^{k+1} = i_7^k + \frac{(U_3 - R_H \cdot i_7^k) \cdot \Delta t}{L_4}; \\ i_2^{k+1} = i_1^{k+1} - i_0^{k+1}; \\ i_4^{k+1} = i_3^{k+1} - i_5^{k+1}; \\ i_6^{k+1} = i_5^{k+1} - i_7^{k+1}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_0 = \frac{1}{2C_0} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t; \\ U_1 = \frac{1}{2C_1} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t; \\ U_2 = \frac{1}{2C_2} \sum_{n=1}^k (i_1^n + i_1^{n-1}) \Delta t; \\ U_3 = \frac{1}{2C_3} \sum_{n=1}^k (i_4^n + i_4^{n-1}) \Delta t; \\ U_4 = \frac{1}{2C_4} \sum_{n=1}^k (i_6^n + i_6^{n-1}) \Delta t; \\ a_2 = U_1 + R_1 \cdot i_1^k + \frac{M_2}{L_{22}} (R_2 \cdot i_3^k + U_2); \\ a_1 = U_0 + U_1 + R_1 \cdot i_1^k + \frac{M_2}{L_{22}} (R_2 \cdot i_3^k + U_2); \end{array} \right. \quad (1)$$

где i_0 – ток зарядной цепи через ключ K_1 ; i_{01} – ток разрядной цепи через ключ K_2 ; i_1 – ток первичной цепи ИТ; i_3 – ток вторичной цепи ИТ; i_5, i_7 – токи через дроссели L_2, L_3 ; i_2, i_4 – токи в цепях конденсаторов C_0, C_4 ; $U_0 \dots U_4$ – напряжения на конденсаторах $C_0 \dots C_4$.

Основные результаты моделирования МПГИ.2 показаны на рис. 3, где первый цикл колебаний разбит на интервалы времени $t_0 \dots t_7$.

В нулевой момент времени отпирается ключ K_1 и производится заряд конденсаторов C_1 и C_2 . Однако индукция в L_2 близка к положительному порогу насыщения и в момент времени t_1 достигает положительного насыщения (рис. 3). В результате чего конденсатор C_2 оказывается зашунтированным на первичную обмотку ω_1 трансформатора ИТ и зарядный ток через него практически не проходит (рис. 3 а). В таком случае зарядный ток конденсатора C_1

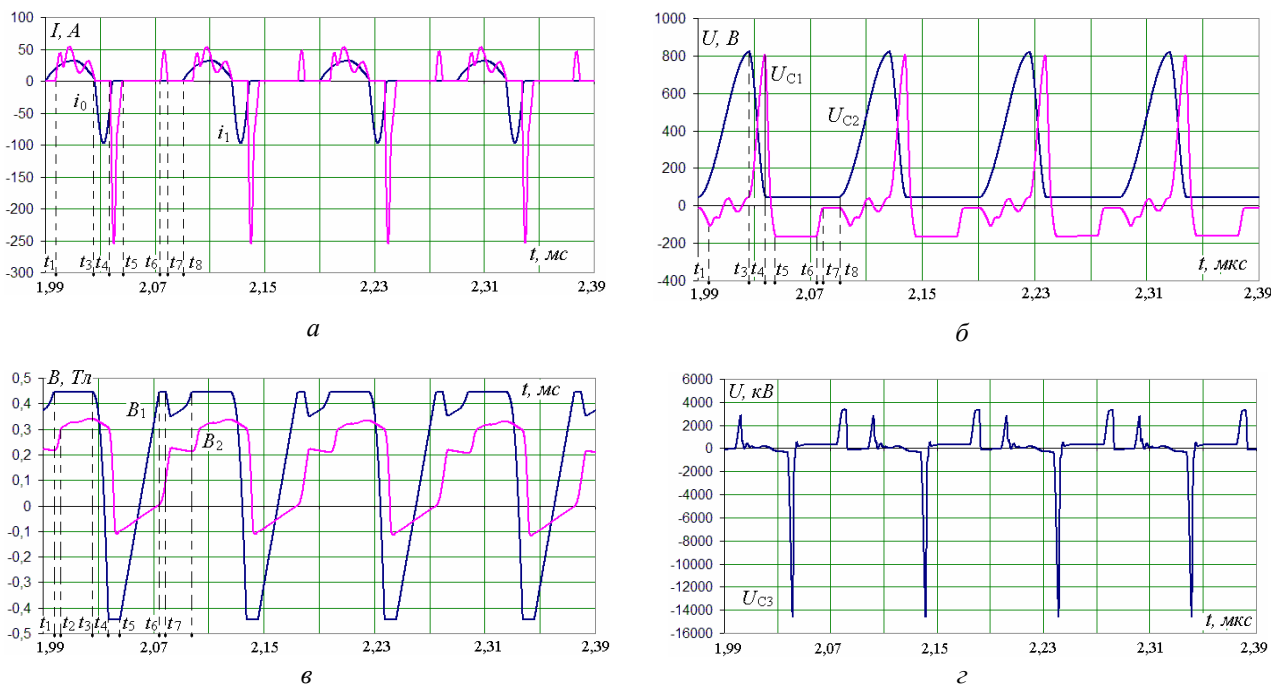


Рис. 3

закрывается через первичную обмотку ИТ. Согласно характеристике напряжения на C_2 (рис. 3 б) следует, что конденсатор C_2 до момента t_1 успевает немного зарядиться. Ток в цепи ИТ и индукция в его сердечнике быстро нарастают, однако в момент t_2 насыщается высоковольтный дроссель L_2 , что приводит к существенному замедлению роста индукции через ИТ и как следствие передача энергии в высоковольтную часть прекращается. Созданный в этой части колебательный контур выступает как фильтр нижних частот, препятствуя дальнейшей передаче энергии в нагрузку в процессе заряда конденсатора C_1 (рис. 3 в). Характеристика индукции в ИТ на этом интервале приобретает пологую (округлую) форму. Тем самым на интервале $t_1 \dots t_3$ в основном происходит заряд конденсатора C_1 и напряжение на нем возрастает до 800 В. В момент t_3 отпирается ключ K_2 и конденсатор C_1 разряжается на C_2 . Следует отметить, что момент коммутации ключа K_2 совпадает с моментом достижения тока i_0 нулевого значения. В интервале $t_3 \dots t_4$ за счет прикладываемого обратного напряжения коммутирующий дроссель (КД) L_1 будет перемагничиваться к отрицательному порогу насыщения. При этом амплитуда разрядного тока через K_2 достигает 100 А, что примерно в четыре раза больше зарядного тока. После насыщения КД L_1 в момент t_4 производится передача энергии из C_2 в высоковольтный конденсатор C_3 (рис. 3 г). Так как энергия в C_1 увеличилась, то размаха индукции высоковольтного КД в этом случае будет недостаточно, чтобы передать всю энергию из C_2 . Поэтому КД L_2 будет насыщаться раньше, чем произойдет полная передача энергии и разрядный ток будет немного затянутым за счет возросшей емкости высоковольтного контура. Разряд становится несогласованным, поэтому в момент времени t_5 на конденсаторах C_1 и C_2 соответственно появятся отрицательное и положительное остаточные напряжения. Амплитуда разрядного тока через ИТ увеличится в 2,5 раза по сравнению с предыдущим звеном сжатия и составит 250 А, амплитуда инверсного импульса на C_3 составит 14,5 кВ. Под действием этих напряжений на интервале времени $t_5 \dots t_6$ КД L_1 и L_2 будут перемагничены к положительному порогу насыщения. После насыщения КД L_1 напряжение на C_3 возрастает примерно до 3,3 кВ. В момент t_7 насыщается КД L_2 и напряжение на конденсаторе C_3 падает практически до нуля, а запасенная энергия передается в последующий высоковольтный узел сжатия. Амплитуда импульса напряжения на C_3 на интервале $t_6 \dots t_7$ будет лишь на несколько сотен вольт превышать амплитуду прямого импульса для интервала $t_1 \dots t_3$. В момент времени t_8 отпирается ключ K_1 и цикл повторяется. Согласно моделированию существует возможность скорректировать индуктивность КД L_1 (количество витков, сечение магнитопровода) так, чтобы максимально уменьшить амплитуду прямого импульса

и улучшить эффект однополяризации. Поэтому решение введения дополнительного КД в низковольтной цепи оправдывается скорее всего улучшением условий согласования звена сжатия с ИТ при формировании инверсного импульса. Необходимо отметить, что для схемы, показанной на рис.2, стационарный режим асимметричных колебаний осуществляется, когда выходная нагрузка находится в пределах от 70 до 110 Ом, то есть составляет 45...80 % от согласованной нагрузки.

Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность введения последовательного узла компрессии импульсов – элементы L_1, C_2 схемы, представленной на рис. 2, в схему МПГИ.1.

Магнитно-полупроводниковый генератор с параллельным и перезарядным звеньями компрессии импульсов в предтрансформаторной части – МПГИ.3 (рис. 4).

Приведенная схема дополнительно содержит перезарядное звено [3] и представляет собой реконфигурацию схемы рис. 2, в которой изменена очередность установки поперечного и продольного конденсаторов: соответственно в схеме рис. 4 – C_1 и C_2 . Это схемотехническое решение позволяет увеличивать напряжение импульса с первичной стороны ИТ путем перезаряда поперечного конденсатора C_1 с помощью элементов L_1, K_2 . Аналогичным образом составляется система интегро-дифференциальных уравнений для баланса напряжений в контурах и баланса токов в узлах. Система решается численно методом Эйлера. Параметры модели МПГИ остаются такими же, как и для генератора на рис. 1, однако емкость высоковольтных конденсаторов выбрана в два раза меньше, чтобы реализовать согласованный режим передачи

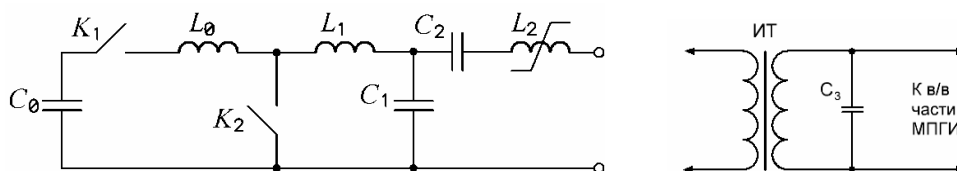


Рис. 4

энергии из конденсаторов C_1, C_2 в высоковольтный конденсатор C_3 . Дополненные параметры модели МПГИ и начальные условия:

емкость высоковольтных конденсаторов $C_3=C_4=1,2$ нФ; сопротивление нагрузки $R_n=150$ Ом; напряжение на C_0 $U_{C0}=300$ В; период коммутации ключа K_1 200 мкс; момент отпирания ключа K_2 по отношению к K_1 $T_{K2}=60$ мкс.

Моделирование показывает, что в схеме существует стационарный режим асимметричных колебаний. Электромагнитные характеристики этого режима показаны на рис. 5. В момент времени t_0 отпирается последовательный ключ K_1 и происходит одновременный заряд конденсаторов C_1 и C_2 от конденсатора C_0 соответственно по цепям: $C_0-L_0-C_1$ и $C_0-L_0-C_2-L_1-L_2$

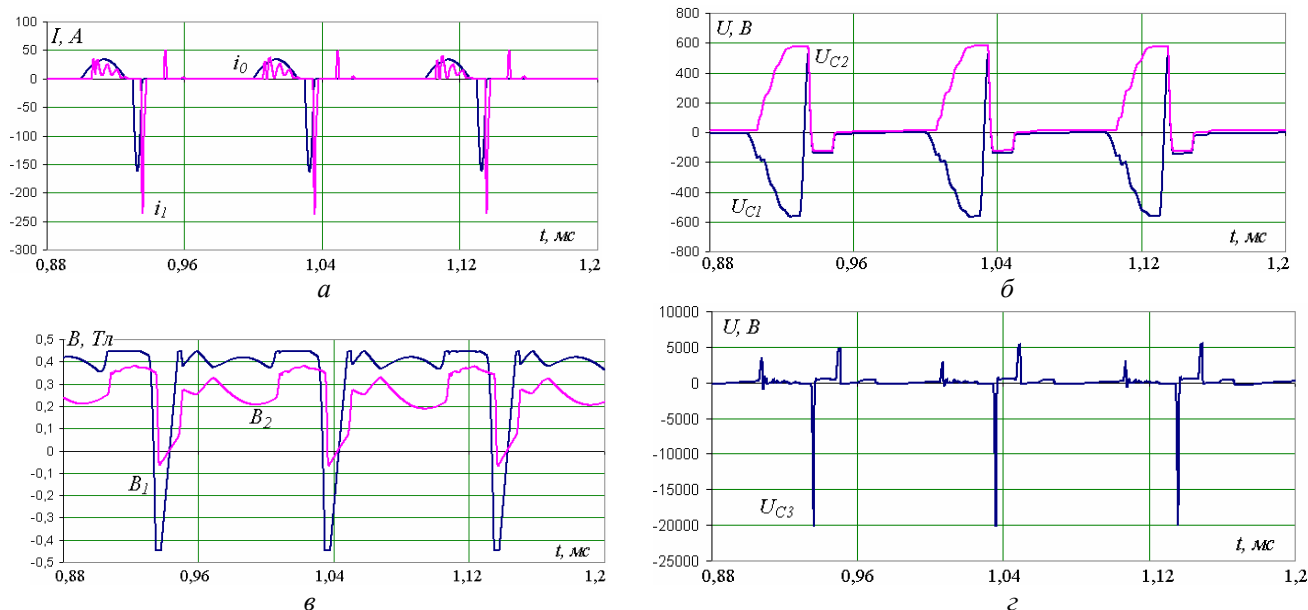


Рис. 5

(рис. 4). При этом в конце цикла заряда (момент t_1) продольный конденсатор заряжается до большего напряжения, чем поперечный (рис. 5 б). На момент отпирания ключа K_1 индукция в сердечнике КД L_1 находится вблизи положительного порога насыщения, что обеспечивает минимальное реактивное сопротивление при протекании зарядного тока по цепи продольного конденсатора. В момент времени t_2 отпирается ключ K_2 и происходит перезаряд конденсатора C_1 до положительного напряжения. В результате преобразования к дросселю L_1 прикладывается напряжение от двух последовательно соединенных конденсаторов C_1, C_2 . Под действием возрастающего напряжения КД L_2 быстро перемагничивается к отрицательному порогу насыщения (рис. 5 в). В момент времени t_3 КД L_2 насыщается и энергия из конденсаторов C_1 и C_2 передается через ИТ в конденсатор C_3 (рис. 5 г). Так как разряд не является идеально согласованным, то по окончании разрядного процесса на конденсаторах C_1 и C_2 появятся отрицательные остаточные напряжения. Под действием их КД L_2 обратно перемагничивается к положительному порогу насыщения, что при формировании зарядного импульса обеспечит свободный путь протекания тока продольного конденсатора и соответственно асимметрию выходных импульсов.

Преимуществом схемы МПГИ.3 является то, что для достижения порога существования асимметричного режима колебаний требуется значительно меньшее входное напряжение источника питания, чем для схемы рис. 2. Это объясняется тем, что энергия на двух последовательно заряженных конденсаторах последовательного звена сжатия с ростом входного напряжения возрастает быстрее, чем в схеме на рис. 2 б.

При равенстве емкостей $C_1=C_2=1$ мкФ асимметричный режим колебаний реализуется уже при входе питающем напряжении, равном 200 В. Осциллограммы напряжения, подтверждающие существование асимметричного режима колебаний, изображены на рис. 6, где видно, что за счет перезаряда поперечного конденсатора C_1 происходит удвоение напряжения в первичной цепи ИТ.

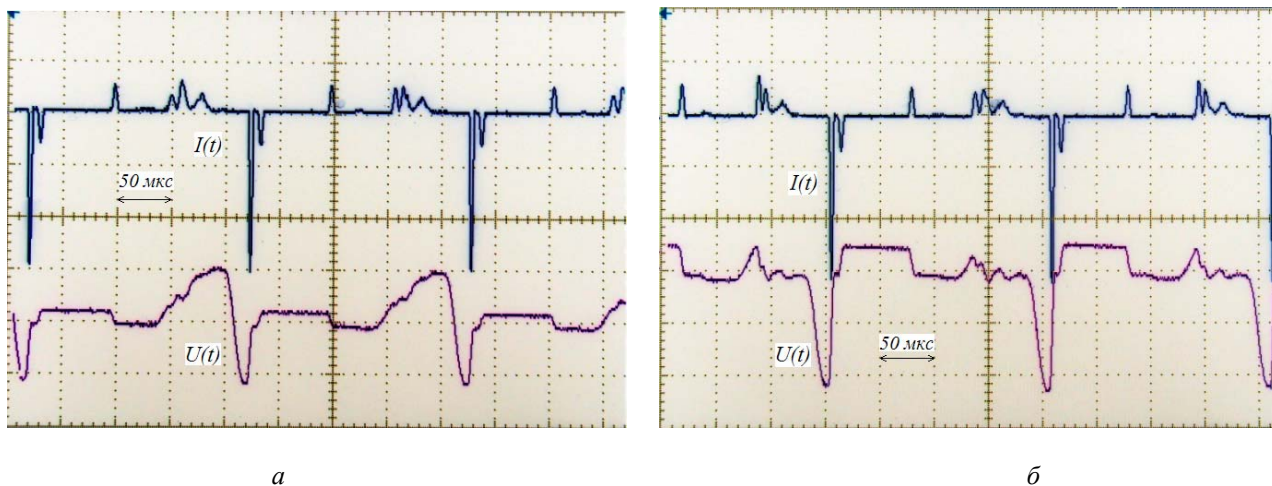


Рис. 6

Основные результаты исследований

Проблемными вопросами повышения эффективности МПГИ являются:

- максимально возможное повышение КПД МПГИ, так как по сравнению с классическими устройствами преобразовательной техники они имеют увеличенное число звеньев преобразования, включая индуктивные элементы, работающие в микро- и наносекундных диапазонах;
- достижение предельно возможных параметров высоковольтных наносекундных импульсов;
- обеспечение стабильных колебательных процессов при изменении в широких пределах нагрузки.

Такие показатели, как массогабаритные, ценовые, надежность и другие являются зависимыми от перечисленных проблемных.

Полученные результаты исследований предлагаются в качестве исходного выбора схемотехнического решения МПГИ, наиболее определяющего положительное решение затронутых проблем повышения эффективности МПГИ при заданных конкретных условиях.

Подтверждено, что схема МПГИ.1 является альтернативой МПГИ с подмагничиванием, причем с его упрощением за счет исключения затратного узла подмагничивания. Дополнительно установлено, что приемлемо восстанавливается магнитное состояние высоковольтных дросселей, существуют условия, при которых усиливается напряжение на конденсаторе C_1 и увеличивается передача энергии в нагрузку с ростом напряжения на ней.

Следуя изложенному, схему выгодно реализовать при относительно небольших мощностях, высоких частотах следования импульсов, небольших изменениях нагрузки и выходном напряжении до 10...20 кВ. Проблему повышения КПД рекомендуется решать путем оптимизации режимов работы ключей [3], выбора ключей с низкими потерями энергии [4] и позиционного анализа работы дросселей и ИТ [2].

По схеме, представленной на рис. 2, установлено, что по сравнению с аналогом [11] заметно снижается ток через ключ K_2 . Это является приоритетным при использовании генераторов большой мощности. Существуют условия выбора оптимальной длительности импульсов тока через первичную обмотку ИТ, что согласно [3] является первоочередным подходом к оптимизации генератора в целом, по сравнению с другим аналогом [11] обеспечивается восстановление магнитного состояния дросселей L_1 , L_2 , существенно улучшаются формирование однополярных импульсов и согласование генератора с нагрузкой, достигается устойчивая работа в режимах, близких к короткому замыканию в цепи нагрузки.

Согласно изложенному, схему следует применять при больших мощностях, используя возможности ее оптимизации по массогабаритным показателям и частично по КПД за счет выбора соотношений формируемых импульсов зарядным узлом, параллельным и последовательным узлами компрессии импульсов. Рекомендации для МПГИ.1 относительно КПД, частоты следования импульсов, выходного напряжения и нагрузки также следует учитывать.

Схемное решение МПГИ.3, согласно которому напряжение на последовательно соединенных конденсаторах C_1 , C_2 увеличивается в два раза, приводит к улучшению показателей генератора, а именно:

- увеличения коэффициента компрессии импульсов звена, состоящего из L_2 , $(C_1 + C_2)$, что заметно уменьшает ИТ, а увеличение напряжения на $(C_1 + C_2)$ соответственно уменьшает коэффициент трансформации ИТ. Эти два фактора существенно упрощают ИТ;

- возможности реализации выявленного времени импульсного регулирования амплитуды импульсов напряжения на первичной обмотке ИТ, использование которого приводит к стабилизации или заданному алгоритму изменения напряжения на нагрузке при отклонениях напряжения на C_0 и при определенных изменениях нагрузки;

- уменьшения примерно вдвое длительности выходных импульсов генератора при соблюдении оптимального энергетического баланса между C_1 , C_2 и C_3 , что позволяет сформировать на нагрузке импульсы с большей пиковой мощностью по сравнению с МПГИ. 2.

Согласно изложенному и при введении в схему последовательного звена компрессии импульсов по аналогии с МПГИ.2 такое решение имеет наибольшие потенциальные возможности по реализации вышеотмеченных проблемных аспектов повышения эффективности МПГИ. Оценки схемы МПГИ.3 по КПД представляются следующими положениями концепции его максимально возможного увеличения:

- 1) в качестве входного выпрямителя использовать управляемую схему выпрямления Лагура-Греца, которая увеличивает напряжение по сравнению со схемой Греца до $\approx 1,8$ раза и имеет меньшие потери энергии на диодах;

- 2) в ключах K_1, K_2 применить соответственно транзисторы с тиристорным управлением и транзисторы с низким падением напряжения [4];
- 3) в высоковольтной цепи ИТ ввести схему, удвоив или утроив напряжение [6], что позволит дополнительно уменьшить коэффициент трансформации ИТ, существенно его упростить и уменьшить соответственно потери энергии в ИТ;
- 4) оптимизировать длительность импульса через ИТ [3] и позвенно использовать магнитные материалы индуктивных элементов, компромиссно выбранных по наименьшим потерям и наибольшей магнитной проницаемости для каждого индуктивного элемента, соответственно позвенно формируемым ими длительностям импульсов;
- 5) с помощью времяимпульсного управления выпрямителем Латура-Греца и/или перезарядным узлом минимизировать обменные процессы между нагрузкой и емкостью фильтра выпрямителя;
- 6) в перспективе (после предстоящих исследований) применять полупроводниковые и магнитно-полупроводниковые прерыватели тока в пред- и послетрансформаторных звеньях – по аналогии с применяемыми SOS-диодами в выходном звене генераторов [3].

Выводы. 1. Оптимизация построения предтрансформаторной части МПГИ с целью повышения КПД, достижения предельно возможных параметров выходных импульсов и обеспечения надежного функционирования МПГИ является основополагающей для решения проблем повышения эффективности МПГИ.

2. Решение проблем повышения эффективности МПГИ потенциально наиболее полно реализуется при использовании предложенной схемы МПГИ.3, имеющей параллельно-разрядное и при необходимости последовательные звенья компрессии импульсов. Причем предполагая, что существующее удвоение напряжения параллельно-перезарядным узлом должно быть дополнено умножением напряжения на входном выпрямителе и на выходе импульсного трансформатора.

3. Положения концепции максимально возможного повышения КПД, как основного проблемного аспекта повышения эффективности МПГИ, базируются на необходимости позвенного умножения напряжения в двух-трех звеньях, применения полупроводниковых приборов с низким падением напряжения, в том числе предложенных дискретных их моделей, позвенного выбора магнитных материалов и оптимальной длительности импульсов через трансформатор, использования предложенного времяимпульсного управления в выпрямителе и/или в параллельно-перезарядном узле для управления обменными процессами энергии для минимизации ее потерь в звеньях МПГИ.

1. Божко І.В., Зозулев В.І., Кобильчак В.В. SOS-генератор для електророзрядних технологій на основі імпульсного бар'єрного розряду // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 2. – С. 63–68.
2. Волков І.В., Зозулев В.І., Спирин В.М., Шолох Д.А. Особенности формирования импульсов в согласующих узлах магнитно-полупроводниковых генераторов // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 73–74.
3. Волков І.В., Зозулев В.І., Шолох Д.А. Магнитно-полупроводниковые импульсные устройства преобразовательной техники. – К.: Наук. думка, 2016. – 230 с.
4. Зозулев В.І. Устройства преобразовательной техники на основе реконфигурации распределенных структур // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 46. – С. 71–80.
5. Зозулев В.І., Шолох Д.А., Христо А.І. Моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитно-полупроводникового генератора прямых импульсов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 42. – С. 104–111.
6. Переверзев А.В., Семенов В.В., Литвиненко Т.Г. Высоковольтный наносекундный генератор с утроением напряжения в ячейке магнитной компрессии // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – С. 13–18.
7. Христо А.І. Электрические и энергетические характеристики последовательно-параллельного преобразовательного звена магнитно-полупроводникового генератора высоковольтных импульсов // Вісник НТУ «ХП». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2015. – № 51. – С. 99–106.
8. Христо А.І., Зозулев В.І., Шолох Д.А. Численное моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 22–28.

9. Пат. 41501, Україна, МПК Н03К 7/00. Двоключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів / І.В. Волков, Л.М. Гапченко, В.І. Зозульов, Д.О. Шолох; Заявник і патентовласник ІЕД НАН України. – Заявл. 18.12.2008; Опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.
10. Choi J. Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application // Journal of electrical engineering and technology. – 2010. – Vol 5, № 3. – P. 484–492.
11. 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. – № 14. – P. 608.
12. Zozulev V.I., Sholokh D.O., Kobylchak V.V., Khrysto A.I. New aspects of magnetic-pulse semiconductor devices improvement // 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems: Conference Proceedings. – Kyiv, June 7-11, 2016. – P. 209–214.

УДК.621.314: 621.373

І.В. Волков¹, чл.-кор. НАН України, **В.І. Зозульов²**, канд. техн. наук, **Н.І. Кускова³**, докт. техн. наук, **О.І. Христо⁴**, канд. техн. наук

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна,

3, 4 – Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України,

пр. Богоявленський, 43-А, Миколаїв-18, 54018, Україна

Розвиток принципів побудови передтрансформаторної частини високовольтних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів

Виконано порівняльний аналіз електромагнітних процесів та принципів побудови передтрансформаторної частини (ПТЧ) високовольтних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів (МНГІ) з паралельною, паралельно-последовною та паралельно-перезарядною ланками компресії імпульсів. Показано, що оптимізація ПТЧ генераторів є основоположною для вирішення проблем підвищення ККД та поліпшення інших основних показників МНГІ. З'ясовано, що вирішення цих проблем найбільш повно реалізується при використанні ПТЧ генератора з паралельно-перезарядною ланкою. Сформовано положення концепції підвищення ККД МНГІ. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів, вузол компресії імпульсів, комутуючий дросель, чисельне моделювання.

I.V. Volkov¹, V.I. Zozulev², N.I. Kuskova³, O.I. Khrysto⁴

1, 2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kiev, 03057, Ukraine,

3, 4 – Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Sciences of Ukraine,

Bogoyavlenskij Avenue, 43a, Mykolayiv, 54018, Ukraine

Development of principles for constructing a pre-transformer part of magnetic-semiconductor pulse generators

A comparative analysis of electromagnetic processes and principles of construction of the pretransformer part of high-voltage magnetic-semiconductor pulse generators (MSGI) is performed with parallel, parallel-sequential and parallel-charge-exchange links of pulse compression. It is shown that the optimization of PTP generators is fundamental for solving the problems of increasing efficiency and improving other key indicators of MSGI. It was found out that the solution of these problems is most fully realized when using a PTP generator with a parallel-charge-exchange link. The provisions of the concept of increasing the MSGI efficiency are formed. Referenses 12, figures 6.

Key words: magnetic-semiconductor pulse generator, pulse compression unit, switching choke, numerical simulation.

Надійшла 27.06.2017

Received 27.06.2017