#### УДК 621.314

# МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОБЩИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

И.В. Волков, В.И. Зозулев, А.А. Калюжный, Д.А. Шолох

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

E-mail: dep8ied@elan-ua.net

Приведены основные вопросы и проблемы, которые не освещены или недостаточно освещены в публикациях по рассматриваемой тематике. Предложены пути повышения эффективности магнитно-полупроводниковых генераторов с учетом принятых ограничений, допущений и условий. Показано, что реализация этих путей осуществляется в основном за счет увеличения коэффициента компрессии импульсов, применения разнофункциональных узлов и обеспечения щадящих режимов работы полупроводниковым ключам.

#### Ключевые слова:

Магнитно-полупроводниковый генератор, магнитный генератор, узел магнитной компрессии, дроссель насыщения, коммутационный дроссель.

### Key words:

Semiconductor-magnetic generator, magnetic generator, magnetic compression nod, saturated reactor, switching reactor.

Магнитно-полупровдниковые генераторы (МПГ) относятся к импульсным источникам электроэнергии, которые в процессе своего развития, начиная с 1950-1960 гг., имеют все расширяющийся спектр развития, особенно, за последние 10-15 лет. Основные применение МПГ представляются следующими: для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, в частности, для разновидностей лазера на парах меди (ЛПМ); в установках для различных электроимпульсных технологий; в линейных индукционных ускорителях, а также в ряде других сфер науки, техники и промышленности. Еще из ранних работ [1-3] известно, что МПГ базируется на узлах магнитной компрессии импульсов (УМК). Внешняя простота УМК обретает сложность при необходимости повысить эффективность МПГ, в том числе за счет максимально возможного уменьшения остаточной индукции насыщенного сердечника коммутационного дросселя УМК.

Нахождение отмеченных сложных решений касательно УМК и МПГ в целом излагается далее с учетом принятых следующих ограничений, допущений и условий, разрозненно в той или иной мере обоснованных в работах [4–6].

Экспериментально-поисковые работы проводились с ориентацией на МПГ, способные формировать высоковольтные (до 20 кВ), сильноточные (до 500 А), микро- (в основном для тахнологий) и наносекундные (в основном для лазеров) импульсы с частотой повторения до 20...35 кГц. Причем в предположении, что полученные результаты в определенной мере можно распространить на МПГ с более высокими требуемыми параметрами импульсов.

Под эффективными МПГ подразумеваются такие, которые адекватно и лучше могут заменить генераторы, базирующиеся на ионных (чаще тиратронных) коммутаторах; обладают высокой надежностью за счет исключения ионных коммутаторов, неприменения полупроводниковых приборов на высоковольтной стороне МПГ и обеспечения им щадящих режимов коммутации с длительностью более 3...5 мкс; наделены возможностями в части формирования разнообразных по форме и параметрам выходных импульсов МПГ; имеют компромиссно-приемлемые и лучшие остальные показатели (объем, масса, КПД, стоимость и другие).

Опыт исследования вариантов МПГ, анализ доступных публикаций по МПГ и их предлагаемым нагрузкам показал, что есть вопросы, задачи и проблемы по рассматриваемой тематике, которые не освещены или недостаточно освещены в сторонних публикациях. Основные пробелы знаний по МПГ, не претендуя на их полноту, представляются следующими:

- недостаточно освещены МПГ, которые формируют из разнополярных импульсов двухтактные однополярные импульсы, в том числе в преди конечных узлах магнитной компрессии (УМК) импульсов;
- не рассмотрены однотактные однополярные МПГ с перемагничиванием импульсного трансформатора зарядным током, у которых создается высоконадежный режим работы разрядного ключа;
- недостаточно информации по разнополярным МПГ и особенно по влиянию разнополярных импульсов на увеличение ресурса работы импульсных лазеров и, предположительно, части устройств электроимпульсных технологий;
- отсутствуют МПГ, у которых используется перезаряд первой и/или последней накопительной емкости;
- отсутствуют МПГ, формирующие парно-разнополярные импульсы;
- отсутствуют данные по универсальным МПГ, формирующих переменно-полярные импульсы, пачки импульсов, асимметричные импульсы и др.;

- недостаточно имеется материалов, раскрывающих пути минимизации длительности импульсов, формируемых УМК, особенно имеющих выход на нагрузку с индуктивной составляющей;
- нет цельного материала по параметрическим, конструктивным, схемотехническим и системным способом повышения эффективности МПГ;
- имеется ограниченная информация по возможным нагрузкам для МПГ и по согласованию МПГ с нагрузкой, особенно низкоомной.

Опыт также показал, что успешно разработать МПГ без стыковки его с реальной нагрузкой практически невозможно. По результатам анализа наиболее характерных нагрузок для МПГ (конечных исполнительных элементов основных видов электроимпульсной обработки материалов, газоразрядных трубок импульсных лазеров, импульсных ламп накачки лазеров, генерирующих приборов импульсной техники и технологических промежутков с различными средами) установлено, что наиболее сложной нагрузкой для МПГ (при соизмеримых мощностях и пр.) является ГРТ импульсных лазеров, среди которых наиболее приемлемой определилась ГРТ лазера на парах меди (ЛПМ). Поэтому предполагается, что первоначальную отработку обозначенного ряда МПГ можно ограничить только с характерно выраженной нагрузкой – с ГРТ ЛПМ, не выходя за рамки принятой оценки эффективности МПГ. Также допускается, что исследованные таким образом МПГ могут быть использованы без дополнительных глубоких исследований для других, менее сложных нагрузок.



Рисунок. Узел магнитной компрессии импульсов

Создание предполагаемых МПГ предопределяется следующими способами повышения их эффективности в изложенном выше смысле.

Увеличение коэффициента компрессии импульсов. В УМК (рисунок) выбор их элементов – коммутационного дросселя L и накопительных конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  производится, исходя из следующих известных соотношений (1–7), взятых из [3] и [7].

Число витков дросселя *L*, из закона электромагнитной индукции:

$$w = \frac{U_m \tau_H}{\Delta B_s S},\tag{1}$$

где  $\tau_n$  — время накопления энергии на конденсаторе  $C_1$ ;  $U_m$  — максимальные напряжение на конденсаторе  $C_1$ ;  $\Delta B_s S$  — соответственно приращение индукции намагниченности (насыщения) сердечника дросселя L и его поперечное сечение. Из закона полного тока:

$$I_m w = H_m l_{\rm cp}, \qquad (2)$$

где  $I_m$  — максимальный ток через дроссель L;  $H_m$  — наибольшая напряженность магнитного поля в сердечнике дросселя;  $l_{cp}$  — длина средней линии сердечника дросселя L.

Индуктивность насыщенного дросселя :

$$L_s = \frac{\mu_0 \mu_s S w^2}{l_{\rm cp}},\tag{3}$$

где  $\mu_0 = 4\pi \, 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума в системе СИ;  $\mu_s$  — относительная магнитная проницаемость насыщенного сердечника.

Максимальное напряжение на конденсаторе  $C_1$ :

$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L_s}{C_1}}.$$
 (4)

Время разряда конденсатора  $C_1$  на конденсатор  $C_2$  через индуктивность  $L_s$ :

$$\tau_{p} = \pi \sqrt{L_{s} \frac{C_{1}C_{2}}{C_{1} + C_{2}}}.$$
 (5)

Накопленная энергия на  $C_1$  при напряжении  $U_m$ :

$$W_{C_1} = \frac{C_1 U_m^2}{2}.$$
 (6)

Коэффициент компрессии импульсов по длительности (основной функциональный параметр УМК):

$$K_{K} = \frac{\tau_{\mu}}{\tau_{p}}.$$
 (7)

Совместный анализ соотношений (1)–(5) относительно (7) приводит к определению коэффициента  $K_{\kappa}$  через выбираемые величины  $\Delta B_{s}$ ,  $\mu_{s}$  и  $H_{m}$ :

$$K_{K} = \frac{\sqrt{2}}{\pi\mu_{0}} \frac{\Delta B_{S}}{\mu_{S}H_{m}}.$$
(8)

Для используемых в экспериментах с МПГ ферритов значение  $\Delta B_s$  укладывается в пределы 0,5...0,7 Тл, аморфных магнитомягких сплавов (АМС) – до ≈3,0 Тл, причем в обоих случаях при предельных петлях импульсного перемагничивания этих материалов, что в однотактных МПГ без специальных мер не достигается. То есть, выбор величины  $\Delta B_s$ детерминирован: приоритет бо́льшому  $\Delta B_s$  с обязательным учетом частотных свойств магнитных материалов и схемное обеспечение перемагничивания выбранных материалов с наибольшей петлей гистерезиса. Произведение параметров  $\mu_{s}H_{m}$  в (8) взаимосвязано, что вызывает неопределенность в их выборе. Неопределенность разрешается путем обращения к зависимости  $\mu = f(H)$ . Если имеются трудности в нахождении этой зависимости по справочным материалам, то для ориентировочных расчетов ее можно снять экспериментально, например, как описано в [6] или более точно – в [8]. Для рассматриваемых ниже МПГ из зависимости  $\mu = f(H)$  были получены следующие значения: для AMC µ<sup>a</sup>=6...10 при  $H_m \approx 12000 \text{ A/м}, \quad для \quad феррита \quad \mu_S^{\phi} = 30...50$ при

 $H_m \approx 3000$  А/м. Эти данные являются исходными и недалеки от оптимальных для рассматриваемых МПГ. Первоначальные параметры сердечника дросселя L - S и  $l_{cp}$  выбираются, исходя из мощности нагрузки  $P_H$ , КПД ( $\eta$ ) МПГ (или УМК) – по известным методикам [2, 3], а емкость конденсатора  $C_1$  определяется из выражения (6) с учетом частоты следования импульсов  $F_C$ , мощности  $P_H$  и КПД ( $\eta$ ) МПГ в целом.

В итоге анализа выражений (1)–(8), систематизации проведенных работ и публикаций по МПГ сформированы следующие подходы к увеличению коэффициента компрессии импульсов  $K_k$ . Эти обобщенные подходы, как представляется, должны иметь положительный практический интерес и быть отправными для конкретных теоретических исследований по проблеме достижения коэффициента  $K_k^{max}$  ( $\mu_s^{min}$ ).

Первый. Следует применять магнитные материалы с бо́льшим значением  $\Delta B_s$ , если учитываются их частотные свойства в отношении допустимых потерь и ухудшения других параметров. Создавать условия перемагничивания сердечников по максимально большой петле гистерезиса.

Второй. При отсутствии зависимостей  $\mu = f(H)$  рекомендуется упрощенный метод ее определения для ориентированных исходных расчетов. Значение  $H_m$  выбрать на кривой  $\mu = f(H)$  на практически горизонтальном ее участке и сразу же за участком ее перегиба. Тогда число витков *w*, определенное из (1), можно несколько увеличить за счет допустимых изменений величин *S* и  $l_{CP}$  с целью уменьшения параметра  $\mu_S \rightarrow \mu_S^{min}$ .

*Третий*. Следует применять в зарядном узле ключи с наименьшим временем восстановления и для последующих УМК создавать перекрытие во времени смежных импульсов токов.

Четвертый. Последовательно с 1-м разрядным дросселем устанавливать ключ, если его возможности способствуют достижению коэффициента  $K_{k}^{\max}$  1-го УМК и введение ключа обосновано по принятым критериям оптимизации МПГ. Этот подход подробно изложен в [7].

Пятый. Последовательно с дросселем L (рис. 1) устанавливать диод VD, блокирующий L при заряде конденсатора  $C_1$ , а затем перезаряжать  $C_1$  с помощью дополнительного ключа и дросселя [6].

Шестой. Применять встречное подмагничивание дросселей или/и соотношением параметров УМК в МПГ обеспечивать возврат части энергии из высоковольтной цепи МПГ, создавая отрицательное напряжение на предтрансформаторных конденсаторах. Благодаря этим режимам работы достигается требуемое восстановление магнитного состояния коммутационных дросселей и трансформатора  $T_{\rm H}$ . Этот подход обоснован в [3] и описан в [9–11].

*Седьмой*. Применять, где позволяет нагрузка, разнополярные МПГ или двухтактные однополярные МПГ, описанные в [6].

Восьмой. Предлагаемый как постановочный перечень дальнейших направлений работ (в том числе как дополнительный к известным исследованиям) по увеличению коэффициента  $K_k$ , основанный на: комбинации предыдущих подходов; использовании ортогональных и балансно-мостовых магнитопроводов; применении полупроводниковых и индуктивных прерывателей тока; создании магнитно-управляемых УМК; сочетании в одном узле магнитопроводов из разных материалов; создании новых магнитных материалов специально под особенности МПГ.

Как видно из рассмотренных подходов, достижение наименьшего значения  $\mu_s^{\min}$  является приоритетным при построении эффективных МПГ. Задача  $\mu_s \rightarrow \mu_s^{\min}$  осуществляется с помощью дросселя (трансформатора) насыщения или под другим названием – коммутационных дросселя и трансформатора. И этот принцип утвердился, вероятно, с 1951 г. [1]. Но актуальность устремления величины  $\mu_s \rightarrow \mu_s^{\min}$  при создании МПГ подтолкнула к поиску других способов в достижении наименьшей остаточной относительной магнитной проницаемости:  $\mu_{ocm} \rightarrow \mu_s^{\min}$ , данные по которым приведены в таблице.

**Таблица.** Сравнительные данные по способам минимизации остаточной индуктивности коммутационных дросселей

Магнитный материал, тип сердечника	Значение вычислен- ной величи- ны <i>µ</i>	Вычисленное значение ве- личины µ <sub>ост</sub>			Коэффициент ми- нимизации индук- тивности дросселя		
		$\mu_{S}$	$\mu_{K3}$	$\mu_{K}$	Ks	К <sub>КЗ</sub>	K <sub>K</sub>
Феррит НМ 2000	2025	24,8	29,4	5,2	81,6	68,6	386
	990	14,5	41,1	9,1	68,2	24	108
Аморфный магнитомягкий сплав MM-11H	12400	6,1	4,3	4,3	2030	2850	2850

 Параметры µ<sub>s</sub>, µ<sub>кз</sub>, – относительные магнитные проницаемости соответственно при насыщенном сердечнике, при коротком замыкании в обмотке управления, при протекании тока компенсации I<sub>k</sub> в обмотке управления.

2. К<sub>s</sub>, К<sub>к</sub>, – коэффициенты минимизации индуктивности дросселя соответственно при насыщенном сердечнике, при коротком замыкании в обмотке управления, при протекании тока І<sub>к</sub> в обмотке управления.

Данные по таблице получены пока как предварительные, на измерительном уровне, но они примерно совпадают с «силовыми» показателями относительно параметров  $\mu_{s}$ ,  $\mu_{k3}$  и косвенно – по  $\mu_{k}$ . Значения касательно параметров  $\mu_{k3}$ ,  $\mu_{k}$ ,  $K_{k3}$ ,  $K_{k}$ , должны, как видится по первым экспериментам, стать поводом для поиска новых эффективных УМК, имеющих наименьшее значение  $\mu_{ocm}^{min}$ . Что вместе с возможной реализацией предложений по восьмому подходу предопределяет заметные перспективы исследований по МПГ и, скорее всего, и по другой магнитно-электронной технике.

Выбор магнитных материалов индуктивных элементов и их интеграция в структуру МПГ. Выбор объема сердечника дросселя L (рис. 1) приведен в [3] и [5], где также приводится оптимальное число УМК в структуре МПГ и обоснованы пути минимизации объема V: необходимо выбрать параметры  $\mu_S \rightarrow \mu_S^{min}$ ,  $\Delta B_S \rightarrow \Delta B_S^{min}$ . В 1-м УМК практически незаменимым оказался аморфный магнитомягкий сплав [ $\tau_p \approx 3...5$  мкс], во 2-м УМК альтернативно: АМС или феррит марки НМ [ $\tau_p \approx 1, 2...2, 5$  мкс], в 3-м УМК – феррит марки НМ [ $\tau_p \approx 0, 5...0, 8$  мкс], 4-м УМК – альтернативно: феррит марки НМ или НН [ $\tau_p \approx 150...200$  нс] и в оконечном УМК – феррит марки НН [ $\tau_p \approx 80...120$  нс]. Интеграция УМК в структуру МПГ взаимозависима от места установки импульсного трансформатора  $T_{H}$ . Расчеты по минимизации установленных мощностей индуктивных элементов МПГ, принимая также конструктивные ограничения на высоковольтной стороне МПГ, показали, что оптимальная длительность импульсов для трансформатора  $T_{H}$  находится в пределах 1...2 мкс.

Введение разнофункционального предтрансформаторно-согласующего узла магнитной компрессии импульсов. Отмеченный режим работы трансформатора  $T_{\mu}$  обеспечивается наилучшим образом, если между 1-м УМК и Т<sub>и</sub> ввести 2-й УМК, работающий в отличительном режиме, когда импульсы токов в 1-м и 2-м УМК перекрываются во времени с длительностью  $\Delta \tau_{1-2} \approx (0,3...0,5) \tau_1$ , где  $\tau_1$  – длительность тока в 1-м УМК. Это позволяет достичь соотношения:  $L_{S1} > L_{STH} > L_{S2}$  – соответственно между индуктивностями насыщения дросселей L<sub>2</sub>, L<sub>1</sub> (дроссели в 2-м и 1-м УМК соответственно) и индуктивностью рассеяния первичной обмотки трансформатора Т<sub>и</sub>, а также обеспечения указанной длительности импульсов для функционирования трансформатора Т<sub>И</sub>. То есть 2-й УМК, помимо основной функции – компрессии импульсов тока, наделен отмеченным свойством согласования индуктивных элементов  $L_1$  и  $T_{H}$ , а также функциями трансформации импульсов на высоковольтную часть МПГ, возврата части энергии от нее на конденсаторы 1-го и 2-го УМК, создавая на них благоприятные ненулевые начальные условия в установившемся режиме, способствующих уменьшению этих конденсаторов и восстановлению магнитных состояний элементов  $L_1, L_2, T_{\mu}$ . Анализ режима работы МПГ, при котором создаются эти условия, рассмотрен в [3].

Введение разнофункционального преднагрузочносогласующего узла магнитной компрессии импульсов. В большинстве случаев нагрузка МПГ имеет заметную индуктивную составляющую. Для эффективной передачи импульсной энергии от МПГ в нагрузку необходимо, чтобы индуктивность насыщения конечного переключающего дросселя  $L_{S} << L_{IPT}$ . Для этого еще одного обычного УМК, когда конденсатор разряжается через  $L_s$  непосредственно на ГРТ, недостаточно. Лучше применить согласующий УМК, выполненный на оконечных конденсаторе  $C_5$ , дросселе  $L_5$ , в сочетании с обостряющим конденсатором  $C_0$  и шунтирующем дросселе  $L_{III}$  [6]. Дроссель  $L_5$  работает в режиме, когда смежные токи  $i_4$  (в предконечном УМК) и  $i_5$  (в согласующем YMK) имеют перекрытие ПО времени  $\Delta \tau_{4-5} = (0, 3...0, 5) \tau_4$ , где  $\tau_4$  – время заряда конденсатора С<sub>5</sub> в согласующем УМК. Это позволяет, со-

гласно выражения (1), уменьшить количество витков дросселя в согласующем УМК в 1,5...2 раза и таким образом достичь неравенства  $L_{S}^{5} << L_{IPT}$ . Кроме того, конденсатор  $C_0$ , определяется в сочетании с  $L_s^5$  таким, чтобы он вместе с индуктивностью  $L_{IPT}$  представлял дополнение к согласующему УМК. Индуктивность воздушного дросселя  $L_m$ устанавливается:  $L_{s}^{5} << L_{III}$ . Дроссель  $L_{III}$  в отличие от  $L_{III}$  тиратронных генераторов не только шунтирует межимпульсные токи, но также, как важный элемент согласующего УМК, выполняет функцию – замыкание через нелинейное сопротивление ГРТ накопленной энергии в  $L_{IPT}$  при обрыве и флуктуациях тока *i*<sub>ГРТ</sub>. С помощью индуктивности  $L_{\mu}$ , выбранной во взаимосвязи с параметрами  $L_{S}^{5}$ ,  $C_{0}$ ,  $L_{IPT}$ , обеспечивается устойчивая работа МПГ. То есть можно отметить, что оконечный УМК также как и 2-й УМК, является разнофункциональным УМК. Эти УМК применяются в исследованных нами МПГ, что способствует повышению их эффективности.

Применение зарядно-стабилизирующего узла. За счет тока подмагничивания  $I_{ll}$  [6], управляемого по цепи обратной связи от напряжения  $U_{ll}$ , изменяется магнитное состояние дросселя  $L_0$  таким образом, чтобы компенсировать отклонение напряжения  $U_{ll}$ . Стабилизация амплитуды напряжения на конденсаторе  $C_1$  способствует уменьшению числа витков дросселя  $L_1$ . Этот узел можно рассматривать также как разнофункциональный, если придерживаться принятых принципов построения эффективных МПГ.

Использование разнофункциональных: перезарядно-компрессионных узлов; узлов однополяризации импульсов и узлов парно-разнополярных импульсов. Эти подходы для большей наглядности рассмотрены, на примере конкретных МПГ с данными узлами в следующей публикации.

#### Выводы

- Улучшение основных показателей магнитнополупроводниковых генераторов предопределяется в большинстве случаев максимизацией коэффициента компрессии импульсов или его оптимизацией по определенному параметру.
- 2. Увеличение коэффициента компрессии импульсов достигается путем выбора магнитных материалов для индуктивных элементов с наибольшей индукцией насыщения, наименьшей относительной магнитной проницаемости сердечника  $\mu_{ocm}^{\min}$  (или  $\mu_{S}^{\min}$ ,  $\mu_{K3}^{\min}$ ,  $\mu_{K}^{\min}$ ) и с учетом максимально допустимой частоты их перемагничивания; применения управляемых узлов магнитной компрессии импульсов, узлов с перезарядом входного конденсатора, согласующих узлов магнитной компрессии импульсов, функционирующих с большим перекрытием по времени смежных токов, если они нагружены на нагрузку с индуктивной составляющей; применения встречного подмагничивания дросселей; комбинацией изложенных подходов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Melvill W.S. The Use of Saturall Reactors as Discharge Devices for Pulse Generators // Proc. IEE. – 1951. – V. 98. – № 53. – P. 185.
- Гарбер И.С. Магнитные импульсные модуляторы. М.: Советское радио, 1964. – 159 с.
- Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. – М.: Советское радио, 1968. – 475 с.
- Зозулев В.И., Калюжный А.А. Применение узлов магнитного сжатия в генераторах возбуждения лазеров на парах меди // Техн. електродинаміка, Темат. вип.: Проблеми сучасної електротехніки. – 2002. – Ч. 6. – С. 67–70.
- Зозулев В.И. Основные подходы к анализу и оптимальному построению компрессионных магнитно-полупроводниковых генераторов // Техн. електродинаміка. Темат. вип.: Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 3. – С. 77–81.
- Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Магнитно-полупроводниковые генераторы с разнофункциональными узлами магнитной компрессии импульсов // Пр. Ін-ту електродинамі-

ки НАН України: 36. наук. пр. – Кіїв: ІЕД НАНУ. – 2010. – Вип. 26. – С. 79–89.

- Важдаев В.А., Катаев И.Г. Магнитополупроводниковый формирователь импульсов с управляемым узлом сжатия // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 6. – С. 128–134.
- Русин Ю.С., Чепарухин А.М. Проектирование индуктивных элементов приборов. – Л.: Машиностроение, 1981. – 172 с.
- Важдаев В.А., Катаев И.Г. Магнитополупроводниковый формирователь импульсов с управляемым узлом сжатия // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 6. – С. 128–134.
- 5. Одноключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів: пат. № 44910 Украина. Заявл. 12.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12.
- Двоключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів: пат. № 41501 Украина. Заявл. 18.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.

Поступила 01.09.2010 г.

УДК 621.314

# МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С РАСШИРЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ИХ ПРИМЕНЕНИЙ

И.В. Волков, В.И. Зозулев, А.А. Калюжный, Д.А. Шолох

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев E-mail: dep8ied@elan-ua.net

Представлены основные результаты исследований трех групп магнитно-полупроводниковых генераторов: однотактных однополярных; двухтактных однополярных и разнополярных. Показано, что с помощью этих трех групп генераторов эффективно решается основные задачи по расширенным возможностям их применений. Достигаются: адекватность с генераторами на базе ионных коммутаторов, оцениваемой по выходным параметрам нагрузок; высокая надежность; расширенные и новые функции; соизмеримые и лучшие другие показатели.

#### Ключевые слова:

Магнитно-полупроводниковый генератор, магнитный генератор, узел магнитной компрессии, дроссель насыщения, коммутационный дроссель.

## Key words:

Semiconductor-magnetic generator, magnetic generator, magnetic compression nod, saturated reactor, switching reactor.

В современных передовых сферах науки, техники и промышленности распространены импульсные электротехнологические устройства, в которых до последнего времени применялись преимущественно тиратронные генераторы импульсов (ТГИ) и тиратронно-магнитные ГИ. Основы по магнитным ГИ были изложены еще до и в 60-х гг. прошлого столетия в [1, 2], а позднее — в ряде публикаций по магнитно-полупроводниковым ГИ (МПГ) [3–5]. МПГ в сравнении с ТГИ имеют лучшие массогабаритные и энергетические показатели и не менее чем на порядок больший ресурс работы, с помощью МПГ можно реализовать ряд качественно новых параметров, характеристик и функций.

Опыт исследований МПГ показал, что построение эффективных МПГ достигается в основном за счет применения в них разнофункциональных узлов. При этом под эффективными МПГ подразумеваются такие, которые адекватно и лучше могут заменить генераторы, базирующиеся на ионных коммутаторах; обладают высокой надежностью за счет исключения ионных коммутаторов, неприменения полупроводниковых приборов на высоковольтной стороне МПГ и обеспечения им щадящих режимов коммутации; формируют разнообразные по форме и параметрам выходные импульсы МПГ.

В соответствии с изложенными положениями представляются следующие три группы МПГ: однотактные однополярные, двухтактные однополярные, и разнополярные.

**1. Магнитно-полупроводниковый генератор однополярных прямых импульсов (МПГ-1).** Схема этого МПГ представлена на рис. 1, *a*, описана в [6]. Схема МПГ-1 отработана совместно с газоразрядной трубкой (ГРТ) до уровня ее практического приме-