

## **№ 8. ВІДДІЛ СИСТЕМ СТАБІЛІЗОВАНОГО СТРУМУ**

УДК 621.314

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

### **МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С РАЗНОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ УЗЛАМИ МАГНИТНОЙ КОМПРЕССИИ ИМПУЛЬСОВ**

*Протягом 2009 року проводилась робота з проблемних питань щодо поліпшення основних показників магнітно-напівпровідникових генераторів. Пропонується застосування в цих генераторах різнофункціональних вузлів магнітної компресії імпульсів з врахуванням індуктивної складової навантаження на виході цих вузлів. Визначаються переваги розглянутих генераторів і дається їх додаткова класифікація.*

*На протяжении 2009 года проводилась работа по проблемным вопросам улучшения основных показателей магнитно-полупроводниковых генераторов. Предлагается использование в этих генераторах разнофункциональных узлов магнитной компрессии импульсов с учетом индуктивной составляющей нагрузки на выходе этих узлов. Определяются преимущества рассмотренных генераторов и дается их дополнительная классификация.*

#### **1. Состояние проблемы, способы повышения эффективности**

**Введение.** В современных сферах науки, техники и промышленности широко используются импульсные электротехнологические устройства. Неотъемлемой частью этих устройств и установок являются генераторы импульсов (ГИ), из которых наиболее значимыми и перспективными для исследования представляются генераторы, формирующие высоковольтные (до 20 кВ и более), сильноточные (до 0,5 кА и более) микро- (в основном для технологий) и наносекундные (в основном для лазеров) импульсы с частотой повторения до 20...35 кГц и более. До последнего времени для формирования указанных импульсов применялись преимущественно тиратронные генераторы импульсов (ТГИ) и относительно недавно – тиратронно-магнитные ГИ. Несмотря на то, что теоретические основы по магнитным ГИ и сферы их применений были изложены еще до и в 60-х годах прошлого столетия, например в работе [4]. Однако результаты практического применения магнитных ГИ, а затем магнитно-полупроводниковых генераторов (МПП) выявились менее эффективными в сравнении с результатами применения ТГИ, например, в установках импульсных лазеров и некоторых других электроимпульсных устройствах. Актуальность исследований по МПП обусловлена не только тем, что они в сравнении с ТГИ имеют лучшие массогабаритные и энергетические показатели и не менее чем на порядок больший ресурс работы, а также тем, что с помощью МПП можно реализовать ряд качественно новых параметров, характеристик и функций. Востребованность в таких МПП вызвана также коммерциализацией спецразработок по импульсным лазерам и электроимпульсным устройствам неширокого применения, а также развитием электроимпульсных нанотехнологий.

Опыт исследования и анализ публикаций по МПП показал, что есть задачи и проблемы, которые невозможно эффективно решить, опираясь на известные знания в этой области, основные из которых следующие:

– недостаточно освещены МПП, которые формируют из разнополярных импульсов двухтактные однополярные, в том числе в пред- и конечных узлах магнитной компрессии (УМК) импульсов;

– не рассмотрены одноктактные однополярные МПП с перемагничиванием импульсного трансформатора зарядным током, у которых создается высоконадежный режим работы разрядного ключа;

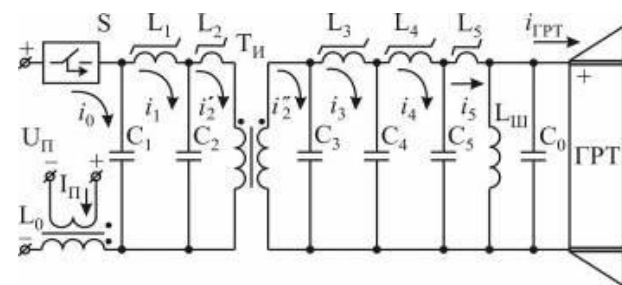
– недостаточно информации по разнополярным МПП и особенно по влиянию разнополярных импульсов на увеличение ресурса работы импульсных лазеров и предположительно части устройств электроимпульсных технологий;

- отсутствуют МПГ, у которых используется перезаряд первой и/или последней накопительной емкости;
- отсутствуют МПГ, формирующие парно-разнополярные импульсы;
- отсутствуют данные по универсальным МПГ, формирующим переменнопольные импульсы, пачки импульсов, асимметричные импульсы и др.;
- недостаточно материалов, раскрывающих пути минимизации длительности импульсов, формируемых УМК, особенно имеющих выход на сопротивление с индуктивной составляющей;
- нет цельного материала по параметрическим, конструктивным, схемотехническим и системным способам повышения эффективности МПГ;
- имеется ограниченная информация по возможным нагрузкам для МПГ и по согласованию МПГ с нагрузкой, особенно низкоомной;
- далеко не в полной мере изложены решения по МПГ, связанные с новыми элементной базой и материалами, с новыми требованиями со стороны потребителей электроимпульсного питания.

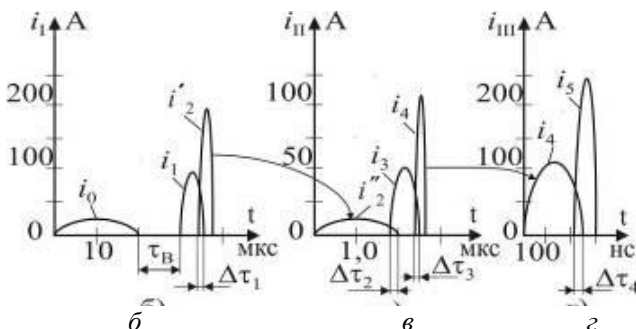
Опыт также показал, что успешно разработать МПГ без стыковки его с реальной нагрузкой практически невозможно. По результатам анализа наиболее характерных нагрузок для МПГ (конечных исполнительных элементов основных видов электроимпульсной обработки материалов, газоразрядных трубок (ГРТ) импульсных лазеров, 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.) являются ГРТ импульсных лазеров, среди которых наиболее приемлемой определена 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.

Исходя из данной проблемы, поставлены задачи для экспериментально-поисковых и исходных теоретических исследований:

- создание ряда МПГ, которые отличаются по выходным импульсам МПГ, а именно: одноктактные однополярные; двухтактные одно- и разнополярные, а также расширение каждой разновидности МПГ до нескольких типов их схемных решений;
- достижение адекватности МПГ с тиратронными и другими ГИ, оцениваемой по нагрузке сопоставимых ГИ;



а



б

в

г

Рис. 1

- улучшение основных характеристик и показателей МПГ в сопоставлении с конкурирующими ГИ и особенно в части повышения надежности и расширения функциональных возможностей;

– обеспечение в целом с помощью исследованных МПГ востребованности в самых разнообразных импульсах со стороны современных электроимпульсных средств.

Для большей доступности материалов по предлагаемым решениям поставленных задач рассмотрим сначала экспериментально отработанную совместно с ГРТ типа KULON LT-1,5Cu схему МПГ-1 (рис. 1), которая по структурному построению близка к известным схемам [4] и которой свойственна наибольшая наглядность применения в ней части предлагае-

мых способов повышения эффективности МПГ. Здесь  $U_{\Pi}$  – источник DC-питания;  $S$  – однопольный полупроводниковый ключ;  $L_0$  – линейный зарядный дроссель;  $C_1 \dots C_5$  – накопительные конденсаторы;  $C_0$  – обостряющий конденсатор;  $L_1 \dots L_5$  – коммутационные дроссели;  $T_{\Pi}$  – импульсный трансформатор; ГРТ – газоразрядная трубка лазера. Схема, показанная на рис. 1 а, работает по известному принципу магнитной компрессии импульсов [4], описана в работе [5] и ясна при рассмотрении схемы с эпюрами импульсных токов в ее элементах (рис. 1 б-г), которые имеют соответствующую им индексацию. Особенности МПГ-1 изложены в контексте общих для всех предлагаемых МПГ способов повышения их эффективности, под которой подразумевается не только достижение лучших показателей, но и расширение функциональных возможностей МПГ.

**Увеличение коэффициента компрессии импульсов.** В узлах магнитной компрессии (УМК) импульсов (рис. 2) выбор их элементов – переключающих (коммутирующих) дросселей  $L_1$  и накопительных конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  производится исходя из следующих известных соотношений [1, 4]:

$$\omega_1 = \frac{U_m \cdot \tau_H}{\Delta B_S \cdot S_1} \quad (1,а); \quad I_m \cdot \omega_1 = H_m \cdot l_{cp} \quad (1,б); \quad L_{1S} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_S \cdot S_1 \cdot \omega_1^2}{I_{cp}} \quad (1,в); \quad (1)$$

$$U_m = I_m \cdot \sqrt{\frac{L_{1S}}{C_1}} \quad (1,г); \quad \tau_p = \pi \cdot \sqrt{L_{1S} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}} \quad (1,д); \quad W_{C1} = \frac{C_1 \cdot U_m^2}{2} \quad (1,е); \quad K_K = \frac{\tau_H}{\tau_p} \quad (1,ж),$$

где  $\tau_H$ ,  $\tau_p$  – время соответственно накопления энергии  $W_{C1}$  на конденсаторе  $C_1$  и её разряда на конденсатор  $C_2$  через индуктивность  $L_{1S}$  насыщенного дросселя  $L_1$ ;  $U_m$ ,  $I_m$  – соответственно максимальное напряжение на конденсаторе  $C_1$  и ток через дроссель  $L_1$ ;  $\Delta B_S$  – приращение индукции намагниченности (насыщения) сердечника  $L_1$ ;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума в системе СИ;  $\mu_S$  – относительная магнитная проницаемость насыщенного сердечника;  $\omega_1$  – число витков дросселя  $L_1$ ;  $K_K$  – коэффициент компресс-импульсов.

Выражения вытекают: (1,а) – из закона электромагнитной индукции; (1,б) – из закона полного тока; (1,в) – из определения индуктивности и закона полного тока; (1,г) – из определения волнового сопротивления  $\rho = \sqrt{L_S / C_1}$  разрядного контура; выражение (1,д), взятое из [4], определяет зависимость  $\tau_p$  от параметров УМК; выражение (1,е) определяет накопленную энергию на  $C_1$  при напряжении  $U_m$ ; выражение (1,ж), принятое в [1], определяет коэффициент компрессии импульсов  $K_K$  (по их длительности).

Совместный анализ соотношений (1,а)–(1,д), (1,ж) приводит к определению коэффициента  $K_K$  через выбираемые величины  $\Delta B_S$ ,  $\mu_S$  и  $H_m$ :

$$K_K = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot \mu_0} \cdot \frac{\Delta B_S}{\mu_S \cdot H_m} \quad (2)$$

Для используемых в МПГ ферритов значение  $\Delta B_S$  укладывается в пределы 0,5...0,7 Тл, для магнитных сплавов – до  $\approx 3,0$ , причем в обоих случаях при предельных петлях импульсного перемагничивания, что в одноконтурных МПГ без специальных мер не достигается. Произведение  $\mu_S \cdot H_m$  в (2) взаимосвязано, что вызывает необходимость обратиться к зависимости  $\mu = f(H)$ , которая, как пример, приведена на рис. 3 а: 1 – для феррита; 2 – для аморфного магнитного сплава, которые экспериментально сняты для сердечников соответственно дросселей  $L_1$ ,  $L_2$  схемы рис. 1 а согласно упрощенной схеме для ориентировочного измерения параметров зависимости  $\mu = f(H)$  рис. 3 б, где  $P_L$  – прибор для измерения индуктивности;  $GI$  – генератор стабилизированного и регулируемого тока;  $I_{\Pi}$  – постоянный ток подмагничивания дросселя  $L$ . Из рис. 3 а и приведенных вычислений  $\mu_S$  и  $H_m$  для дросселей схемы рис. 1 а следует, что для аморфного сплава  $\mu_S^a = (6 \dots 10)$  при  $H_m \approx 12000$  А/м, для феррита  $\mu_S^{\phi} = (50 \dots 60)$  при  $H_m \approx 3000$  А/м. Эти данные

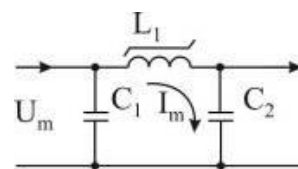


Рис. 2

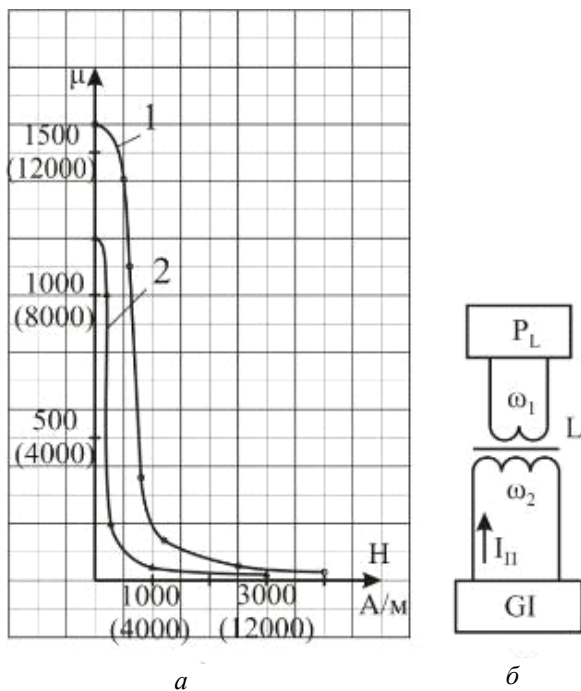


Рис. 3

приближенного определения (рис. 3 б) и увеличение числа витков  $\omega_1$ , не нарушая условия (1,в) за счет допустимых изменений  $S_1$  и  $I_{CP}$ , с целью уменьшения  $L_S$  при увеличенном  $H_m$ . Однако, если рабочее значение  $H_m$  находится далеко за участком перегиба кривых (рис. 3 а), то эффективность от увеличения  $\omega_1$  уменьшается.

III – следует применять ключи (рис. 1 а) с наименьшим временем восстановления  $\tau_B$  (рис. 1 б) для первого УМК и создавать перекрытие во времени смежных импульсов токов (рис. 1 б, в, г – соответственно  $\Delta\tau_1 \dots \Delta\tau_4$ ).

IV – последовательно с первым дросселем  $L_1$  установить ключ, если его возможности соответствуют параметрам первого УМК и введение его обосновано по принятым параметрам оптимизации МПГ. Этот метод изложен в [1], где показано, что можно существенно увеличить  $K_K$ .

V – последовательно с первым дросселем  $L_1$  устанавливать диод, блокирующий  $L_1$  при заряде  $C_1$ , а затем перезаряжать  $C_1$  с помощью дополнительного ключа и создавать симметричный режим перемагничивания дросселей  $L_1, L_2$  и трансформатора  $T_{II}$  (как пример – схема на рис. 6).

VI – применять встречное подмагничивание дросселей  $L$  или/и соотношением параметров УМК в МПГ обеспечивать возврат части энергии из высоковольтной цепи МПГ, создавая отрицательное напряжение на предтрансформаторных конденсаторах. Эти подходы обоснованы соответственно в [4] и описаны в [5–7].

VII – как постановочный перечень дальнейших направлений, основанный на следующем: комбинации подходов I...VI; использовании ортогональных и балансно-мостовых магнитопроводов; применении полупроводниковых (SOS-диодов) и индуктивных прерывателей тока; создании магнитно-управляемых узлов магнитной компрессии; сочетании в одном узле магнитопроводов из разных материалов и создании новых магнитных материалов специально под особенности МПГ.

Изложенные в I...VI подходы в той или иной мере использованы при создании схемы рис. 1 и приведенных ниже схем МПГ. Необходимо также заметить, что согласно [4] уменьшение числа УМК в структуре МПГ не всегда приводит к увеличению КПД генераторов в целом.

**Выбор магнитных материалов индуктивных элементов и их интеграция в структуру МПГ.** Из соотношений (1) вытекает выражение для объема сердечника дросселя  $L_1$ :

$$V_1 = \mu_0 \cdot \mu_S \cdot W_{Cl} \left( K_K \cdot \frac{\pi}{\Delta B_S} \right)^2 \quad (4)$$

являются исходными и недалеко от оптимальных для рассматриваемых МПГ. Первоначальные параметры сердечника дросселя  $L_1 - S_1$  и  $I_{CP}$  выбираются из мощности нагрузки  $P_H$ , КПД ( $\eta$ ) МПГ (или УМК) по известным методикам, а емкость  $C_1$  определяется с учетом (1,е) как

$$C_1 = \frac{2 \cdot P_H}{U_m^2 \cdot F_C \cdot \eta}, \quad (3)$$

где  $F_C$  – частота следования импульсов.

В итоге анализа выражений (1) и (2) вытекают следующие подходы к увеличению коэффициента компрессии импульсов  $K_K$ .

I – следует применять магнитные материалы с большим значением  $\Delta B_S$ , если их частотные свойства соответствуют условиям отвода тепла от дросселей, и с помощью схемных решений создавать перемагничивание сердечников дросселей по полной петле гистерезиса.

II – если не имеется зависимостей  $\mu = f(H)$ , то рекомендуется упрощенный метод их

Подробно выбор  $V_1$  приведен в работах [3, 4], где также приводится оптимальное число УМК в структуре МПГ в зависимости от суммарного коэффициента компрессии всего МПГ:

$$n_{\text{опт}} = \ln(K_{\text{КС}}). \quad (5)$$

Из выражения (4), с учетом приведенных выкладок по  $\mu_s$ ,  $K_K$  и зависимости (5), очевидны пути минимизации значения  $V_1$ : необходимо выбирать  $\mu_s \rightarrow \min$ , что свойственно для аморфных магнитомягких (рис. 3) и пермалловых сплавов [2]. Ограничения такого выбора определяются частотными свойствами указанных сплавов. Например, в схеме (рис. 1 а) эффективное использование магнитных материалов определяется так: в  $L_1$  – аморфный сплав ( $\tau_p^1$  до  $\approx 3$  мкс); в  $L_2$  – пермаллой или феррит марки НМ ( $\tau_p^2$  до  $\approx 1,5$  мкс); в  $L_3$  – пермаллой или феррит марки НМ ( $\tau_p^3$  до  $\approx 0,5$  мкс); в  $L_4$  – феррит марки НМ или НН ( $\tau_p^4$  до  $\approx 200$  нс);  $L_5$  – феррит марки НН ( $\tau_p^5$  до  $\approx 80$  нс). Поэтому число УМК, уменьшенных за счет большого перекрытия смежных токов ( $\Delta\tau_1, \Delta\tau_4$  на рис. 1 б, в, выполненных на  $L_2, L_5$ ), равно 5, а не  $n_{\text{опт}} \approx 6$  согласно зависимости (5) при  $K_{\text{КС}} \approx 350$  для схемы рис. 1 а.

Интеграция УМК в структуру МПГ взаимозависима от места установки импульсного трансформатора  $T_{II}$ . Индуктивность рассеивания его первичной обмотки  $\omega_1 - L_{S1}^T = M \cdot \omega_1^2$ , где  $M$  – практически постоянный коэффициент для предполагаемого диапазона длительности импульсов после дросселя  $L_1$ . Наиболее приемлемым оказалось применение в схеме рис. 1 а и, как правило, в последующих МПГ согласующих дросселей  $L_2$  (между соизмеримыми  $L_S^{T_{II}}$  и  $L_S^1$ ), имеющих  $L_S^2 \ll L_S^{T_{II}}$ . И это определило оптимальную длительность импульсов для трансформатора  $T_{II}$  – в пределах 1...2 мкс, исходя также из конструктивных ограничений на высоковольтной стороне для  $T_{II}$  и  $L_3, L_4$ .

**Применение зарядно-стабилизирующего узла.** За счет тока подмагничивания  $I_{II}$  (рис. 1 а), управляемого по цепи обратной связи от напряжения  $U_{II}$ , изменяется магнитное состояние дросселя  $L_0$  таким образом, чтобы компенсировать отклонение напряжения  $U_{II}$ . Такое решение не нарушает режим запираания ключа  $S$  при нулевом значении тока  $i_0$ , если ключ  $S$  – тиристор и благоприятный для транзисторного ключа  $S$ , если его запираание синхронизировать с изменением тока  $I_{II}$ . Стабилизация амплитуды напряжения на конденсаторе  $C_1$  способствует уменьшению числа витков дросселя  $L_1$  на  $(U_{II}^{\max} - U_{II}^{\min}) / U_{II}^{\text{ном}} \cdot 10^{-2}$  (%) согласно выражению (1,а) и необходимости стабилизации по входу амплитуды импульсов МПГ.

**Введение предтрансформаторно-согласующего узла магнитной компрессии импульсов.** Обоснование введения согласующего дросселя  $L_2$  для схемы МПГ-1 (рис. 1 а) и для последующих МПГ рассмотрено выше. Второй УМК ( $L_2, T_{II}, C_3$  – рис. 1 а) помимо основной функции – компрессии импульсов наделен также функциями согласования  $L_1$  с  $T_{II}$ , трансформации импульсов на высоковольтную часть МПГ и возврата части энергии на конденсаторы  $C_1, C_2$ , создавая в установившемся режиме отрицательное напряжение на них. Условия создания этих отрицательных напряжений описаны и рассмотрены в [4, 5]. Наличие в предкоммутационное время отрицательных напряжений на  $C_1, C_2$  увеличивают положительные амплитуды импульсов напряжения на них в  $\approx 1,3...1,5$  раза, что приводит к уменьшению емкостей конденсаторов  $C_1, C_2$  согласно выражению (1,е) в  $\approx 1,7...2,6$  раза. Кроме того, наличие в межимпульсный период отрицательных напряжений на  $C_1, C_2$  создает приемлемые условия для восстановления магнитного состояния элементов  $L_1, L_2, T_{II}$ .

**Введение преднагрузочно-согласующего узла магнитной компрессии импульсов.** В большинстве случаев нагрузка МПГ является комплексной с заметной индуктивной составляющей. Например, в схеме рис. 1 а эта составляющая  $L_{ГРТ} \approx 10...20$  мкГн, а дроссель  $L_4$  имеет индуктивность насыщения  $L_S^4 = 50$  мкГн. Для эффективной передачи импульсной энергии от МПГ в нагрузку необходимо, чтобы индуктивность насыщения конечного переключающего дросселя  $L_S^5 \ll L_{ГРТ}$ . Для этого еще одного обычного УМК, когда конденсатор  $C_5$  разряжается

через  $L_5^S$  непосредственно на ГРТ, недостаточно. Лучше применить согласующий ( $L_4^S$  с  $L_{ГРТ}$ ) УМК, выполненный (рис. 1 а) на элементах  $L_5$ ,  $C_0$ ,  $L_{III}$ . Дроссель работает в режиме, когда смежные токи  $i_4$  и  $i_5$  имеют перекрытие по времени  $\Delta\tau_4 = 0,5 \cdot \tau_4$ , где  $\tau_4$  – время заряда конденсатора  $C_5$ . Это позволяет, согласно выражениям (1), уменьшить количество витков дросселя  $L_5$  в 2 раза, а его индуктивность насыщения  $L_5^S$  – в 4 раза и таким образом достичь неравенства  $L_5^S \ll L_{ГРТ}$ . Кроме того, конденсатор  $C_0$  определяется в сочетании с  $L_5^S$  таким, чтобы он вместе с индуктивностью  $L_{ГРТ}$  представлял дополнение к согласующему УМК. Индуктивность воздушного дросселя  $L_{III}$  устанавливается:  $L_5^S \ll L_{III}$ . Дроссель  $L_{III}$  в отличие от  $L_{III}$  тиратронных генераторов не только шунтирует межимпульсные токи, но также, как важный элемент согласующего УМК, выполняет функцию замыкания через нелинейное сопротивление ГРТ накопленной энергии в  $L_{ГРТ}$  при обрыве и флуктуациях тока  $i_{ГРТ}$ . С помощью индуктивности  $L_{III}$ , выбранной во взаимосвязи с параметрами  $L_5^S$ ,  $C_0$ ,  $L_{ГРТ}$ , обеспечивается устойчивая работа МПГ.

**Использование:** перезарядно-компрессионных узлов; узлов однополяризации импульсов и узлов парно-разнополярных импульсов. Эти способы для большей наглядности рассмотрены далее на примере конкретных МПГ с данными узлами.

## 2. Схемы магнитно-полупроводниковых генераторов с разнофункциональными узлами

**Магнитно-полупроводниковый генератор однополярных прямых импульсов.** Схема этого МПГ (рис. 1 а) по основным вопросам представлена выше. Дополнительно рассмотрим ее особенности. Ключ  $S$  работает в благоприятном режиме, что вместе с остальными пассивными элементами обеспечивает высокую надежность МПГ и большие возможности увеличения предельной мощности МПГ. В угоду этим свойствам дроссель  $L_1$  имеет несколько завышенный массогабаритный показатель. Остальные элементы, благодаря введению описанных выше согласующих узлов (на  $L_2$ ,  $L_5$ ), выбраны оптимально. Это первая представляемая схема и, согласно публикациям, одна из первых схем МПГ, с помощью которой достигнута мощность излучения медного лазера на 10...15 % больше, чем при возбуждении этого же лазера тиратронным генератором. В эксперименте использовалась ГРТ типа KULON LT-1,5 Cu, которая возбуждалась импульсами тока:  $I_{ГРТ}^m = 220...250$  А, длительность импульсов  $\tau_{ГРТ} = 80...90$  нс. Согласование МПГ с низкоомной ГРТ достигнуто, пожалуй, единственным способом: за счет нарастающего перекрытия смежных импульсов токов –  $\Delta\tau_2... \Delta\tau_4$  на рис. 1 б–г.

## Одноключевой магнитно-полупроводниковый генератор однополярных инверсных импульсов (МПГ-2).

Схема МПГ-2, представленная на рис. 4 а, имеет такие же характеристики и особенности, как и МПГ-1 (рис. 1 а). Исключением является то, что магнитопровод трансформатора  $T_{II}$  перемагничивается практически по полной петле гистерезиса. Достигается также уменьшение дросселя  $L_0$  за счет последовательного включения с ним индуктивности рассеивания трансформатора  $T_{II}$ . Здесь УМК-узлы магнитной компрессии схемы рис. 1 а, остальные обозначения соответствуют схеме рис. 1 а и б, а на рис. 4 б и в показаны соответственно эпюры импульсов токов в элементах  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  и реальный импульс тока, возбуждающий ГРТ. Описание схемы МПГ-2 дано в работе [7], вытекает она из схемы, представ-

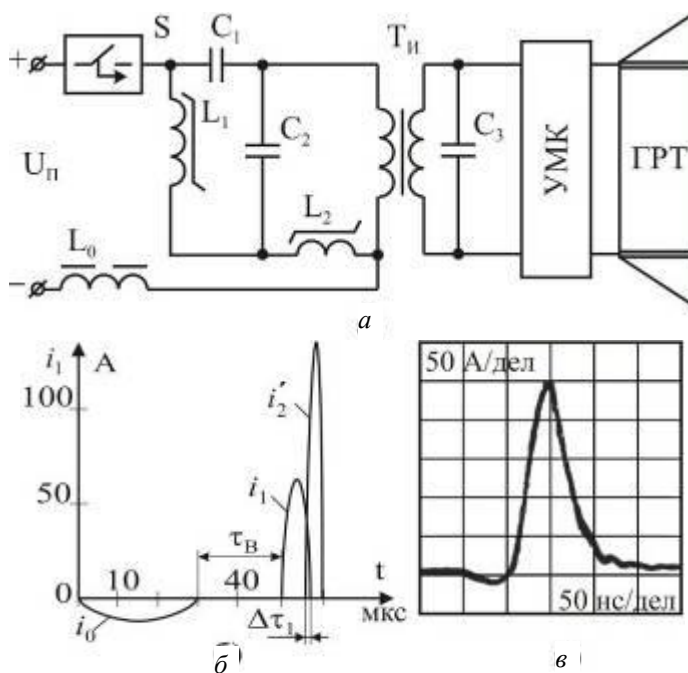


Рис. 4

ленной в работе [11], но в схеме МПГ-2 ключ на основе IGBT-транзистора (1200 В, 400 А), коммутирующий ток длительностью  $\approx 3$  мкс, заменен на переключающий дроссель  $L_1$ , а УМК, выполненный на согласующем дросселе  $L_2$ , обеспечивает формирование импульсов тока через первичную обмотку трансформатора  $T_{II}$  с оптимальной длительностью  $\approx 1,2...1,5$  мкс. Этим обеспечиваются благоприятный режим работы ключа  $S$ , высокая надежность и меньшая стоимость в сравнении со схемой [11]. МПГ-2 имеет также преимущество по увеличению его мощности, так как скорее всего нецелесообразно увеличивать число включенных параллельно IGBT-транзисторов ключа схемы [11]. Классификация импульсов как инверсных принята исходя из разнополярности зарядного тока  $i_0$  и формируемых импульсов  $i_1, i_2$ .

### Двухключевой магнитно-полупроводниковый генератор однополярных инверсных импульсов (МПГ-3).

Схема МПГ-3 представлена на рис. 5 а, где  $S_2, L_{02}$  – дополнительные ключ и линейный дроссель, остальные обозначения соответствуют схеме рис. 4 а, а на рис. 5 б представлены эпюры импульсных токов в элементах  $L_{01}, L_{02}, L_1, L_2$ . Схема МПГ-3 имеет такие же характеристики и особенности, что и МПГ-1 (рис. 1 а) и МПГ-2 (рис. 4 а). Исключением является то, что разряд конденсатора  $C_1$  происходит через дополнительный ключ  $S_2$  и линейный дроссель  $L_{02}$ . Это позволяет уменьшить импульсный отбор энергии от источника  $U_{II}$ , улучшить защитные свойства схемы и уменьшить время  $\tau_{B2}$  для восстановления ключа  $S_2$ . Схема в большей мере соответствует принципу построения схемы [11] и описание ее дано в [6]. С помощью макета этой схемы достигнуты лучшие результаты, чем для МПГ-1:  $I_{ГРТ}^m = 240...270$  А,  $\tau_{ГРТ} = 80...90$  нс; мощность излучения ГРТ на 15...25 % больше, чем при ее тестировании на тиратронном генераторе.

### Магнитно-полупроводниковый генератор однополярных перезарядно-инверсных импульсов.

Схема МПГ-4 представлена на рис. 6. Здесь  $S_2, L_{02}$  – дополнительные ключ и линейный дроссель;  $Z_{\mu}$  – сопротивление для перемангничивания дросселя  $L_1$ ; УМК,  $Z_H$  – узлы магнитной компрессии и нагрузка, соответствующие рис. 1 а; VD – блокирующий диод; обозначение остальных элементов соответствует схеме рис. 1 а. Перезарядно-компрессионный узел (ПКУ)

выполнен на элементах  $L_{02}, S_2, L_1, Z_{\mu}, VD, C_2$ . При заряде  $C_1$  ток через дроссель  $L_1$  блокируется диодом VD. За счет чего время восстановления  $\tau_B$  ключа  $S_1$  не входит в  $\tau_H$  выражения (1,а). По истечении времени  $\tau_{S1} \geq \tau_B$  отпирается ключ  $S_2$ . Конденсатор  $C_1$  перезарядается по цепи  $L_{02}, S_2, L_1, \omega_1$ , подзарядая конденсатор  $C_2$  и перемангничивая дроссель  $L_1$  через  $Z_{\mu}$ . После перезаряда конденсатора  $C_1$  насыщается дроссель  $L_1$ , и конденсатор  $C_1$  передает накопленную энергию при

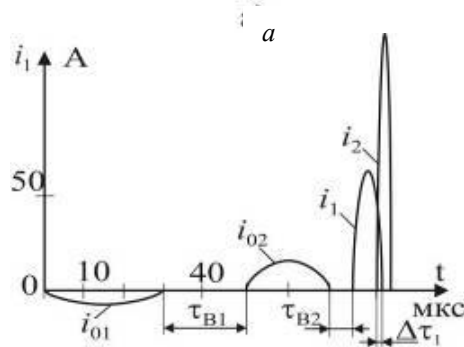
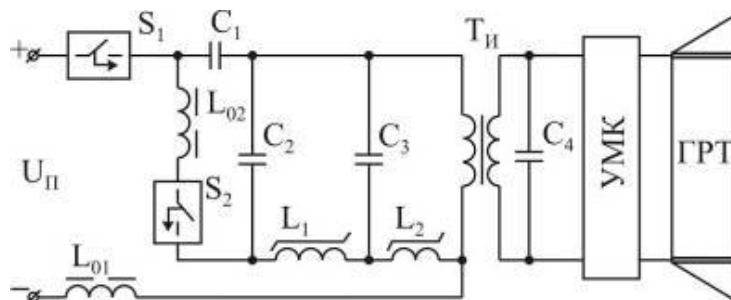


Рис. 5

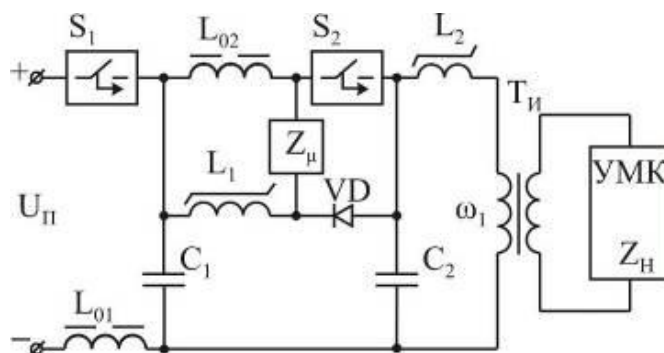


Рис. 6

токе  $i_1$  в конденсатор  $C_2$  по цепи  $C_2, VD, L_1$ . Далее процессы компрессии импульсов соответствуют схеме рис. 4 а и 1 а. В схеме МПГ-4 дроссель  $L_1$  рассчитывается согласно выражению (1,а) только исходя из значения  $\tau_H = \tau_{C1}^{\Pi}$  – времени перезаряда конденсатора  $C_1$ . Индуктивные элементы  $L_1, L_2, T_{II}$  функционируют практически при полной петле перемагничивания их сердечников. Экспериментально подтверждено, что в результате применения ПКУ удалось уменьшить длительность зарядного тока через дроссель  $L_1$  с 4,2...4,5 мкс до 2,0...2,2 мкс, через дроссель  $L_2$  с 2,0...2,4 мкс до 1,0...1,2 мкс.

**Магнитно-полупроводниковый генератор с дроссельным узлом формирования двухтактных однополярных импульсов (МПГ-5).** Схема МПГ-5 представлена на рис. 7 а. Здесь  $E_{II}$  – источник АС-питания; УМК-1 и 2 – узлы магнитной компрессии аналогично  $L_1, L_2$  (рис. 1 а);  $L'_4, L''_4$  и  $L'_5, L''_5$  – соответственно двухобмоточные переключающие дроссели  $L_4, L_5$ ;  $I_{II}$  – ток подмагничивания дросселей  $L_4, L_5$ ; остальные обозначения элементов соответствуют схеме рис. 1 а, а на рис. 5 б представлены эпюры импульсов тока в элементах  $L_3, L_4 (L'_4 + L''_4), L_5$

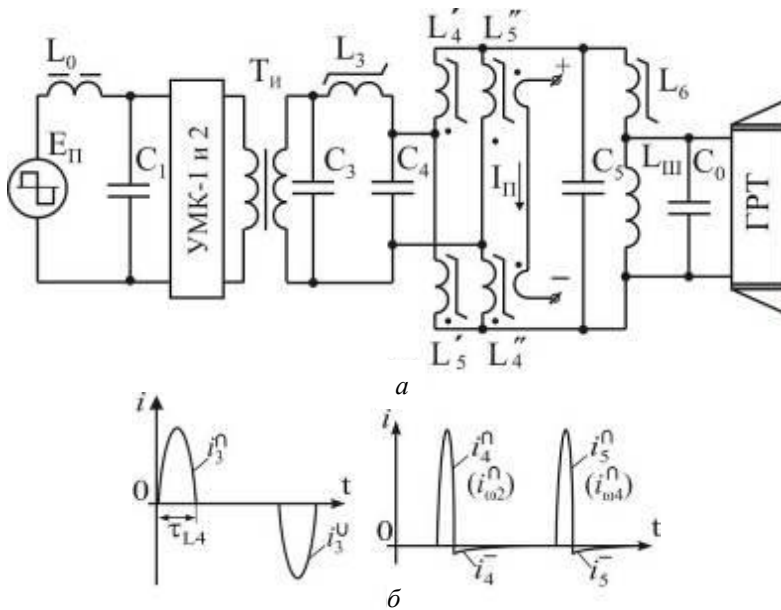


Рис. 7

( $L'_5 + L''_5$ ). Дроссельный узел формирования двухтактных однополярных импульсов [10] выполнен на элементах  $L_4 (L'_4 + L''_4), L_5 (L'_5 + L''_5), C_5$ . Инвертор  $E_{II}$  через дроссель  $L_0$  заряжает конденсатор  $C_1$ . Далее с помощью УМК-1 и 2,  $T_{II}, C_3, L_3$  производится компрессия импульсов тока инвертора  $E_{II}$  до импульсов тока  $i_3$  аналогично как в схеме рис. 1 а, но только в разнополярном режиме. Фазировка подмагничивания током  $I_{II}$  определена так, что при токе  $i_3^{\wedge}$  насыщается дроссель  $L_4$  и через его составляющие  $L'_4, L''_4$  формируется ток  $i_4^{\wedge}$ . При токе  $i_3^{\wedge}$  насыщается дроссель  $L_5$  и через его составляющие  $L'_5, L''_5$  форми-

руется ток  $i_5^{\wedge}$ . То есть в узле ( $L_4, L_5$ ) в одном процессе происходит «L-выпрямление», вернее, L-однополярная входных разнополярных импульсов тока  $i_3$  и их компрессия по длительности, в результате чего формируются двухтактные однополярные импульсы  $i_4^{\wedge}$  и  $i_5^{\wedge}$ . По завершении их формирования возникают отрицательные токи  $i_4^-$  и  $i_5^-$  за счет оставшейся накопленной энергии соответственно в ненасыщенных дросселях  $L_5$  и  $L_4$ . Поскольку токи намагничивания  $i_{\mu}^4, i_{\mu}^5$  дросселей  $L_4, L_5$  находятся в соотношении  $i_{\mu}^5 \ll i_4^+, i_{\mu}^5 \ll i_5^+$ , то при больших скважностях импульсов ( $Q \geq 20 \dots 50$ ) значение токов  $i_4^-, i_5^-$  не превышает 2,0...3,0 % от амплитудных значений токов  $I_4^m, I_5^m$ . Узел  $L_4, L_5$  помимо однополярности и компрессии импульсов способен при соответственном изменении тока  $I_{II}$  регулировать амплитуду импульсов, создавать их потактовую асимметрию, изменять их полярность, в том числе в виде разнополярных пачек импульсов и др. То есть существенно расширяются функциональные возможности МПГ-5, что дает право определить его так же, как универсальный МПГ. При этом следует особо подчеркнуть, что по сравнению с МПГ, где тиратрон заменен на составной ключ из IGBT-транзисторов в схеме МПГ-5 их заменяет всего один, самый малый, кроме  $L_6$ , «лишний» дроссель  $L_5$  (в схеме рис. 10 есть аналогичный дроссель  $L_4$ ). Очевидно, что надежность МПГ-5 значительно выше, стоимость



меньше и есть возможность дополнительно реализовать приведенные выше функциональные возможности.

**Магнитно-полупроводниковый генератор с трансформаторным узлом формирования однократных однополярных импульсов (МПП-6).** Схема МПП-6 представлена на рис. 8.

Здесь  $G$  – часть МПП-5 до конденсатора  $C_3$ ;  $T_1, T_2$  – переключающие трансформаторы с обмотками  $\omega_1, \omega_2, \omega_5$  и  $\omega_3, \omega_4, \omega_6$ ; остальные обозначения соответствуют схеме рис. 7 а;  $i_{\omega_2}^{\wedge}, i_{\omega_4}^{\wedge}$  на рис. 7 б – трансформируемые токи в обмотках  $\omega_2, \omega_4$ . Трансформаторный узел формирования двухтактных однополярных импульсов выполнен на элементах  $T_1, T_2, C_5$ . Формирование тока  $i_3$  соответствует схеме рис. 7 а и б. Фазировка подмагничивания током  $I_{\Pi}$  трансформаторов  $T_1, T_2$

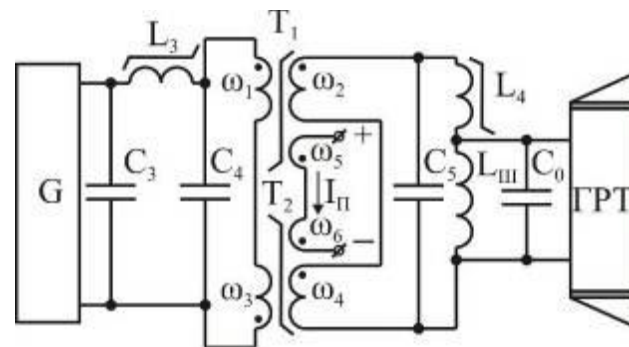


Рис. 8

определена так, что при токе  $i_3^{\wedge}$  насыщается трансформатор  $T_2$ , а  $T_1$  работает в линейном режиме, трансформируя в обмотку  $\omega_2$  ток  $i_{\omega_2}^{\wedge}$ . При токе  $i_3^{\vee}$  насыщается трансформатор  $T_1$ , а  $T_2$  работает в линейном режиме, трансформируя в обмотку  $\omega_4$  ток  $i_{\omega_4}^{\wedge}$ . В обоих тактах встречные токи  $i_{\omega_4}^S$  и  $i_{\omega_2}^S$  насыщенных трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  находятся в соотношениях с трансформируемыми токами:  $i_{\omega_4}^S \ll i_{\omega_2}^{\wedge}, i_{\omega_2}^S \ll i_{\omega_4}^{\wedge}$ . Поэтому без заметного ослабления трансформирующих свойств трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  в цепи  $\omega_2, C_5, \omega_4$  ( $\omega_4, \omega_2, C_5$ ) формируются однополярные импульсы в первом такте –  $i_{\omega_2}^{\wedge}$  и во втором такте –  $i_{\omega_4}^{\wedge}$ , которые в одном процессе однополяризации (“Т-выпрямления”) импульсов тока  $i_3$  также сжимаются по их длительности. МПП-6 имеет такие же характеристики и преимущества, как МПП-5, но имеет еще важное функциональное свойство: вторую гальваническую развязку с нагрузкой, а также возможность электроимпульсного питания нескольких нагрузок без сложной синхронизации импульсов, если трансформаторы  $T_1, T_2$  выполнить с несколькими вторичными обмотками. Массогабаритные показатели  $T_1, T_2$  и  $L_4, L_5$  (рис. 7 а) примерно одинаковые. С помощью МПП-5, МПП-6, ввиду проведения исследований только по принципиальным их возможностям, получена мощность излучения ГРТ типа KULON LT-1,5 несколько меньше, чем от достаточно отработанных МПП-1, МПП-3.

**Магнитно-полупроводниковый генератор однополярных прямых и инверсных импульсов.** Схема МПП-7 представлена на рис. 9. Здесь  $E_{\Pi}$  – источник АС-питания;  $L_{01}, L_{02}, L_{03}$  – линейные дроссели;  $S_1, S_2$  – ключи;  $L_1, L_2$  – согласующие дроссели;  $T_{\Pi}$  – импульсный трансформатор;  $G, Z_{\Pi}$  – часть МПП-1 (рис. 1 а) и его нагрузки. Структуры формирования прямых импульсов –  $L_{01}, C_1, \omega_1$  ( $L_{03}$ ),  $S_1, C_2, L_1, \omega_1$  ( $T_{\Pi}$ ) и инверсных импульсов –  $L_{02}, C_3, \omega_2$  ( $L_{03}$ ),  $S_2, C_4, L_2, \omega_1$  ( $T_{\Pi}$ ) – функционируют соответственно структурам МПП-1 (рис. 1 а) и МПП-2 (рис. 2 а), включая обмотку  $\omega_1$  ( $T_{\Pi}$ ). Описание схемы дано в работе [9]. Описание другого использования схемы рис. 9, в которой каждая пара элементов  $L_{03}$  ( $\omega_1$ ),  $S_1$  и  $L_{03}$  ( $\omega_2$ ) заменена на коммутирующий дроссель, аналогичный дросселю  $L_1$  схемы рис. 1 а, приведено в работе [8]. Применяется схема преимущественно, когда имеется серийный инвертор  $E_{\Pi}$ , а для нагрузки  $Z_{\Pi}$  требуется микросекундные однополярные импульсы с небольшой скважностью. Также здесь без дополнительных затрат касательно силовых элементов создается асси-

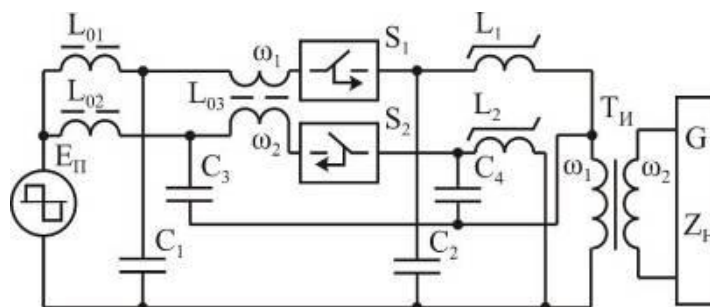


Рис. 9

метричный заряд конденсаторов  $C_1, C_3$ , что улучшает массогабаритные показатели отмеченных структур. МПГ-7 свойственна также универсальность в формировании выходных импульсов, рассмотренная для МПГ-5 и 6, высокая надежность и преимущества перед МПГ, в котором однополярные импульсы формируются на высокой стороне с помощью IGBT-транзисторов.

#### Магнитно-полупроводниковый генератор разнополярных импульсов (МПГ-8).

Схема МПГ-8 представлена на рис. 10. Здесь  $G$  – часть МПГ-5 до конденсатора  $C_3$ ;  $L_3, L_4$  и  $L_5$  – переключаящие и согласующий дроссели;  $C_3...C_5, C_0$  – накопительные и обостряющий конденсаторы;  $Z_H$  – комплексная нагрузка. На месте  $L_4$  схемы рис. 10 в МПГ-5 и МПГ-6 установлены соответственно дроссельный и трансформаторный узлы однополяризации разнополярных импульсов. Сравнительные экспериментальные испытания МПГ-5, МПГ-6 с МПГ-8 при нагрузке генераторов на  $R_H=30\Omega$  (эквивалент ГРТ) показали, что потребляемая мощность от сети МПГ-5

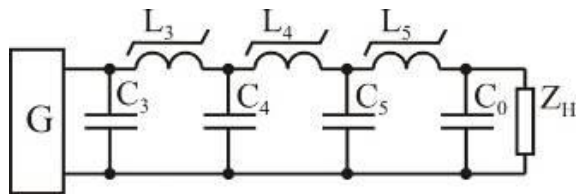


Рис. 10

и 6 ( $P_{5,6}^C$ ) и МПГ-8 ( $P_8^C$ ) находится в соотношении  $P_{5,6}^C \approx 1,03 \cdot P_8^C$ . То есть на однополяризацию импульсов расходуется всего дополнительно  $\approx 3,0\%$ . Функционирование схемы части  $G$  МПГ-8 соответствует схеме МПГ-5, а далее – схеме МПГ-1, но для разнополярных импульсов. Потенциально МПГ-8 является наиболее простым, его все индуктивные элементы работают при симметричной петле гистерезиса, что вместе улучшает его массогабаритные и надежность показатели. Предполагается, что главное преимущество разнополярных МПГ заключается в повышении ресурса работы ГРТ и других нагрузок, если их выполнить разнополярными.

**Магнитно-полупроводниковый генератор парно-разнополярных импульсов (МПГ-9).** Схема МПГ-9 представлена на рис. 11. Здесь  $G$  – часть МПГ-5 до конденсатора  $C_3$  (рис. 7 а);  $L_3...L_5$  – переключаящие дроссели;  $C_3...C_5$  – накопительные конденсаторы;  $R_H$  – нагрузка, а на рис. 11, б представлены эпюры импульсов тока  $i_3, i_4, i_5$  соответственно в элементах  $L_3...L_5$ . Фазировка тока  $I_{\Pi}$  и индуктивность дросселей  $L_4, L_5$  определены так, что при импульсе тока  $i_3^{\wedge}$  (или  $i_3^{\vee}$ ) с длительностью  $\tau_3$  дроссели  $L_4, L_5$  не достигают режима насыщения, конденсатор  $C_3$

передает заданную энергию в конденсаторы  $C_4, C_5$ . По завершении импульса тока  $i_3^{\wedge}$  ( $i_3^{\vee}$ ) дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) насыщается, а дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на время  $\tau_3+\tau_4$  ( $\tau_3+\tau_5$ ) остается в режиме намагничивания. При разряде конденсатора  $C_4$  ( $C_5$ ) через насыщенный дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) формируется положительный импульс тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) на нагрузке  $R_H$ . По окончании импульса тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) насыщается дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) и при разряде конденсатора  $C_5$  ( $C_4$ ) через насыщенный дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на нагрузке  $R_H$  формируется отрицательный импульс тока  $i_4^{\vee}$  ( $i_5^{\vee}$ ). МПН-9 обладает всеми особенностями и преимуществами, что и МПГ-5, если имеется необходимость в парно-разнополярных импульсах (ПРИ). К настоящему времени прорабатывается применение ПРИ для возбуждения ЛПМ. Причем при создании асимметрии между токами  $i_4^{\wedge}$  и ( $i_5^{\wedge}$ ), так как установлено, что мощность излучения ГРТ возрастает, если фронт импульсов начинается в предымпульсной его отрицательной части (рис. 4 в). Также ПРИ более эффективно трансформируются, чем однополярные и даже разнополярные импульсы с большой скважностью. Узел формирования ПРИ об-

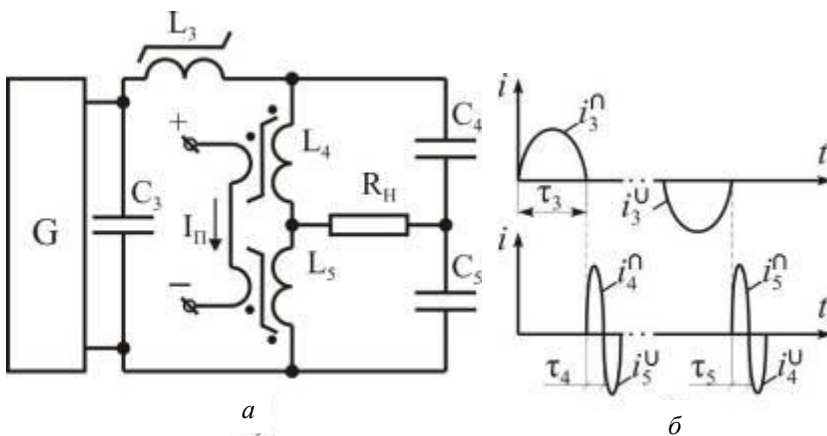


Рис. 11

передает заданную энергию в конденсаторы  $C_4, C_5$ . По завершении импульса тока  $i_3^{\wedge}$  ( $i_3^{\vee}$ ) дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) насыщается, а дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на время  $\tau_3+\tau_4$  ( $\tau_3+\tau_5$ ) остается в режиме намагничивания. При разряде конденсатора  $C_4$  ( $C_5$ ) через насыщенный дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) формируется положительный импульс тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) на нагрузке  $R_H$ . По окончании импульса тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) насыщается дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) и при разряде конденсатора  $C_5$  ( $C_4$ ) через насыщенный дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на нагрузке  $R_H$  формируется отрицательный импульс тока  $i_4^{\vee}$  ( $i_5^{\vee}$ ). МПН-9 обладает всеми особенностями и преимуществами, что и МПГ-5, если имеется необходимость в парно-разнополярных импульсах (ПРИ). К настоящему времени прорабатывается применение ПРИ для возбуждения ЛПМ. Причем при создании асимметрии между токами  $i_4^{\wedge}$  и ( $i_5^{\wedge}$ ), так как установлено, что мощность излучения ГРТ возрастает, если фронт импульсов начинается в предымпульсной его отрицательной части (рис. 4 в). Также ПРИ более эффективно трансформируются, чем однополярные и даже разнополярные импульсы с большой скважностью. Узел формирования ПРИ об-

передает заданную энергию в конденсаторы  $C_4, C_5$ . По завершении импульса тока  $i_3^{\wedge}$  ( $i_3^{\vee}$ ) дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) насыщается, а дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на время  $\tau_3+\tau_4$  ( $\tau_3+\tau_5$ ) остается в режиме намагничивания. При разряде конденсатора  $C_4$  ( $C_5$ ) через насыщенный дроссель  $L_4$  ( $L_5$ ) формируется положительный импульс тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) на нагрузке  $R_H$ . По окончании импульса тока  $i_4^{\wedge}$  ( $i_5^{\wedge}$ ) насыщается дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) и при разряде конденсатора  $C_5$  ( $C_4$ ) через насыщенный дроссель  $L_5$  ( $L_4$ ) на нагрузке  $R_H$  формируется отрицательный импульс тока  $i_4^{\vee}$  ( $i_5^{\vee}$ ). МПН-9 обладает всеми особенностями и преимуществами, что и МПГ-5, если имеется необходимость в парно-разнополярных импульсах (ПРИ). К настоящему времени прорабатывается применение ПРИ для возбуждения ЛПМ. Причем при создании асимметрии между токами  $i_4^{\wedge}$  и ( $i_5^{\wedge}$ ), так как установлено, что мощность излучения ГРТ возрастает, если фронт импульсов начинается в предымпульсной его отрицательной части (рис. 4 в). Также ПРИ более эффективно трансформируются, чем однополярные и даже разнополярные импульсы с большой скважностью. Узел формирования ПРИ об-

ладает еще одним свойством: независимо, какой первым поступит на узел ток  $i_3^{\wedge}$  или  $i_3^{\smile}$ , на входе узла всегда будет положительный импульс  $i_4^{\wedge}$  или  $i_5^{\wedge}$ .

Согласно п. 1 и 2 можно сделать следующие выводы:

1. Улучшение основных показателей магнитно-полупроводниковых генераторов (МПГ) предопределяется в большинстве случаев максимизацией коэффициента компрессии импульсов  $K_K$  или его оптимизацией по определенному параметру.

2. Увеличение коэффициента  $K_K$  достигается следующим путем: выбора магнитных материалов для индуктивных элементов с наибольшей индукцией насыщения  $B_S$ , наименьшей относительной магнитной проницаемостью насыщенного сердечника  $\mu_S$  и с учетом максимально допустимой частоты их перемагничивания; применения управляемых узлов магнитной компрессии импульсов (УМК), УМК с перезарядом входного конденсатора, согласующих УМК, функционирующих с большим перекрытием по времени смежных токов, если они нагружены на сопротивление с индуктивной составляющей; применения встречного подмагничивания дросселей; комбинации изложенных подходов.

3. Улучшение основных показателей МПГ дополнительно достигается путем использования в структурах МПГ разнофункциональных УМК: зарядно-стабилизирующих; перезарядных; формирующих в низко- или высоковольтной части МПГ двухтактные однополярные импульсы из разнополярных (дроссельного и трансформаторного типа), которые также расширяют функциональные возможности МПГ. К ним относятся: управление амплитудой импульсов, тактовые их корректировка и асимметрирование; изменение полярности импульсов, создание пакетов импульсов и др.

В дополнение к работе [4] предлагается классификация на примере рассмотренных МПГ. По вырабатываемым импульсам: однотактные однополярные (МПГ-1...МПГ-4); двухтактные однополярные (МПГ-5...МПГ-7); разнополярные (МПГ-8), парно-разнополярные (МПГ-9). По соотношению зарядных и формируемых импульсов: прямых (МПГ-1...МПГ-5,6,8,9), инверсных (МПГ-2,3), прямых и инверсных (МПГ-7), перезарядно-инверсных (МПГ-4) и перезарядно-прямых импульсов. По элементам разнополярных УМК: с дроссельным (L), трансформаторным (T), дроссельно-конденсаторным (LC), полупроводниково-реактивными (VL, VT, VLC, VTC) узлами. Предполагается, что с помощью рассмотренной разновидности МПГ-1...9 могут быть выполнены основные требования со стороны импульсных лазеров и установок электроимпульсных технологий.

1. *Важдаев В.А., Катаев И.Г.* Магнитополупроводниковый формирователь импульсов с управляемым узлом сжатия // ПТЭ. – 1992. – № 6. – С. 128–134.
2. *Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И.* Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат. – 1978. – 248 с.
3. *Зозулев В.И.* Основные подходы к анализу и оптимальному построению компрессионных магнитно-полупроводниковых генераторов // Техн. електродинаміка. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С. 77–81.
4. *Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кадыкин В.М.* Магнитные генераторы импульсов. – М.: Сов. радио. – 1968. – 475 с.
5. *Пат. 40523 Україна.* Магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних наносекундних імпульсів / І.В. Волков, Л.М. Гапченко, В.І. Зозульов, О.Л. Шиманський. – Опубл. 2009, Бюл. №7.
6. *Пат. 41501 Україна.* Двоключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів / І.В. Волков, Л.М. Гапченко, В.І. Зозульов, Д.О. Шолох. – Опубл. 2009, Бюл. № 10.
7. *Пат. 42122 Україна.* Одноключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів / І.В. Волков, В.І. Зозульов, Н.В. Крицько, В.А. Куцафін. – Опубл. 2009, Бюл. № 12.
8. *Пат. 44910 Україна.* Магнітно-напівпровідниковий генератор прямих та інверсних однополярних імпульсів / І.В. Волков, Л.М. Гапченко, В.І. Зозульов, Д.О. Шолох. – Опубл. 2009, Бюл. № 20.
9. *Пат. 46235 Україна.* Магнітно-напівпровідниковий генератор двотактних однополярних імпульсів / І.В. Волков, Л.М. Гапченко, В.І. Зозульов, Д.О. Шолох. – Опубл. 2009, Бюл. № 23.
10. *Пат. 66275A Україна.* Магнітний вузол формування двотактних однополярних імпульсів / І.В. Волков, С.І. Закревський, В.І. Зозульов, А.А. Калюжний. – Опубл. 2004, Бюл. № 4.
11. *Nakhe S.V., Rajanikanth B.S. and Bratnager R.* Energy disposition studies in a copper vapour laser under different pulse excitation schemes // Measurement Science and Technology. – 2003. – № 14. – P. 608.