

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наук. думка. – 1981. – 173 с.
2. Волков И.В., Губаревич В.Н., Чиженко А.И., Спиринов В.М. Зарядное устройство с совмещенным трансформатором-реактором индуктивно-емкостного преобразователя // Техн. электродинамика. Спец. вып. 2. «Силовая электроника и энергоэффективность». – 1998. – Т. 2. – С. 82–85.
3. Губаревич В.Н., Спиринов В.М., Кабан В.П. Алгоритм выбора схем индуктивно-емкостных преобразователей для источников питания электротехнологических установок. Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой. – К.: Наук. думка. – 1984. – С. 47–53.
4. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет основных параметров индуктивно-емкостных преобразователей с учетом характера нагрузки // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2008. – Вип. 21. – С. 118–121.
5. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей СL-вида с учетом характера нагрузки // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2012. – Вип. 33. – С. 83–87.
6. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Сравнительный анализ простейших схем индуктивно-емкостных преобразователей по установленной мощности реактивных элементов // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 94–99.

УДК 621.314.061

**В.М. Спирін**, докт. техн. наук, **В.П. Кабан**, канд. техн. наук, **В.Ю. Матвеев**, канд. техн. наук, **В.Н. Губаревич**, канд. техн. наук, **Ю.В. Маруня**, інж. І-ї кат.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Порівняльний аналіз Г-подібних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів СL-виду за встановленою потужністю реактивних елементів**

*Проведено порівняльний аналіз Г-подібних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів СL-виду за встановленою потужністю реактивних елементів з урахуванням характеру навантаження. Надано рекомендації щодо застосування схем залежно від ємнісної або індуктивної реакції навантаження. Бібл. 6, таблиця.*

**Ключові слова:** індуктивно-ємнісні перетворювачі, встановлена потужність, реактивні елементи.

**V.M. Spirin, V.P. Kaban, V.Yu. Matveev, V.N. Gubarevych, Yu.V. Marunya**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**A comparative analysis of G-shaped schemes of inductive-capacitive CL-type transducers for an installed capacity by reactive elements**

*A comparative analysis of the G-shaped schemes of inductive-capacitive CL-type transformers for an installed capacity by reactive elements, where considered the nature of the load, is done. Recommendations, for the application of schemes, which are based on capacitive or inductive load response, were issued. References 6, table.*

**Key words:** inductive-capacitive transducers, an installed capacity, reactive elements.

Надійшла 21.04.2015

Received 21.04.2015

УДК 621.373:519.62

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМЕ МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПРЯМЫХ ИМПУЛЬСОВ**

**В.И. Зозулев<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Д.А. Шолох<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **А.И. Христо<sup>3</sup>**, мл. науч. сотр.

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: dep8ied@ied.org.ua

3 – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,  
пр. Октябський, 43-А, Николаев-18, 54018, Україна

*Проведено численне моделювання перехідних процесів в магнітно-полупроводниковому генераторі високовольтних імпульсів при варіації параметрами його зарядного контура, цепі подмагнічування і динамічної коефіцієнтної сили індуктивних елементів. Представлені графіки відповідуючих змінених індукції в цих елементах, токів і напруг в зв'язках компресії імпульсів, по котрим визначені межі частотних властивостей і стійкої роботи генератора. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключевые слова:** магнитно-полупроводниковый генератор, коммутирующий дроссель, магнитная компрессия импульсов, численное моделирование.

**Введение.** Магнитно-полупроводниковый генератор (МПГ) прямых импульсов [9] имеет на входе зарядно-накопительный узел (ЗНУ) и последующий за ним узел компрессии импульсов (УКИ); сформированные ими токи (напряжения) совпадают по полярности. Такое построение МПГ в большинстве случаев предполагает введение в его структуру схемы восстановления (перемагничивания) сердечников высоковольтного импульсного трансформатора и всех коммутирующих дросселей (КД) [1]. Поэтому одними из наиболее значимых для расширения знаний об МПГ данного типа являются процессы, связанные с обратным перемагничиванием сердечников его индуктивных элементов (ИЭ), при которых эти элементы подготавливаются к формированию очередного импульса. Особый интерес представляет схема МПГ, в которой одновременно подмагничиваются КД первого УКИ и импульсный трансформатор ( $T_{и}$ ), причем с точки зрения влияния такого подмагничивания на высоковольтные КД, не охваченные подмагничиванием, а также на границы частотных свойств и устойчивой работы данного МПГ. Упрощенному варианту МПГ (в сравнении с приведенным в [10]) посвящено дальнейшее изложение исследования как продолжение работы [8] в этом направлении.

Как правило, процесс восстановления индукции в сердечнике ИЭ носит характер затухающих колебаний [4], поэтому до подачи следующего импульса индукция в сердечнике дросселя (трансформатора), а также токи и напряжения в цепях должны принять исходное значение. В противном случае нарушатся стабильность срабатывания КД и стабильность выходных импульсов. Следует отметить, что на стабильность работы генератора влияет также характер нагрузки. При явном рассогласовании выходного УКИ с нагрузкой часть энергии отражается от последней, возвращается в конденсатор первого УКИ, складывается с энергией импульса обратной полярности и тем самым только усиливает амплитуду затухающих колебаний индукции в сердечниках относительно их исходных значений. Поэтому для завершения этого процесса за минимально возможное время необходимо обеспечить как согласование волнового сопротивления выходного УКИ с нагрузкой, так и согласование емкостей конденсаторов, расположенных в соседних УКИ.

Поиск по этой тематике показывает [4, 10], что динамика процесса перемагничивания наиболее показательно исследована для схем магнитных генераторов высоковольтных импульсов, питающихся от источника переменного напряжения, в которых КД содержит дополнительную обмотку для подмагничивания его сердечника постоянным током. Для таких процессов, как резонансный заряд конденсатора первого УКИ, намагничивание сердечника дросселя, передача энергии в УКИ при насыщении сердечника его КД, обратное перемагничивание сердечника выведены известные аналитические выражения, которые могут быть использованы для предварительного расчета звеньев генератора. На основании их построены кривые характеристик индукций, поясняющие динамику процесса намагничивания и обратного восстановления КД в низковольтных УКИ. Однако не выявлено исследований по динамике перемагничивания импульсного трансформатора в сочетании с высоковольтными УКИ. В работе [9] предложен ряд новых схем с классификационным наименованием “Однотактные униполярные магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов”, которые по своим показателям и функциональным возможностям имеют преимущество в сравнении с традиционными схемами МПГ. Однако для приведенного МПГ прямых импульсов осталась открытой задача определения характера изменения магнитного состояния их индуктивных элементов (ИЭ) при полном цикле намагничивания и перемагничивания сердечников этих элементов.

**Целью работы** является исследование электромагнитных процессов в типовой схеме магнитно-полупроводникового генератора прямых импульсов для определения устойчивых режимов перемагничивания сердечников коммутирующих дросселей и импульсного трансформатора, а также частотных границ данного генератора.

**Постановка задачи.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) для контуров выбранной схемы составить системы интегро-дифференциальных уравнений, преобразовать их в системы алгебраических уравнений; 2) провести численное моделирование переходных процессов в цепях с нелинейной индуктивностью; 3)

исследовать всевозможные режимы колебаний в схеме магнитно-полупроводникового генератора прямых импульсов соответственно в зависимости от параметров цепи подмагничивания и параметров зарядно-накопительного узла и оценить ее функциональные возможности.

Поэтому первоочередной задачей исследуемого процесса перемагничивания является определение наиболее устойчивой динамики изменения характеристик индукции в сердечниках коммутирующих дросселей и импульсного трансформатора за один период колебаний генератора. Опыт авторов показывает, что наиболее приемлемым инструментом для исследования электромагнитных процессов в схемах генераторов высоковольтных импульсов является математическое моделирование. Экспериментальное исследование процессов перемагничивания и всевозможных режимов работы генератора – это более трудоемкая и не всегда целесообразная задача. Объясняется это тем, что индукцию в сердечнике можно измерить только косвенным методом (индукция пропорциональна интегралу напряжения на обмотке дросселя), следовательно, достоверность результатов после выполненных преобразований будет невысокая, тем более, что нужно совместить характеристики индукций для всех ИЭ генератора. При всей простоте существующей модели КД все же нет целостной картины электродинамики происходящих в нем процессов, так же рассматривается идеализированный режим работы генератора, при котором осуществляется только однонаправленная передача энергии [1, 4]. Поэтому для получения более приближенной картины электромагнитных процессов в рассматриваемом генераторе за основу взята модель коммутирующего дросселя, характеристика намагничивания которого аппроксимируется арктангенсовой функцией [3].

**Базовая схема генератора и параметры модели.** В качестве объекта исследования выбрана схема генератора, показанная на рис. 1, которая содержит зарядный контур, высоковольтный УКИ, повышающий импульсный трансформатор  $T_{II}$  и два высоковольтных УКИ. Для реализации режима обратного перемагничивания элементов генератора коммутирующий дроссель  $L_1$  и импульсный трансформатор  $T_{II}$  имеют соответствующие дополнительные обмотки  $w_{12}$ ,  $w_{23}$ , соединенные последовательно и подключенные к одному источнику подмагничивания  $E_{II}$  через развязывающий дроссель  $L_{II}$ .

Расчет индуктивных параметров трансформатора производится по тем же формулам, что и для коммутирующего дросселя [6]. Но так как длительность разрядного тока в первом УКИ составляет  $\approx 5$  мкс, то потерями энергии на перемагничивание в сердечнике трансформатора можно пренебречь, что дает основание ввести безгистерезисный цикл намагничивания. Тогда согласно [3] формулы для расчета магнитной индукции и абсолютной магнитной проницаемости приобретают вид

$$B(H) = \frac{2}{\pi} \cdot B_s \cdot \arctg \left( p_1 \cdot \frac{H}{H_c} \right); \tag{1}$$

$$\frac{dB(H)}{dH} = \frac{2}{\pi} B_s H_c \frac{p_1}{H_c^2 + p_1^2 \cdot H^2}, \tag{2}$$

где  $p_1 = tg \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{B_r}{B_s} \right)$ ;  $B_s$  – индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – динамическая коэрцитивная сила.

Для токов и напряжений в контурах схемы (рис. 1) на основании законов Кирхгофа

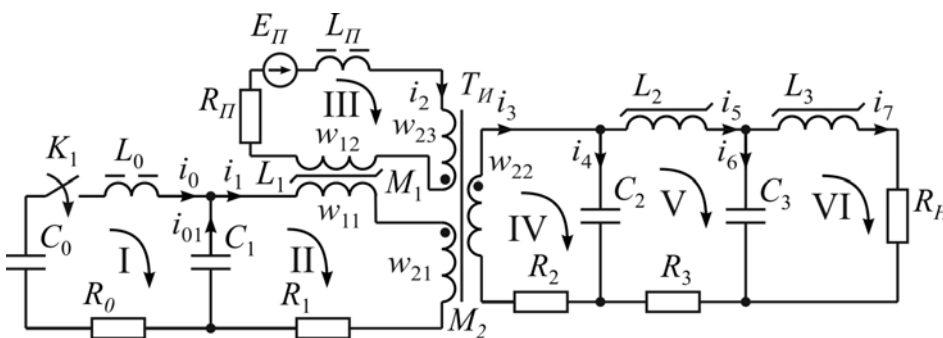


Рис. 1

составляются интегро-дифференциальные уравнения, которые решаются численно методом Эйлера [2]. Для определения токов и напряжений в цепях генератора получаем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0^{k+1} = i_0^k + \Delta t (S_1 - S_0 - R_0 \cdot i_0^k) / L_0; \\ i_1^{k+1} = i_1^k + \frac{a_1 \cdot \Delta t}{L_{11} + L_{21} - \frac{M_1^2}{L_{12} + L_{23}} - \frac{M_2^2}{L_{22}}}; \\ i_{01}^{k+1} = i_1^{k+1} - i_0^{k+1}; \\ i_2^{k+1} = i_2^k + \frac{(E_{II} - R_{II} \cdot i_2^k) \cdot \Delta t + M_1 (i_1^{k+1} - i_1^k)}{L_{II} + L_{12} + L_{23}}; \\ i_3^{k+1} = i_3^k + \frac{M_2 (i_1^{k+1} - i_1^k) - (R_2 \cdot i_3^k + S_2) \cdot \Delta t}{L_{22}}; \\ i_5^{k+1} = i_5^k + \frac{(S_2 - S_3 - R_3 \cdot i_5^k) \cdot \Delta t}{L_3}; \\ i_7^{k+1} = i_7^k + \frac{(S_3 - R_H \cdot i_7^k) \cdot \Delta t}{L_4}; \\ i_4^{k+1} = i_3^{k+1} - i_5^{k+1}; \\ i_6^{k+1} = i_5^{k+1} - i_7^{k+1}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $S_0 = \frac{1}{2C_0} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t$ ;  $S_1 = \frac{1}{2C_1} \sum_{n=1}^k (i_{01}^n + i_{01}^{n-1}) \Delta t$ ;  $S_2 = \frac{1}{2C_2} \sum_{n=1}^k (i_4^n + i_4^{n-1}) \Delta t$ ;  
 $S_3 = \frac{1}{2C_3} \sum_{n=1}^k (i_6^n + i_6^{n-1}) \Delta t$ ;  $a_1 = S_1 + R_1 \cdot i_1^k + \frac{M_1}{L_{II} + L_{12} + L_{23}} (R_{II} \cdot i_2^k - E_{II}) + \frac{M_2}{L_{22}} (R_2 \cdot i_3^k + S_2)$ .

Анализ системы уравнений (3) показал, что коэффициенты взаимного магнитного сцепления дополнительной обмотки  $w_{23} - L_{23}$  с первичной  $w_{21} - L_{21}$  и вторичной  $w_{22} - L_{22}$  обмотками трансформатора  $T_{II}$  заметно усложняют определение токов  $i_1 \dots i_3$ , а значение этих коэффициентов не оказывает существенного влияния на токи  $i_1 \dots i_3$ . Поэтому для упрощения расчетов взаимные индуктивные связи с дополнительной обмоткой трансформатора  $T_{II}$  не рассматривались. Начальными условиями в нулевой момент времени являются токи в цепях и напряжения на конденсаторе. Ток в цепи подмагничивания для  $t=0$  определялся как  $i_2(0) = E_{II}/R_{II}$ , остальные токи принимались равными нулю:  $i_0(0) = i_{01}(0) = i_1(0) = 0$ . Напряжения на конденсаторах соответственно для  $t=0$  равны:  $U_{C0} = 300$ ;  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = 0$ . Индукция в сердечнике  $L_1$  в нулевой момент времени при  $H = 0$  определяется для восходящей характеристики намагничивания. Расчет индукции поля сердечника  $B(H)$  и индуктивных коэффициентов  $L_{11}$  (в обмотке  $w_{11}$ ),  $L_{12}$  (в обмотке  $w_{12}$ ),  $M_1$  производится для результирующей напряженности поля, создаваемой двумя обмотками дросселя  $L_1$ . Ток обмотки подмагничивания  $w_{12}$  создает магнитное поле  $H_{12}$ , встречное полю  $H_{11}$  основной обмотки  $w_{11}$ , а результирующая напряженность поля является разностью между ними и определяется по формуле как для тороидального сердечника:

$$H_{1p}^k = H_{11}^k - H_{12}^k = \frac{w_{11} \cdot i_1^k - w_{12} \cdot i_2^k}{\ell_{cp}}. \quad (4)$$

Для расчета системы уравнений (3) создана математическая модель, алгоритм которой позволяет моделировать зарядный контур путем отслеживания величины тока  $i_0$ . При достижении тока  $i_0$  нулевого значения расчет 1- и 3-го уравнений в системе уравнений (3) прекращается, и дальнейшая динамика изменения напряжения на конденсатор  $C_1$  уже определяется исключительно по току  $i_1$ .

Объемы сердечников дросселей и трансформатора, количество витков их обмоток рассчитывались согласно методикам, изложенным в работах [1, 4]. В качестве материала сердечника коммутирующих дросселей  $L_1$ ,  $L_3$  и трансформатора  $T_{II}$  выбран аморфный сплав ММ-5Со на основе кобальта. Характеристика материала: индукция насыщения  $B_S = 0,45$  Тл;

остаточная индукция  $B_r = 0,38$  Тл; коэффициент прямоугольности 0,84; удельное электрическое сопротивление ленты  $\rho = 1,35 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; толщина ленты проката  $d = 25 \cdot 10^{-6}$  м.

Моделирование электромагнитных процессов осуществлялось при следующих параметрах схемы генератора (рис. 1): емкость конденсатора источника питания  $C_0 = 470$  мкФ; емкость конденсатора  $C_1 = 1$  мкФ; емкости высоковольтных конденсаторов равны  $C_2 = C_3 = 2,5$  нФ; суммарное сопротивление первичной цепи трансформатора  $T_{II}$  и основной обмотки дросселя  $L_1$ :  $R_1 = 0,01$  Ом; сопротивление вторичной обмотки трансформатора  $R_2 = 1$  Ом; сопротивление обмотки дросселя  $L_2$ :  $R_3 = 0,8$  Ом; сопротивление нагрузки  $R_H = 150$  Ом; индуктивность развязки цепи подмагничивания  $L_{II} = 10$  мГн; сопротивление цепи подмагничивания  $R_{II} = 1$  Ом; ЭДС источника питания  $E_{II} = 3$  В, объем сердечника дросселя  $L_1$ :  $V_1 = 34,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>; объемы сердечника высоковольтных дросселей  $L_2$  и  $L_3$  равны  $V_3 = V_4 = 31,7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>; объем сердечника трансформатора  $V_2 = 84,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>; количество витков основной и дополнительной обмоток дросселя  $L_1$ :  $w_{11} = 20$ ,  $w_{12} = 14$ ; количество витков обмоток трансформатора  $w_{21} = 14$ ,  $w_{22} = 290$ ,  $w_{23} = 14$ ; количество витков обмоток дросселей  $L_2$  и  $L_3$ :  $w_3 = 120$ ,  $w_4 = 35$ ; индуктивность зарядного контура  $L_0 = 32$  мкГн; напряжение на конденсаторе  $C_1$ :  $U_{C1} = 260$  В. Динамическая коэрцитивная сила для характеристики намагничивания коммутирующих дросселей определяется по формуле [5]

$$H_c = S_w / \tau, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время полного перемагничивания сердечника;  $S_w$  – коэффициент переключения, определяемый по формуле [5]

$$S_w = B_s \cdot d^2 / 4\rho, \quad (6)$$

где  $d$  – толщина ленты;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление ленты.

При одинаковой толщине ленты всех сердечников и равной 25 мкм динамическая коэрцитивная сила для характеристики намагничивания коммутирующих дросселей  $L_1 \dots L_3$  и импульсного трансформатора  $T_{II}$  соответственно составила  $H_{C1} = 4$  А/м,  $H_{C3} = 10$  А/м,  $H_{C4} = 37$  А/м,  $H_{C2} = 10$  А/м. Напряженность поля  $H_{12}$  обмотки подмагничивания  $w_{12}$  коммутирующего дросселя  $L_1$  изменялась в диапазоне 150...363 А/м, напряженность поля  $H_{23}$  обмотки подмагничивания  $w_{23}$  трансформатора  $T_{II}$  задавалась постоянной – 148 А/м.

**Анализ результатов моделирования.** В результате совместного расчета системы уравнений (3) с уравнениями (1)...(4), определения индуктивных параметров индуктивных элементов  $L_{12} \dots L_{23}$  и  $M_1, M_2$  [8] получены графики характеристик для токов  $i_0, i_1, i_3, i_5, i_7$ , напряжений на  $C_1$  и  $C_2$ , индукции поля в сердечниках дросселей  $L_1 \dots L_3$  и импульсном трансформаторе  $T_{II}$ . Графики характеристик индукций  $B_1 (L_1), B_2 (T_{II}), B_3 (L_2), B_4 (L_3)$  в сердечниках коммутирующих дросселей и импульсного трансформатора для напряженности поля обмотки подмагничивания дросселя  $L_1$ :  $H_{12} = 363$  А/м изображены на рис. 2 а. Результаты моделирования показывают, что расчет конструктивных параметров индуктивных элементов генератора, согласно методике, изложенной в работе [5], выполнен корректно. Подтверждается это тем, что в процессе формирования основного импульса передний фронт следующих друг за другом графиков индукций

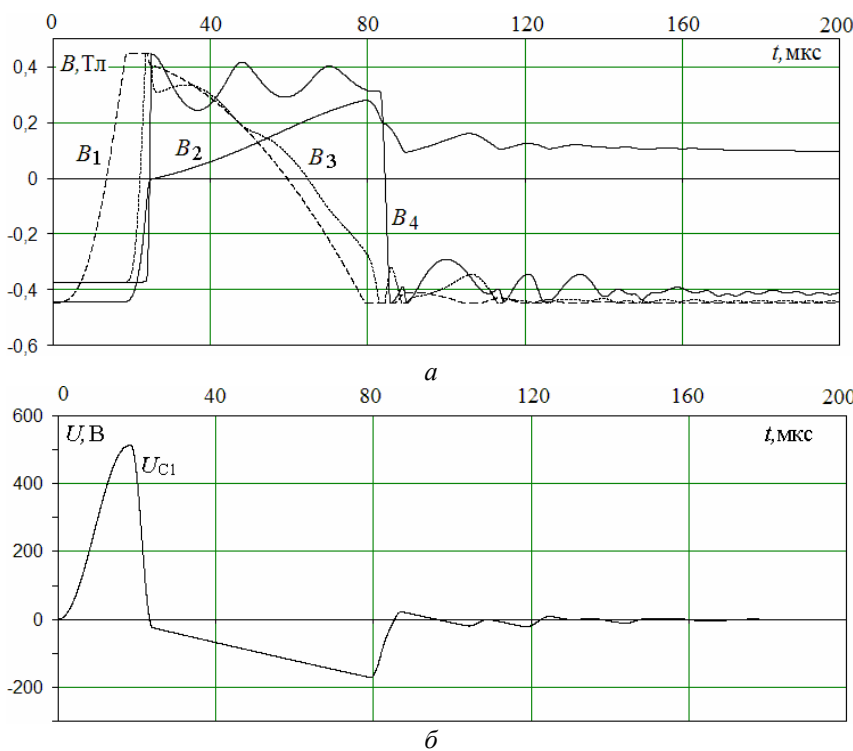


Рис. 2

$B_1...B_4$  отображает поочередность намагничивания и насыщения сердечников коммутирующих дросселей в положительном направлении  $+B_s$ . Также процесс имеет свойство роста крутизны фронта индукции и сокращения интервала задержки насыщения коммутирующих дросселей в порядке их расположения в схеме генератора. Задний фронт индукций  $B_1...B_4$  более продолжительный, он отображает процесс перемагничивания сердечников коммутирующих дросселей к противоположному порогу насыщения  $-B_s$ . Можно указать, что индукция  $B_1$  в дросселе  $L_1$  изменяется по параболическому закону, индукция  $B_3$  в  $L_2$  – близкому к параболическому, индукция  $B_4$  в  $L_3$  имеет форму прямоугольного импульса с затухающими колебаниями на полке. Такая динамика индукции объясняется тем, что ток перемагничивания дросселей  $L_1$  и  $L_2$  замыкается через емкость конденсатора следующего УКИ, а ток дросселя  $L_3$  – через линейную нагрузку  $R_H$ . Процесс перемагничивания  $B_1...B_4$  начинается после выхода индукции первого дросселя из положительного порога насыщения в момент времени 25 мкс и заканчивается после входа индукции  $B_4$  окончательного дросселя  $L_3$  к отрицательному порогу насыщения в момент времени 90 мкс. Остальная динамика процесса носит характер затухающих колебаний и наиболее продолжительной оказывается для сердечника дросселя  $L_3$ , в котором индукция затухает до принужденного значения только через 200 мкс. На рис. 2 б представлена характеристика напряжения на конденсаторе  $C_1$ , которая в полной мере соответствует теоретическим выкладкам по магнитным генераторам [4], а также подтверждена экспериментально в работе [7].

Отличительную особенность имеет характеристика индукции  $B_2$  в сердечнике импульсного трансформатора  $T_{II}$ , для которой можно выделить следующие основные интервалы: от 20 до 25 мкс происходит резкий рост индукции по параболическому закону; от 25 до 140 мкс индукция характеризуется последовательностью затухающих импульсов треугольной формы; от 140 мкс и далее индукция уменьшается по линейному закону. Начиная от 140 мкс индукция  $B_2(T_{II})$  линейно уменьшается только за счет действия тока подмагничивания. Так как расчетная область процесса ограничена и составляет 300 мкс, то для определения момента времени, достижения индукции  $B_2$  противоположного порога насыщения можно воспользоваться уравнением прямой линии. Задавшись координатами двух крайних точек линейного процесса  $B_2(1) - (0,12 \text{ Тл}, 140 \text{ мкс})$ ,  $B_2(2) - (0,08 \text{ Тл}, 300 \text{ мкс})$  и подставив в уравнение прямой исходное значение индукции 0,44 Тл, находим полное время перемагничивания трансформатора  $\tau_r(-\mu) = 2,4 \text{ мс}$ .

На рис. 3 показаны графики динамики индукции (кривые 1–3) в импульсном трансформаторе для трех значений напряженности поля обмотки подмагничивания 1 –  $H_{12}=326 \text{ А/м}$ , 2 –  $H_{12}=232 \text{ А/м}$ , 3 –  $H_{12}=186 \text{ А/м}$  коммутирующего дросселя  $L_1$  и при постоянной напряженности поля обмотки подмагничивания трансформатора  $H_{23} = 148 \text{ А/м}$ . Для указанных значений  $H_{12}$  полное время перемагничивания трансформатора соответственно наступает через 2,4; 1,8; 1,1 мс. Путем изменения  $H_C$  в формуле (1) можно задавать (пологость) крутизну характеристики намагничивания импульсного трансформатора. Вид характеристик намагничивания  $T_{II}$  для трех значений  $H_C$  (1 –  $H_C = 5 \text{ А/м}$ , 2 –

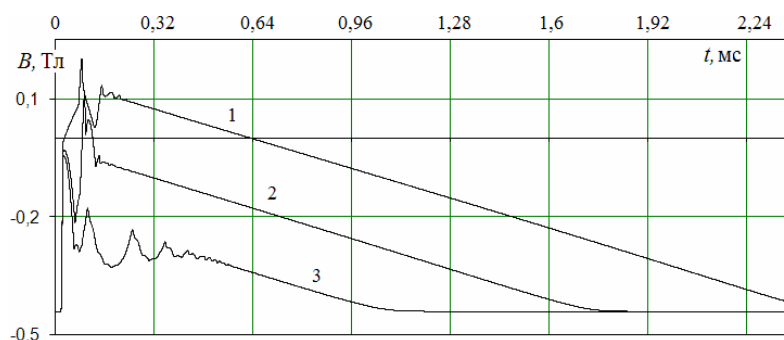


Рис. 3

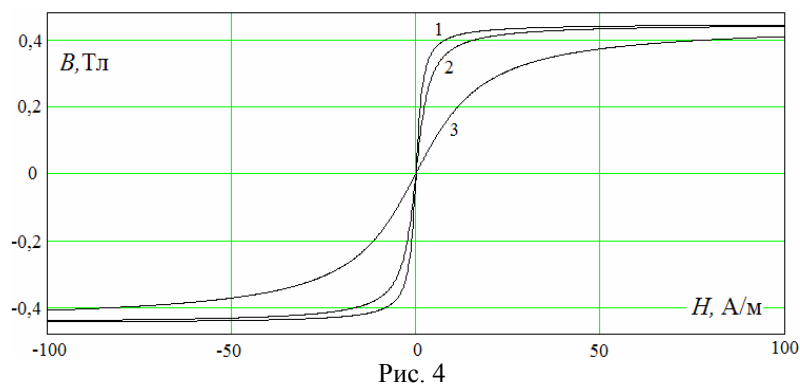


Рис. 4

$H_C = 10$  А/м,  $3 - H_C = 50$  А/м) показан на рис. 4. Моделирование показывает, что уменьшение пологости характеристики намагничивания ( $H_{C2}=5$  А/м) при тех же самых значениях  $H_{12}$  приводит к увеличению времени перемагничивания трансформатора. Перемагничивание наступает соответственно через 3; 2,1; 1,6 мс. Растягивание характеристики намагничивания трансформатора ( $H_{C2}=50$ ) приводит к уменьшению размаха индукции, однако ее характер становится гиперболическим и медленно устремляется к исходному значению (1,7; 1,2; 1,1 мс), поэтому существенного влияния на результирующую длительность перемагничивания не оказывает. Дальнейшее увеличение пологости характеристики намагничивания трансформатора вызывает появление незатухающих колебаний индукции около индукции насыщения  $B_s$  во всей системе.

Уже при значении  $H_{12}=186$  А/м динамика индукции в сердечнике  $L_1$  принимает характер серии затухающих колебаний, как показано на рис. 5 а. Это объясняется тем, что ток в обмотке подмагничивания трансформатора создает в основной обмотке дросселя  $L_1$  ток, направление которого противоположно направлению тока размагничивания  $L_1$ , что заново устремляет индукцию  $B_1$  к положительному порогу насыщения. Если пренебречь присутствием небольших колебаний около индукции насыщения  $B_2$ , то можно считать, что время перемагничивания трансформатора сокращается до 0,6 мс. При значении  $H_{12} = 93$  А/м процесс восстановления индукции в первом дросселе принимает характер незатухающих колебаний.

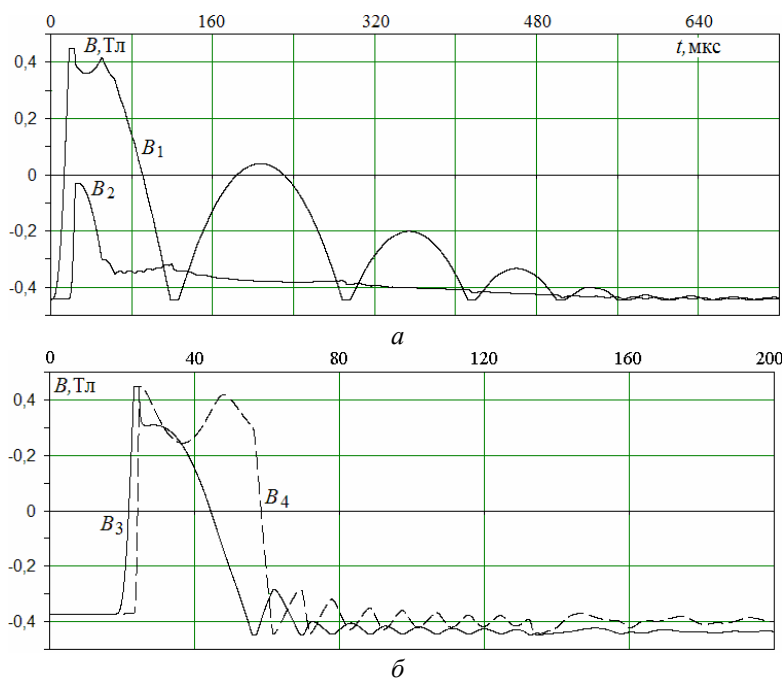


Рис. 5

Динамика индукции в сердечниках высоковольтных дросселей также характеризуется наличием продолжительных колебаний малой амплитуды около индукции насыщения (рис. 5 б). Моделирование показывает, что при формировании следующего импульса режим работы генератора становится неустойчивым, так как во всей схеме возбуждаются незатухающие колебания. Таким образом, граничная частота следования импульсов в схеме генератора с подмагничиванием сердечников низковольтного коммутационного дросселя и импульсного трансформатора с энергией в импульсе 0,12 Дж и выходным напряжением 10 кВ находится в пределах до 2 кГц.

**Заключение.** Вследствие моделирования схемы магнитно-полупроводникового генератора прямых импульсов, содержащей узел одновременного подмагничивания коммутационного дросселя и трансформатора для восстановления их исходного магнитного состояния в послеимпульсный период, определены следующие основные результаты:

1. Высоковольтные коммутационные дроссели, неохваченные подмагничиванием, также восстанавливают свое исходное состояние после формирования ими компрессионных импульсов.
2. Наиболее продолжительной динамикой перемагничивания характеризуется сердечник импульсного трансформатора (на примере генератора с энергией в импульсе 0,12 Дж и выходным напряжением 10 кВ).
3. Сокращение длительности перемагничивания импульсного трансформатора достигается путем уменьшения напряженности поля обмотки подмагничивания первого коммутационного дросселя до ее допустимого нижнего значения при фиксированной и допустимой по нижнему пределу напряженности поля обмотки трансформатора, а также при значении коэрцитивной силы сердечника  $T_H$ , определяющего нижний допус-

тимый предел характеристики его намагничивания (на примере генератора по п. 2 при  $H_{12}(L_1) = 186$  А/м,  $H_{23}(T_{II}) = 148$  А/м и  $H_C = 50$  А/м можно сократить время перемагничивания  $T_{II}$  с 2,4 до 0,6 мкс).

4. Для первого коммутирующего дросселя существуют значение напряженности поля его обмотки подмагничивания, при котором время перемагничивания импульсного трансформатора минимально, и значение, при котором процесс восстановления индукции в дросселе принимает характер длительных незатухающих колебаний (на примере генератора по п. 2 – соответственно при  $H_{12} = 186$  А/м и  $H_{12} = 93$  А/м).

1. *Гарбер И.С.* Магнитные импульсные модуляторы. – М.: Сов. радио, 1964. – 159 с.
2. *Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З.* Численные методы анализа. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
3. *Зацепин Н.Н.* Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса // *Весті АН БССР. Сер. Фіз.-техн. наук.* – 1973. – № 4. – С. 29–31.
4. *Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М.* Магнитные генераторы импульсов. – М.: Сов. радио, 1968. – 475 с.
5. *Розенблат М.А.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Наука, 1966. – 719 с.
6. *Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н.* Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
7. *Христо А.И.* Магнитно-транзисторный генератор для формирования высоковольтных импульсов субмикросекундной длительности // *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП»*: Зб. наук. пр. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 190–202.
8. *Христо А.И., Зозулев В.И., Шолох Д.А.* Численное моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов // *Техн. електродинаміка.* – 2014. – № 2. – С. 22–28.
9. *Шолох Д.О.* Високовольтні магнітно-напівпровідникові генератори з новими вузлами компресії мікро- і наносекундних імпульсів: Дис. ... канд. техн. наук. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – 152 с.
10. *Dai Yuhang.* Pulsed Supply Employing Magnetic Pulse Compression Technology // *Proc. PEMC'98.* – Prague, Czech Republic, 1998. – V.2. – P. 185–189.

УДК 621.373:519.62

**В.І. Зозульов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **Д.О. Шолох**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **О.І. Христо**<sup>3</sup>, мол. наук. співроб.

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

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

3 – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,

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

#### **Моделювання електромагнітних процесів у схемі магнітно-напівпровідникового генератора прямих імпульсів**

*Проведено чисельне моделювання перехідних процесів у магнітно-напівпровідниковому генераторі високовольтних імпульсів при варіації параметрами його зарядного контура, ланцюга підмагнічування та динамічної коефіцієнтної сили індуктивних елементів. Представлено графіки відповідних змін індукції в цих елементах, струмів і напруг у ланках компресії імпульсів, за якими визначено межі частотних властивостей і стійкої роботи генератора. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** магнітно-напівпровідниковий генератор, комутуючий дросель, магнітна компресія імпульсів, чисельне моделювання.

**V.I. Zozulev**<sup>1</sup>, **D.O. Sholokh**<sup>2</sup>, **A.I. Khrysto**<sup>3</sup>

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

Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

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

Zhovtnevy Avenue, 43a, Mykolayiv, 54018, Ukraine

#### **Simulation of electromagnetic processes in the circuit of magnetic semiconductor generator of the direct pulses**

*A numerical simulation of transient processes in magnetic semiconductor generator of high voltage pulses with variations of the parameters of charging circuit, bias circuit and dynamic coercive force of its inductive elements was conducted. Graphics of the induction in inductive elements, currents and voltages in the pulse compression nodes are presented. Limits of the frequency properties and stable work of the generator are defined by these graphs. References 10, figures 5.*

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

Надійшла 23.03.2015

Received 23.03.2015