

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СХЕМЕ МАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ

А.И.Христо¹, В.И.Зозулев², канд.техн.наук, Д.А.Шолох², канд.техн.наук

¹ – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, Николаев-18, 54018, Украина,

² – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail:dimashol@ukr.net

Выполнен расширенный анализ существующей модели коммутающего дросселя. Предложена его усовершенствованная модель, которая учитывает нелинейность и неоднозначность характеристики намагничивания его сердечника. Проведено численное моделирование переходных процессов в магнитном генераторе импульсов с ключом в зарядном контуре, получены графики электромагнитных характеристик процесса и проанализированы режимы работы генератора при различных сопротивлениях нагрузки и параметрах цепи подмагничивания. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: магнитный генератор импульсов, коммутающий дроссель, численное моделирование.

Введение. Стержневым элементом магнитного генератора импульсов (МГИ) является коммутирующий дроссель (КД), содержащий ферромагнитный сердечник с нелинейными свойствами. Как правило, эти свойства доводятся до ключевых: в состоянии намагничивания сердечника КД считается закрытым, в состоянии насыщения – открытым. Магнитное состояние КД задает электромагнитные процессы формирования импульсов в схеме МГИ. В монографиях [1, 5] магнитное состояние КД аппроксимируется идеализированной ломаной линией, а в работе [6] проанализированы наиболее используемые для него математические модели. При этом факторы подмагничивания КД и согласования МГИ с нагрузкой рассматриваются отдельно или не учитываются. Однако идеализированная характеристика намагничивания КД без комплексного учета влияния на нее отмеченных факторов становится неприемлемой для микро- и наносекундного диапазона формирования импульсов с помощью КД. Требуется переход к модели КД, максимально приближенной к реальной, учитывающей нелинейность и неоднозначность характеристики намагничивания ферромагнитного сердечника КД, влияния на нее тока подмагничивания сердечника и параметров нагрузки разрядного контура МГИ.

Цель работы. Усовершенствование математической модели КД путем использования численного расчета электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов; учет в этой модели нелинейных и гистерезисных свойств характеристики намагничивания сердечника КД, параметров его цепи подмагничивания, а также режимов согласования разрядного контура с нагрузкой.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие основные положения: 1) ввести в математическую модель КД нелинейную зависимость между индукцией и напряженностью поля в сердечнике КД в пределах полной петли гистерезиса, максимально приближенной к реальной, чтобы модель в достаточной мере отображала динамические характеристики КД в диапазоне микро- и наносекундных импульсов; 2) провести анализ и сравнение динамики электромагнитных процессов в МГИ при различных режимах согласования разрядного контура с активной нагрузкой на основе усовершенствованной модели КД; 3) оценить влияние параметров цепи подмагничивания КД и длительности перемагничивания его сердечника на характеристики разрядного импульса; 4) провести численное моделирование переходных процессов в цепях с КД, которое представляется более эффективным в сравнении с трудоемким аналитическим подходом и позволяющее определить полную динамику электромагнитных характеристик на всем интервале намагничивания и перемагничивания КД, включая диапазон формирования наносекундных импульсов.

Обоснование основных положений модели КД. Существует достаточное количество различных аналитических выражений для описания петли магнитного гистерезиса [6], однако наиболее приемлемым приближением является аппроксимация с помощью арктангенсовой функции. Так, одной из самых простых и компактных формул на основе арктангенсовой функции является аппроксимация Зацепина [4], которая взята за основу предлагаемой усовершенствованной модели КД для описания петель магнитного гистерезиса. То, что эта модель применима только для описания предельной петли гистерезиса, не является недостатком, поскольку учет частных циклов, строго говоря, необяза-

телен, так как основная часть переходных процессов в каскадах сжатия происходит именно по предельной петле гистерезиса.

В качестве сердечников КД используют ферромагнитные материалы с малой динамической коэрцитивной силой, обладающие минимальной магнитной проницаемостью в насыщении и высоким коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса. Основной части этих требований в полной мере соответствует аморфный магнитомягкий сплав на основе кобальта ММ-5Со (производитель ТОВ “МЕЛТА”) с высоким коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса – 0,84. Сердечник из данного материала использован при создании магнитно-транзисторного генератора высоковольтных импульсов субмикросекундной длительности, предназначенного для формирования газового разряда пониженного давления [8]. В большинстве случаев в первых звеньях сжатия магнитных генераторов импульсов КД имеет дополнительную обмотку подмагничивания постоянным током для реализации режима с обратным насыщением его сердечника и выработки импульса обратной полярности для размагничивания остальной части схемы. Поэтому в работе рассматривается обобщенная модель КД, которая учитывает отмеченное подмагничивание его сердечника и базируется на нижеследующих принятых допущениях.

1. Индукция магнитного поля и магнитная проницаемость в сердечнике дросселя рассчитываются для предельной петли магнитного гистерезиса. Частные циклы намагничивания не рассматриваются.

2. Ветви предельной петли магнитного гистерезиса аппроксимируются арктангенсовой функцией [4]

$$B(H) = \frac{2}{\pi} B_s \arctg \left(p_1 \frac{H \pm H_c}{H_c} \right), \quad p_1 = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{B_r}{B_s} \right), \quad (1)$$

где B_s – индукция насыщения, B_r – остаточная индукция, H_c – динамическая коэрцитивная сила, H – результирующая напряженность поля, создаваемая токами основной обмотки и обмотки подмагничивания КД.

3. Абсолютная магнитная проницаемость сердечника на основной кривой намагничивания определяется производной от индукции по напряженности поля

$$dB(H)/dH = 2\pi^{-1} B_s H_c p_1 (H_c^2 + p_1^2 H^2 \pm 2p_1^2 H H_c + p_1^2 H_c^2)^{-1}. \quad (2)$$

4. Относительная магнитная проницаемость сердечника μ_s на участке насыщения постоянна и не зависит от H . Полагается, что насыщение материала наступает, если отношение производной dB/dH к магнитной постоянной μ_0 достигает значения μ_s .

5. Динамическая коэрцитивная сила для сердечника КД определяется по формуле [4]

$$H_c = S_w / \tau, \quad (3)$$

где τ – время полного перемагничивания сердечника, S_w – коэффициент переключения, определяемый по формуле [5],

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

где d – толщина ленты, ρ – удельное электрическое сопротивление ленты.

6. Индуктивность обмоток КД определяется по формуле, полученной для тороидального сердечника с равномерно распределенной обмоткой по его поверхности [7]

$$L(H) = w^2 S_m \ell_{cp}^{-1} dB(H)/dH, \quad (5)$$

где S_m – сечения сердечника, ℓ_{cp} – длина его средней линии, w – количество витков обмотки.

7. Коэффициент взаимной индукции между основной и подмагничивающей обмотками КД определяется по формуле [7]

$$M(H) = w_1^2 S_m (\ell_{cp} w_1 / w_2)^{-1} (dB/dH - \mu_0), \quad (6)$$

где w_1 и w_2 – количество витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

На рис. 1, а, б показаны характеристики веток предельной петли магнитного гистерезиса, заданные формулой (1), и соответствующие веткам гистерезиса характеристики абсолютной магнитной проницаемости, заданные формулой (2). В формулах (1), (2) знак “минус” и “плюс” используется соответственно для восходящей и нисходящей ветвей магнитного гистерезиса. Аналитические характеристики отображают приближенный характер изменения магнитного состояния сердечника для материала ММ-5Со с такими основными параметрами: $B_s = 0,447$ Тл, $B_r = 0,372$ Тл, $\mu_s = 5$, $d = 40 \cdot 10^{-6}$ м, $\rho = 1,35 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Особенность аппроксимации арктангенсом состоит в том, что характеристика намагничивания приближается к асимптоте, которая параллельна оси абсцисс, а физически должна стремиться к асимптоте, которая наклонна к оси абсцисс и определяется магнитной проницаемостью сердечника в

насыщенном состоянии. Поэтому физическая характеристика намагничивания достаточно хорошо аппроксимируется арктангенсовой функцией только на основной кривой намагничивания и в области её излома, а в области насыщения аппроксимируется линейной зависимостью, определяемой относительной магнитной проницаемостью в насыщении μ_s , принятой независимой от напряженности магнитного поля. Это требование учтено как основное допущение, вносимое в математическую модель дросселя.

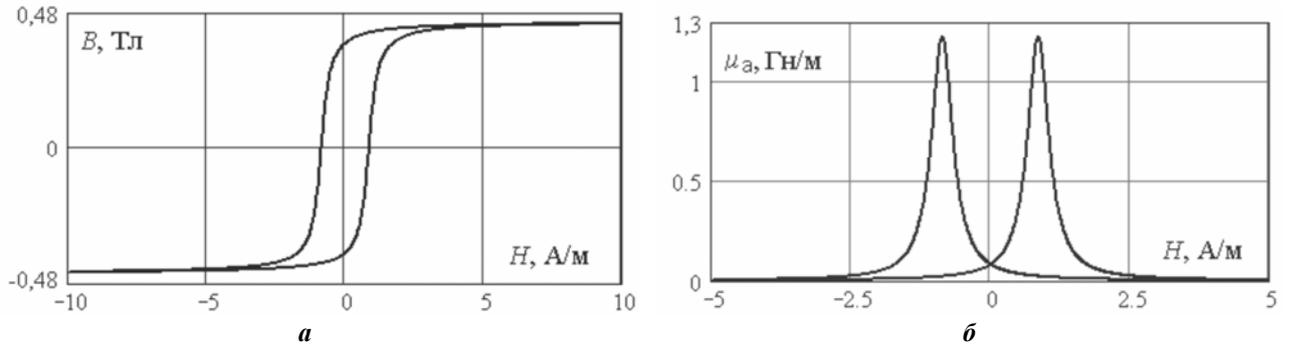


Рис. 1

Численное моделирование. Для анализа электромагнитных процессов согласно разработанной математической модели КД рассмотрена простейшая схема МГИ, снабженная ключом в зарядном контуре и одним КД, который в насыщенном состоянии разряжает накопительный конденсатор на активную нагрузку. Схема генератора, показанная на рис. 2, имеет прикладное значение как генератор импульсов тока для нагрузок с малым активным сопротивлением [5]. При микросекундной длительности импульса тока в зарядной цепи в качестве ключа K может использоваться тиристор либо транзистор. При отпирании ключа K в цепи возбуждается ток разряда конденсатора C_0 на конденсатор C_1 через индуктивность дросселя L_0 . Сопротивление транзистора (или тиристора) в открытом состоянии достаточно низкое, поэтому на длительность этого процесса влияния практически не оказывает. Ключ K цепи имеет одностороннюю проводимость, поэтому через цепь пройдет только положительный полупериод колебаний тока. При снижении тока до нуля ключ K запирается, процесс заряда прекращается. Это обстоятельство дает возможность упростить моделирование зарядного контура путем замены полупроводникового элемента идеальным ключом и рассматривать старт переходных процессов при мгновенной его коммутации.

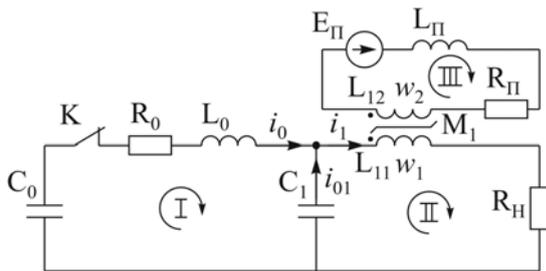


Рис. 2

Для моделирования МГИ [8] параметры его схемы (рис. 2) выбраны следующими: емкость входного конденсатора – $C_0 = 470 \cdot 10^{-6}$ Ф, емкость конденсатора звена сжатия – $C_1 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, индуктивность зарядного дросселя – $L_0 = 32 \cdot 10^{-6}$ Гн, начальное напряжение на конденсаторе C_1 – $U_{C1} = 300$ В, активное сопротивление нагрузки – $R_n = 6$ Ом, индуктивность дросселя развязки – $L_n = 10 \cdot 10^{-3}$ Гн, сопротивление этого дросселя – $R_n = 1$ Ом, ЭДС источника питания – $E_n = 2$ В, сечение сердечника дросселя Др1 – $S_m = 2,7 \cdot 10^{-4}$ м², длина его средней линии – $\ell_m = 0,129$ м, количество витков основной обмотки дросселя – $w_1 = 20$ и обмотки подмагничивания – $w_2 = 10$.

Для контуров схемы на основании законов Кирхгофа составляется система интегро-дифференциальных уравнений, которая решается численно методом Эйлера [2]. Интегральные суммы напряжений на конденсаторах от токов рассчитываются по методу трапеций. Для определения токов и напряжений в цепях генератора получаем систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} i_0^{k+1} = i_0^k + \Delta t (S_1 - S_0 - R_0 \cdot i_0^k) / L_0; \\ i_1^{k+1} = i_1^k + a_1 \cdot \Delta t \left(L_{11} - \frac{M_1^2}{L_{12} + L_n} \right)^{-1}; \\ i_2^{k+1} = i_2^k + (E_n - R_n \cdot i_2^k) \cdot \Delta t + M_1 (i_1^{k+1} - i_1^k) (L_n + L_{12})^{-1}; \\ i_{01}^{k+1} = i_1^{k+1} - i_0^{k+1}; \end{cases} \quad \begin{cases} S_0 = (2C_0)^{-1} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t; \\ S_1 = (2C_1)^{-1} \sum_{n=1}^k (i_{01}^n + i_{01}^{n-1}) \Delta t; \\ a_1 = S_1^k + R_n \cdot i_1^k + \frac{M_1}{L_{12} + L_n} (R_n \cdot i_2^k - E_n). \end{cases} \quad (7)$$

Начальными условиями являются токи в цепях и напряжения на конденсаторах. Ток в цепи подмагничивания для $t=0$ определялся как $i_2(0) = E_n/R_n$, остальные токи принимались равными нулю $i_0(0) = i_{01}(0) = i_1(0) = 0$, а напряжения на конденсаторах соответственно равны: $U_{C0}=300$ В, $U_{C1}=0$ В. Расчет индукции поля сердечника $B(H)$ и индуктивных коэффициентов основной обмотки L_{11} , обмотки подмагничивания L_{12} и коэффициента взаимной индукции M_1 производился для результирующей напряженности поля, создаваемой двумя обмотками дросселя. Ток обмотки w_2 создает напряженность магнитного поля H_{12} , которая противоположна по знаку напряженности магнитного поля H_{11} , создаваемой током в основной обмотке w_1 , а результирующая напряженность поля есть разность между ними и определяется по формуле для тороидального сердечника

$$H^k = H_{11}^k - H_{12}^k = (w_1 i_1^k - w_2 i_2^k) l_{\text{сп}}^{-1}. \quad (8)$$

По формуле (3) для выбранного материала сердечника и при известной длительности тока намагничивания – τ_1 рассчитывается динамическая коэрцитивная сила $H_c = 11$ А/м. Известно, что затраты энергии на изменение магнитного состояния сердечника КД пропорциональны произведению его объема $V_m = S_m \ell_{\text{сп}}$ на интеграл от напряженности поля по индукции – $W_m = V_m \int H dB$ [3]. В численном виде к интегральной сумме приближаемся по методу трапеций

$$W_m = 0,5 V_m \sum_{n=1}^k (B^n - B^{n-1}) H^n. \quad (9)$$

Временной интервал шага итерации процесса задавался равным – $\Delta t = 10 \cdot 10^{-9}$ с, что намного меньше длительности зарядного и разрядного токов. Для расчета системы уравнений (7) составлена компьютерная программа, алгоритм которой позволяет моделировать зарядный контур путем отслеживания величины тока i_0 . При достижении тока i_0 нулевого значения, расчет 1-го и 4-го уравнений в системе (7) прекращается и дальнейшая динамика изменения напряжения на конденсатор C_1 уже определяется исключительно по току i_1 . Также алгоритм учитывает выбор нисходящей и восходящей ветвей гистерезиса для определения индукции поля и магнитной проницаемости в зависимости от полярности произошедшего насыщения сердечника КД, полярности предыдущего насыщения и на основании сопоставления значений мгновенной индукции B^k магнитного поля с остаточной индукцией B_r , которая задана. Моделирование электромагнитного процесса производилось в двух вариантах соотношений параметров элементов схемы генератора импульсов: при постоянном сопротивлении нагрузки – $R_n = 6$ Ом варьируется напряженность поля обмотки подмагничивания – $H_{12} = 155$ А/м, 233 А/м, 349 А/м; при постоянной напряженности поля – $H_{12} = 155$ А/м варьируется сопротивление нагрузки – $R_n = 6$ Ом, 2 Ом, 20 Ом. Согласование волнового сопротивления разрядного контура с нагрузкой реализуется только при $R_{\text{нс}} = 6$ Ом. В результате совместного расчета системы уравнений (7), уравнений (1), (2), (8), (9) и определения индуктивных коэффициентов по формулам (5), (6) получены графики характеристик для токов i_0 , i_1 , индукции поля B и затрат энергии W_m в сердечнике дросселя. Графики, построенные по результатам моделирования, показаны на рис. 3 и рис. 4.

Результаты численного моделирования. Графики электродинамических характеристик разрядного процесса при трех вышеуказанных значениях напряженности магнитного поля обмотки подмагничивания и постоянном сопротивлении нагрузки $R_{\text{нс}} = 6$ Ом показаны на рис. 3, где i_0 – ток зарядного контура, i_1 – ток разрядного контура; B – индукция поля в сердечнике; W_m – динамика затрат энергии в сердечнике. По характеристикам разрядного тока i_1 для интервала времени (60...100) мкс (рис. 3, а) подтверждена закономерность процесса обратного перемагничивания – с ростом напряженности магнитного поля обмотки подмагничивания увеличивается энергия импульса обратной полярности и уменьшается задержка его образования относительно рабочего импульса. Импульс обратной полярности формируется в момент времени, когда индукция B принимает значение – B_r , что отображается на графике рис. 3, б (кривые 1–3). Для напряженностей магнитного поля $H_{12} = 155$ А/м, 233 А/м, 349 А/м насыщение наступает соответственно через 86,8 мкс, 76,2 мкс и 65,8 мкс от начала коммутации ключа K . Сокращение времени обратного перемагничивания сердечника дросселя является полезным свойством процесса, так как позволяет повысить частоту следования импульсов.

Однако есть и противоположная тенденция, которая состоит в том, что с увеличением H_{12} происходит рост «пьедестала» тока (напряжения) разрядного импульса, рост интервала задержки насыщения дросселя и уменьшение амплитуды разрядного импульса. Таким образом, на основании полученных графиков разрядного тока в интервале времени (14...23) мкс, которые показаны на рис. 3, в, выяв-

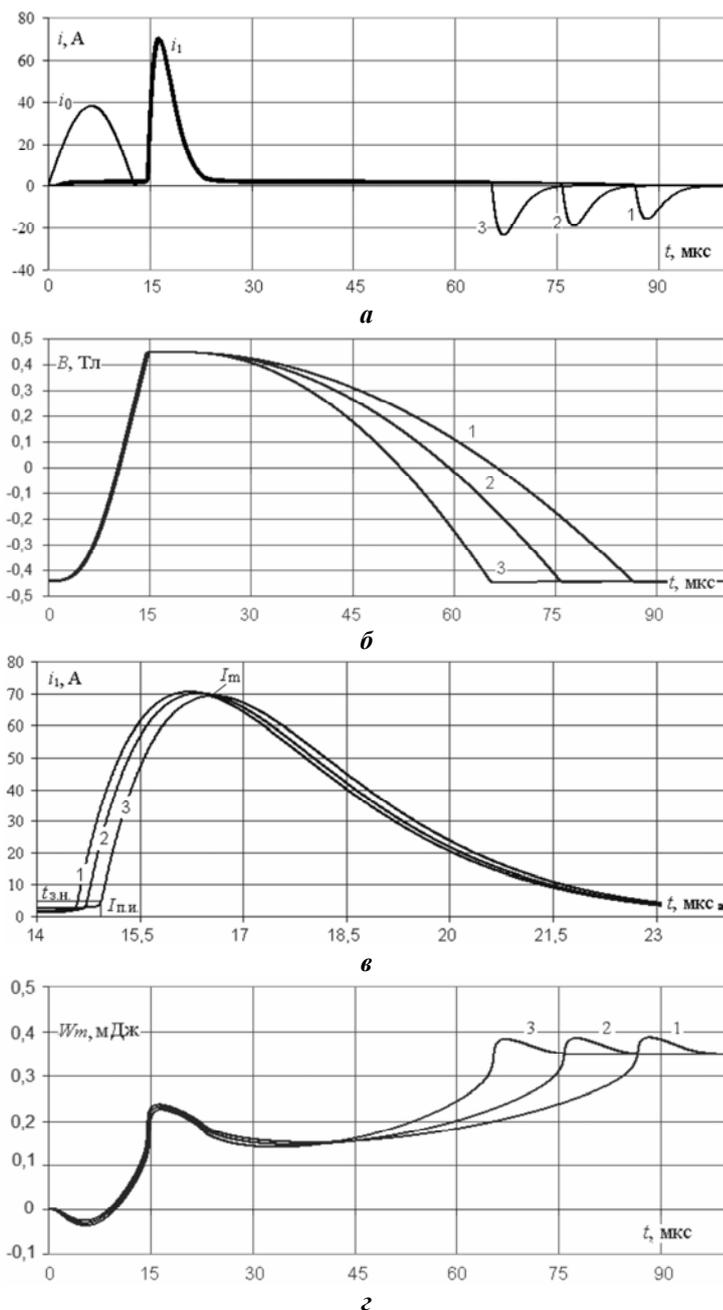
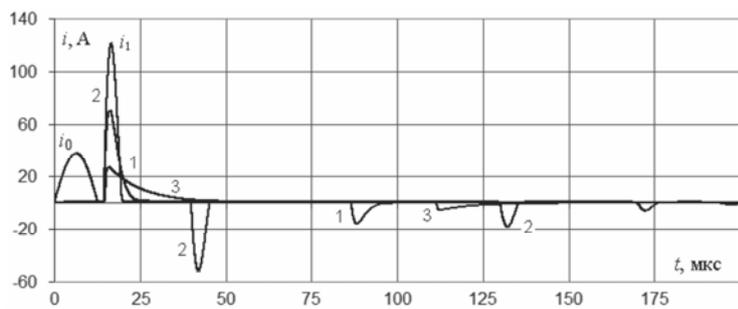


Рис. 3

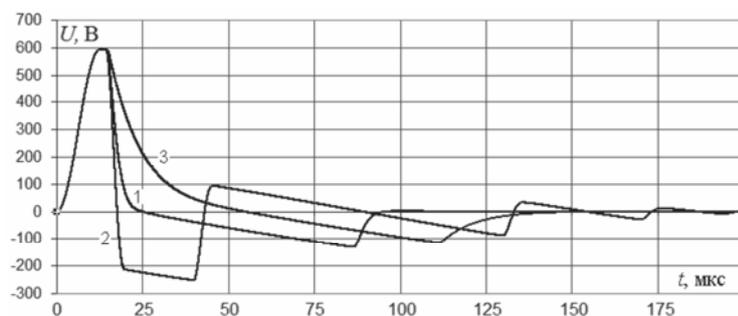
нужно указать, что суммарные затраты энергии должны возрастать с уменьшением длительности обратного перемагничивания.

Графики электродинамических характеристик разрядного процесса для трех значений сопротивления нагрузки $R_{нс} = 6$ Ом (кривая 1), $R_n = 2$ Ом (кривая 2), $R_n = 20$ Ом (кривая 3) и постоянной напряженности поля обмотки подмагничивания 155 А/м показаны на рис. 4, где i_0 – ток зарядного контура; i_1 – ток разрядного контура; B – индукция поля в сердечнике, U – напряжение на конденсаторе C_1 . При уменьшении сопротивления нагрузки до $R_n = 2$ Ом ток i_1 принимает колебательный характер, что приводит к возврату части энергии рабочего импульса обратно в конденсатор C_1 , этот процесс отчетливо отображается на рис. 4, а. После перезаряда конденсатора C_1 отрицательным напряжением к обмотке дросселя будет прикладываться напряжение трапецидальной формы (рис. 4, б – кривая 2). Индукция поля достигнет отрицательного насыщения уже через 40 мкс от начала коммутации ключа K .

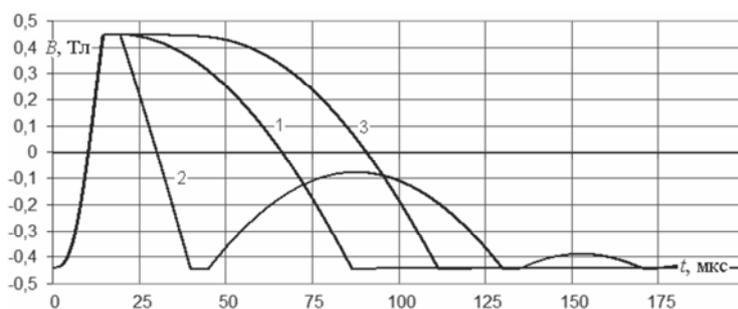
лено влияние напряженности поля обмотки подмагничивания на характеристики разрядного тока. Для кривых импульсов тока (рис. 3, а, кривые 1–3) в порядке нарастания напряженности поля H_{12} (рис. 3, в) интервал задержки насыщения $t_{3,н}$ относительно окончания зарядного тока соответственно составляет – 0,7 мкс, 0,9 мкс, 1,1 мкс, «пьедестал» импульса разрядного тока $I_{п.и}$ – 2,7 А, 3,2 А, 4,25 А, амплитуда разрядного тока I_m – 70,52 А, 70,1 А, 69,32 А. Основным недостатком сокращения процесса обратного перемагничивания путем увеличения напряженности поля обмотки подмагничивания является уменьшение энергетических показателей разрядного импульса. Например, при $H_{12} = 349$ А/м амплитуда тока разрядного импульса относительно $H_{12} = 0$ снижается на 3%, а «пьедестал» импульса будет составлять 6% от его амплитуды. Для графиков затрат энергии в сердечнике (рис. 3, г) можно отметить наличие двух максимумов, соответствующих интервалам ввода энергии в нагрузку. Отрицательное значение затрат энергии в начале графиков объясняется тем, что на этом участке намагничивания приращение индукции поля положительно ($dB > 0$), а результирующая напряженность поля – отрицательна ($H < 0$). Однако прироста энергии в конденсаторе быть не может, так как приращение отрицательного значения затрат энергии в начале кривой намагничивания сердечника будет компенсироваться такой же по величине энергией в начале кривой размагничивания сердечника, что отображается на отмеченных графиках как снижение положительного значения затрат энергии. Несомненно,



а



б



в

Рис. 4

сопротивление выходного контура не согласовано с сопротивлением нагрузки, является нежелательным, так как приводит к потере управляемости КД. В случае, когда $R_n > R_{нс}$, разряд имеет апериодический характер, но его длительность существенно затягивается – рис. 4, а (кривая 3). Такой режим работы генератора импульсов также нежелателен, так как может вызвать появление на нагрузке повторного импульса положительной полярности.

Заключение. Разработана математическая модель коммутирующего дросселя, которая позволяет комплексно учитывать нелинейность и неоднозначность характеристики намагничивания сердечника дросселя, токи его намагничивания и подмагничивания. Одним из самых простых и компактных аналитических выражений для описания петли магнитного гистерезиса является её аппроксимация на основе арктангенсовой функции при допущении, что абсолютная магнитная проницаемость на основных ветвях гистерезиса определяется как производная dB/dH , а на ветвях, отображающих насыщение сердечника, абсолютная магнитная проницаемость принимает значение $\mu_0\mu_s$ и задается постоянной, не зависящей от напряженности поля. Установлено, что с увеличением напряженности поля H_{12} , создаваемой током обмотки подмагничивания, происходит рост задержки насыщения сердечника дросселя $t_{з.н.}$, «пьедестала» разрядного импульса $I_{п.и.}$, а также уменьшение амплитуды разрядного импульса I_m . Установлено, что при рассогласовании разрядного контура с нагрузкой ($R_n = 2$ Ом) остаток энергии рабочего импульса, не рассеянный в нагрузке, возвращается обратно в конденсатор звена сжатия, в результате чего на характеристике индукции появляется серия затухающих колебаний параболической формы. Выяснено, что в этом случае длительность процесса обратного перемагничивания сердечника возрастает в 3,2 раза по сравнению с процессом перемагничивания при работе генератора на согласованную нагрузку. Предложенная модель коммутирующего дросселя может использоваться для численного моделирования электромагнитных процессов в магнит-

На этом же интервале времени потери энергии в сердечнике будут стремительно нарастать и достигнут своего максимального значения. После повторного насыщения дросселя конденсатор C_1 заново перезаряжается, но уже положительной полярностью с меньшей амплитудой. Теперь индукция поля нарастает, но в противоположном направлении, однако энергии этого импульса уже не достаточно для достижения положительного насыщения, так как действует встречный магнитный поток, который принуждает индукцию возвратиться к исходному значению. В результате этого на характеристике индукции поля (рис. 4, в – кривая 2) появляется серия параболических импульсов с затухающей амплитудой. Индукция поля примет исходное значение примерно через 240 мкс, что в 3,2 раза превышает длительность восстановления исходного состояния сердечника дросселя при работе генератора на согласованную нагрузку. Недостатком этого процесса является то, что к моменту формирования следующего импульса тока индукция поля в сердечнике может не принять исходное значение, что приведет к нестабильности срабатывания КД. Таким образом, режим работы генератора импульсов, при котором волновое

ных генераторах импульсов микро- и наносекундной длительности при оптимизации их энергетических и динамических показателей.

1. *Гарбер И.С.* Магнитные импульсные модуляторы. – М.: Советское радио, 1964. – 159 с.
2. *Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З.* Численные методы анализа. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
3. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники. Том 2. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
4. *Зацепин Н.Н.* Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса // Весті АН БССР. Сер. Фіз.-техн. наук. – 1973. – № 4. – С. 29–31.
5. *Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М.* Магнитные генераторы импульсов. – М.: Советское радио, 1968. – 475 с.
6. *Матюк В.Ф., Осипов А.А.* Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3–35.
7. *Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н.* Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и Связь, 1991. – 224 с.
8. *Христо А.И.* Магнитно-транзисторный генератор для формирования высоковольтных импульсов субмикросекундной длительности // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – №52. – С. 190–202.

УДК 621.373:519.62

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СХЕМІ МАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ

О.І.Христо¹, В.І.Зозульов², канд.техн.наук, **Д.О.Шолох²**, канд.техн.наук

¹ – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, пр. Жовтневий, 43-А, Миколаїв-18, 54018, Україна,

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

e-mail:dimashol@ukr.net

Виконано розширений аналіз існуючої моделі комутуючого дроселя. Запропоновано його вдосконалену модель, яка враховує нелінійність і неоднозначність характеристик намагнічування його осердя. Проведено чисельне моделювання перехідних процесів у магнітному генераторі імпульсів з ключем у зарядному контурі, отримано графіки електромагнітних характеристик процесу та проаналізовано режими його роботи за різних опорів навантаження і параметрах ланцюга підмагнічування. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: магнітний генератор імпульсів, комутуючий дросель, чисельне моделювання.

NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE SCHEME OF MAGNETIC PULSE GENERATOR

O.I.Khrysto¹, V.I.Zozulev², D.O.Sholokh²

¹ – Institute of Pulses Processes and Technologies of National Academy of Science of Ukraine, pr. Zhovtnevyi, 43-A, Mykolaiv, 54018, Ukraine,

² – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail:dimashol@ukr.net

A advanced analysis of the existing models of the switching choke is made. An improved model of the switching choke, which takes into account the non-linearity and the ambiguity of the magnetization characteristic of its core, is offered. Numerical simulation of transient processes in a magnetic pulse generator with a key in the charging circuit is produced. Graphs of electrical and magnetic characteristics of the process are received. The modes of its operation at different load resistances and parameters of the bias circuit are analyzed. References 8, figures 4.

Keywords: magnetic pulse generator, switching choke, numerical simulation.

1. *Garber I.S.* Magnetic pulse modulators. – Moskva: Sovetskoe radio, 1964. – 159 p. (Rus)
2. *Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z.* Numerical methods of analysis. – Moskva: Nauka, 1967. – 368 p. (Rus)
3. *Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.* Theory of Electrical. Vol. 2. – Sankt-Peterburg: Piter, 2003. – 576 p. (Rus)
4. *Zatsepin N.N.* The analytical function describing the course of the symmetric magnetic hysteresis loop // Vestsi AN BSSR. Seriya Fiz.-tekhn. nauk. – 1973. – № 4. – Pp. 29–31. (Rus)
5. *Meerovich L.A., Vatin I.M., Zaitsev E.F., Kandykin V.M.* Magnetic the pulse generators. – Moskva: Sovetskoe radio, 1968. – 475 p. (Rus)
6. *Matiuk V.F., Osipov A.A.* Mathematical models of the magnetization curve and magnetic hysteresis loops // Nerazrushaiushchii kontrol i diagnostika. – 2011. – № 2. – Pp. 3–35. (Rus)
7. *Rusin Yu.S., Glikman I.Ja., Gorskii A.N.* The electromagnetic elements radioelectronic equipment. – Moskva: Radio i Sviaz, 1991. – 224 p. (Rus)
8. *Khristo A.I.* Magnetically-transistorized generator for forming high-voltage pulses of submicron-second durations // Visnyk Naціонального Технічного Університету «ХПІ». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokykh napruh. – 2012. – № 52. – Pp. 190–202. (Rus)

Надійшла 28.05.2013

Остаточний варіант 20.12.2013