

УДК 621.314

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА**

И.В.Волков, чл.-корр. НАН Украины, **В.И.Зозулев**, канд.техн.наук, **С.В.Подольный**, канд.техн.наук,
Д.А.Шолох
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Проведен анализ процесса формирования выходных импульсов в оконечном узле магнитно-полупроводникового генератора. Установлены зависимости амплитуды и длительности фронта импульса тока от емкости корректирующего конденсатора C_K , шунтирующего RL -нагрузку. Определены значения емкости, при которых длительность фронта импульса тока минимальна либо амплитуда импульса тока и передаваемая в нагрузку мощность максимальны, а также C_K , при котором суммарно учитываются допустимые ограничения амплитуды импульса тока и длительности его фронта. Результаты анализа подтверждаются соответствующими экспериментальными данными. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор, узел магнитной компрессии, дроссель насыщения, наносекундные импульсы

Введение. Магнитно-полупроводниковые генераторы (МПГ) широко используются в силовой импульсной технике для создания высоковольтных многоамперных (мощных) импульсов микро- и наносекундного диапазона, используемых как в экспериментальных электрофизических установках, так и для новых технологических применений: в лазерных устройствах, электрогидравлических, магнитноимпульсной обработки металлов и др. Формирование в нагрузке требуемых импульсов, особенно наносекундного диапазона, во многом зависит от выбора схмотехники и параметров оконечного узла МПГ, и для ряда характерных нагрузок этот выбор может быть определяющим. Например, выходные импульсы МПГ, предназначенные для возбуждения лазеров на парах меди (ЛПМ) [1], при подаче их на газоразрядную трубку (ГРТ) выдают мощность излучения заметно меньше расчетной, если не соблюдены определенные соотношения между такими параметрами, как крутизна фронта импульса, общая его длительность и длительность на участке генерирования излучения, «пьедестал», амплитуда тока и фазировка его относительно напряжения и др. На практике для получения наилучших результатов прибегают к коррекции отмеченных параметров импульсов и соотношения между ними эмпирическим путем, изменяя в определенных пределах параметры основных элементов оконечного узла МПГ и вводя в него дополнительные элементы. Такой подход усложняется тем, что МПГ имеют, как правило, нагрузки с индуктивной составляющей, а также сложностями экспериментирования с высоковольтными (20...50кВ), сильноточными (до 0,5кА и более) установками, генерирующими импульсы наносекундной длительности с частотой повторения (20...100) кГц и более.

Поэтому актуальной является задача анализа процесса формирования импульсов в оконечном узле МПГ с использованием аналитических методов, компьютерного моделирования и численных расчетов в сочетании с физическим макетированием с целью установления оптимальных параметров основных и дополнительных параметров этого узла, при которых достигается, в частности, наибольшая крутизна и амплитуда импульса тока в RL -нагрузке МПГ.

Формирование выходных импульсов. На рис.1,*a* показана одна из эффективных схем МПГ, используемая для формирования импульсов питания ГРТ лазера на парах меди [7].

Транзисторный ключ S задает тактовые импульсы заряда конденсатора C_1 . Эти импульсы сжимаются с помощью узлов магнитной компрессии (УМК) [5], каждый из которых состоит из накопительного конденсатора, разряжающегося через коммутационный дроссель: $L_1, C_1; L_2, C_2$ – в первичной цепи повышающего трансформатора $T_1; L_3, C_3; L_4, C_4; L_5, C_5$ – в высоковольтной части МПГ. Параллельно ГРТ в оконечном, пятом, узле включены дополнительные корректирующие элементы: шунтирующий воздушный дроссель L_{III} и обостряющий фронт импульса конденсатор C_K . Процесс сжатия

(компрессии) во времени импульсов, начиная от задающего i_0 до окончного i_5 при соответствующем увеличении амплитуды импульсов тока $i_1 \dots i_5$, схематично иллюстрирует рис. 1, б, в и г.

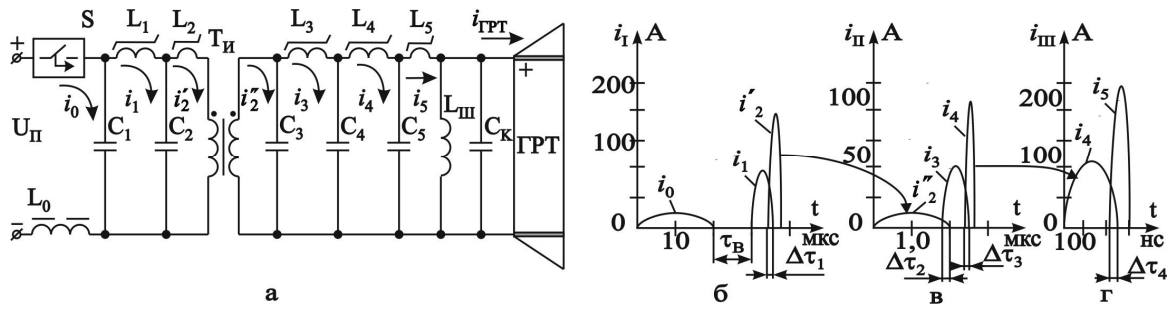


Рис. 1

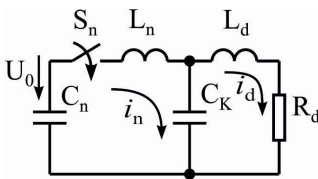


Рис. 2

Схема для анализа и моделирования окончного узла показана на рис. 2. Здесь с помощью ключа S_n имитируется насыщающийся дроссель L_5 в момент его коммутации (коммутация предполагается мгновенной), L_n – индуктивность насыщенного дросселя L_5 , C_n – емкость C_5 (вообще, емкость окончного, n -го каскада), заряженная предыдущим каскадом до напряжения U_0 , C_k – «обостряющий» конденсатор, а R_d , L_d – эквивалентные параметры нагрузки. В схеме рис. 2 не учитывается индуктивность $L_{ш}$, поскольку из-за большого ее значения (примерно в 10 ...15 раз больше L_n)

она практически не влияет на формирование импульса тока и служит для шунтирования межимпульсных токов.

При отсутствии корректирующего (обостряющего) конденсатора C_k замыкание ключа S_n приводит к разряду емкости C_n через индуктивность L_n на нагрузку (суммарная индуктивность $L = L_n + L_d$), и процесс описывается известным дифференциальным уравнением 2-го порядка, имеющим решение [3]

$$i_d = -C_n U_0 \frac{p_1 p_2}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (1)$$

где $p_{1,2} = -\frac{R_d}{2L} \pm \sqrt{\frac{R_d^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_n}}$ – корни характеристического уравнения, в рассматриваемом случае – комплексно сопряженные, поэтому время достижения первого максимума тока, обычно называемое временем фронта импульса τ_d^Φ , и сам этот максимум, т.е амплитуда I_d^m тока i_d вычисляются следующим образом:

$$\tau_d^\Phi = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{p_1 - p_2}, \quad I_d^m = -C_n U_0 \frac{p_1 p_2}{p_2 - p_1} (e^{p_1 \tau_d^\Phi} - e^{p_2 \tau_d^\Phi}). \quad (2)$$

Значения величин R_d , L_d являются заданными, значение емкости C_n определяется из условий запасенной энергии $W_{C_n} \approx (P_d^H \cdot \tau_g^H) / \eta_n = C_n U_0^2 / 2$, где P_d^H , τ_g^H – соответственно импульсная мощность в нагрузке и длительность импульса, η_n – КПД окончного УМК. Отсюда ясно, что при отсутствии C_k увеличение крутизны фронта τ_d^Φ и амплитуды I_d^m тока i_d возможно лишь с помощью предельного уменьшения значения индуктивности $L_n \rightarrow L_n^{\min}$. Это значение пропорционально квадрату числа витков w_{II} дросселя L_n [5]

$$w_n = \frac{1}{\Delta B_{nS} \cdot S_n} \cdot \int_0^{t_n} u_n dt, \quad (3)$$

где t_n – время насыщения дросселя L_n , ΔB_{nS} – приращение индукции сердечника за это время, S_n – поперечное сечение материала сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса. То есть уменьшить значение L_n можно только путем выбора материала сердечника с $\Delta B_{nS} \rightarrow \Delta B_{nS}^{\max}$ и $\mu_{nS} \rightarrow \mu_{nS}^{\max}$, где μ_{nS} – относительная магнитная проницаемость сердечника при насыщении.

Когда же этот выбор исчерпан применением наилучших из имеющихся для этих целей материалов, предлагается вводить в схему окончного узла корректирующий («обостряющий») конденсатор C_K . Обычно принято считать, что шунтирующая нагрузку емкость «заваливает» фронт импульса. Но здесь, именно из-за наличия в нагрузке индуктивности L_d , емкость C_K после замыкания ключа S_n успевает быстро зарядиться до некоторого напряжения $U_0 \approx (0,3..0,5)U_0$, и далее формирование импульса тока определяется, в основном, значениями емкости $C_K < C_n$ и индуктивности $L_d < L_n$.

Основные соотношения. Запишем интегро-дифференциальные уравнения для контурных токов i_d и i_n схемы рис. 2 при наличии C_K

$$\frac{1}{C_K} \int i_d dt + L_d \frac{di_d}{dt} + i_d R_d - \frac{1}{C_K} \int i_n dt = 0, \quad \frac{1}{C_Э} \int i_n dt + L_n \frac{di_n}{dt} - \frac{1}{C_K} \int i_n dt = 0.$$

Им соответствует система двух дифференциальных уравнений

$$(L_n p^2 + R_d p + \frac{1}{C_K})i_d + \frac{-1}{C_K}i_n = 0, \quad \frac{-1}{C_K}i_d + (L_n p^2 + \frac{1}{C_Э})i_n = 0, \quad (4,5)$$

где $p = d/dt$ – дифференциальный оператор, $C_Э = C_n C_K (C_n + C_K)^{-1}$ – эквивалентная емкость.

Двухконтурную цепь рис. 2 можно рассматривать как систему с двумя степенями свободы движения [4], координаты которой i_d и i_n описываются уравнениями (4,5), а характеристическое уравнение имеет вид

$$\begin{vmatrix} L_d \lambda^2 + R_d \lambda + C_K^{-1} & -C_K^{-1} \\ -C_K^{-1} & L_n \lambda^2 + C_Э^{-1} \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Четырем корням этого уравнения ($\lambda_1.. \lambda_4$) соответствуют четыре решения, сумма которых,

т.е. общее решение, определяет изменение токов во времени $i_d = \sum_{i=1}^4 N_1^{(i)} e^{\lambda_i t}$, $i_n = \sum_{i=1}^4 N_2^{(i)} e^{\lambda_i t}$, где $N_{1,2}^{(i)}$

– постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий.

Взаимное влияние токов друг на друга определяется членом $-C_K^{-1}$ уравнения (6), причем корни этого уравнения должны быть комплексно сопряженными

$$\lambda_{1,2} = -n_1 \pm jv_1, \quad \lambda_{3,4} = -n_2 \pm jv_2, \quad (7)$$

поскольку рассматривается только колебательный разряд конденсатора. Получается наложение затухающих колебаний тока i_d с периодом T_d на незатухающие колебания тока i_n с периодом T_n .

Уравнение тока в нагрузке i_d с учетом (7) можно теперь записать следующим образом:

$$i_d = e^{-n_1 t} [A_1^{(1)} \cos v_1 t + B_1^{(1)} \sin v_1 t] + e^{-n_2 t} [A_1^{(2)} \cos v_2 t + B_1^{(2)} \sin v_2 t]. \quad (8)$$

Поскольку C_K меньше C_n , то T_d меньше T_n (L_d соизмерима с L_n , то $L_n C_n > L_K C_K$), и на первую четверть периода колебаний тока i_d процессы в первом контуре мало влияют, поэтому для этого тока в первом приближении можно записать $i_d = I_d^m e^{-\delta t} \sin \omega' t$, где: $\delta = n_1 = R_d / 2L_d$, $\omega' = \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}$, $\omega_0 = (L_d C_K)^{-1/2}$, $I_d^m = U_0 / \omega' L_d$, $i_d(0) = 0$.

Оптимизация параметров. Достичь наибольшей мощности, передаваемой в нагрузку во время первого полупериода тока, можно как увеличением амплитуды I_d^m , так и уменьшением фронта нарастания импульса, т.е. минимизацией τ_d^Φ . Величина этой мощности определяется следующим выражением:

$$p_d(t) = i_d^2 R_d = I_d^{m2} R_d e^{-2\delta t} \sin^2 \omega' t = I_d^{m2} R_d e^{-2\delta t} (1 - \cos 2\omega' t) / 2. \quad (9)$$

Продифференцировав (9) и приравняв нулю, получим трансцендентное уравнение

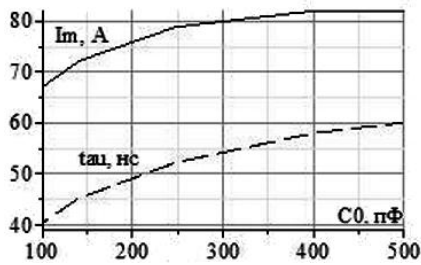
$$\omega' \sin 2\omega' t + \delta (\cos 2\omega' t - 1) = 0, \quad (10)$$

позволяющее определить значение $t = \tau_d^\Phi(p_{\max})$, при котором передаваемая мощность максимальна.

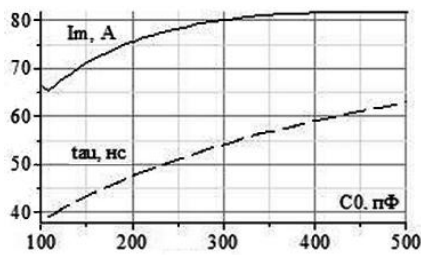
В качестве иллюстрации на рис. 3, а построены зависимости I_d^m и τ_d^Φ от емкости обостряющего конденсатора C_K для экспериментального генератора со следующими параметрами: $U_0 = 7,5$ кВ, $C_n = 500$ пФ, $L_n = 4,5$ мкГн, $L_d = 0,5$ мкГн, $R_d = 32$ Ом.

Эти зависимости находились путем численного интегрирования (используя программу *Maple 15*) дифференциального уравнения четвертой степени

$$L_n L_d C_n C_K \frac{d^4 i_d}{dt^4} + L_n C_n C_K R_d \frac{d^3 i_d}{dt^3} + (L_n C_n + L_d C_n + L_d C_K) \frac{d^2 i_d}{dt^2} + (R_d C_n + R_d C_K) \frac{d i_d}{dt} + i_d = 0, \quad (11)$$



а



б

Рис. 3

которое получено путем совместного решения уравнений (4) и (5) относительно тока нагрузки при следующих начальных условиях: $i_n(0) = 0$; $i_d(0) = 0$; $u_{C_n}(0) = U_0$; $u_{C_K}(0) = 0$.

На рис. 3,б показаны экспериментально снятые зависимости для того же генератора при тех же начальных условиях. Достаточно хорошее их совпадение в рабочей зоне свидетельствует о правомочности принятых при анализе допущений.

Из рис. 3 видно, что возможный минимум длительности фронта импульса достигается при $C_K=100$ пФ, возможный максимум его амплитуды – при $C_K=400$ пФ, в то время как максимум вкладываемой в нагрузку мощности, как это видно из зависимости на рис. 4, построенной по уравнениям (9), (10), – при $C_K=270$ пФ.

Максимизация функции (9) – наиболее подходящий вариант оптимизации, например, для ряда импульсных лазеров. Однако для других применений МПГ (лазеров на парах меди, эксимерных лазеров и др.) выбор наилучших параметров может производиться на основе «нечеткого» определения самого понятия *оптимальный* (по аналогии с терминологией фазы-логики [6]). Оптимальными при таком подходе будем считать такие пара-

метры генератора, при которых каждая из двух определяющих характеристик импульса – τ_d^ϕ (min) и I_d^m (max) – достигает своего возможного минимального и, соответственно, максимального значения лишь обязательно с учетом ограничений, накладываемых на смежную величину.

Если при определенной емкости обостряющего конденсатора $C_K = C_K^\tau$ достигается минимум длительности фронта импульса τ_d^ϕ (min), а при емкости $C_K = C_K^I$ – максимум амплитуды импульса I_d^m (max), то ограничения, накладываемые на диапазон допускаемых изменений I_d^m и τ_d^ϕ , предлагается записать в виде

$$\begin{cases} I_d^m = I_d^m(C_K^I) \dots I_d^m(C_K^\tau), \\ \tau_d^\phi = \tau_d^\phi(C_K^\tau) \dots \tau_d^\phi(C_K^I). \end{cases} \quad (12)$$

Затем на основе зависимостей $\tau_d^\phi(C_K)$ и $I_d^m(C_K)$ (рис. 3) построим безразмерные нормированные функции $\tau_d^{*\phi}(C_K)$ и $I_d^{*m}(C_K)$ в диапазоне ограничений (12) по следующим формулам:

$$I_d^{*m} = \frac{I_d^m(C_K) - I_d^m(C_K^I)}{I_d^m(C_K^I) - I_d^m(C_K^\tau)}, \quad \tau_d^{*\phi} = \frac{\tau_d^\phi(C_K) - \tau_d^\phi(C_K^\tau)}{\tau_d^\phi(C_K^I) - \tau_d^\phi(C_K^\tau)}. \quad (13)$$

Эти функции (рис. 5) по определению принимают значения от 0 до 1, причем нулю соответствует наибольшее (в соответствии с ограничениями) значение функции $I_d^m = I_d^m(C_K^I)$ и наименьшее значение функции $\tau_d^\phi = \tau_d^\phi(C_K^\tau)$, а единице – минимум функции $I_d^m = I_d^m(C_K^\tau)$ и максимум функции $\tau_d^\phi = \tau_d^\phi(C_K^I)$.

Оптимизационной целевой функцией назовем аддитивную функцию

$$F_\Sigma^* = I_d^{*m} + \tau_d^{*\phi}, \quad (14)$$

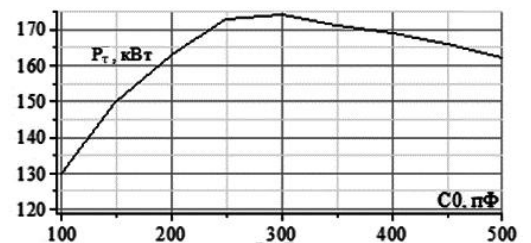


Рис. 4

где $I_d^{**m} = 1 - I_d^{*m}$ – инвертированная относительно единицы функция I_d^{*m} . Такое инвертирование позволяет получить обе составляющие функции F_{Σ}^* однотипными и свести задачу к поиску ее минимума.

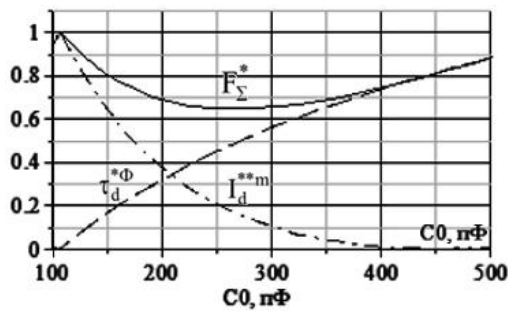


Рис. 5

от конкретного технологического применения МПГ. В частности, для питания лазеров на парах меди, как показали наши эксперименты и исследования, проводимые в Томском политехническом университете [2], лучший результат дает оптимизация по варианту г).

Наглядный пример влияния корректирующей емкости на улучшение параметров импульса дают экспериментальные эпюры импульса тока i_d (рис. 6, а, б) при двух значениях емкости $C_K = 0$, $C_K = 330$ пФ окончного узла принятого экспериментального генератора.

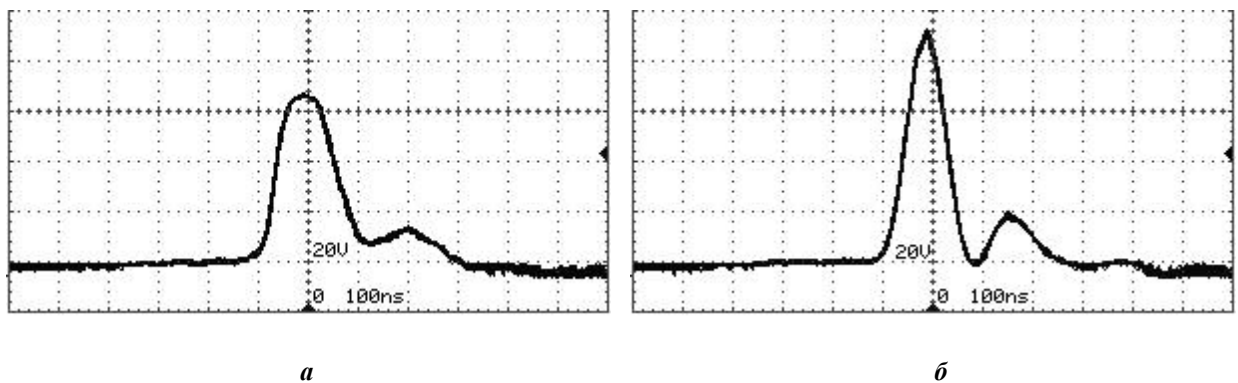


Рис. 6

Для этих же значений параметров на рис. 7 показаны расчетные эпюры импульсов (кривая 1 – без C_K , кривая 2 – с введенным в схему C_K), построенные на основе численного интегрирования уравнения (12). Как видно, по фронту и амплитуде экспериментальные и расчетные эпюры импульса тока i_d совпадают достаточно хорошо.

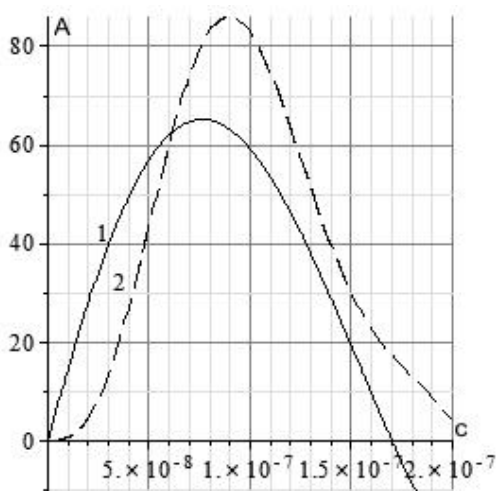


Рис. 7

Некоторые несоответствия по спаду импульса i_d объясняются тем, что в расчетной схеме не учтены паразитные индуктивности, емкости и др. Но в целом очевиден как положительный эффект от введения в схему емкости C_K , так и возможность использования предложенной методики расчета ее оптимальной величины.

Выводы. При расчете магнитно-полупроводниковых генераторов, формирующих выходные импульсы в наносекундном диапазоне, практически любую нагрузку следует рассматривать как имеющую индуктивную составляющую, соизмеримую с индуктивностью насыщения коммутирующего дросселя окончного узла МПГ и значительно влияющую на достижение предельно возможных амплитуд тока I_d^m и минимальных длительностей фронтов импульсов τ_d^{Φ} .

Существенное улучшение параметров I_d^m , τ_d^Φ выходных импульсов достигается, если параллельно RL -нагрузке МПГ включать корректирующий конденсатор C_K .

Предложенная методика позволяет определить оптимальное значение емкости этого конденсатора по одному из четырех предложенных критериев оптимизации, выбор которых обусловлен конкретным технологическим применением МПГ.

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга. – 1998. – 554 с.
2. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. – Томск: из-во Томского политехнического университета. – 2010. – 275 с.
3. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа. – 1972. – 447 с.
4. Крауфорд Ф. Берклевский курс физики. Волны. – М.: Наука. – 1984. – 512 с.
5. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. – М.: Советское радио. – 1972. – 475 с.
6. Новак В., Перфильева И., Мочкрож И. Математические принципы нечеткой логики. – М.: Физматлит, 2006. – 352 с.
7. Патент №40523, Україна, МПК НО3 К7/00. Магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних наносекундних імпульсів // Волков І.В., Гапченко Л.М., Зозульов В.І., Шиманський О.Л. // Промислова власність. – 2009. – № 7.

УДК 621.314

Дослідження процесу формування вихідних імпульсів магнітно-напівпровідникового генератора
І.В. Волков, чл.-кор. НАН України, **В.І. Зозулев**, канд.техн.наук, **С.В. Подольний**, канд.техн.наук, **Д.А. Шолох**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Проведено аналіз процесу формування вихідних імпульсів в кінцевому вузлі магнітно-напівпровідникового генератора. Встановлено залежності амплітуди й тривалості фронту імпульсу струму в активно-індуктивному навантаженні від ємності конденсатора C_K шунтуючого RL -навантаження. Визначено значення ємності, при якій тривалість фронту імпульсу мінімальна, чи амплітуда імпульсу і вкладена в навантаження потужність максимальні, а також C_K , при якому сумарно враховуються допустимі обмеження амплітуди імпульсу струму й тривалості його фронту. Результати аналізу підтверджуються відповідними експериментальними даними. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: магнітно-напівпровідниковий генератор, вузол магнітної компресії, дросель насичення, наносекундні імпульси.

Research of output pulse magnetic-semiconductor generator formation
I.V.Volkov, V.I.Zozulev, S.V.Podolnyi, D.O.Sholokh
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine.

The analysis of the output pulses formation in the terminating node of a magnetic-semiconductor generator (MSG) was performed. The dependencies of amplitude and pulse rise time of current in an active-inductive load from values capacitance of C_K , shunt RL -load, was defined. The capacitance at which the current pulse rise time is minimal, or the amplitude of pulse and invested in load power is maximum, and capacitance C_K at which takes into account the total allowable limit of current pulse amplitude and duration of its front is determinate. The results of the analysis checked by experimental data. References 7, figures 7.

Key words: magnetic semiconductor generator, magnetic compression node, saturation, nanosecond pulses.

1. Batenin V.M., Buchanov V.V., Kazarian M.A., Klimovskiy I.I., Molodykh, E.I. Lasers based on self-contained metal atom. – M.: Naukova kniha. – 1998. – 554 p. (Rus.).
2. Evtushenko G.S., Shiianov D.V., Gubarev F.A. Metal-vapor lasers with high pulse repetition rate. Tomsk Polytechnic University. – 2010. – 275 p. (Rus.).
3. Kaplianskiy A.E., Lysenko A.P., Polotovskiy L.S. Theory of Electrical Engineering. – M.: Vysshaya shkola. – 1972. – 447 p. (Rus.).
4. Crawford F. Berkeley Physics Course. The wave. – M.: Science. – 1984. – 512p. (Rus.).
5. Meerovich L.A., Vatin I.M., Zaitsev E.F., Kandykin V.M. The magnetic pulse generators. – Moscow: Sovetskoe radio. – 1968. – 475 p. (Rus.).
6. Novak V, Perfiljev I, Mochkrozh I. Mathematical principles of fuzzy logic. – M.: Fizmatlit, 2006. – 352. (Rus.).
7. Patent №40523, Ukraine, MPK NO3 K7/00. Magnetic semiconductor generator of unipolar nanosecond pulses // Volkov I.V., Hapchenko L.M., Zozulov V.I., Shymansky O.L. // Promyslova vlasnist. – 2009. – № 7. (Ukr).
- 8.

Надійшла 23.11.2011
Received 23.11.2011