

УДК 621.384.64

И.И. ВИНТИЗЕНКО, А.И. МАЩЕНКО, В.Ю. МИТЮШКИНА

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

Описан принцип действия, электрическая схема генератора импульсов высокого напряжения. Проектные параметры генератора: выходное напряжение на активной нагрузке равно 450 кВ, ток в нагрузке ~ 1 кА, длительность импульса напряжения на нагрузке ~ 1 мкс, частота повторения импульсов 1 кГц. Работа генератора происходит по принципу последовательного разряда трёх линий магнитного импульсного генератора (МИГ) через преобразующий *LC*-фильтр на высоковольтный трансформатор. Задержка разряда второй и третьей линий МИГ осуществляется увеличением потокосцеплений дросселей последних звеньев сжатия. Приведены расчёты преобразующего *LC*-фильтра, служащего для сглаживания пульсаций на вершине импульса. Представлены результаты моделирования работы генератора на нагрузку 450 Ом.

Введение

В НИИ ядерной физики ТПУ с 90-х годов разрабатываются линейные индукционные ускорители (ЛИУ), в которых для питания индукторов используются магнитные импульсные генераторы (МИГ). Магнитный импульсный генератор представляет собой последовательность звеньев сжатия (*LC*-контуров с увеличивающейся частотой собственных колебаний $\omega_k = 1/\sqrt{L_{n_k} C_{n_k}/2}$, где L_{n_k} – индуктивность обмотки дросселя в насыщенном состоянии, C_{n_k} – эквивалентная ёмкость конденсаторов звена сжатия). Магнитное звено сжатия содержит два конденсатора C_{k-1} и C_k , между которыми включен дроссель насыщения L_{k-1} , являющийся магнитным коммутатором. Дроссель, как коммутирующий элемент, может находиться в двух состояниях – состоянии «разомкнуто» (материал сердечника ненасыщен), когда происходит заряд конденсатора C_{k-1} , и в состоянии «замкнуто» (материал сердечника насыщен), когда энергия из конденсатора C_{k-1} передаётся в конденсатор C_k . Ёмкости конденсаторов звеньев сжатия C_{k-1} , C_k , C_{k+1} , ..., C_{k+n} обычно равны между собой. Но каждый следующий дроссель насыщения L_k по сравнению с предыдущим L_{k-1} имеет меньшее число витков обмотки, то есть меньшую индуктивность при насыщенном состоянии сердечника. При этом передача энергии от каждого предыдущего магнитного звена к следующему звуно происходит за меньший интервал времени, чем и обеспечивается компрессия электромагнитной энергии и рост мощности импульсов.

ЛИУ с магнитной коммутацией энергии, в отличие от установок на разрядниках, могут устойчиво работать с частотой следования импульсов несколько килогерц. Высокая стабильность амплитудных и временных характеристик формируемых импульсов, простота конструкции, отсутствие профилактических работ наряду с неограниченным ресурсом работы являются важным достоинством магнитных коммутаторов.

Основным недостатком известных ЛИУ на магнитных элементах является малая длительность импульса выходного напряжения, составляющая несколько сотен наносекунд. Из принципа действия ЛИУ не следует ограничений на длительность импульса [1]. Однако увеличение длительности импульса до 1 мкс и более ведёт к увеличению размеров индукционной системы и соответственно к увеличению массы ферромагнитного материала сердечников, которая становится не-приемлемо большой. В то же время использование дросселей насыщения как магнитных коммутаторов, способных обеспечить заряд формирующих линий электрической длиной до 1 мкс, приводит к росту поперечного сечения сердечников, а значит, и к большей индуктивности коммутаторов, что делает невозможным формирование прямоугольного импульса выходного напряжения. Поэтому ЛИУ на основе магнитных элементов создаются для формирования импульсов выходного напряжения наносекундной длительности.

При разработке генератора высоковольтных импульсов микросекундного диапазона был использован принцип последовательного разряда нескольких линий МИГ на высоковольтный трансформатор [2]. Возникающие при этом колебания амплитуды импульса сглаживаются *LC*-фильтром.

Принципиальная схема генератора

На рис. 1 представлена схема генератора микросекундных импульсов, где показано: первичный накопитель C_0 , тиристорный коммутатор Т, импульсный трансформатор ИТр, магнитный импульсный генератор, содержащий два звена сжатия и состоящий из конденсаторов C_1 , C_2 , C_{31} , C_{32} , C_{33} и дросселей насыщения L_{11} , L_{12} , L_{13} , L_{21} , L_{22} , L_{23} , преобразующий фильтр с элементами L_ϕ и C_ϕ , высоковольтный трансформатор ВВТр, источники размагничивания ИР-1 и ИР-2, активная нагрузка R_h .

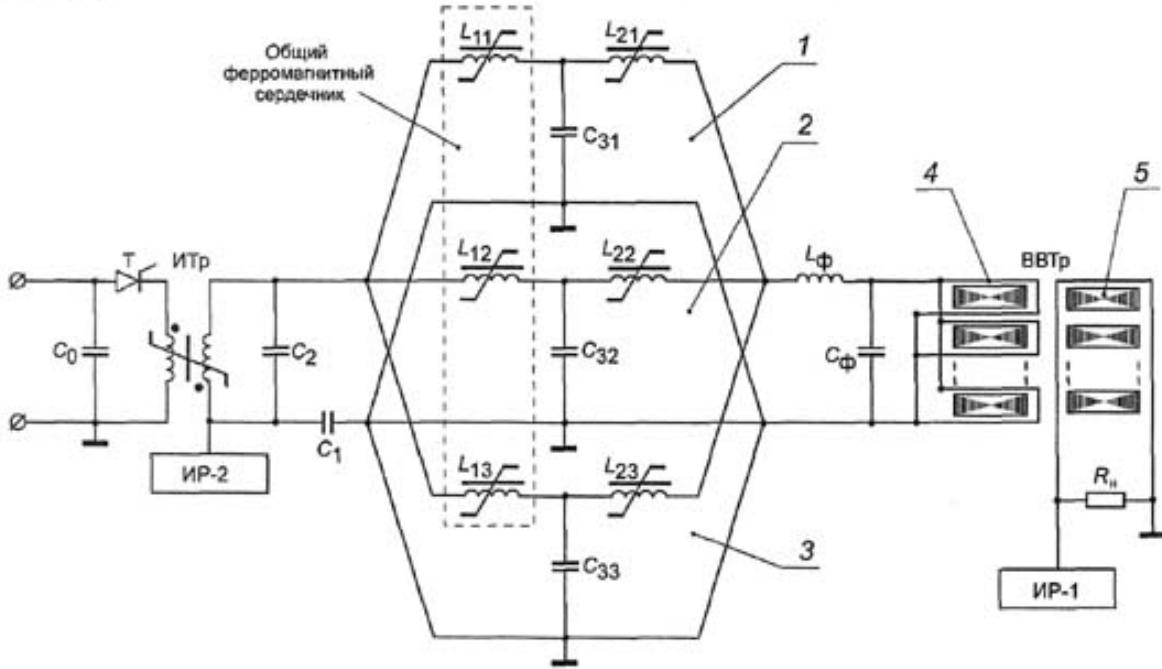


Рис. 1. Принципиальная схема генератора микросекундных импульсов

Схема МИГ состоит из трёх параллельных линий 1, 2 и 3 с элементами $L_{11} - C_{31} - L_{21}$, $L_{12} - C_{32} - L_{22}$ и $L_{13} - C_{33} - L_{23}$ соответственно. Дроссели L_{11} , L_{12} , L_{13} имеют общий ферромагнитный сердечник с тремя одинаковыми обмотками. Первое звено сжатия МИГ соединено с вторичной обмоткой импульсного трансформатора ИТр, последние звенья каждой линии МИГ подключены через фильтр $L_\phi C_\phi$ к выводам витков намагничивания 4 индукторов 5 высоковольтного трансформатора ВВТр. Для размагничивания сердечников ВВТр используется источник размагничивания ИР-1, источник размагничивания ИР-2 служит для размагничивания сердечников высоковольтного трансформатора ВВТр, всех дросселей и импульсного трансформатора ИТр.

Высоковольтный трансформатор изготавливается по принципу индукционной системы ЛИУ в виде набора индукторов – ферромагнитных сердечников, охваченных витками намагничивания. Такая компоновка позволяет минимизировать индуктивность рассеяния высоковольтного трансформатора. Количество витков намагничивания (первичной обмотки) ВВТр для снижения объёма ферромагнитного материала индукторов увеличено с одного до трёх в отличие от традиционной одновитковой конструкции. Для того чтобы сохранить скорость роста напряжения на вторичной обмотке ВВТр, вторичные витки индукторов, собранные в группы, также имеют по три витка (выходной импульс длительностью 1 мкс даёт возможность увеличить разрядную индуктивность).

Принцип работы генератора

Первичный источник питания $C_0 = 2400 \text{ мкФ}$ разряжается на конденсаторы $C_1 = 1,128 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 1,128 \text{ мкФ}$ через импульсный трансформатор ИТр при включении тиристорного коммутатора Т и заряжает их. Под действием напряжения на C_2 сердечник ИТр насыщается и C_2 перезаряжается через индуктивность вторичной обмотки $L_{\text{ИТр}2}$ импульсного трансформатора ИТр. При этом сумма напряжений на C_1 и C_2 прикладывается к виткам одинаковых обмоток дросселей L_{11} , L_{12} , L_{13} , расположенных на общем сердечнике. Для исключения передачи энергии между первыми звенями сжатия в линиях МИГ необходимо, чтобы процессы в них протекали одновременно. Поэтому в первых звеньях используются элементы с одинаковыми параметрами и номиналами. Ве-

величины потокосцеплений дросселей L_{11} , L_{12} , L_{13} выбираются такими, чтобы к моменту времени, когда конденсатор C_2 полностью перезарядится, общий сердечник дросселей насытился, то есть выполнось условие

$$\Psi_{L11} = \Psi_{L12} = \Psi_{L13} = \pi \sqrt{L_{\text{ИТР2}} C_2 (U_{C1} + U_{C2}) / 2}, \quad (1)$$

где $\Psi_{L11} = \Psi_{L12} = \Psi_{L13} = \omega_{11} S_1 \Delta B$; ω_{11} и S_1 – число витков обмоток и площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника дросселей L_{11} , L_{12} , L_{13} ; ΔB – приращение индукции (для пермаллоя 50 НП $\Delta B = 2,5$ Тл); $\pi \sqrt{L_{\text{ИТР2}} C_2} = 13,1$ мкс – время перезаряда C_2 ; U_{C1} и U_{C2} – амплитуды зарядного напряжения конденсаторов C_1 и C_2 ; $(U_{C1} + U_{C2}) / 2 = 27,5$ кВ – среднее действующее напряжение на обмотках дросселей L_{11} , L_{12} , L_{13} . Конструктивно дроссели L_{11} , L_{12} , L_{13} имеют 11 общих сердечников из пермаллоя 50 НП: внешний диаметр $D_{L1} = 1,1$ м, внутренний диаметр $d_{L1} = 0,5$ м, ширина $l_{L1} = 0,018$ м, коэффициент заполнения сталью объема сердечника $K = 0,8$, – с тремя обмотками с числом витков $\omega_{11} = \omega_{12} = \omega_{13} = 3$. Использование дросселей L_{11} , L_{12} , L_{13} с общим сердечником позволяет уменьшить размеры и вес магнитных коммутаторов первых звеньев сжатия и синхронизовать импульсы отдельных линий МИГ.

При насыщении сердечника дросселей L_{11} , L_{12} и L_{13} его магнитная проницаемость уменьшается от $\mu \approx 10^4$ до $\mu \rightarrow 1$ и индуктивность обмоток дросселей падает до величины индуктивности воздушной обмотки. Вследствие этого конденсаторы C_1 и C_2 начинают разряжаться на конденсаторы C_{31} , C_{32} и C_{33} , включенные параллельно. Для эффективной передачи энергии должно выполняться следующее соотношение между ёмкостями конденсаторов:

$$C_1 + C_2 = C_{31} + C_{32} + C_{33} = 0,564 \text{ мкФ}. \quad (2)$$

Под действием напряжения на C_{31} , C_{32} , C_{33} , в интервале времени их заряда, происходит перемагничивание сердечников дросселей (магнитных коммутаторов) последних звеньев сжатия L_{21} , L_{22} и L_{23} . Величина потокосцепления Ψ_{L21} дросселя L_{21} должна быть достаточной, чтобы завершить разряд конденсаторов C_1 и C_2 на конденсаторы C_{31} , C_{32} и C_{33} , то есть соответствовать следующему условию:

$$\Psi_{L21} = U_{C31} \cdot \Delta t_1 / 2, \quad (3)$$

где $U_{C31} = U_{C32} = U_{C33} = 52$ кВ – амплитуда зарядного напряжения конденсаторов C_{31} , C_{32} и C_{33} ; Δt_1 – время разряда конденсаторов C_1 и C_2 на конденсаторы C_{31} , C_{32} и C_{33} :

$$\Delta t_1 = \pi \sqrt{L_{11} \frac{(C_1 + C_2)(C_{31} + C_{32} + C_{33})}{C_1 + C_2 + C_{31} + C_{32} + C_{33}}} = 1,18 \text{ мкс}. \quad (4)$$

Здесь L_{11} – общая индуктивность разрядного контура.

Ёмкости конденсаторов должны быть одинаковыми $C_{31} = C_{32} = C_{33} = 0,188$ мкФ, чтобы осуществить высокую эффективность передачи энергии от первого звена сжатия ко второму, а также обеспечить равенство амплитуды зарядных напряжений и длительности процессов заряда и разряда.

Дроссель L_{21} можно изготовить из 4 сердечников (пермаллои 50 НП) с наружным диаметром $D_{L21} = 0,5$ м, внутренним диаметром $d_{L21} = 0,22$ м, шириной $l_{L21} = 0,025$ м, $K = 0,8$, со сплошной медной одновитковой обмоткой. Индуктивность обмотки дросселя L_{21} при насыщенном состоянии сердечников составляет

$$L_{21} = \frac{\mu_0 \cdot \omega_{21}^2 \cdot l_{21} \cdot \ln \frac{D_{21}}{d_{21}}}{2\pi} = 0,027 \text{ мкГн}, \quad (5)$$

где $\omega_{21} = 1$ – число витков обмотки; $D_{21} = 0,525$ м, $d_{21} = 0,194$ м – внешний и внутренний диаметры обмотки; $l_{21} = 0,134$ м – аксиальный размер витка обмотки.

Чтобы получить длительность выходного импульса генератора 1 мкс, необходимо сформировать на общем выходе трёх линий МИГ три импульса, каждый длительностью $\sim 0,7$ мкс, с временной задержкой 0,35 мкс между первым и вторым импульсом и $\sim 0,7$ мкс между первым и третьим импульсом. Задержать выходной импульс второй линии МИГ на 0,35 мкс можно за счёт увеличения потокосцепления дросселя L_{22} . Увеличив потокосцепление дросселя L_{23} , можно задержать на 0,7 мкс выходной импульс третьей линии МИГ.

Для выполнения этого условия потокосцепление дросселя насыщения L_{22} выбирается равным

$$\Psi_{L22} = U_{C32} (\Delta t_1 + 0,35 \text{ мкс}) / 2. \quad (6)$$

Дроссель L_{22} может быть изготовлен из 5 сердечников с размерами $D_{L22} = 0,5$ м, $d_{L22} = 0,22$ м, $I_{L22} = 0,025$ м, $K = 0,8$, материал пермаллой 50 НП, со сплошной медной одновитковой обмоткой. Индуктивность обмотки дросселя L_{22} в насыщенном состоянии сердечника равна

$$L_{22} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \omega_{22}^2 \cdot I_{22} \cdot \ln \frac{D_{22}}{d_{22}} = 0,032 \text{ мкГн}, \quad (7)$$

где $\omega_{22} = 1$ – число витков обмотки; $D_{22} = 0,525$ м, $d_{22} = 0,194$ м – внешний и внутренний диаметры обмотки; $I_{22} = 0,162$ м – аксиальный размер витка обмотки.

Потокосцепление дросселя насыщения L_{23} выбирается из условия

$$\Psi_{L23} = U_{C33} (\Delta t_1 + 0,7 \text{ мкс}) / 2. \quad (8)$$

Дроссель L_{23} можно изготовить из 6 сердечников с размерами $D_{L23} = 0,5$ м, $d_{L23} = 0,22$ м, $I_{L23} = 0,025$ м, $K = 0,8$, материал пермаллой 50 НП со сплошной медной одновитковой обмоткой. Индуктивность обмотки дросселя L_{23} в насыщенном состоянии сердечника равна

$$L_{23} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \omega_{23}^2 \cdot I_{23} \cdot \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} = 0,038 \text{ мкГн}, \quad (9)$$

где $\omega_{23} = 1$ – число витков обмотки; $D_{23} = 0,525$ м, $d_{23} = 0,194$ м – внешний и внутренний диаметры обмотки; $I_{23} = 0,19$ м – аксиальный размер витка обмотки.

Импульс, формируемый на входе высоковольтного трансформатора при последовательном разряде трёх линий МИГ, имеет постоянную и переменную составляющие тока и напряжения [3]. Переменная составляющая имеет большую величину, которая достигает 20 % от амплитуды импульса, а её длительность в 5–8 раз меньше, чем длительность рабочего импульса, которая составляет ~ 1,4 мкс по основанию. Соответственно частота импульсов переменной составляющей в 5–8 раз больше, чем частота основного импульса. Известно, что при протекании импульсного тока потери энергии в элементах электротехнического устройства растут с увеличением частоты импульсов.

Наличие пульсаций (высокочастотной составляющей) на вершине импульса ведёт к увеличению потерь энергии в ферромагнитных сердечниках, проводнике обмоток и в распределенной ёмкости (в изоляции) высоковольтного трансформатора. Наибольшими являются потери энергии на размагничивание сердечников, обусловленные в основном действием вихревых токов и магнитной вязкости. Рост потерь энергии ведёт к снижению КПД высоковольтного трансформатора и снижению общего КПД генератора. Потери энергии в высоковольтном трансформаторе оказывают большое влияние и на технические характеристики устройства, поскольку сопровождаются дополнительными тепловыделениями в элементах конструкции, ростом температуры охлаждающей и изолирующей жидкости (трансформаторного масла) и, как следствие, необходимостью снижения рабочей частоты генератора либо уменьшению количества импульсов в пакетном режиме. Кроме того, значительные пульсации на вершине выходных импульсов высокого напряжения снижают эффективность применения таких устройств для генерации сильноточных пучков заряженных частиц, которые при этом приобретают большой энергетический разброс. Устранение колебаний на плоской части импульса является важным также при питании мощных релятивистских магнетронных СВЧ-генераторов. Поэтому в идеальном случае амплитуда импульса выходного напряжения должна оставаться постоянной. Таким образом, между тремя линиями МИГ и высоковольтным трансформатором необходимо иметь устройство, с помощью которого можно было бы преобразовывать форму импульса выходного напряжения. Таким устройством является $L_\phi C_\phi$ -фильтр.

Индуктивность L_ϕ , включенная последовательно в цепь тока разряда трёх линий МИГ, должна иметь большое сопротивление для переменной составляющей тока и малое для постоянной составляющей. Конденсатор C_ϕ , подключенный параллельно виткам первичной обмотки ВВТр, наоборот, должен иметь малое сопротивление для переменной составляющей тока и большое для постоянной составляющей. При этом величины индуктивности L_ϕ и конденсатора C_ϕ определяются из расчетного соотношения

$$L_\phi C_\phi = \frac{k_{cr} + 1}{(m \cdot \omega_C)^2}, \quad (10)$$

где k_{cr} – коэффициент сглаживания пульсаций; m – количество импульсов тока разряда линий МИГ за один период выходного напряжения; ω_C – угловая частота выходного напряжения.

Величину индуктивности L_ϕ определяют из условия непрерывности тока в нагрузке. При этом условии минимальное значение индуктивности $L_{\phi \min}$ для предлагаемого устройства выражается соотношением

$$L_{\phi \min} = \frac{2 \cdot R_u'}{(m^2 - 1)m \cdot \omega_C} = 0,026 \text{ мкГн}, \quad (11)$$

где $R'_{\text{н}} = R_{\text{н}} / N^2 = 1,389$ Ом – приведенное сопротивление нагрузки согласно эквивалентной схеме; $R_{\text{н}} = 450$ Ом – проектная величина сопротивления нагрузки; $N = 18$ – коэффициент трансформации (число индукторов) ВВТр; $m = 3$ – число импульсов тока от трёх линий МИГ; $\omega_C = 2\pi/T_C = 4,485 \times 10^6$ рад/с – угловая частота выходного напряжения; $T_C = 1,4$ мкс – длительность (период) импульса выходного напряжения.

При расчете следует выбирать индуктивность $L_\phi > L_{\phi \min}$, а конденсатор C_ϕ — с ёмкостью, определяемой из выражения (10).

$$C_\phi = \frac{k_{\text{cr}} + 1}{(m \cdot \omega_c)^2 \cdot L_h} = 0,25 \text{ MK}\Phi. \quad (12)$$

Здесь величина индуктивности принимается равной $L_\phi = 0,1$ мГн, а коэффициент сглаживания $k_s = 3,5$. При этом должно выполняться условие

$$\omega_b \leq 0.5 m \cdot \omega_c, \quad (13)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{L_\Phi C_\Phi}$ – собственная частота преобразующего устройства.

Соблюдение условия (13) позволяет исключить возникновение резонансных явлений на частотах, близких к частоте пульсаций. Это условие всегда выполняется при коэффициенте сглаживания $k_{\text{sg}} \geq 3$.

Конструктивно преобразующий фильтр может быть выполнен в виде цилиндрической сборки, состоящей из блока конденсаторов с ёмкостью C_{ϕ} и соединительных проводов с индуктивностью L_{ϕ} . Величина ёмкости $C_{\phi} = 0,25 \text{ мкФ}$ набирается из 10 конденсаторов К75-74 – 40 кВ – 0,1 мкФ, включенных последовательно – параллельно. Индуктивность $L_{\phi} = 0,1 \text{ мГн}$ образуется при использовании трех многожильных проводов диаметром 15 мм и длиной 0,4 м, соединяющих однополярные выводы МИГ и первичной обмотки ВВТр.

Компьютерное моделирование работы генератора

Поскольку генератор высоковольтных импульсов является трудоёмкой и дорогостоящей в изготовлении установкой, этап моделирования является очень важным.

Элементы установки представляются сложными эквивалентными схемами, поэтому качественный и достаточно быстрый расчёт генератора возможен только с применением компьютерных средств, что позволяет учитывать практически все физические процессы при компрессии энергии. Схема моделирования, представленная в элементах программы Electronics Workbench, соответствует эквивалентной электрической схеме генератора, в которой параметры элементов получены расчётным путём. Процессы в модели рассматриваются с момента времени t_0 , когда конденсаторы C_0 заряжены, включается тиристорный коммутатор Т и C_0 начинает разряжаться на конденсаторы C_1 и C_2 через импульсный трансформатор ИТр.

Процесс компрессии энергии от момента разряда конденсаторов C_0 первичного накопителя до момента передачи энергии в нагрузку $R_u = 450 \text{ Ом}$ (заряд C_2 от C_0 через ИТр – перезаряд C_1 – заряд C_{31}, C_{32}, C_{33} – формирование выходного импульса) показан на рис. 2.

На рис. 3 демонстрируются кривые напряжения U_n и тока I_n выходного импульса генератора на нагрузке 450 Ом без применения в схеме преобразующего $L_F C_F$ -фильтра. Величина пульсаций на вершине импульса достигает $\sim 20\%$ его амплитуды.

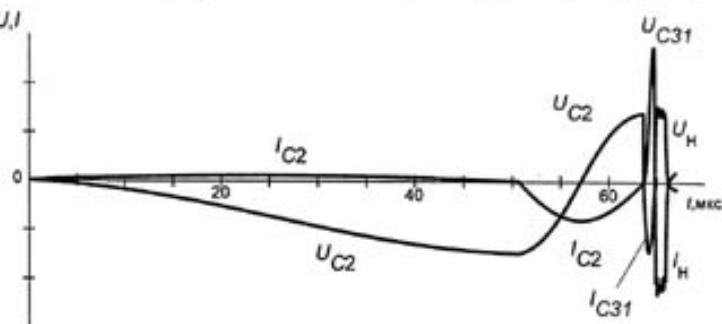


Рис. 2. Процесс компрессии энергии

На рис. 4 показаны кривые напряжения U_n и тока I_n выходного импульса генератора на нагрузке 450 Ом при использовании в схеме преобразующего $L_\phi C_\phi$ -фильтра. Параметры генератора: амплитуда напряжения 450 кВ, амплитуда тока 1 кА, длительность импульса ~ 1 мкс на уровне 0,9. Видно, что при использовании индуктивности L_ϕ и ёмкости C_ϕ , включенных между общим выходом трёх линий МИГ и витками первичной обмотки ВВТр, происходит эффективное сглаживание пульсаций на вершине выходного импульса, который приобретает трапецидальную форму с плоской вершиной. Коэффициент сглаживания имеет величину $k_{cr} = 3-4$. Увеличение $k_{cr} > 4$ ведёт к затягиванию фронтов импульса из-за увеличения ёмкости конденсатора C_ϕ .

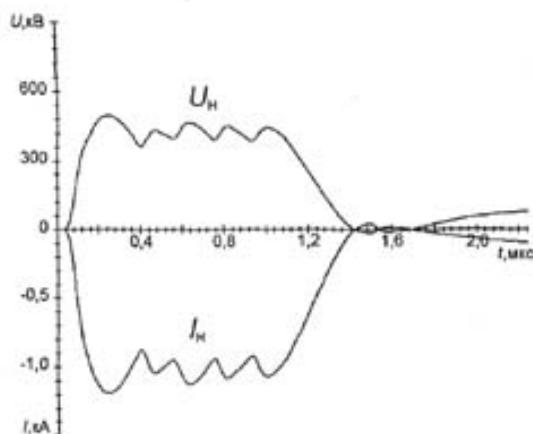


Рис. 3. Выходные импульсы напряжения U_n и тока I_n микросекундной длительности на нагрузке 450 Ом в устройстве без преобразующего $L_\phi C_\phi$ -фильтра

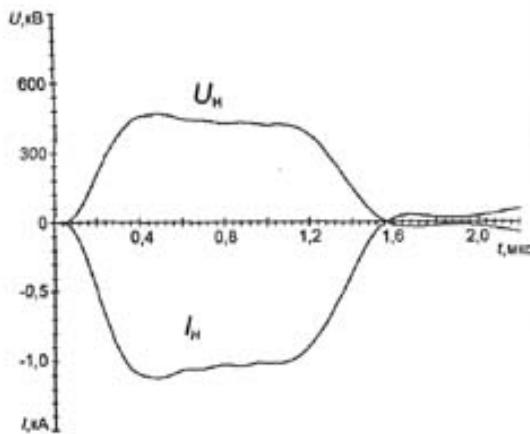


Рис. 4. Выходные импульсы напряжения U_n и тока I_n микросекундной длительности на нагрузке 450 Ом в устройстве с преобразующим $L_\phi C_\phi$ -фильтром

Проведенное моделирование позволило скорректировать характеристики элементов генератора и оптимизировать его выходные параметры.

Заключение

Спроектированный генератор высоковольтных импульсов, построенный по принципу последовательного разряда трёх параллельных линий МИГ через сглаживающий фильтр на витки первичной обмотки ВВТр, позволяет получить на нагрузке выходной импульс микросекундной длительности с напряжением 450 кВ при токе 1 кА. Расчётная частота повторения импульсов составляет 1 кГц. Синхронизация разряда трёх линий МИГ достигается использованием общего сердечника для дросселей первых звеньев сжатия МИГ, а также выбором элементов с равными параметрами. Последовательный разряд линий МИГ обеспечивается увеличенным потокосцеплением дросселей в последних звеньях сжатия.

Включение в электрическую цепь между последними звеньями сжатия трёх линий МИГ и первичной обмоткой ВВТр двух реактивных элементов, а именно индуктивности L_ϕ и конденсатора C_ϕ позволяет сгладить пульсации амплитуды выходного импульса генератора. Это снижает потери энергии в высоковольтном трансформаторе и ведёт к увеличению его КПД и соответственно общего КПД генератора.

Возможность формирования микросекундного импульса квазипрямоугольной формы с плоской вершиной расширяет функциональные возможности использования высоковольтного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. – М.: Атомиздат, 1978. – 245 с.
2. Винтизенко И.И. // Патент на изобретение № 2265973 РФ. Линейный индукционный ускоритель. – Опубл. в БИ № 34. – 2005.
3. Vintizenko I.I., Mashchenko A.I., Mityushkina V.Yu. // Proc. 14 Symposium on High Current Electronics. 10–15 September, 2006, Tomsk, Russia. – Tomsk, 2006. – P. 262–265.