

7. Зимин В.П. Изображение и анализ граничных условий для уравнения теплопроводности на фазовых плоскостях // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 29–33.
8. Зимин В.П. Развитие метода фазовой плоскости для анализа решений краевых задач // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 17–21.
9. McCandless R.J., Wilkins D.R., Derby S.L. Theory of thermionic converter volume phenomena // IEEE Conf. Record of 1969 Thermion. Convers. Spes. Conf. – Carmel, California (USA), Oct., 1969. – P. 163–169.
10. Руманов Э.Н. Критические явления вдали от равновесия // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – № 1. – С. 103–112.

Поступила 19.02.2013 г.

УДК 621.384.64:539.12.04

ЧАСТОТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ДВУМЯ РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

А.И. Мащенко

Томский политехнический университет
E-mail: mashchenko@tpu.ru

Представлена электрическая схема частотного линейного индукционного ускорителя с магнитной коммутацией, формирующего на нагрузке последовательность двух разнополярных импульсов, отделенных друг от друга временным интервалом. Даны методика расчета элементов схемы и результаты расчета параметров выходных импульсов ускорителя при моделировании его работы на активную нагрузку. Полученные расчетные параметры выходных импульсов показывают принципиальную возможность прикладного использования таких ускорителей, например, в технологических процессах в области материаловедения.

Ключевые слова:

Линейный индукционный ускоритель, магнитный импульсный генератор, разнополярные импульсы напряжения, омическая нагрузка.

Key words:

Linear induction accelerator, magnetic pulsed generator, bipolar voltage pulse, ohmic load.

Введение

Линейные индукционные ускорители (ЛИУ) с магнитной коммутацией, разработанные в Физико-техническом институте ТПУ, используются в основном в качестве источников питания релятивистских СВЧ приборов [1]. Отсутствие в ЛИУ на магнитных элементах газоразрядных коммутаторов снимает принципиальные ограничения на частоту повторения импульсов. В продолжительном режиме работы эта частота ограничена тепловыми нагрузками на элементы ЛИУ, в первую очередь на сердечники магнитных коммутаторов (дросселей насыщения), а при кратковременном включении ускорителя в режиме пакета импульсов с еще меньшим периодом следования – частотными возможностями тиристорного зарядного устройства, т. е. временем восстановления тиристоры и временем заряда накопителя первичного источника питания [2]. Эффективность применения ЛИУ с магнитной коммутацией энергии в проводимых экспериментальных исследованиях обусловлена высокой стабильностью их выходных параметров, высокой частотой следования импульсов, достигающей нескольких килогерц, и практически неограниченным ресурсом работы. Такой ускоритель может работать в любом однополярном режиме: отрицательном, когда нагрузкой является, например, релятивистский магнетрон, или положительном – при работе на отражательный триод. Полярность рабочих импульсов ЛИУ может изменяться перестановкой клемм на выходе первичного источника питания.

С целью расширения функциональных возможностей ЛИУ на магнитных элементах, например, для их практического применения в технологических процессах в области материаловедения, необходимо создать устройство, способное сформировать на нагрузке два высоковольтных разнополярных импульса напряжения с временной задержкой между ними [3]. Решение данной задачи позволило бы в случае прикладного использования такой установки повысить ее производительность, эффективность и надежность, а также значительно упростить эксплуатацию.

В настоящей работе представлены схема, методика расчета параметров элементов и результаты моделирования работы ЛИУ с магнитной коммутацией энергии, способного формировать на нагрузке два разнополярных импульса, разделенных временным интервалом, при одном срабатывании первичного источника питания и с высокой частотой посылок двоек импульсов.

При разработке ускорителя с разнополярными импульсами за основу была принята схема построения действующего ЛИУ 0,4/6 [4].

Электрическая схема

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема ЛИУ. Основными узлами ЛИУ являются ферромагнитная индукционная система (ИС), формирующая рабочие импульсы в нагрузке; первичный накопитель C_0 с тиристорным коммутатором Т; импульсный трансформатор (ИТ); магнитный импульсный генератор (МИГ), состоящий из звеньев сжатия с конденсаторами C_1, C_2, C_3, C_4 и дросселями насыщения L_1, L_2, L_3 и служащий для согласования параметров выходного импульса первичного накопителя C_0 с параметрами импульса заряда емкостей C_5 и C_6 ; дроссель насыщения L_4 , служащий для перезаряда емкости C_5 ; магнитный коммутатор L_5 , переключающий заряженные емкости C_5 и C_6 на витки намагничивания ИС; емкость C_7 , обеспечивающая инвертирование импульсов в нагрузке в процессе своего заряда и разряда; дроссель насыщения L_6 , предназначенный для создания требуемой временной паузы Δt_n между сдвоенными импульсами разной полярности и переключения заряженной емкости C_7 на витки намагничивания ИС; омический эквивалент нагрузки R_H .

Емкость C_0 выполнена из конденсаторов типа К75–81 (20 мкФ, 1600 В), соединенных параллельно. Звенья сжатия МИГ содержат емкости C_1, C_2, C_3 и C_4 в виде сборок параллельно-последовательно включенных конденсаторов типа К75–74 (0,1 мкФ, 40 кВ и 0,047 мкФ, 40 кВ). Для формирования на выходе ускорителя импульсов, близких по виду к трапецеидальным, емкости C_5, C_6 и C_7 , условно показанные в виде конденсаторов с сосредоточенными параметрами, выполнены по технологии полосковых формирующих линий.

Индукционная система, импульсный трансформатор, дроссели насыщения L_1, L_2, L_3, L_4, L_6 и магнитный коммутатор L_5 построены на тороидальных сердечниках различных диаметров, изготовленных из ферромагнитной ленты шириной 25 мм и толщиной 0,01 и 0,02 мм пермаллового сплава марки 50 НП с коэффициентом заполнения сердечников сталью ~ 0,8.

Принцип работы

Заряд емкости C_0 первичного источника питания осуществляется при протекании тока по первичной обмотке импульсного трансформатора, сердечник которого при этом перемагничивается до области отрицательного насыщения. При включении тиристорного коммутатора Т емкость C_0 разряжается через импульсный трансформатор на емкости C_1 и C_2 входного звена МИГ по двум контурам. Емкость C_1 заряжается непосредственно от вторичной обмотки ИТ, а емкость C_2 заряжается током, протекающим через обмотки дросселей L_1, L_2, L_3 и L_4 и переводящим их в состояние насыщения. При заряде емкости C_1 и C_2 включены в контуре параллельно. По окончании передачи энергии из C_0 в C_1 и C_2 под действием напряжения на C_1 , приложенного к вторичной обмотке ИТ, его сердечник начинает перемагничиваться в обратном направлении. ИТ насыщается, что приводит к перезаряду емкости C_1 через его вторичную обмотку и удвоению (без учета потерь) напряжения на противоположных выводах емкостей C_1 и C_2 при их последовательном включении по сравнению с напряжением заряда. Под действием напряжения $U_c(t) = U_{c1}(t) + U_{c2}(t)$ дроссель L_1 выходит из состояния отрицательного насыщения и начинает перемагничиваться. Он насыщается, но уже в положительной области, и начинается разряд последовательно соединенных емкостей C_1, C_2 (суммарная емкость $C_{1-2} = 0,5C_1 = 0,5C_2$) на емкость C_3 . Дальнейшая передача энергии от звена к звену с последовательным временным сжатием импульсов в звеньях C_3, L_2 и C_4, L_3 в 3–4 раза осуществляется при равной величине напряжения.

Выражение, определяющее зависимость конструктивных параметров дросселей насыщения от требуемого времени передачи энергии в звеньях МИГ, записывается в виде:

$$\Delta t_n = \pi \sqrt{L'_n \frac{C_n C_{n+1}}{C_n + C_{n+1}}} = \frac{\Psi_{n+1}}{U_{cp\ n+1}} = \frac{W_{n+1} S_{n+1} \Delta B}{U_{cp\ n+1}} = \frac{W_{n+1} (D - d) h k N \Delta B}{U_{n+1}} = \Delta t'_{n+1}, \tag{1}$$

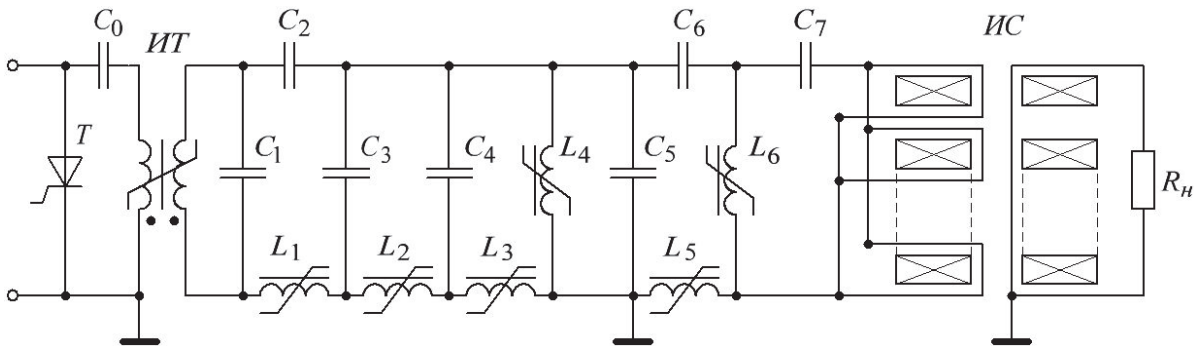


Рис. 1. Электрическая схема частотного линейного индукционного ускорителя с двумя разнополярными импульсами

где Δt_n – интервал времени передачи энергии из емкости C_n в емкость C_{n+1} ; Δt_{n+1}^t – интервал времени перемагничивания дросселя L_{n+1} ; L_n' – суммарная индуктивность контура, состоящая из индуктивности обмотки дросселя L_n в насыщенном состоянии его сердечника, индуктивности тоководов L_T и индуктивности конденсаторов L_C ; C_n – емкость разряда; C_{n+1} – емкость заряда; Ψ_{n+1} – потокосцепление дросселя L_{n+1} ; $U_{cp,n+1} = U_{n+1}/2$ – среднее значение напряжения, приложенного к обмотке дросселя L_{n+1} ; U_{n+1} – амплитудное значение напряжения на конденсаторе C_{n+1} ; W_{n+1} – число витков обмотки

дросселя L_{n+1} ; $S_{n+1} = \frac{D-d}{2} hkN$ – общая площадь

поперечного сечения сердечников дросселя L_{n+1} ; D , d , h – внешний, внутренний диаметры и ширина ленты сердечника; k – коэффициент заполнения сталью объема сердечника; N – число сердечников; ΔB – приращение индукции (для пермаллоя 50 НП $\Delta B = 2,5$ Тл).

Индуктивность обмотки дросселя L_n в насыщенном состоянии сердечника равна:

$$L_n = \frac{\mu_0}{2\pi} W_n^2 a_n \ln \frac{D_n}{d_n}, \quad (2)$$

где W_n – число витков обмотки дросселя L_n ; D_n и d_n – внешний и внутренний диаметры обмотки; a_n – аксиальный размер обмотки.

Разряд конденсатора C_4 и заряд формирующих линий C_5 и C_6 , включенных в этот момент времени в цепи параллельно, происходит после насыщения дросселя L_3 (дроссель L_4 в это время ненасыщен) по двум контурам. Линия C_5 заряжается током, протекающим через обмотку насыщенного дросселя L_3 . Зарядный ток линии C_6 протекает по обмоткам дросселя L_3 , магнитного коммутатора L_5 и переключающего дросселя L_6 . Этот ток одновременно является размагничивающим током для сердечников коммутатора L_5 и дросселя L_6 . К магнитному коммутатору L_5 напряжение в это время не прикладывается, так как по отношению к нему емкости C_5 и C_6 заряжаются встречно. Временной интервал передачи энергии при этом будет равен:

$$\Delta t_4 = \pi \sqrt{L_3 \frac{C_4(C_5 + C_6)}{C_4 + C_5 + C_6}} = \frac{\Psi_4}{U_{cp,4}} = \frac{W_4 S_4 \Delta B}{U_{cp,4}}, \quad (3)$$

где $\Psi_4 = W_4 S_4 \Delta B$ – потокосцепление дросселя насыщения L_4 ; W_4 и S_4 – число витков и площадь поперечного сечения сердечника дросселя L_4 ;

$U_{cp,4} \approx U_{C5-6} \frac{C_4}{C_4 + C_5 + C_6}$ – среднее значение напряжения, приложенного к обмотке дросселя L_4 ; U_{C5-6} – амплитудное значение зарядного напряжения параллельно включенных емкостей C_5 и C_6 . L_6' – суммарная индуктивность контура, состоящая из индуктивности обмотки насыщенного дросселя L_3 , которая определяется по уравнению (2), индуктивности тоководов L_{T3} и индуктивности конденсаторов $L_{C4,5,6}$.

Для полной передачи энергии из конденсаторов звеньев сжатия МИГ в формирующие линии C_5 и C_6 следует выбирать их емкости в соотношении $0,5C_1 = 0,5C_2 = C_3 = C_4 = 2C_5 = 2C_6 = C$. В этом случае (без учета потерь) величины разрядного напряжения на C_1 , C_2 и зарядного напряжения на C_3 , C_4 и C_5 , C_6 (включенных параллельно) будут равны.

В процессе заряда под действием напряжения формирующей линии C_5 сердечник дросселя L_4 начнет перемагничиваться. Срабатывание дросселя L_4 при его насыщении происходит в тот момент времени, когда ток $I_{C4} = I_{C5} + I_{C6}$ в цепи разряда емкости C_4 и заряда емкостей C_5 и C_6 упадет до нуля. В это время начинается процесс перезаряда линии C_5 через обмотку дросселя L_4 , который приводит к изменению полярности линии C_5 на противоположную и включению емкостей C_5 и C_6 последовательно. Суммарная емкость формирующих линий C_5 и C_6 при этом уменьшится в 4 раза по отношению к их параллельному включению ($C_4 = 0,5C_5 = 0,5C_6$), а напряжение на противоположных электродах линий к концу процесса перезаряда удвоится (без учета потерь) по сравнению с зарядным напряжением. Интервал времени перезаряда Δt_5 линии C_5 будет равен:

$$\Delta t_5 = \pi \sqrt{L_4' C_5}, \quad (4)$$

где L_4' – индуктивность контура, состоящая из индуктивности обмотки насыщенного дросселя L_4 , индуктивности тоководов L_{T4} и индуктивности конденсаторов L_{C5} .

Нарастающее напряжение на последовательно включенных линиях C_5 и C_6 прикладывается к обмотке магнитного коммутатора L_5 . Через обмотку магнитного коммутатора начинает протекать перемагничивающий ток. Величину потокосцепления Ψ_5 магнитного коммутатора L_5 следует выбирать из следующего условия: сердечник магнитного коммутатора должен насытиться в момент окончания перезаряда линии C_5 , т. е. должно выполняться условие:

$$\Psi_5 = W_5 S_5 \Delta B \approx \pi \sqrt{L_4' C_5} U_{cp,5-6}, \quad (5)$$

где W_5 и S_5 – число витков обмотки и площадь поперечного сечения сердечника магнитного коммутатора L_5 ; $U_{cp,5-6} = 0,5(U_{C5} + U_{C6})$ – среднее напряжение, действующее на витки обмотки магнитного коммутатора L_5 при перезаряде линии C_5 и включении последовательно линий C_5 и C_6 ; U_{C5} и U_{C6} – амплитудное значение зарядного напряжения линий C_5 и C_6 .

После насыщения сердечника магнитного коммутатора L_5 включенные последовательно линии C_5 и C_6 начнут разряжаться через обмотку магнитного коммутатора L_5 на витки намагничивания ИС и формирующую линию C_7 . Переключающий дроссель L_6 находится в это время в ненасыщенном для рабочего тока состоянии. Эквивалентной для данного процесса является схема разряда заряженного конденсатора с емкостью $C = 0,5C_5 = 0,5C_6$ и на-

чальным напряжением $U=U_{C5}+U_{C6}$ на цепь из второго конденсатора с емкостью C_7 , индуктивности контура L_{p1} и сопротивления R . В случае аperiodического процесса величина максимального тока I_{R1} в контуре и напряжение заряда U_{C7} линии C_7 определяются выражениями [5]:

$$\begin{aligned} I_{R1} &= -\frac{U_{C5}+U_{C6}}{2aL_{p1}}(e^{p_1t}-e^{p_2t}); \\ U_{C7} &= -\frac{0,5C_5}{0,5C_5+C_7}(U_{C5}+U_{C6})+ \\ &+ \frac{0,5C_5}{2a(0,5C_5+C_7)}(U_{C5}+U_{C6})(-p_2e^{p_1t}+p_1e^{p_2t}); \\ p_1 &= -b+a; p_2 = -b-a; b = \frac{R}{2L_{p1}}; \\ a &= \sqrt{b^2 - \frac{1}{L_{p1}C_3}}; C_3 = \frac{0,5C_5C_7}{0,5C_5+C_7}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $0,5C_5$ – эквивалентная емкость последовательно включенных формирующих линий C_5 и C_6 при условии $C_5=C_6$; $U_{C5}+U_{C6}$ – напряжение разряда последовательно включенных линий C_5 и C_6 , равное сумме их зарядных напряжений; $R=R_H/n^2$ – приведенное к первичной цепи ускорителя сопротивление нагрузки; R_H – сопротивление нагрузки; n – число сердечников ИС; $L_{p1}=L_5+L_R+L_S+L_\Phi+L_{M1}$ – индуктивность разрядной цепи; L_5 – индуктивность обмотки магнитного коммутатора в насыщенном состоянии сердечника; L_R – индуктивность нагрузки R_H , приведенная к первичной цепи; L_S – индуктивность рассеяния ИС; L_Φ – индуктивность формирующих линий C_5 , C_6 и C_7 ; L_{M1} – индуктивность монтажа контура разряда.

Ток заряда линии C_7 одновременно является перемещающим током индукционной системы, способствующим формированию в нагрузке R_H первого высоковольтного импульса тока I_H с напряжением U_H отрицательной полярности, длительность τ_1 которого определяется:

$$\tau_1 = \pi \sqrt{L_{p1} \frac{0,5C_5C_7}{0,5C_5+C_7}}. \quad (7)$$

Для эффективной передачи энергии следует выбирать емкости формирующих линий в соотношении $0,5C_5=0,5C_6=C_7=C$. В этом случае величина напряжения заряда формирующей линии C_7 будет близка к величине зарядного напряжения последовательно включенных линий C_5 и C_6 .

После передачи энергии из емкостей C_5 и C_6 в нагрузку R_H и в емкость линии C_7 последняя остается заряженной до тех пор, пока переключающий дроссель L_6 не перейдет в насыщенное состояние. Величина потокосцепления Ψ_6 дросселя L_6 определяет временную задержку между первым (отрицательным) и вторым (положительным) импульсами в нагрузке R_H и вычисляется по выражению:

$$\Psi_6 = U_{cp,7}(\tau_1 + \Delta t_H) = W_6 S_6 \Delta B, \quad (8)$$

где $U_{cp,7}=U_{C7}/2$ – среднее значение напряжения, приложенного к виткам обмотки переключающего дросселя L_6 ; U_{C7} – амплитудное значение напряжения на линии C_7 ; Δt_H – интервал времени задержки между разнополярными импульсами в нагрузке R_H , который задается в техническом задании на проектирование устройства; W_6 и S_6 – число витков и площадь поперечного сечения сердечника дросселя L_6 .

Нарастающим напряжением на формирующей линии C_7 переключающий дроссель L_6 перемещается. После временной паузы Δt_H дроссель L_7 срабатывает и в витки намагничивания ИС вводится обратный ток (ток разряда линии C_7) и энергия линии C_7 переводится в нагрузку. Максимальная величина разрядного тока I_{R2} формирующей линии C_7 через обмотку дросселя насыщения L_6 и витки намагничивания ИС на омическую нагрузку R в момент времени t_1 определяется следующими соотношениями [5]:

$$\begin{aligned} I_{R2} &= \frac{U_{C7}}{2aL_{p2}}(-e^{p_1t}+e^{p_2t}); \\ p_{1,2} &= -\frac{R}{2L_{p2}} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L_{p2}^2} - \frac{1}{L_{p2}C_7}}; \\ 2a &= p_1 - p_2; t_1 = \frac{1}{2a} \ln \frac{p_2}{p_1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $L_{p2}=L_6+L_R+L_S+L_{\Phi7}+L_{M2}$ – индуктивность разрядного контура; L_6 – индуктивность обмотки насыщенного дросселя L_6 ; L_R – индуктивность нагрузки, приведенная к первичной цепи; L_S – индуктивность рассеяния ИС; $L_{\Phi7}$ – индуктивность одинарной формирующей линии C_7 ; L_{M2} – индуктивность монтажа контура разряда.

При этом в нагрузке R_H формируется второй высоковольтный импульс тока I_H с напряжением U_H положительной полярности, длительность которого τ_2 определяется:

$$\tau_2 = \pi \sqrt{L_{p2}C_7}. \quad (10)$$

После проведенного расчета необходимо уточнить основные параметры ускорителя: емкости конденсаторов и напряжения на них, объемы сердечников, числа витков обмоток и др. Полученные данные позволяют выполнить конструктивный расчет дросселей, индукционной системы, трансформатора, сборок конденсаторов МИГ и формирующих линий и вновь уточнить исходные величины электрических параметров элементов ЛИУ.

Конструктивное исполнение элементов ЛИУ следующее. Индукционная система состоит из 14 тороидальных ферромагнитных сердечников прямоугольного сечения размером $K380 \times 140 \times 25$ (внешний диаметр – внутренний диаметр – ширина в мм) и толщиной ленты 0,01 мм. На каждом сердечнике (индукторе) размещен 1 виток намагничивания. Емкость первичного источника $C_0=1080$ мкФ. Конденсаторы звеньев сжатия МИГ имеют емкости $C_1=C_2=0,6$ мкФ, $C_3=0,25$ мкФ,

$C_4=0,24$ мкФ. Емкость каждого следующего звена сжатия выбирается несколько меньше емкости предыдущего. В результате компенсируется уменьшение напряжения в звеньях из-за активных потерь при передаче энергии. Этот метод используется и при выборе величины емкостей параллельно включенных формирующих линий C_5 и C_6 относительно емкости конденсатора C_4 последнего звена сжатия МИГ. Формирующие линии состоят из наборов полосковых медных электродов с межслойной изоляцией из синтофлекса и имеют емкости $C_5=C_6=0,1$ мкФ и $C_7=0,05$ мкФ. Конструктивно формирующие линии для компактности устройства намотаны снаружи сердечников индукционной системы. Дроссель L_1 выполнен из 6 сердечников размером $K250 \times 110 \times 25$ (толщина ленты 0,02 мм) и имеет 13 витков обмотки. Дроссель L_2 содержит также 6 сердечников $K250 \times 110 \times 25$, но число витков обмотки равно 4. Дроссель L_3 изготовлен из 5 сердечников размером $K420 \times 220 \times 25$ (толщина ленты 0,01 мм) и имеет 1 виток. Дроссель насыщения L_4 , включенный параллельно выходу МИГ и выводам формирующей линии C_5 , содержит 1 сердечник $K380 \times 150 \times 25$, обмотка имеет 1 виток. Магнитный коммутатор L_5 выполнен из одного сердечника $K420 \times 150 \times 25$ (пермаллоевая лента толщиной 0,01 мм) с одновитковой обмоткой. Дроссель L_6 изготовлен из 3 сердечников размером $K380 \times 180 \times 25$ пермаллового сплава марки 50 НП с толщиной ленты 0,01 мм, обмотка имеет 1 виток. Все эти элементы высоковольтного модуля ЛИУ размещены в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 670 мм, заполненном трансформаторным маслом.

Результаты моделирования

Для исследования работы ЛИУ данного типа с указанными выше параметрами элементов была принята за основу схема моделирования, разработанная ранее для ЛИУ 04/6 [4, 6]. Отметим, что расчет ЛИУ, проведенный по уравнениям (1)–(10), является предварительным. В модели расчет выполнялся по эквивалентной схеме, в которой дополнительно вводились активные сопротивления и индуктивности соединительных проводников и элементов в сборках, «паразитные» емкости и индуктивности импульсного трансформатора и индукционной системы. Потери энергии в ферромагнитных сердечниках, в меди проводников обмоток и соединений, в диэлектрике конденсаторов и формирующих линий учитывались введением в схему эквивалентных сопротивлений потерь.

При напряжении первичного источника питания $U_{c0}=1$ кВ в расчетах были получены следующие значения напряжений на элементах, конденсаторах звеньев сжатия МИГ и формирующих линиях: вторичная обмотка импульсного трансформатора $U_{ИТ2}=29,2$ кВ, $U_{C1}+U_{C2}=57,9$ кВ, $U_{C3}=58$ кВ, $U_{C4}=54$ кВ, $U_{C5}+U_{C6}=106$ кВ, $U_{C7}=85,3$ кВ. Параметры выходных разнополярных импульсов на омической нагрузке $R_H=100$ Ом (рис. 2): отрицательный – амплитуда тока составляет 3,2 кА при на-

пряжении 320 кВ, длительность импульса по основанию равна 115 нс; положительный – амплитуда тока 4,7 кА при напряжении 470 кВ, длительность по основанию 135 нс; время задержки между импульсами равно 240 нс. Варьируя величинами емкостей формирующих линий C_5 , C_6 и C_7 , можно изменять амплитуды и длительности обоих импульсов в нагрузке R_H , а меняя величину потокосцепления Ψ_6 переключающего дросселя L_6 , можно изменять временную задержку между отрицательным и положительным импульсами. Например, если в данной схеме с указанными выше расчетными параметрами элементов ускорителя переключающий дроссель L_6 изготовить из 2 сердечников $K380 \times 150 \times 25$ из сплава марки 50 НП с толщиной ленты 0,01 мм и одновитковой обмоткой, то уменьшенное потокосцепление дросселя L_6 обеспечит временной интервал между импульсами 160 нс.

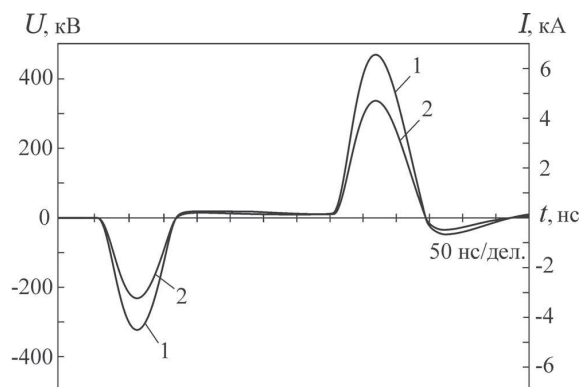


Рис. 2. Импульсы напряжения (1) и тока (2) ЛИУ на омической нагрузке при одном срабатывании его первичного источника питания

Заключение

Таким образом, схемная реализация двухконтурной передачи энергии в линейном индукционном ускорителе от формирующих линий C_5 и C_6 к индукционной системе с использованием формирующей линии C_7 и переключающего дросселя L_6 позволяет получать в нагрузке R_H два разнополярных импульса напряжения с временным интервалом подачи Δt_H и высокой частотой следования рабочих циклов, достигающих нескольких килогерц. Причем полярность импульсов в паре может меняться на противоположную простым переключением выходных клемм первичного источника питания C_0 . Первый импульс в нагрузке R_H формируется при передаче энергии из линий C_5 и C_6 к индукционной системе и линии C_7 (ее заряду), а второй (инвертированный) – при передаче энергии из линии C_7 (ее разряду) к индукционной системе. В процессе работы зарядные и разрядные токи формирующих линий C_5 , C_6 и C_7 , благодаря разным направлениям протекания, автоматически производят перемагничивание сердечников магнитного коммутатора L_5 , дросселя L_6 и индукционной системы, что исключает необходимость применения посторонних источников размагничивания в частотном цикле работы.

Проведенное моделирование функционирования разработанного линейного индукционного ускорителя на активную нагрузку и полученные при этом параметры выходных двоярных разнополярных импульсов высокого напряжения показывают принципиальную возможность использования такого ускорителя, например, в качестве мощного импульсного источника питания диодных систем, работающих в двухимпульсном режиме и создающих

ионные пучки для технологических применений в области материаловедения. Высокая стабильность амплитудных и временных параметров выходных разнополярных импульсов, большая частота повторения двоярных импульсов и большой ресурс работы без профилактических мероприятий позволяет поднять качество технологического процесса, увеличить производительность и надежность установки при снижении эксплуатационных расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Рябчиков А.И., Юшков Ю.Г. Разработка релятивистских СВЧ генераторов в НИИ ядерной физики при ТПУ // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 101–105.
2. Меерович А.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. – М.: Сов. радио, 1968. – 476 с.
3. Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф., Опекунов М.С., Матвиенко В.М. Источники мощных ионных пучков для практического применения // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – Приложение. – С. 92–111.
4. Мащенко А.И. Оптимизация параметров линейного индукционного ускорителя с магнитной коммутацией энергии // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 10/2. – С. 82–85.
5. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М.: Высш. школа, 1967. – 387 с.
6. Мащенко А.И. Линейный индукционный ускоритель с удвоением напряжения в выходном звене магнитного генератора // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/2. – С. 75–80.

Поступила 25.12.2012 г.

УДК 621.039.58: 532.529.5

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЬНЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК В ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИМПУЛЬСНОМ ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ

В.А. Витюк, А.Д. Вурим, И.В. Шаманин*, С.Б. Козловский*

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатова, Казахстан

*Томский политехнический университет

E-mail: shiva@tpu.ru

Представлена расчетно-экспериментальная методика контроля энерговыделения в тепловыделяющих сборках при их испытаниях в центральном экспериментальном канале импульсного исследовательского ядерного реактора. Приведены результаты апробации методики в ходе выполнения серии испытаний с экспериментальным устройством, предназначенным для изучения поведения модельных тепловыделяющихборок реакторной установки типа ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих заключительную фазу аварии с потерей теплоносителя.

Ключевые слова:

Импульсный исследовательский ядерный реактор, ядерное топливо, испытания, тепловыделение, контроль.

Key words:

Pulsed research nuclear reactor, nuclear fuel, test, heat emission, monitoring.

Имитационные испытания тепловыделяющихборок (ТВС) энергетических реакторов в исследовательских реакторах остаются одним из общепризнанных и надежных методов получения экспериментальной информации, используемой как для верификации существующих и разрабатываемых компьютерных кодов, описывающих поведение топлива энергетических реакторов в различных режимах, включая аварийные, так и для прямой экспериментальной оценки работоспособности ТВС.

Важной задачей при проведении таких исследований является определение энергетических параметров экспериментов (мощность и энерговыделение в топливе экспериментального устройства), которые необходимы как для правильной интерпре-

тации их результатов, так и для повышения точности реализации заданного энерговыделения. На исследовательских реакторах, обеспечивающих возможность реализации продолжительных стационарных режимов, определение энергетических параметров ТВС часто выполняется балансовыми методами, среди которых метод стационарного определения энерговыделения теоретически позволяет обеспечить точность до 1 %. При его применении в практике внутриреакторных исследований по данным [1, 2] точность определения энергетических параметров ТВС достигает значения 3...4 %.

Эксплуатационные возможности импульсного графитового реактора (ИГР) [3] позволяют реализовать исследования, направленные на получение