

УДК 621.316.543

СХЕМА МОДУЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА МЕГААМПЕРНОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С Z-ПИНЧАМИ

© 2013 г. Г. И. Долгачев, Ю. Г. Калинин, Д. Д. Масленников,
В. В. Матвеев, А. А. Шведов

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Поступила в редакцию 02.08.2012 г.

Для экспериментов с проволочными лайнерами и других применений предлагается модульная схема генератора мегаамперного импульса тока на основе плазменного прерывателя тока (п.п.т.) с изолирующей межэлектродного зазора последнего магнитным полем от внешнего источника. Питание п.п.т. осуществляется от параллельно включаемых независимых модулей. Спроектирован и испытан модуль питания на основе конденсатора ИК-50-3 (50 кВ, 3 мкФ) с током на эквивалентную часть п.п.т. до 200 кА. Определены предельные параметры п.п.т. и максимально допустимое количество модулей, представлены схемные решения основных узлов генератора.

DOI: 10.7868/S0032816213040046

1. СХЕМА ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ П.П.Т. С ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Генератор на основе п.п.т. (рис. 1а) содержит емкостный накопитель энергии C_0 , ключ K (разрядник), индуктивный накопитель L_0 , п.п.т. (два коаксиальных электрода с плазменной перемычкой и продольным магнитным полем в межэлектродном зазоре) и индуктивную нагрузку [1]. Индуктивный накопитель L_0 включает в себя индуктивности всех элементов контура “емкостный накопитель—п.п.т.”, индуктивная нагрузка L_H — индуктивности линии “п.п.т.—лайнер”, т.е. индуктивности $L_{\text{лин}}$ и лайнера $L_{\text{лайн}}$.

После замыкания ключа K емкостный накопитель разряжается через плазменную перемычку п.п.т. на индуктивный накопитель L_0 , и электрическая энергия $C_0 U_0^2/2$ преобразуется в магнитную $L_0 I_0^2/2$ — режим накопления длительностью $t_{\text{нак}} \approx 1$ мкс. При определенных условиях сопротивление п.п.т. резко возрастает, и ток перебрасывается в нагрузку — режим переброса тока длительностью $t_{\text{пер}} \approx 100$ нс.

Типичный вид осциллограмм тока в индуктивном накопителе I_0 , тока в нагрузке I_H и напряжения на п.п.т. $U_{\text{п.п.т.}}$ представлены на рис. 1б. Как показали эксперименты [2], внешнее магнитное поле предотвращает повторное замыкание п.п.т. и позволяет удерживать напряжение на нагрузке в течение ~ 1 мкс.

После переброса тока схема питания лайнера представляет собой индуктивный контур (рис. 2а)

с током I_H , и к лайнеру может быть подведена энергия $W_{\text{лайн}} = (L_0 + L_{\text{лин}} + L_{\text{лайн}}) I_H^2/2$. При этом основным источником энергии должна быть энергия внешней по отношению к лайнеру цепи, т.е.

$$L_0 + L_{\text{лин}} + L_{\text{лайн}} \geq 10 L_{\text{лайн}}. \quad (1)$$

Типичная осциллограмма тока лайнера I_H , включающая режим переброса $t_{\text{пер}}$ и режим сжатия лайнера $t_{\text{сж}}$, когда запасенная энергия расходуется на сжатие лайнера, иллюстрируется рис. 2б.

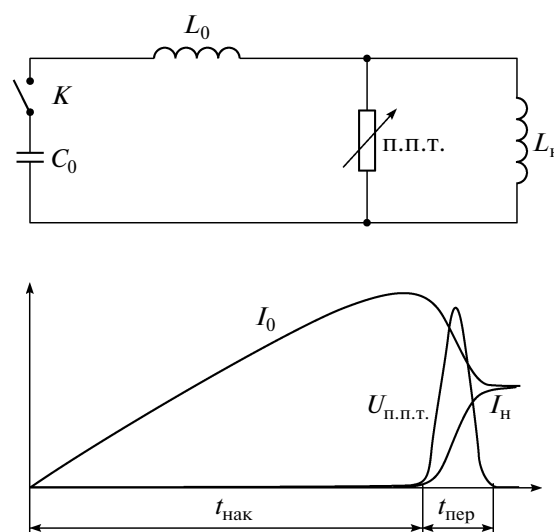


Рис. 1. Схема п.п.т. (а) и типичные осциллограммы тока I_0 , тока нагрузки I_H и напряжения $U_{\text{п.п.т.}}$ (б).

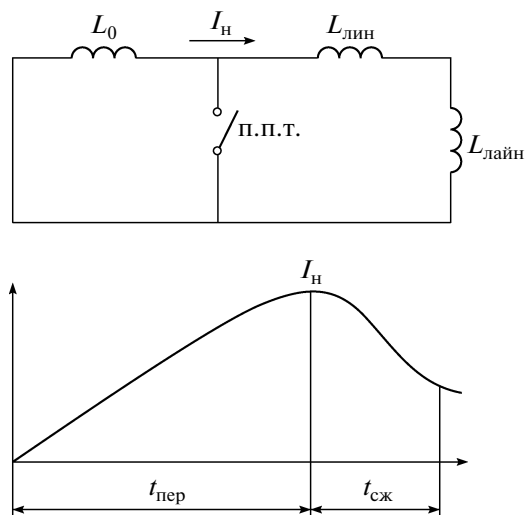


Рис. 2. Схема питания лайнера после переброса тока (а) и типичная осциллограмма тока нагрузки I_n (б).

2. МОДУЛЬНАЯ СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Предлагается разбить рассмотренную выше схему на N модулей, где N равно числу конденсаторов в емкостном накопителе, т.е. расположить N конденсаторов (типа ИК-50-3) вокруг цилиндрического п.п.т. с лайнерной нагрузкой на оси (рис. 3а) При этом каждый модуль генератора содержит модуль питания, сектор п.п.т. и соответствующий сектор лайнера и соединяющей линии. Модуль питания на одном конденсаторе содер-

жит конденсатор 2, шесть 50-омных кабелей типа КВИ-110, соединяющих его через трехканальный разрядник 3 с тремя вводами 8 высоковольтного электрода 5. Используется наиболее эффективная схема п.п.т. с внешним магнитным полем [2, 3]. Методика его расчета и согласования с лайнером приведена в [4, 5]. При предельной величине погонной (по длине окружности п.п.т.) плотности переносимого через п.п.т. заряда $q_{\text{пор}} = 5$ мКл/см длина дуги электрода п.п.т., приходящаяся на 1 модуль, составляет 30 см, т.е. равна длине стороны конденсатора λ . Этот факт позволяет располагать модули питания вокруг п.п.т. вплотную друг к другу.

Диаметр вакуумной камеры – наружного электрода п.п.т. – составит

$$D \approx N\lambda/\pi. \quad (2)$$

Модуль генератора содержит модуль питания и соответствующий ему сектор п.п.т., лайнера и соединяющей линии (9 на рис. 3а). Угол раствора сектора

$$\alpha, \text{ град} \approx 360/N. \quad (3)$$

Этот сектор с соответствующим ему модулем питания, как указывалось выше, и является модулем генератора. И если модуль питания конструктивно самостоятелен, то соответствующий ему сектор п.п.т., соединительной линии и лайнера – всего лишь части соответствующих элементов.

Для увеличения тока генератора в два раза предложены два вставленных друг в друга п.п.т. (рис. 3б): между заземленными коаксиальными электродами 1 расположен высоковольтный электр-

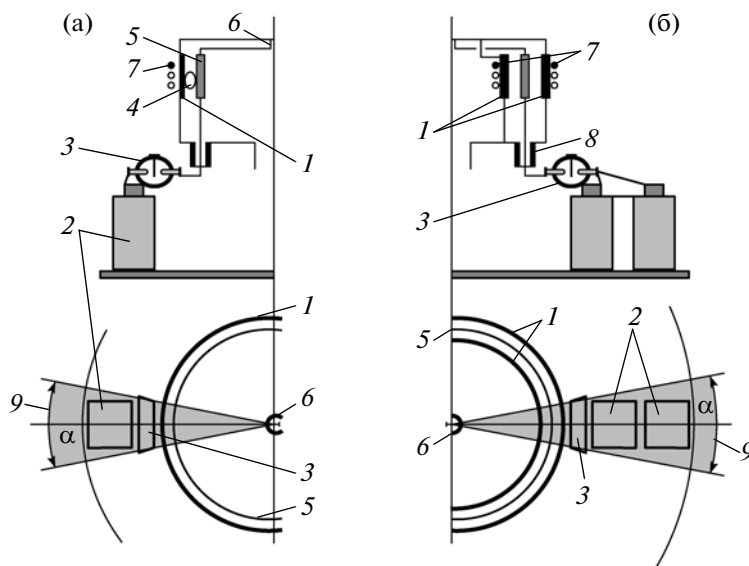


Рис. 3. Схема генератора (а – однорядное расположение конденсаторов, б – двухрядное). 1 – заземленные электроды п.п.т.; 2 – конденсаторы модулей; 3 – разрядники; 4 – плазменная перемычка п.п.т.; 5 – высоковольтный электрод п.п.т.; 6 – лайнер; 7 – катушки внешнего магнитного поля; 8 – изолятор высоковольтного ввода; 9 – модуль генератора – сектор, приходящийся на один модуль питания.

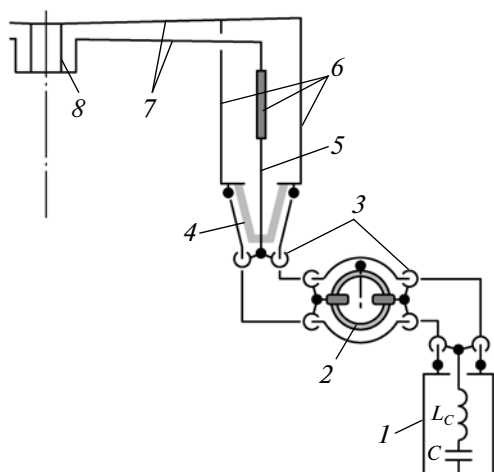


Рис. 4. Схема модуля генератора (двухрядное расположение конденсаторов): 1 – конденсаторы, $C = 6$ кФ, $L_C = 15$ нГн; 2 – 6-канальный разрядник, $L_p = 25$ нГн; 3 – 12 параллельных кабелей, $L_k = 20$ нГн; 4 – изолятор высоковольтного ввода (6 шт.); 5 – 6 высоковольтных вводов – шпильки $\varnothing 5$ мм, $L_{в/в} = 22.5$ нГн; 6 – электроды сектора п.п.т., $L_{сект п.п.т.} \approx 2.5$ нГн; 7 – сектор линии “п.п.т.–лайн”, $L_{сект лин} = NL_{лин}$; 8 – сектор лайнера, $L_{сект лайн} = NL_{лайн}$.

трод 5, который является общим для двух п.п.т.: наружного и внутреннего. При этом конденсаторы располагаются в два ряда. Это предложение позволяет при неизменных параметрах импульса на нагрузке практически вдвое сократить диаметр вакуумной камеры. В этом случае на один модуль питания приходится два конденсатора – по одному из первого и второго ряда (рис. 3б), 12 кабелей, 6 каналов разрядника и 6 вводов.

В соответствии с [2, 3] радиальный зазор между электродами каждого п.п.т. $\Delta R = 2.5$ см, индукция внешнего квазистационарного магнитного поля, создаваемого сторонним источником, $B_z = 6-8$ кГс; это поле создается двумя встречно включенными соленоидами 7. Высоковольтный электрод 5 выполнен из меди толщиной ~ 5 мм, что позволяет разделить магнитные поля, создаваемые в зазорах внешнего и внутреннего п.п.т.

3. СХЕМА МОДУЛЯ ГЕНЕРАТОРА И РАСЧЕТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Схема соединения элементов модуля генератора приведена на рис. 4. Параметры модуля питания и сектора п.п.т. не зависят от числа модулей N и определяются только конструкцией элементов модуля, параметрами и числом конденсаторов. Если пренебречь взаимоиндуктивностью секторов, то индуктивности сектора лайнера ($L_{сект лайн}$) и соединяющей линии ($L_{сект лин}$) растут с увеличением N :

$$L_{сект лайн} = NL_{лайн}, \quad L_{сект лин} = NL_{лин}. \quad (4)$$

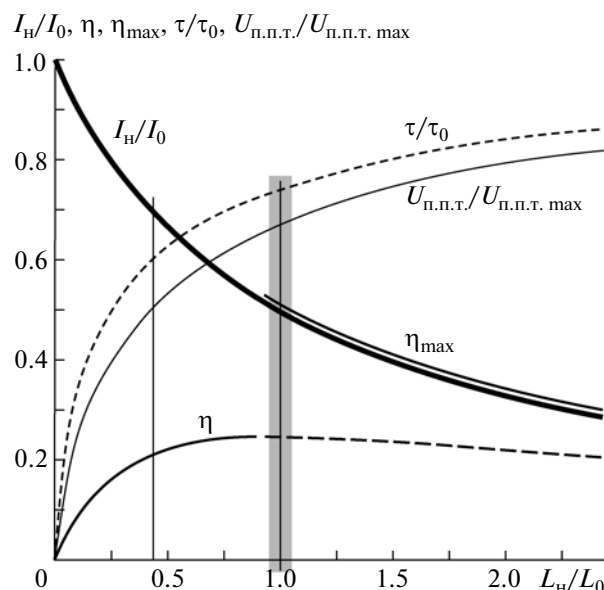


Рис. 5. Зависимости относительных величин (I_H/I_0 – тока индуктивной нагрузки; η – к.п.д. передачи энергии в нагрузку при наличии повторной закоротки п.п.т. плазмой; η_{max} – к.п.д. передачи энергии в нагрузку при отсутствии повторной закоротки п.п.т.; τ/τ_0 – длительности нарастания тока в нагрузке; $U_{п.п.т.}/U_{п.п.т. max}$ – напряжения на п.п.т.) от относительной величины индуктивности нагрузки L_H/L_0 . Две вертикальные линии определяют допустимый диапазон значений L_H/L_0 , ширина правой (серой) линии определяет диапазон L_H/L_0 при заданной нагрузке (см. рис. 6).

Полная индуктивность модуля питания (при использовании двух конденсаторов) составляет $L_{м.0} = 85$ нГн, что совпадает с измеренной величиной на макете. Эта индуктивность $L_{м.0}$ определяет параметры контура “конденсатор–п.п.т.”: $\rho = (L_0/C)^{1/2} = 0.12$ Ом, $t_{период} = 4.5$ мкс.

При рабочем напряжении зарядки конденсатора $U_0 = 45$ кВ получим следующие параметры: заряд емкости $Q_{м.0} = 137$ мКл, запасаемая энергия $W_{м.0} = 6$ кДж, амплитуда тока в контуре $I_{м.0} = 370$ кА, время его нарастания $t_{нар} = 1.25$ мкс. Для модуля с одним конденсатором ($C = 3$ мкФ) параметры изменятся: $Q_{м.0} = 68.35$ мКл, $W_{м.0} = 3$ кДж, $L_{м.0} = 170$ нГн, $\rho = 0.24$ Ом, $I_{м.0} = 185$ кА.

Синхронизация двух п.п.т. в схеме с двойным п.п.т. осуществляется за счет индуктивной связи между ними [6]: высоковольтный электрод у них общий, а заземленные электроды соединены на входе и выходе п.п.т., $L_{св} \approx 5$ нГн. Напряжение п.п.т. определяется плотностью энергии, затрачиваемой на ускорение ионов – эрозию плазмы. Его максимальная величина достигается в режиме холостого хода, т.е. в отсутствие нагрузки, и определяется как [4, 5]

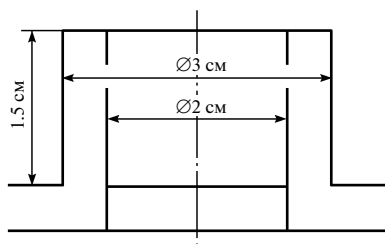


Рис. 6. Схема лайнера ($\varnothing = 2$ см, $L_{\text{лайн}} \approx 1.2$ нГн).

$$U_{\text{п.п.т. max}} = 3.6U_0^{4/7} \approx 0.6 \text{ МВ.} \quad (5)$$

Включение малоиндуктивной нагрузки приводит к снижению развиваемого на п.п.т. напряжения. Кроме того, возникает опасность повторного замыкания п.п.т., отсекающего накопительную индуктивность L_0 от нагрузки. На рис. 5, взятом из работы [7], приведены зависимости параметров импульса, получаемого на индуктивной нагрузке L_H от относительной величины ее индуктивности L_H/L_0 . В случае одного модуля нагрузки, шунтирующей сектор п.п.т., является индуктивность сектора нагрузки

$$L_{\text{м.н}} = L_{\text{сект лин}} + L_{\text{сект лайн}} \quad (6)$$

накопительной индуктивностью — индуктивность модуля питания $L_{\text{м.0}}$.

Как следует из работы [7], необходимо выбирать $L_{\text{сект н}}$ в диапазоне значений $(0.4-1)L_{\text{м.0}}$, что соответствует диапазону значений L_H/L_0 , ограниченному на рис. 5 двумя вертикальными линия-

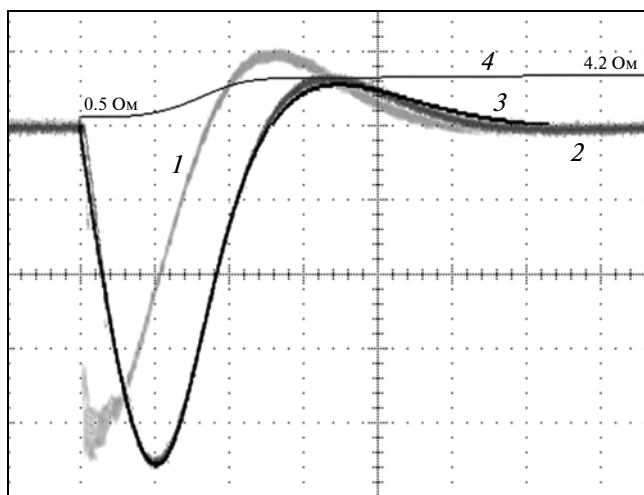


Рис. 7. Влияние вольфрамовой проволоочки на форму импульса пушки: 1 — осциллограмма напряжения (6 кВ/деление), 2 — осциллограмма и 3 — расчетная величина тока в одинаковых единицах (2.5 кА/деление), 4 — расчетная зависимость сопротивления вольфрамовой проволоочки от времени (начальное — 0.5 Ом, конечное — 4.2 Ом). Развертка 1 мкс/деление.

ми. При $L_{\text{сект н}} < 0.4L_{\text{м.0}}$ резко падает развиваемое на п.п.т. напряжение, снижается его электропрочность и практически неизбежно возникает повторное замыкание п.п.т., резко уменьшается к.п.д. передачи энергии η . При $L_{\text{сект н}} > L_{\text{м.0}}$ снижается передаваемый в нагрузку ток. Учитывая достаточно малую величину индуктивности модуля питания $L_{\text{м.0}} = 85$ нГн, следует брать

$$L_{\text{м.н}} = L_{\text{м.0}} \text{ или } L_H = L_0. \quad (7)$$

При этом диапазон значений L_H/L_0 на рис. 5 примерно определяется шириной правой вертикальной линии.

Условие (1), фактически, определяет максимально возможное число модулей. Представив его как $L_0 + L_H \approx 10L_{\text{лайн}}$ и учитывая (7), получим $L_0 \approx 5L_{\text{лайн}}$, т.е.

$$N = L_{\text{м.0}}/L_0 \approx L_{\text{м.0}}/5L_{\text{лайн}}. \quad (8)$$

Геометрия лайнера (рис. 6), близкая к используемой на установках “Стенд-300” и “Ангара-5” [8] с токами ~ 3 МА, определяет индуктивность лайнера $L_{\text{лайн}} \approx 1.2$ нГн. При такой величине условие (8) с учетом (6) и (7) дает $N=14$ (по два конденсатора в модуле). При этом диаметр камеры D в соответствии с (2) составит 1.4 м.

Исходя из рис. 5, получим следующие параметры модуля: ток $I_{\text{м.н}} = 0.5I_{\text{м.0}} = 185$ кА, к.п.д. передачи энергии в нагрузку $\eta_{\text{max}} = 0.5$, длительность фронта нарастания тока в нагрузке $\tau = 0.75\tau_0 \approx 100$ нс, напряжение на п.п.т. и нагрузке $U_{\text{п.п.т.}} = 0.65U_{\text{п.п.т. max}} = 0.4$ МВ. При этом полный ток генератора и нагрузки в N раз превышает соответствующие величины токов модуля и при $N = 14$ (по два конденсатора в каждом модуле) составит 5.2 и 2.6 МА соответственно.

Следует отметить, что применение внешнего магнитного поля и высокоимпедансной нагрузки позволяет избежать повторного замыкания п.п.т. и получить максимальное значение к.п.д. переброса энергии в нагрузку. В экспериментах [2, 6] по моделированию лайнерной нагрузки в качестве нагрузки использовалась емкость, которая при перебросе тока ведет себя аналогично лайнеру: вначале она представляет собой низкоимпедансную нагрузку и по мере протекания тока заряжается до напряжения п.п.т. То же и с лайнером — напряжение на нем появляется при его сжатии магнитным полем протекающего по нему тока. В этих экспериментах повторное замыкание п.п.т. наблюдалось спустя ~ 1 мкс после зарядки емкостной нагрузки.

4. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТОРА

При диаметре вакуумной камеры 140 см источник внешнего магнитного поля включает в себя

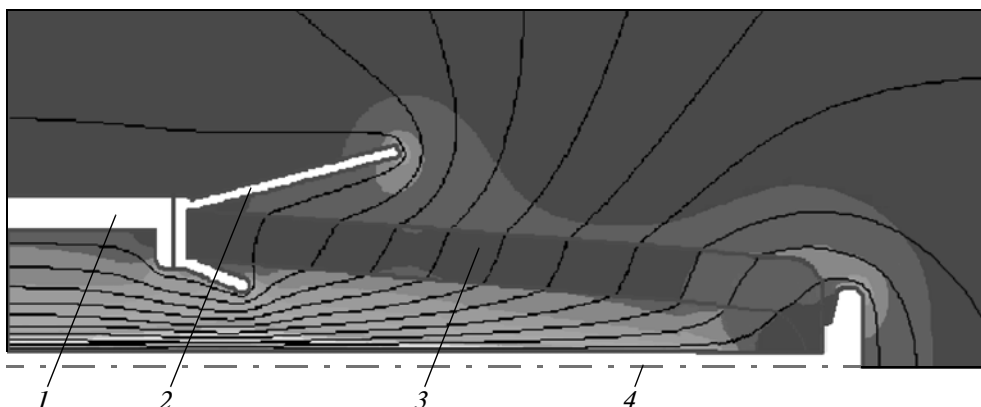


Рис. 8. Распределение электрического поля на изоляторе: 1 – стенка вакуумной камеры, 2 – защитный электрод, 3 – изолятор, 4 – высоковольтный электрод.

14 конденсаторов ИК-5-100 (5 кВ, 100 мкФ) и встречно включенные катушки магнитного поля индуктивностью ~ 5 Гн. Такие параметры обеспечивают проникновение магнитного поля $B_z = 8\text{--}10$ кГс в зазор п.п.т. сквозь стенку вакуумной камеры из нержавеющей стали толщиной 8–10 мм, поскольку толщина скин-слоя составляет ~ 3 см.

Малый межэлектродный зазор п.п.т. (2–2.5 см) требует применения однополярных импульсов тока плазменных пушек. В противном случае происходит многократное поступление плазмы в зазор п.п.т. [9], что приводит к превышению оптимальной величины плотности. Поэтому предложено использовать в цепи пушки материалы с сильной зависимостью сопротивления от температуры $\chi = \rho(T_{\max})/\rho(T_{\min})$. В соответствии с [10] в качестве таких материалов можно использовать никель ($\chi = 10$, $T_{\max} = 400^\circ\text{C}$, $T_{\min} = 20^\circ\text{C}$) или вольфрам ($\chi = 20$, $T_{\max} = 3000^\circ\text{C}$, $T_{\min} = 20^\circ\text{C}$). В первой половине импульса сопротивление такого материала мало и практически не ограничивает амплитуду тока, а затем сопротивление резко растет, и ток быстро затухает (рис. 7).

На рис. 8 представлено распределение поля на изоляторе. Эксперименты показали, что наиболее простой вариант изолятора без защитного электрода 2 из-за большой неоднородности поля ($E_{\max}/E_{\min} \approx 10$) имеет электропрочность ~ 30 кВ при микросекундной длительности. Электрод 2 позволяет получить достаточно однородное распределение поля ($E_{\max}/E_{\min} \approx 1.4$), при этом прочность изолятора оценивается на уровне ~ 100 кВ.

Предложенная авторами схема синхронного включения всех модулей питания (рис. 9) работает следующим образом. Высоковольтные клеммы конденсаторов 1 подключены к общей высоковольтной шине 5 и к электродам 8 разрядников 7, которые подсоединяют конденсаторы 1 к высоковольтному электроду п.п.т. Управляющие элект-

роды 9 через резисторы 6 соединены с заземленными клеммами конденсаторов 1 цепочкой из ограничительного сопротивления 2 и управляемого разрядника 3. При подаче запускающего импульса 4 на управляющий электрод разрядника 3 разрядник замыкается, и все управляющие электроды 9 приобретают потенциал земли. В результате во всех разрядниках 7 происходит одновременный пробой между электродами 8 и 9. Ток каждой искры определяется ограничительными резисторами 6 и резистором 2 и составляет ~ 100 А. Такого тока вполне достаточно для одновременного запуска разрядников 7. Как показал эксперимент на макете из двух конденсаторов и шести разрядников, наличие резисторов связи 10 между промежуточными электродами соседних разрядников и подсветки одного разрядника другим позволяет осуществлять синхронный запуск всех разрядни-

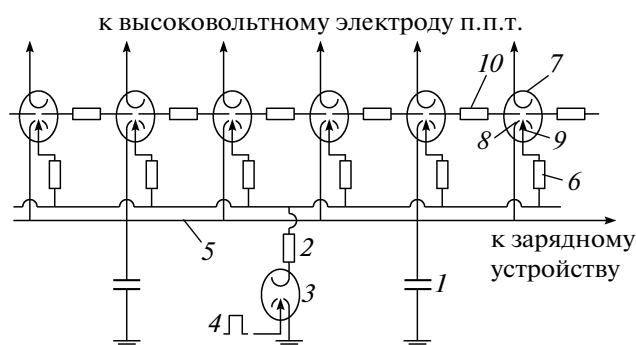


Рис. 9. Схема запуска разрядников модулей. 1 – конденсатор модуля питания; 2 – ограничительный резистор (~ 5 Ом); 3 – общий запускающий разрядник; 4 – запускающий импульс; 5 – высоковольтная шина; 6 – резистор в цепи управляющего электрода разрядника модуля (~ 500 Ом); 7 – разрядник модуля; 8 – электрод разрядника модуля; 9 – управляющий электрод разрядника модуля; 10 – резистор связи промежуточных электродов разрядников (~ 500 Ом).

ков 7 при наличии управляющего электрода 9 только в каждом третьем разряднике. При этом разброс времени срабатывания разрядников (при напряжении $\geq 80\%$ напряжения самопробоя) не превышает ± 0.1 мкс.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема модульного генератора импульсов тока мегаамперного диапазона позволяет создавать достаточно простые и дешевые установки для проведения экспериментов по изучению динамики сжатия лайнеров. При использовании вакуумной камеры диаметром 1.4 м и 14 модулей питания (по два конденсатора в каждом) с общей емкостью 144 мкФ в лайнерной нагрузке может быть получен импульс тока ~ 2.6 МА, что практически равно току установки “Стенд-300”, по стоимости и габаритам многократно превышающей рассмотренный выше генератор. Приведенные в работе схемные решения отдельных узлов генератора могут найти применение в области ускорительной и высоковольтной техники.

Работа поддержана грантами Президента РФ МК-2436.2011.2, РФФИ 11-02-01008-а, Минобр-

науки РФ № 2012-1.1-12-000-4004-007 и молодежный № 12-02-31321-мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баринов Н.У., Беленький Г.С., Долгачев Г.И. и др.* // Изв. вузов. Физика. 1997. № 10. С. 40.
2. *Алтухов А.А., Блинов П.И., Долгачев Г.И. и др.* // ПТЭ. 2005. № 5. С. 64.
3. *Dolgachev G.I., Ushakov A.G.* // IEEE Trans. Plasma Science. 2006. V. 34. Issue 1. P. 28.
4. *Dolgachev G.I., Maslennikov D.D., Ushakov A.G. et al.* // Proceeding of the first Euro-Asian Pulsed Power Conf. (EAPPC'). 18–22 Sept., 2006. V. 1. P. 375.
5. *Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Шведов А.А.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 3. С. 251.
6. *Алтухов А.С., Блинов П.И., Долгачев Г.И. и др.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2003. Вып. 2. С. 49.
7. *Долгачев Г.И., Масленников Д.Д., Ушаков А.Г. и др.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 905.
8. *Altuhov A.A., Bakshaev Y.L., Bartov A.V.* // Proceedings 15th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Saint-Petersburg, Russia, 18–23 July. 2004. P. 726.
9. *Долгачев Г.И., Ушаков А.Г.* // ПТЭ. 2004. № 3. С. 6.
10. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 305–307.