

УДК 621.319.53

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ДЛЯ РАБОТЫ НА ИНДУКТИВНО-РЕЗИСТИВНУЮ НАГРУЗКУ

© 2011 г. Э. Н. Абдуллин, В. Н. Киселев, А. В. Морозов, Yongpeng Zhao*

Институт сильноточной электроники СО РАН

Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

**Harbin Institute of Technology, Institute of Optoelectronics*

China, 150080, Harbin

Поступила в редакцию 20.12.2010 г.

Описана конструкция и приведены результаты испытаний генератора, разработанного для получения импульсов тока положительной полярности с длительностью первого полупериода 110–130 нс, амплитудой 40–70 кА в режиме однократных импульсов и 30 кА при частоте следования импульсов 10 Гц в течение 5 мин в индуктивно-резистивной нагрузке 300 нГн, 1 Ом. Установка собрана по схеме с промежуточным накопителем энергии. Первичным накопителем является 10-ступенчатый генератор Маркса, функцию промежуточного накопителя выполняет конденсатор с водяной изоляцией.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсные генераторы с промежуточными накопителями энергии характеризуются высокой выходной мощностью, широким диапазоном параметров импульсов напряжения и тока и применяются для питания диодов мощных электронных ускорителей, источников с.в.ч. и рентгеновского излучения и других целей [1]. Использование промежуточного накопителя расширяет возможности импульсного генератора, при этом требования к первичному накопителю по величине тока и длительности фронта импульса снижаются, что повышает надежность и ресурс работы установки. Импульсные генераторы с промежуточными накопителями наряду с однократным работают и в импульсно-периодическом режиме, что достигается использованием конденсаторов с малыми потерями, обеспечением охлаждения и продувки разрядников, циркуляции рабочей жидкости в промежуточном накопителе в процессе работы [2].

Наиболее часто величина индуктивности нагрузки невелика, что позволяет получить близкий к согласованному режим разряда промежуточного накопителя (формирующей линии) на нагрузку. В согласованном режиме мощность, выделяемая в нагрузке, максимальна, а длительность импульса определяется электрической длиной линии и составляет $\sim 10^{-9}$ – 10^{-6} с.

Задача получения импульсов тока малой длительности $\sim 10^{-7}$ с при большой индуктивности и малом активном сопротивлении нагрузки может быть решена при использовании генератора с промежуточным накопителем (конденсатором) малой емкости, при этом режим разряда проме-

жуточного накопителя на нагрузку – колебательный. Ввиду большого волнового сопротивления вторичного контура важным требованием, предъявляемым к первичному накопителю, является обеспечение необходимого зарядного напряжения промежуточного накопителя. Время зарядки промежуточного накопителя не является критическим и может быть выбрано из условия малости тока первичного накопителя для обеспечения необходимого ресурса работы конденсаторов. Возможно включение дополнительных демпферных сопротивлений в первичном контуре для уменьшения потерь в конденсаторах и разрядниках при импульсно-периодическом режиме работы.

В статье описывается конструкция и приводятся результаты испытаний генератора с промежуточным накопителем энергии, разработанного для получения в газоразрядной нагрузке с параметрами 300 нГн, 1 Ом или резистивном эквиваленте нагрузки импульса тока с длительностью первого полупериода в интервале 110–130 нс, амплитудой 40–70 кА в однократном режиме и 30 кА при частоте следования импульсов 10 Гц в течение 5 мин. Установка собрана на базе 10-ступенчатого генератора Маркса с газовой изоляцией. Генератор содержит 9 демпферных сопротивлений, систему охлаждения, систему продувки разрядников.

Промежуточным накопителем является конденсатор с водяной изоляцией, который заряжается через индуктивность, что позволяет ограничить ток генератора Маркса и увеличить зарядное напряжение на конденсаторе. Разряжается конденсатор на нагрузку через неуправляемый двухэлектродный газоразрядный коммутатор. Уста-

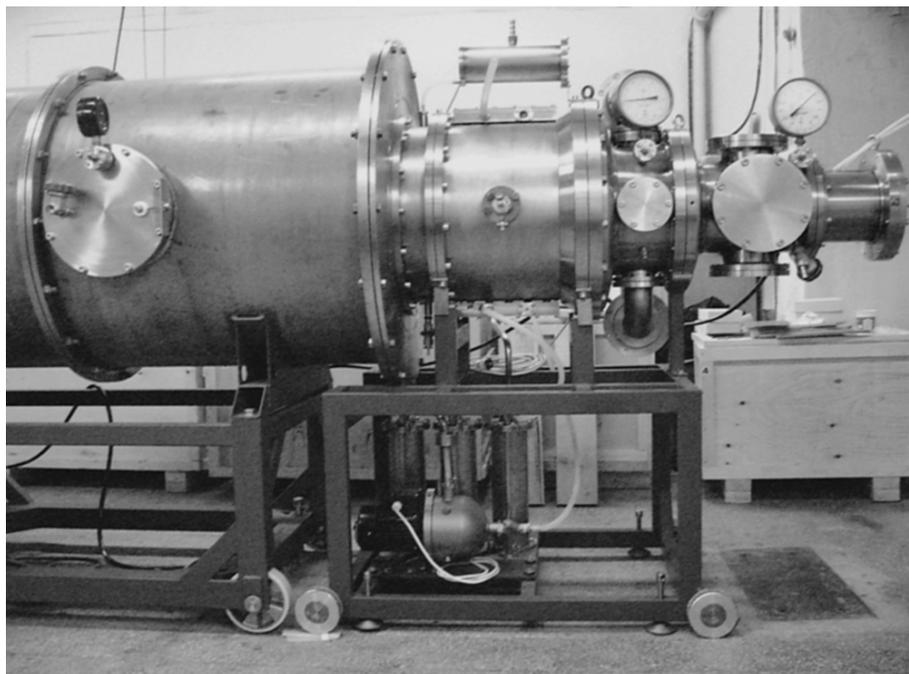


Рис. 1. Внешний вид установки.

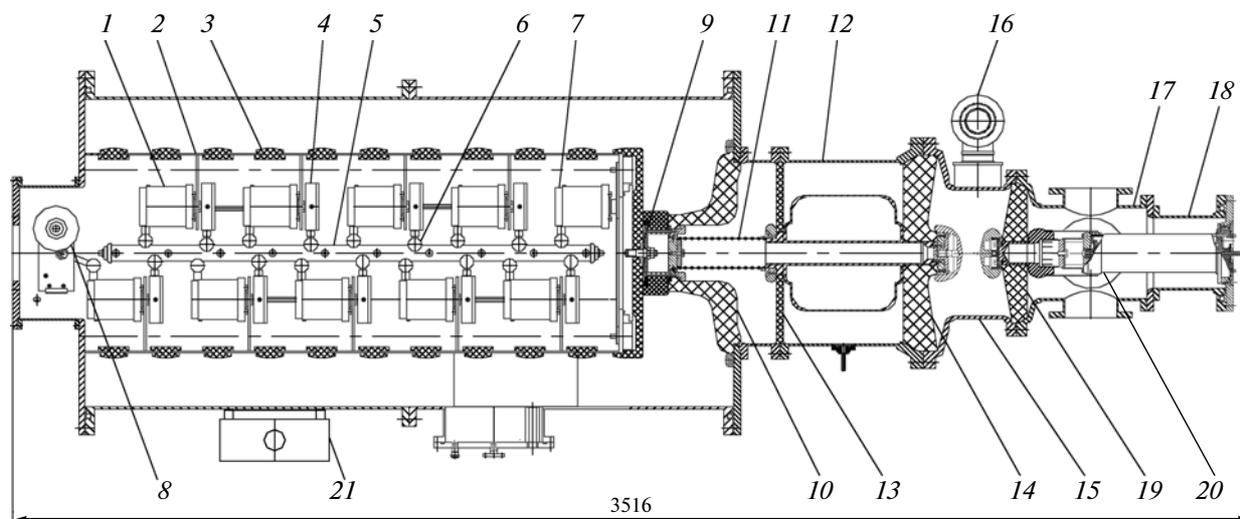


Рис. 2. Устройство генератора (вид сверху). 1 – конденсатор; 2 – экран; 3 – полиэтиленовое кольцо; 4 – демпферное сопротивление; 5 – разделительная индуктивность; 6 – электрод; 7 – крышка; 8 – трансформатор; 9 – плунжерный контакт; 10 – проходной изолятор; 11 – зарядная индуктивность; 12 – промежуточный накопитель; 13, 14 – изоляторы; 15 – коммутатор; 16 – вентилятор; 17, 18 – корпус узла нагрузки; 19 – изолятор узла нагрузки; 20 – нагрузка; 21 – шкаф системы управления.

новка снабжена системой подготовки деионизованной воды на основе ионообменных смол, имеет автоматизированную систему управления.

1. УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Внешний вид установки показан на рис. 1, а ее устройство приведено на рис. 2.

Прототипом генератора Маркса является генератор с вакуумной изоляцией с круглой колонной [3, 4], в отличие от которого разработанный генератор имеет газовую изоляцию колонны относительно корпуса, изменены конструкция ступени и число ступеней, конфигурация колонны для согласования с промежуточным накопителем и реализации частотного режима работы.

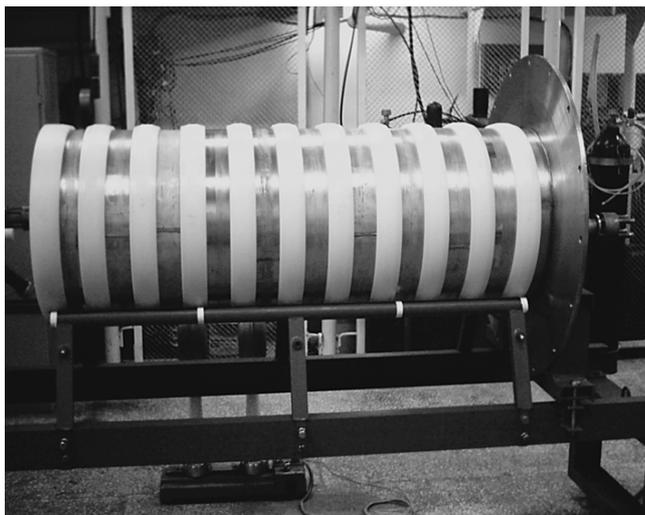


Рис. 3. Колонна генератора Маркса в сборе.

Генератор собран в цилиндрическом корпусе с внутренним диаметром 880 и длиной 1840 мм. Ось генератора в рабочем состоянии, а также при разборке и сборке располагается горизонтально.

В генераторе использованы конденсаторы ИК 100-0.1 производства ИИПТ НАН Украины (Институт импульсных процессов и технологий, Николаев) [5]. Емкость конденсатора 0.1 мкФ, индуктивность 100 нГн, зарядное напряжение до 100 кВ. Оптимальное зарядное напряжение при работе установки в однократном и импульсно-периодическом режиме составляет до 75 и до 40 кВ соответственно. Максимальная допустимая величина тока, протекающего через конденсатор, в однократном и импульсно-периодическом режиме равна 40 и 25 кА. Число конденсаторов в генераторе 10, по одному конденсатору на ступень (1, рис. 2). Емкость генератора в ударе $C_1 = 10$ нФ.

Ступени генератора имеют цилиндрические экраны (2, рис. 2) с наружным диаметром 570, высотой 114 и толщиной стенки 4.5 мм из нержавеющей стали. Экраны изолированы от входного фланца и друг от друга полиэтиленовыми кольцами 3 и стянуты стеклопластиковыми шпильками, образуя колонну генератора.

Внешний вид и устройство колонны иллюстрируют рис. 3 и рис. 4. Конденсаторы располагаются в колонне в 2 ряда. Одним выводом конденсаторы соединены с экранами и демпферными сопротивлениями (4, рис. 2), другим – с разделительными индуктивностями 5 и электродами 6 коммутаторов. Коммутаторы и устройство продувки (рис. 4), состоящее из вентилятора и стеклоэпоксидной трубы с соплами, размещаются в центральной части колонны. Разделительные индуктивности располагаются над и под коммутаторами (на рис. 4 не видны).

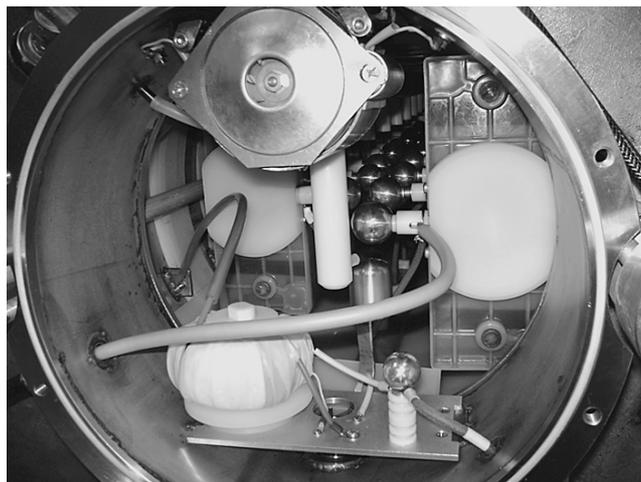


Рис. 4. Устройство колонны. Вверху – вентилятор продувки, внизу – импульсный трансформатор генератора запуска. Выводы конденсаторов закрыты полиэтиленовыми крышками.

Разделительные индуктивности выполнены в виде однослойных катушек, намотанных изолированным проводом на стержни $\varnothing 30$ мм из капролона. Индуктивность одной катушки 35.2 мкГн, сопротивление 2.2 Ом, число витков 67. Разделительные индуктивности, расположенные в верхней части колонны, соединены с экранами и корпусом генератора. Индуктивности, расположенные в нижней части колонны, соединены с выводами конденсаторов и высоковольтным выводом зарядного устройства. Для предотвращения пробоев высоковольтные выводы конденсаторов закрыты полиэтиленовыми крышками (7, рис. 2; рис. 4). Дополнительно для повышения электрической прочности нижний ряд катушек помещен в стеклоэпоксидную трубу, заполненную трансформаторным маслом.

Ступени генератора, за исключением последней, имеют демпферные сопротивления по 0.4 Ом и индуктивностью 0.2 мкГн. Сопротивления изготовлены из нихромовой проволоки, имеют корпуса из капролона, позволяющие охлаждать сопротивления проточной водой при работе установки в импульсно-периодическом режиме.

Генератор Маркса имеет двухэлектродные коммутаторы, первый коммутатор работает в управляемом режиме. Electroды коммутаторов имеют форму шаров или цилиндров $\varnothing 40$ мм со скругленными краями (6, рис. 2; рис. 4) из стали или латуни, межэлектродное расстояние может изменяться в пределах 15–28 мм. Рабочий газ в колонне – азот или сухой воздух при давлении 1–1.3 атм. Изоляция колонны достигается за счет заполнения объема между корпусом генератора и колонной азотом или элегазом с давлением 1.3 атм.

Генератор Маркса заряжается от высоковольтных источников ВИП-80 и ВИП-40, изготовленных в Институте электрофизики УрО РАН, с выходным напряжением отрицательной полярности соответственно до -80 и -40 кВ, обеспечивающих работу установки в однократном и частотном режимах.

Высоковольтные источники собраны в общем корпусе и являются стабилизаторами напряжения, выполненными на основе автономных инверторов. Каждый из источников включает сетевой фильтр, сетевой выпрямитель, мостовой инвертор, повышающий трансформатор, неуправляемый выпрямитель. Повышающий трансформатор имеет 8- или 10-секционную обмотку (соответственно для ВИП-40 и ВИП-80) с мостовым выпрямителем в каждой секции. Выпрямители включены последовательно. Повышающие трансформаторы и выпрямители расположены в маслonaполненных баках. Для управления зарядкой генератора используется схема управления, обеспечивающая регулирование, стабилизацию, измерение напряжения источника питания и ограничение максимального тока нагрузки.

Запуск генератора Маркса производится от пускового генератора, изготовленного на основе тиратрона ТГИ2-500/20. Генератор включает генератор импульсов запуска тиратрона (300 В, 1 мкс), искусственную линию 50 Ом (200 нс) для формирования импульса запуска генератора Маркса, выходной импульсный трансформатор (8, рис. 2; рис. 4), источник анодного питания 20 кВ и трансформатор накала ТН11-127/220-50К.

При срабатывании тиратрона пусковой генератор вырабатывает импульс напряжения отрицательной полярности амплитудой до -30 кВ, который с высоковольтной обмотки импульсного трансформатора подается на экран первой ступени генератора Маркса и далее через конденсатор ИК100-0.1 на первый коммутатор, приводя к его пробое и срабатыванию генератора. Управление срабатыванием пускового генератора, как и зарядкой генератора Маркса, осуществляется с помощью автоматизированной системы управления от управляющего компьютера.

Выходное напряжение с последней ступени генератора Маркса с помощью плунжерного контакта 9 (рис. 2) через проходной изолятор 10 подается на зарядную индуктивность 11 и далее на промежуточный накопитель 12. Функции зарядной индуктивности выполняет стальная пружина с наружным диаметром 90 и длиной 250 мм, с числом витков 11, размещенная в объеме, заполненном трансформаторным маслом. Суммарная индуктивность первичного контура, включающая индуктивность генератора Маркса и зарядную индуктивность, оцененная по времени зарядки промежуточного накопителя, составляет $L_1 \approx 5.5$ мкГн.

Промежуточный накопитель выполнен в виде цилиндрического конденсатора с диаметрами наружного и внутреннего электродов соответственно 520 и 330 мм (рис. 2). Длина наружного электрода 410 мм, цилиндрической части внутреннего электрода -220 мм, радиус закругления края внутреннего электрода 40 мм. Электроды изготовлены из нержавеющей стали. Диэлектриком служит деионизованная вода. Накопитель имеет оргстеклянные изоляторы 13, 14, отделяющие его от объема с индуктивностью и газоразрядного коммутатора 15. Ориентировочное значение емкости промежуточного накопителя при 20°C $C_2 \approx 3$ нФ. Ориентировочная величина индуктивности $L_2 \approx 50$ нГн.

Система подготовки воды включает три колонки с катионитом, анионитом и их смесью в соотношении $1 : 1.5$ объемом 4 л. Подача воды в линию обеспечивается с помощью герметичного химического электронасоса. Скорость подачи воды составляет 200 л/ч. Удельное сопротивление воды, достаточное для нормальной работы установки, составляет 2 МОм · см. При работе в частотном режиме циркуляция воды в линии осуществляется непрерывно.

Рабочее давление в коммутаторе 15 (рис. 2) до 10 атм, рабочий газ — азот. В частотном режиме работы обеспечивается продувка газа с помощью двух вентиляторов 16 при охлаждении стенок канала продувки проточной водой. В соответствии с [6] индуктивность коммутатора предполагали равной 14 нГн на 1 см длины канала разряда, что при межэлектродном зазоре ~ 3 см составляет 40 нГн.

Корпус узла нагрузки образован патрубками 17, 18 (рис. 2) с внутренними диаметрами 360 и 202 мм, длиной 370 и 205 мм соответственно. Узел нагрузки имеет проходной изолятор 19 из капролона, обеспечивающий возможность установки газоразрядной нагрузки или ее эквивалента 20. Как и в генераторе Маркса, для обеспечения изоляции узла нагрузки используется SF_6 , рабочее давление газа 6 атм.

Газоразрядная нагрузка и эквивалент нагрузки (резистивная нагрузка) собраны в полиэтиленовых корпусах с фланцами, длина нагрузки 425 и диаметр 120 мм (20, рис. 2; рис. 5). Газоразрядная нагрузка допускает установку разрядной трубки с наружным диаметром 20 и длиной 400 мм.

Резистивная нагрузка содержит 6 параллельно соединенных спиралей из нихромовой проволоки $\varnothing 0.5$ мм, намотанных на керамические трубки. Для повышения электрической прочности при работе в режиме одиночных импульсов корпус резистивной нагрузки заполнялся трансформаторным маслом. В частотном режиме охлаждение нагрузки осуществлялось пропусканием через ее корпус проточной воды. Активное сопротивление нагрузки 1 Ом, собственная индуктивность



Рис. 5. Резистивная нагрузка в сборе.

300 нГн. Ориентировочное значение полной индуктивности узла нагрузки с учетом индуктивности токоподвода 350 нГн.

Автоматизированная система управления обеспечивает контроль состояния, программируемое включение и выключение систем продувки, охлаждения, подачи деионизованной воды в промежуточный накопитель, управление работой генератора Маркса, регистрацию и запись времени и напряжения срабатывания генератора как в однократном, так и в импульсно-периодическом режиме. Система управления реализована на базе микропроцессорной технологии, состоит из схемы управления и управляющего компьютера. Схема управления собрана в двух шкафах 21 (рис. 2), закрепленных на корпусе генератора Маркса. Управляющий компьютер с регистрирующей аппаратурой размещается в экранированной комнате.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Эквивалентная электрическая схема установки приведена на рис. 6. Обозначения элементов схемы и значения их параметров соответствуют данным предыдущего раздела. Сопротивление R_1 – сопротивление первичного контура, равное сумме демпферных сопротивлений и сопротивлений коммутаторов. Ключ S соответствует коммутатору 15 (рис. 2), R_2 – сопротивление ключа в замкнутом состоянии, $L_3 = 390$ нГн – суммарная индуктивность коммутатора и узла нагрузки, U_0 – начальное напряжение на конденсаторах.

Оценки параметров генератора – напряжения на конденсаторах генератора Маркса U_1 и тока зарядки промежуточного накопителя I_1 , напряжения на промежуточном накопителе U_2 и тока нагрузки I_2 – можно получить с помощью простых формул для разряда в RLC -контуре. Более точные значения параметров генератора, а также зависи-

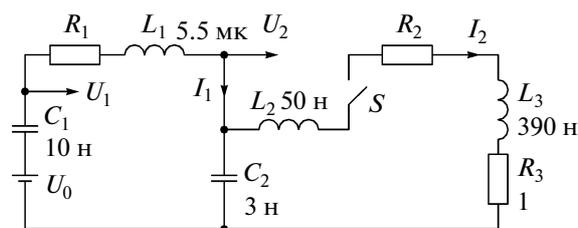


Рис. 6. Схема установки. C_1, C_2 – емкость генератора Маркса в ударе и емкость промежуточного накопителя; R_1, R_2, R_3 – сопротивления первичного контура, ключа и нагрузки; L_1, L_2 – индуктивности первичного контура и промежуточного накопителя, L_3 – индуктивность ключа и нагрузки; U_1 и U_2 – напряжения на конденсаторах генератора Маркса и промежуточном накопителе; I_1 и I_2 – токи первичного контура и нагрузки. $U_0 = 10U_{зар}$.

мости их от времени были получены с использованием численного моделирования. Сопротивления коммутаторов при проведении расчетов предполагались постоянными. Сопротивление ключа S (коммутатора 15) варьировалось в пределах 0–0.5 Ом, сопротивление коммутаторов генератора Маркса изменялось в пределах 0–15 Ом (0–1.5 Ом на коммутатор). Полученные данные сравнивались с результатами эксперимента.

Выражение для тока разряда в RLC -контуре можно записать в виде

$$I = \frac{U_0}{\sqrt{\rho^2 - \frac{R^2}{4}}} e^{kt} \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$; $k = -\frac{R}{2L}$; $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$; t – время.

Длительность периода разрядного тока и время до максимума тока равны соответственно

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2)$$

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega} \arctg\left(-\frac{\omega}{k}\right). \quad (3)$$

Подставляя в (1)–(3) параметры схемы, найдем, что волновое сопротивление цепи разряда промежуточного накопителя на нагрузку составляет 12.2 Ом. Пренебрегая сопротивлением ключа в сравнении с сопротивлением нагрузки и волновым сопротивлением контура, получим длительность периода импульса тока нагрузки равной 230 нс, что соответствует требуемой длительности полупериода импульса тока $t_{и} = 110$ –130. Время до максимума тока составляет 56 нс, максимальные требуемые значения тока 70 и 30 кА в одноимпульсном и частотном режимах достигаются при напряжении на промежуточном накопителе 910 и 390 кВ.

Аналогичным образом для цепи зарядки промежуточного накопителя от генератора Маркса получим, что эквивалентная емкость составляет

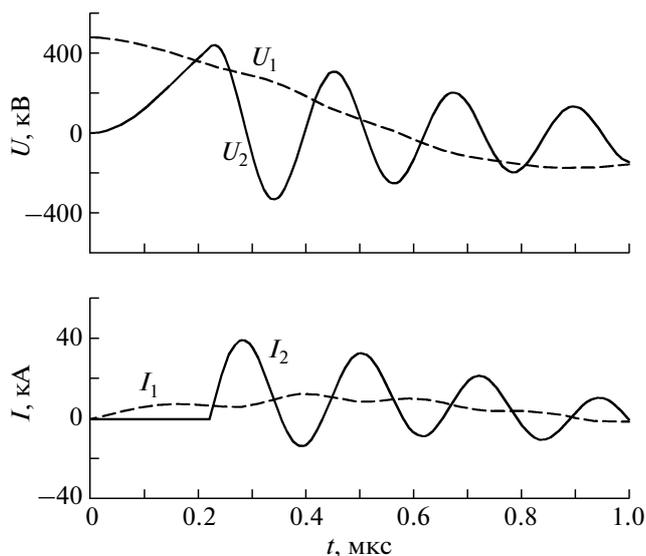


Рис. 7. Зависимости напряжения U_1 на конденсаторах генератора Маркса, напряжения U_2 на промежуточном накопителе, тока I_1 генератора Маркса и тока нагрузки I_2 от времени. $U_{зар} = 48$ кВ, $t_k = 220$ нс.

2.2 нФ, волновое сопротивление контура 49 Ом. Длительность полупериода импульса тока, соответствующая времени достижения максимального напряжения на промежуточном накопителе, равна 350 нс. Пренебрегая активным сопротивлением контура в сравнении с волновым, найдем, что токи генератора Маркса при максимальном зарядном напряжении 75 и 40 кВ соответственно в одноимпульсном и частотном режимах составляют 15.3 и 8.2 кА. После срабатывания ключа появляется цепь разряда генератора Маркса через нагрузку. Волновое сопротивление этого контура относительно мало – 24 Ом, что может обеспечить двукратное увеличение тока. Значения тока в обоих случаях, однако, с достаточным запасом остаются в области допустимых значений токов конденсаторов генератора Маркса.

На рис. 7 и 8 приведены зависимости напряжений и токов генератора от времени, а также зависимости амплитуды I_{2max} и длительности $t_{и}$ первого полупериода тока нагрузки от времени t_k замыкания ключа относительно начала зарядки промежуточного накопителя, полученные в результате моделирования. Расчет выполнен для случая $R_1 = 11.6$ Ом (9 демпферных сопротивлений по 0.4 Ом и 10 коммутаторов по 0.8 Ом), $R_2 = 0.3$ Ом.

Расчетная зависимость тока нагрузки от времени является суммой двух синусоид, что связано с разрядом на нагрузку генератора Маркса. Наложение тока генератора Маркса на ток промежуточного накопителя приводит к росту тока нагрузки в первом, третьем и пятом полупериоде и уменьшению во втором и четвертом, что сопровождается увеличением длительности соответ-

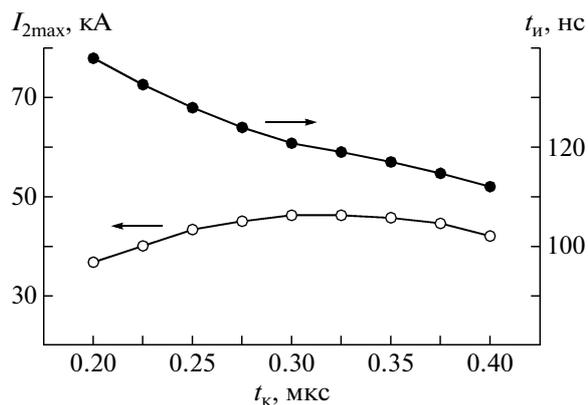


Рис. 8. Расчетные зависимости амплитуды тока I_{2max} и длительности $t_{и}$ первого полупериода от времени замыкания ключа t_k . $U_{зар} = 48$ кВ.

ственно первого, третьего и пятого полупериодов импульса тока. Одновременно за счет частичного разряда промежуточного накопителя через первичный контур период колебаний тока нагрузки уменьшается и составляет 220 нс. При напряжении на промежуточном накопителе 444 кВ максимальное значение тока нагрузки $I_{2max} = 39.5$ кА, длительность первого полупериода $t_{и} = 131$ нс.

Анализ показывает, что амплитуда тока нагрузки и длительность первого полупериода импульса тока существенно зависят от времени срабатывания ключа t_k . Как видно из рис. 8, раннее срабатывание ключа приводит к уменьшению амплитуды тока нагрузки в связи с недозарядкой промежуточного накопителя, а также к увеличению длительности первого полупериода. Позднее срабатывание ключа вблизи максимума напряжения на промежуточном накопителе ~ 350 нс от начала зарядки или за ним также ведет к уменьшению тока. Изменение зарядного напряжения $U_{зар}$ приводит к пропорциональному изменению тока. Характер зависимостей $I_{2max}(t_k)$ и $t_{и}(t_k)$ при изменении $U_{зар}$ сохраняется.

Расчетные зависимости и экспериментально зарегистрированные осциллограммы близки друг другу. На рис. 9 представлены осциллограммы напряжения на промежуточном накопителе U_2 и тока нагрузки I_2 , полученные при тех же значениях зарядного напряжения $U_{зар} = 48$ кВ и времени включения коммутатора $t_k = 220$ нс, что и расчетные зависимости, приведенные на рис. 7. Для регистрации импульсов напряжения и тока использовались емкостный делитель напряжения и пояс Роговского, осциллографы Tektronix DPO7104 и Tektronix TDS224. Осциллограммы имеют ту же форму, что и расчетные зависимости, значения напряжения на промежуточном накопителе, тока нагрузки и длительности первого полупериода со-

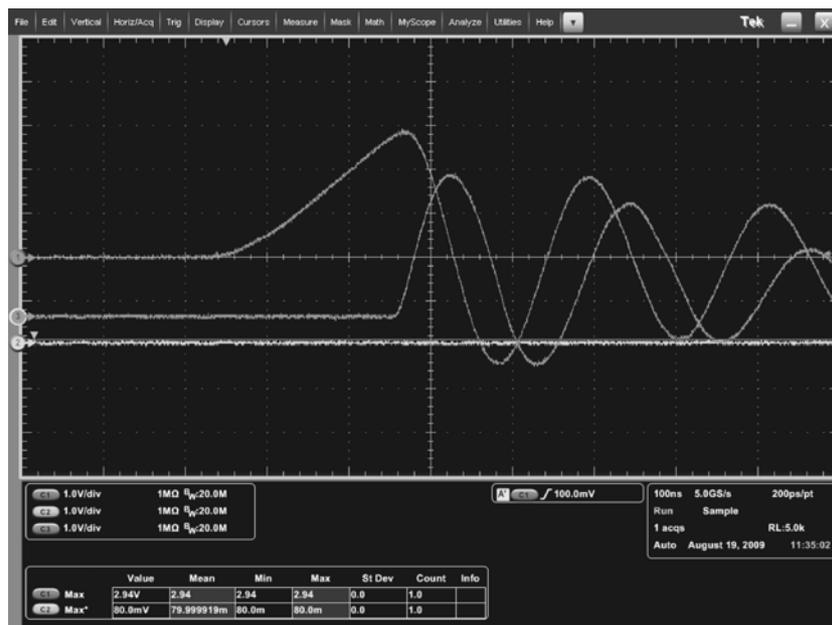


Рис. 9. Осциллограммы напряжения на промежуточном накопителе U_2 (верхняя) и тока нагрузки I_2 (нижняя). Чувствительность по вертикали 155 кВ/деление и 11.93 кА/деление, развертка – 100 нс/деление. $U_{зар} = 48$ кВ, $t_k = 220$ нс.

ставляют $U_{2max} \approx 440$ кВ, $I_{2max} \approx 39.0$ кА и $t_{и} \approx 133$ нс и хорошо соответствуют результатам расчета.

Превышение экспериментального значения длительности первого полупериода над расчетным значением связано с существованием в процессе спада сопротивления ключа двух фаз. В течение первой фазы сопротивление ключа велико, порядка волнового сопротивления контура или больше, что не учитывалось при проведении расчетов. Наличие этого сопротивления и является причиной затягивания фронта импульса и увеличения длительности первого полупериода на $\sim 2-3$ нс по сравнению с расчетными зависимостями. В течение основного времени импульса сопротивление ключа невелико. Наибольшее сходство расчетных зависимостей с реальными осциллограммами наблюдается, если сопротивление ключа равно 0.3 Ом, а сопротивление коммутаторов генератора Маркса составляет 0.8–0.9 Ом при $U_{зар} = 50-75$ кВ и возрастает до 1.5 Ом на коммутатор при малых зарядных напряжениях.

Значения тока нагрузки I_{2max} и длительности первого полупериода $t_{и}$ импульса тока, полученные при изменении зарядного напряжения генератора Маркса в диапазоне $U_{зар} = 34-74$ кВ, приведены на рис. 10. Номера 1–15 на графике соответствуют номерам импульсов в процессе испытаний: импульсы 1–12 получены в одноимпульсном режиме, 13–15 – три последовательных импульса из серии продолжительностью 5 мин при работе генератора на частоте 10 Гц.

Разброс экспериментальных значений I_{2max} и $t_{и}$ тока нагрузки в одноимпульсном режиме доста-

точно мал и в основном связан с разбросом времени срабатывания коммутатора 15 (рис. 2). Подтверждением этого являются разнонаправленные изменения амплитуды тока и длительности первого полупериода при постоянном зарядном напряжении уменьшение или увеличение I_{2max} от импульса к импульсу сопровождается увеличением или уменьшением величины $t_{и}$ в полном соответствии с данными рис. 8. Так, например, уменьшение тока в импульсах 2, 6, 9, 10 (рис. 10) по отношению к импульсам соответственно 1, 5, 8, 11 сопровождается увеличением длительности $t_{и}$ первого

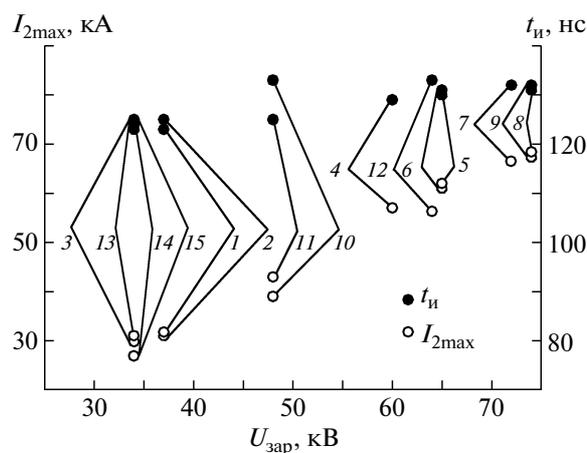


Рис. 10. Значения тока нагрузки I_{2max} и длительности $t_{и}$ первого полупериода в одноимпульсном (1–12) и частотном (13–15) режимах в зависимости от зарядного напряжения $U_{зар}$ генератора Маркса.

полупериода. Наиболее вероятными причинами нестабильности в работе коммутатора *15* могут быть повышенная влажность рабочего газа, недостаточная чистота поверхности электродов в отдельных экспериментах. При работе в частотном режиме разброс значений тока несколько увеличивается.

Эксперименты продемонстрировали устойчивую работу установки. Экспериментально получены требуемые значения тока 40–70 кА в одноимпульсном и 30 кА в частотном режимах при длительности первого полупериода импульса тока в пределах 120–133 нс. Нестабильность тока нагрузки от импульса к импульсу в одноимпульсном режиме при постоянном зарядном напряжении генератора Маркса не превышает $\pm 5\%$. При работе установки с частотой 10 Гц в течение 5 мин нестабильность амплитуды тока находится в пределах $\pm 10\%$, число пропусков импульсов (несрабатываний генератора при подаче импульса запуска) не более 1% от полного числа импульсов.

Авторы благодарят Ю.П. Баженова за участие в изготовлении установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
2. *Katsuki S., Takano D., Namihira T., Akiyama H.* // Proc. of 2001 IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference (PPPS-2001). 2001. V. 2. P. 1229.
3. *Abdullin E.N., Bugaev S.P., Efremov A.M. et al.* // Proc. of 9th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. 1992. V. 1. P. 419.
4. *Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. и др.* // ПТЭ. 1993. № 5. С. 138.
5. *Onishchenko L., Gunko V., Grebennikov I., Bandura A.* // Proc. of 12th Symp. on High Current Electronics. 2000. P. 366.
6. *Миллер Р.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.