

## СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-2

© 2012 г. А. В. Акимов, В. Е. Акимов, П. А. Бак, В. Д. Бочков\*, Л. Т. Вехорева\*\*,  
А. А. Корепанов, П. В. Логачев, А. Н. Панов, Д. А. Старостенко, О. В. Шилин\*\*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

*E-mail: a.v.akimov@inp.nsk.su*

*\*ООО “Импульсные технологии”*

*Россия, 390023, Рязань, пр-д Яблочкова, 5*

*E-mail: info@pulsetech.ru*

*\*\*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

*Россия, 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29*

*E-mail: ludmilavekhoreva@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.06.2011 г.

Представлена система импульсного питания индукционного ускорителя электронов на 2 МэВ, 2 кА, работающего в двухимпульсном режиме. Описаны принципиальная схема и основные элементы импульсной системы, указаны основные технические решения, позволяющие сформировать на резистивно-индуктивной нагрузке серию импульсов напряжением 21 кВ, током до 8 кА, длительностью 200 нс. Приведены экспериментальные данные, полученные при работе отдельных устройств и всей системы питания в номинальном режиме.

### ВВЕДЕНИЕ

Рентгенографический метод исследования быстротекущих процессов является сегодня одним из наиболее информативных и востребованных в ядерных оружейных лабораториях мира [1, 2]. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН) совместно с Институтом технической физики им. Е.И. Забабахина был разработан проект мощного двухимпульсного источника рентгеновского излучения с минимальным поперечным размером источника. Проект, получивший название ЛИУ-20, включает в себя линейный индукционный ускоритель, обеспечивающий ускорение электронного пучка с током 2 кА до энергии 20 МэВ.

В качестве первого этапа реализации проекта в ИЯФ был создан линейный индукционный ускоритель – инжектор ЛИУ-2 на энергию 2 МэВ с током пучка 2 кА. Качество пучка, сформированного ЛИУ-2 на указанных параметрах, должно быть таким, чтобы обеспечить работу инжектора как самостоятельной рентгенографической машины. При этом диаметр электронного пучка на конверсионной мишени по уровню 10% плотности тока не должен превышать 1.9 мм, что соответствует ненормализованному фазовому объему пучка на энергии 2 МэВ в 120 л мм · мрад.

ЛИУ-2 состоит из двух ускоряющих систем: первая обеспечивает напряжение 1 МВ на ваку-

умном диоде анод–катод, вторая доускоряет эмитированный с катода пучок до энергии 2 МэВ. Ускоряющая система ЛИУ-2 должна обеспечивать формирование и ускорение двух одинаковых электронных импульсов длительностью 200 нс, следующих друг за другом с регулируемым интервалом от 2 до 10 мкс, при стабильности энергии электронов  $\pm 1\%$ . Далее рассматриваются особенности схемного решения модулятора для формирования последовательности из двух импульсов.

### СХЕМА МОДУЛЯТОРА

За основу системы импульсного питания индукторов ЛИУ была выбрана схема модулятора с параллельным включением двух генераторов на одну нагрузку (рис. 1). В такой конструкции катод каждого тиратрона заземлен. Это упрощает питание генератора водорода и схемы запуска, упрощается конструктивное исполнение ошиновки тиратронов. Нагрузкой модулятора являются индукторы на основе аморфного сплава 2НСР, подключенные к выходу модулятора через кабельную трассу.

Индукторы, собранные в ускорительном модуле, образуют индукционную систему (ИС), нагрузкой которой является электронный пучок либо эквивалентное активное сопротивление  $R_n$ . Два импульса на нагрузке формируются при последовательном во времени разряде формирую-

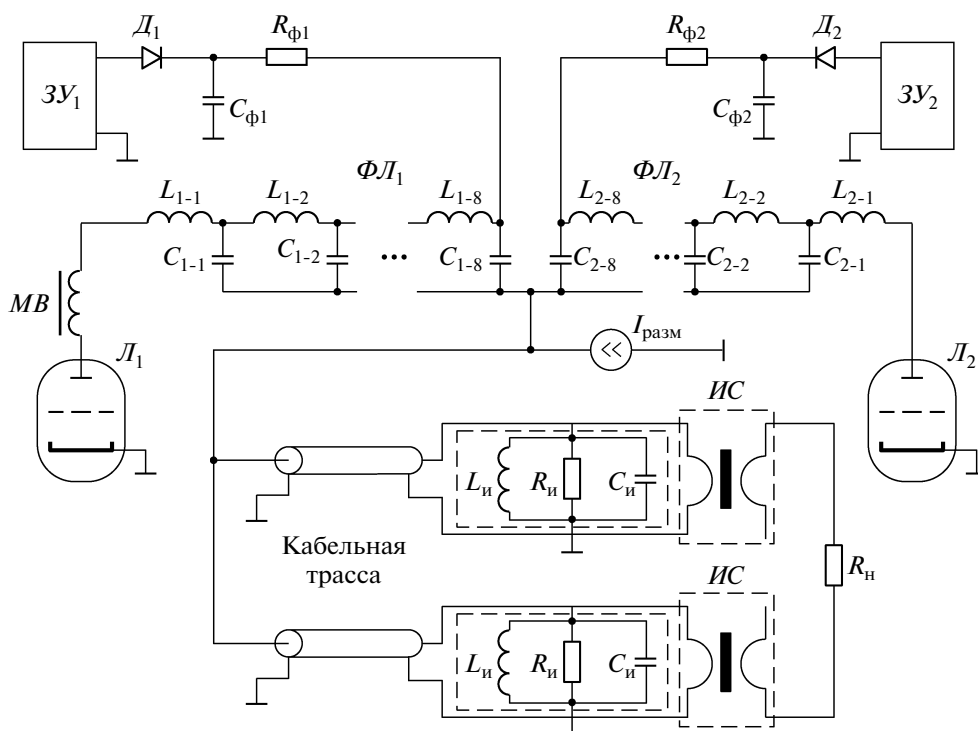


Рис. 1. Модулятор с параллельным включением двух генераторов.

щих линий ( $\Phi L$ ). Сначала при включении тиратрона  $L_1$  происходит разряд  $\Phi L_1$ , затем, при включении тиратрона  $L_2$  с заданной задержкой, происходит разряд  $\Phi L_2$ .

При формировании второго импульса к ключу  $L_1$ , открытому первым, прикладывается обратное напряжение, равное или превышающее по амплитуде напряжение на выходе модулятора. В связи с этим необходимо, чтобы за время паузы между импульсами первый ключ восстановил свою электрическую прочность и при открывании второго ключа не проводил ток в обратном направлении. Для развязки одной формирующей линии от другой можно применять насыщающийся дроссель — магнитный вентиль  $MВ$ , однако наиболее эффективное решение достигается при наличии диодных свойств у самих ключей. Такие ключи должны иметь время восстановления после коммутации прямого тока в пределах единиц микросекунд, а в идеале — сотен наносекунд, о чем будет сказано ниже.

Формирующие линии заряжаются от соответствующих источников импульсного напряжения  $3У_1$ ,  $3У_2$  через зарядные диоды  $Д_1$ ,  $Д_2$  и фильтрующие цепи  $R_{\Phi 1}-C_{\Phi 1}$ ,  $R_{\Phi 2}-C_{\Phi 2}$ . Всего в модуляторе используется два зарядных устройства, по одному на каждую формирующую линию. Таким образом обеспечивается независимая подстройка уровней

напряжения на выходе модулятора во время первого и второго импульсов.

Выходное напряжение модулятора составляет 21 кВ, один модулятор запитывает два индуктора в параллель. Каждый индуктор для обеспечения согласования с волновым сопротивлением нагрузки присоединяется к модулятору через десять 50-омных кабелей РК50-11-13 равной длины 10 м. При этом импеданс нагрузки модулятора ( $Z_{нагр}$ ) представляет собой параллельное включение эквивалентного активного сопротивления электронного пучка ( $R_n = 20 \text{ Ом}$ ), эквивалентной резистивно-индуктивной нагрузки индукторов (индуктивность намагничивания индуктора  $L_n \sim 7 \text{ мкГн}$ , активное вихревое сопротивление индуктора  $R_n \sim 15 \text{ Ом}$ ) и емкости  $ИС$  ( $C_{ИС} \sim 1 \text{ нФ}$ ).

Проектные параметры модуляторов импульсной системы следующие: напряжение на выходе модулятора 21 кВ; количество питаемых индукторов — 2; максимальный рабочий ток на каждый индуктор (с учетом тока индуктора) — 4 кА; волновое сопротивление  $\Phi L$  — 2.5 Ом; число ячеек  $\Phi L$  — 8; емкость и индуктивность ячейки (среднее значение) соответственно 9 нФ и 60 нГн; длительности: плоской вершины импульса — 200 нс, фронта (10–90%) — 80 нс, спада (90–10%) — 150 нс; неравномерность плоской вершины импульса  $\pm 1\%$ ; зарядное напряжение  $\Phi L$  — 43 кВ.

Для обеспечения требуемого уровня ускоряющего напряжения 2 МВ импульсная система вклю-

чает в себя 48 модуляторов. Половина модуляторов питает индукционную систему, формирующую напряжение 1 МВ на диоде анод–катод, вторая половина питает индукционную систему, нагруженную на доускоряющую секцию, на которой также формируется импульс напряжения суммарной амплитудой 1 МВ. При такой схеме импульсного питания, когда полное ускоряющее напряжение формируется отдельными относительно невысокой токовой нагрузкой, снижаются требования к отдельным элементам модуляторов, что особенно важно для получения двухимпульсного режима работы импульсной системы. Кроме того, как будет отмечено ниже, питание ускорителя от нескольких модуляторов позволяет иметь дополнительный механизм настройки формы ускоряющего напряжения.

### ВЫБОР ТИПА КЛЮЧЕЙ

В качестве высоковольтных силовых ключей для модуляторов ЛИУ были выбраны тиратроны ТПИ1-10к/50 на основе импульсного разряда низкого давления с полым катодом, так называемые псевдоискровые разрядники [3], с коммутируемым по паспорту током до 10 кА и рабочим напряжением до 50 кВ. Данные приборы рассматриваются как альтернатива классическим высоковольтным водородным тиратронам с накаливаемым катодом, особенно при коммутации больших токов с наносекундной стабильностью запуска и сравнительно малым средним током через прибор. По сравнению с тиратронами с накаливаемым катодом тиратроны ТПИ обладают меньшими габаритами, не требуют принудительного охлаждения, обладают лучшими коммутационными характеристиками.

Как указывалось выше, в схеме двухимпульсного модулятора с параллельным включением генераторов для развязки одной  $\Phi/L$  от другой важно наличие диодных свойств у ключей. Было исследовано поведение тиратронов ТПИ1-10к/50 при прикладывании к аноду импульса обратной полярности напряжением до 26 кВ, длительностью до 300 нс через 2–10 мкс после начала импульса прямого тока амплитудой до 10 кА, длительностью до 300 нс. Подробное описание результатов испытаний приведено в статье [4], на их основе можно сделать вывод о том, что тиратроны ТПИ1-10к/50 способны выдерживать обратное напряжение до 26 кВ через 3 мкс после начала импульса прямого тока амплитудой 7 кА, длительностью 200 нс. Эти показатели позволяют существенно снизить требования к дополнительному развязывающему элементу схемы импульсного питания — магнитному вентилю.

Проведенные в ИЯФ испытания тиратронов подтвердили их коммутационные характери-

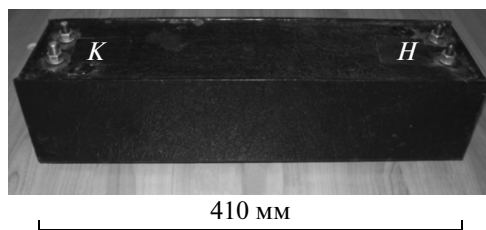


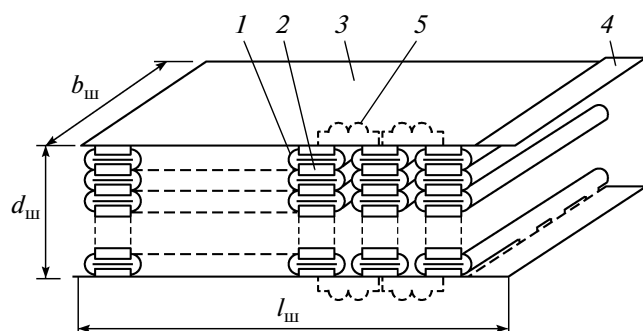
Рис. 2. Формирующая линия на основе пленочных конденсаторных секций в сборе. *H* и *K* — начало и конец линии.

ки [5], в частности возможность коммутации тока до 10 кА с временем коммутации до 60 нс, со стабильностью отпираания до 5 нс. Нарботка отдельных тиратронов ТПИ1-10к/50 в рабочих режимах ЛИУ превысила  $10^5$  импульсов, после чего стабильность их параметров и коммутационные характеристики остались на прежнем уровне. Выявленные при первых испытаниях недостатки тиратронов были согласованы с разработчиками (ООО “Импульсные технологии”, Рязань) и в большой степени устранены в последующих версиях приборов. Новая технология изготовления и конструкция генератора водорода позволили увеличить ресурс работы и диапазон рабочих давлений тиратрона, а за счет использования более качественного активного элемента катода были снижены напряжение зажигания дуги и падение напряжения на дуге вспомогательного разряда.

### ВЫБОР ТИПА КОНДЕНСАТОРОВ

По опыту использования формирующих линий в классических модуляторах для питания клистронов, где при длительности импульса на уровне 3–5 мкс требования к длительности фронта ограничиваются значением около 0.7 мкс, хорошо зарекомендовали себя конденсаторы с пленочным или комбинированным диэлектриком на основе полипропилена [6]. К недостаткам таких конденсаторов следует отнести их избыточные паразитные параметры — собственную индуктивность и активное сопротивление. Тем не менее, в сотрудничестве с производителем таких конденсаторов (СПбГПУ, С.-Петербург) удалось создать формирующую линию, удовлетворяющую проектным параметрам модулятора (см. выше).

Формирующая линия была выполнена в виде монолитной, пропитанной маслом двухшинной линии на основе ячеек из пленочных диэлектриков (рис. 2), такая линия получилась достаточно компактной. Пленочные конденсаторные секции мотаются по стандартной технологии и собираются последовательно для получения требуемого значения рабочего напряжения [7]. Отдельная секция выдерживает напряжение около 5 кВ, для получения напряжения в несколько десятков ки-



**Рис. 3.** Формирующая линия на основе пленочных конденсаторных секций (эскиз конструкции). 1 – пленочная конденсаторная секция (смотана в рулон); 2 – выводы секции; 3 – соединительные шины; 4 – выводы линии; 5 – дополнительные индуктивности ячеек (дрессели).

ловольт секции соединяются последовательно и образуют ячейку  $\PhiЛ$ . Отдельные ячейки соединяются между собой либо шинами, либо дросселями в зависимости от требуемого волнового сопротивления  $\PhiЛ$ . На рис. 3 представлен эскиз  $\PhiЛ$ .

Сложность создания формирующей линии заключалась в отсутствии возможности настройки волнового сопротивления отдельных ячеек линии в ее собранном состоянии – настройка возможна на малом напряжении в разобранном состоянии линии. Поэтому для создания подобных линий требуется качественный низковольтный макет, позволяющий имитировать все рабочие и паразитные параметры нагрузки. При этом следует делать соответствующую поправку, если присутствует нелинейная зависимость электрических параметров нагрузки от напряжения, как в случае с индукторами из аморфного сплава.

Также на начальном этапе в качестве альтернативных емкостных накопителей для  $\PhiЛ$  модулятора были выбраны ситалловые конденсаторы К15-10, разработанные в начале 80-х годов. Они привлекли к себе внимание такими электрическими параметрами, как высокое рабочее напряжение (до 63 кВ), большая удельная энергоемкость (диэлектрическая проницаемость до 1500), малая собственная индуктивность (не более 30 нГн). Формирующая линия, собранная на конденсаторах К15-10, имеет возможность оперативной настройки волнового сопротивления. Следует отметить, что конденсаторы К15-10, рассчитанные на напряжение 50 кВ, в настоящее время больше не производятся. Конденсаторы, которые удалось использовать для создания модуляторов, были закуплены ИЯФ несколько лет назад. В итоге половина модуляторов ЛИУ-2 была оснащена конденсаторами К15-10, другая половина – линиями на основе пленочных конденсаторных секций.

## ИСПЫТАНИЯ НА СТЕНДЕ

Перед сборкой модуляторов в единую систему питания проводилось комплексное тестирование модуляторов на испытательном стенде, собранном по схеме рис. 1. Стенд представлял собой эквивалент нагрузки модулятора, состоящий из двух индукторов, собранных в стандартном модуле. Индукторы запитываются от модулятора в параллель через кабели стандартной длины 10 м. Активное сопротивление, имитирующее нагрузку электронного пучка ускорителя ( $R_n = 21 \text{ Ом}$ ), включено во вторичную цепь индукционной системы. Таким образом, при питании двух индукторов в параллель напряжением 21 кВ во вторичной цепи происходит удвоение напряжения до 42 кВ, ток нагрузки при этом составляет 2 кА.

Экспериментально полученные формы импульсов одного из 24-х протестированных модуляторов, собранных с использованием формирующих линий на конденсаторах К15-10, приведены на рис. 4а, 5а, 6а. В свою очередь, формы импульсов одного из 24-х протестированных модуляторов, собранных с использованием формирующих линий на базе пленочных конденсаторных секций, приведены на рис. 4б, 5б, 6б. В результате тестов были получены следующие импульсные характеристики модуляторов: зарядное напряжение на формирующей линии – до 43 кВ; амплитуда импульсного напряжения на нагрузке – до 21.5 кВ; рабочий ток на каждый индуктор – до 4 кА; длительности: плоской вершины импульса 220–250 нс, фронта – 80–100 нс, спада – 100–150 нс; неравномерность плоской вершины импульса – от  $\pm 1$  до  $\pm 2\%$ ; интервал между импульсами варьировался от 4 до 10 мкс

## ИСПЫТАНИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ

После наладки и испытаний модуляторов был проведен монтаж системы импульсного питания ускорителя (рис. 7), содержащей 48 модуляторов. Все модуляторы установлены в 8 стоек, по 6 модуляторов в каждой стойке. В стойке также находится управляющий крейт, обеспечивающий считывание состояний блокировок модулятора, разрешение работы, формирование запускающих сигналов, оцифровку измеренных аналоговых сигналов.

В результате испытаний импульсной системы, нагруженной на индукционные секции без электронного пучка (холостой ход), был достигнут номинальный уровень суммарного напряжения на ускоряющих электродах – 2.1 МэВ. Для работы системы на индукционные секции с электронным пучком потребовалось качественное сведение выходных импульсов всех модуляторов, что подразумевает синхронизацию срабатывания тиратронов. В итоге импульсная система обеспечила питание индукционного ускорителя с элек-

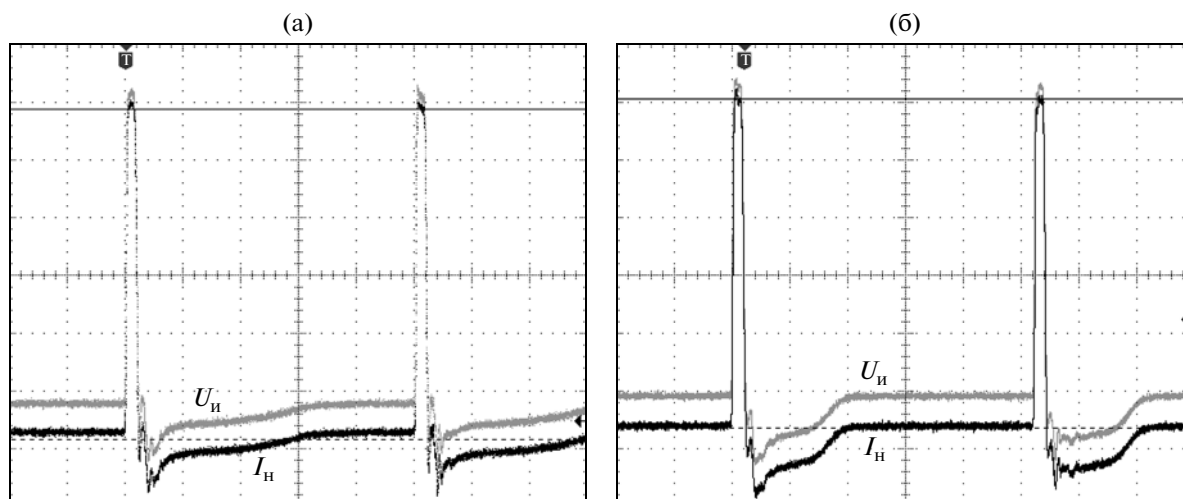


Рис. 4. Форма тока нагрузки  $I_n$  (масштаб по вертикали – 350 А/клетка) и напряжения на индукторе  $U_n$  (4100 В/клетка) при работе модулятора в двухимпульсном режиме (по горизонтали – 2 мкс/клетка): а – использованы  $\Phi Л$  на конденсаторах К15-10, б – на пленочных конденсаторных секциях.

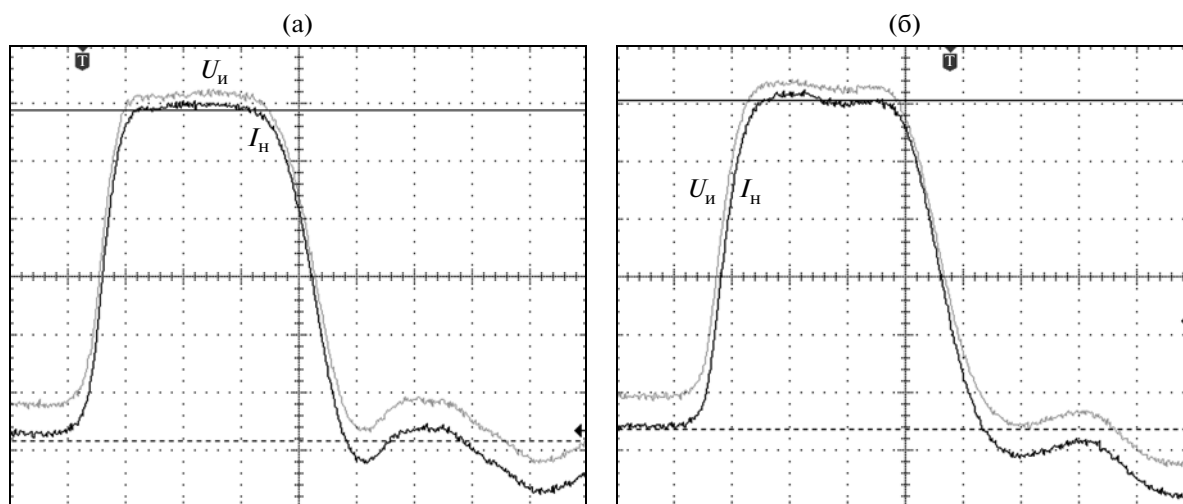


Рис. 5. Форма тока нагрузки  $I_n$  (350 А/клетка) и напряжения на индукторе  $U_n$  (4100 В/клетка) во время первого импульса (100 нс/клетка): а – использованы  $\Phi Л$  на конденсаторах К15-10, б – на пленочных конденсаторных секциях.

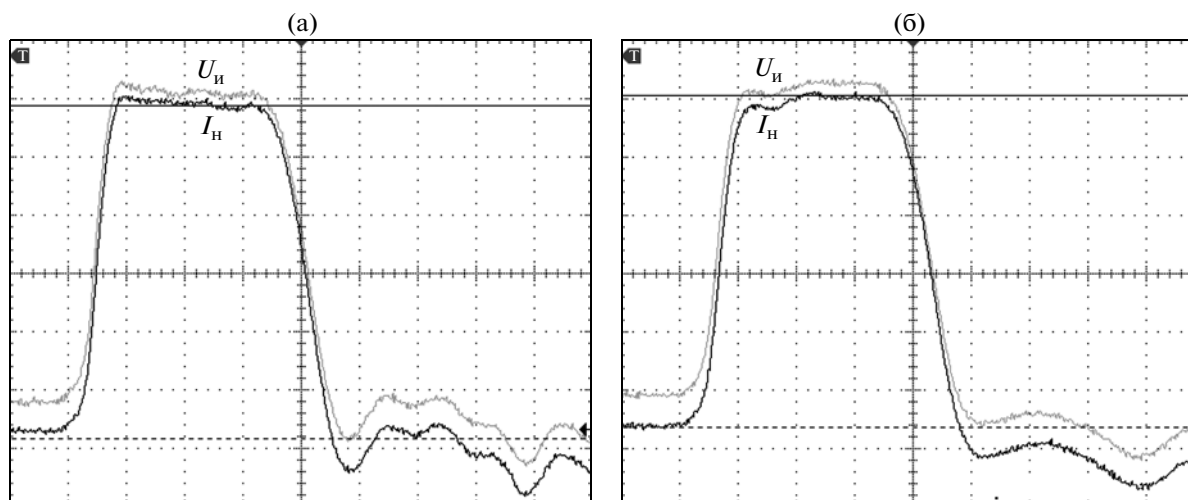


Рис. 6. Форма тока нагрузки  $I_n$  (350 А/клетка) и напряжения на индукторе  $U_n$  (4100 В/клетка) во время второго импульса (100 нс/клетка): а – использованы  $\Phi Л$  на конденсаторах К15-10, б – на пленочных конденсаторных секциях.



Рис. 7. Система импульсного питания в сборе.

тронным пучком в необходимом объеме. В то же время остались вопросы по оптимизации коррекции формы ускоряющего напряжения за счет изменения параметров модулятора. Как говорилось выше, в данной конструкции системы питания половина модуляторов оснащена формирующи-

ми линиями, не поддающимися перенастройке. Тем не менее, получить требуемую равномерность полки импульса суммарного ускоряющего напряжения удастся за счет небольшой рассинхронизации времени включения отдельных модуляторов и, как следствие, за счет усреднения колебаний их выходных напряжений. На рис. 8 представлены формы импульса ускоряющего напряжения на диоде анод–катод и тока катода в режиме без рассинхронизации включения модуляторов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проекта по созданию индукционного ускорителя ЛИУ-2 была разработана система импульсного питания, состоящая из 48 модуляторов, обеспечивающая суммарное ускоряющее напряжение до 2 МВ при токе пучка 2 кА в двухимпульсном режиме. В процессе работы по созданию модуляторов были исследованы относительно новые коммутационные приборы – тиратроны с ненакаливаемым катодом, выявлены их характерные особенности, намечены пути дальнейшего повышения надежности, что весьма важно в установках, использующих сотни таких коммутаторов. Были изучены диодные свойства тиратронов, на основе чего был реализован относительно

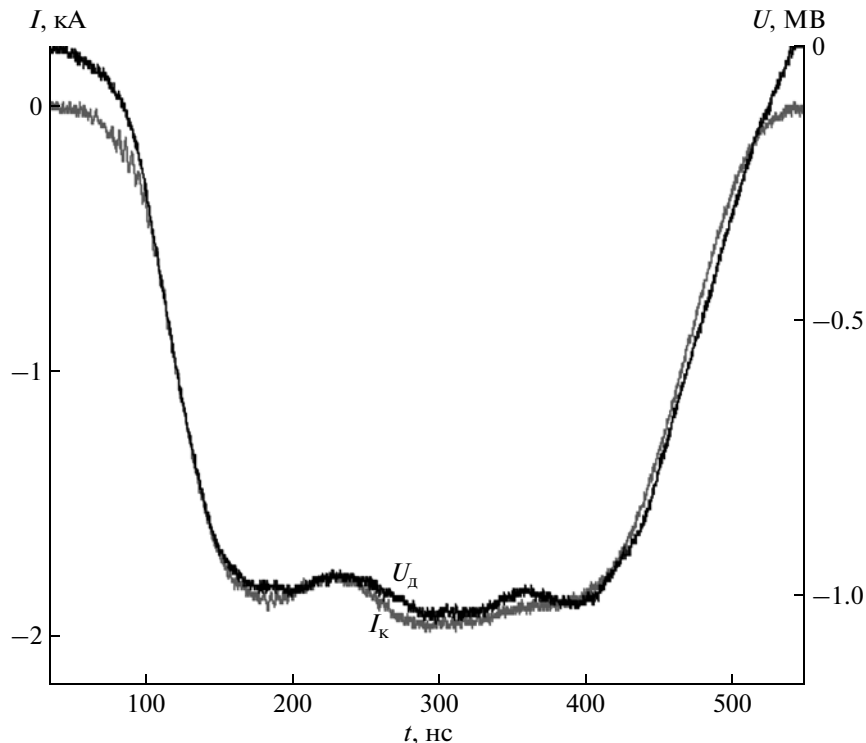


Рис. 8. Формы импульса напряжения на диоде анод–катод  $U_d$  и тока катода  $I_k$ .

простой вариант двухимпульсного режима работы системы питания.

Совместно с производителем пленочных конденсаторов были разработаны специальные формирующие линии, рассчитанные на необходимые токи и напряжения, отличающиеся хорошими импульсными характеристиками, малыми габаритами и удобством монтажа. К сожалению, отечественное производство высоковольтных емкостных накопителей, рассчитанных на применение в импульсном режиме на временах несколько сотен наносекунд, было фактически остановлено. Опыт разработки описанных формирующих линий позволил найти новый подход к реализации импульсных формирователей, существенно удешевить и упростить их создание.

Работа была частично поддержана Министерством образования и науки РФ (контракты 14.740.11.0160, П2493).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burns M.J., Carlsten B.E., Kwan T.J.T. et al.* // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. 1999. V. 1. P. 617.
2. *De Mascureau J., Anhouard Ph., Bardy J. et al.* // Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference. 1993. V. 1. P. 697.
3. *Бочков В.Д., Королев Ю.Д.* Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. акад. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Вводный том. Книга 4. Раздел № XI.6. С. 446.
4. *Akimov A.V., Logachev P.V., Bockhov V.D. et al* // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. V. 17. № 3. P. 718.
5. *Akimov A.V., Bak P.A., Kazarezov I.V. et al.* // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. № 3(47). P. 92.
6. *Akimov A.V., Akimov V.E., Bak P.A. et al.* // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2001. № 3(38). P. 92.
7. *Кучинский Г.С., Вехорева Л.Т., Шилин О.В.* // Электричество. 1997. № 9. С. 18.