

## ЕМКОСТНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ 1 МДж

© 2011 г. Б. Э. Фридман, Baoming Li\*, В. А. Беляков, Р. Ш. Еникеев, Н. А. Коврижных, Ю. Л. Крюков, А. Г. Рошаль, Р. А. Серебров

*НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова*

*Россия, 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3*

*\*Nanjing University of Sciences & Technology*

*P.R. China, 210091, Nanjing, Xiao Ling Wei, 200*

Поступила в редакцию 04.03.2011 г.

Емкостный накопитель энергии предназначен для генерации мощных импульсов тока. Установка состоит из двух модулей емкостного накопителя энергии, пульта управления и кабельного коллектора для подключения к установке нагрузки. Каждый модуль — это емкостный накопитель энергии с запасаемой энергией 0.5 МДж и напряжением 18 кВ, построенный на 8 конденсаторных ячейках с реверсивноключаемыми динисторами в качестве ключей. Модуль имеет объем 1.3 м<sup>3</sup>. Полупроводниковые ключи в конденсаторных ячейках запускаются импульсами света, которые передаются от пульта управления через волоконно-оптические кабели. Устройство спроектировано для работы в режиме программируемого разряда, при котором полупроводниковые ключи в конденсаторных ячейках включаются не одновременно, в соответствии с заданной программой. Максимальная амплитуда импульса выходного тока при одновременном включении разряда всех ячеек и коротком замыкании на нагрузке составляет 800 кА. Длительность фронта импульса разрядного тока ячейки 150 мкс.

Емкостные накопители энергии широко используются как источники импульсного тока в различных физических экспериментах, включая исследования электрического разряда в конденсированной среде [1–3]. Развитие технологии изготовления конденсаторов с высокой плотностью энергии (>1 Дж/см<sup>3</sup>) и прогресс в производстве силовых полупроводниковых ключей создали основу для разработки компактных источников импульсного тока на основе емкостных накопителей энергии, которые могут запасать энергию в сотни килоджоулей в сравнительно небольшом объеме и генерировать импульсные токи амплитудой в сотни килоампер и более [4, 5].

Современные емкостные накопители имеют модульную структуру. Конденсаторная батарея в таких накопителях разделена на модули, каждый из которых содержит в своем составе несколько конденсаторных ячеек. В ячейках кроме конденсатора и ключа разрядного тока имеются балластные и защитные резисторы, индуктор, датчики систем управления и диагностики [6]. Цепь формирования импульса тока конденсаторной ячейки включает в себя замыкающий полупроводниковый ключ, рубящий ключ, промежуточный индуктивный накопитель энергии (индуктор), балластные резисторы и другие устройства [7].

Компактное размещение в малом объеме компонентов конденсаторной батареи выдвигает проблему обеспечения работоспособности этих компонент в условиях одновременного действия

электрических, тепловых, магнитных и силовых полей. Большое количество конденсаторных ячеек в составе емкостного накопителя энергии позволяет генерировать импульсы тока в режиме программируемого разряда, при котором ключи в ячейках замыкаются не одновременно, в соответствии с заранее определенной временной программой [8–11]. Реализация такого режима выдвигает дополнительные технические требования к аппаратуре управления накопителя энергии и конденсаторных ячеек. Все эти проблемы были решены при создании емкостного накопителя энергии, описанного в данной статье.

Предложен емкостный накопитель энергии с запасаемой энергией 1 МДж, состоящий из двух модулей и 16 конденсаторных ячеек. Рассматривается структура установки и ее возможности формировать импульс тока в нагрузке в режиме программируемого разряда.

### 1. СОСТАВ УСТАНОВКИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Установка (рис. 1) состоит из двух модулей емкостного накопителя энергии, кабельного коллектора и пульта управления.

Ее технические характеристики: число модулей емкостного накопителя энергии — 2; запасаемая энергия — 1 МДж; максимальное напряжение на конденсаторах — 18 кВ; максимальный ток в режиме синхронного разряда — 800 кА; фронт импуль-

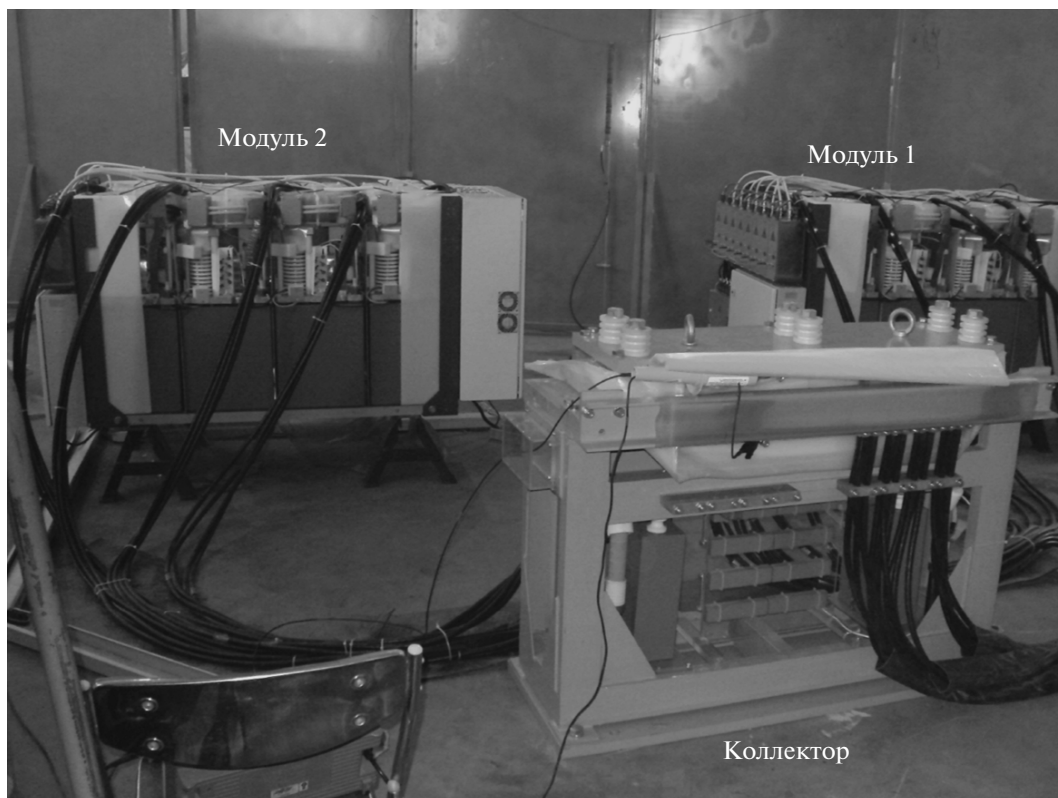


Рис. 1. Высоковольтное оборудование установки.

са тока в режиме синхронного разряда – 150 мкс; число ступеней формирования тока в режиме программируемого разряда (число конденсаторных ячеек) – 16; задержка времени запуска конденсаторных ячеек – от 0 до 32 мс, дискрет установки временной задержки – 1 мкс; длительность зарядки –  $\leq 30$  с; напряжение питания  $3 \times 380$  В, 50 Гц; максимальная потребляемая мощность 80 кВт; объем модуля  $1.3 \text{ м}^3$ ; масса модуля 2200 кг.

Каждый модуль – это функционально завершенный емкостный накопитель энергии с дистанционным управлением, содержащий 8 конденсаторных ячеек с ключами на реверсивно включаемых динисторах (р.в.д.) [6]. Конденсаторная ячейка собрана на конденсаторе с плотностью запасаемой энергии  $1.3 \text{ Дж/см}^3$ , изготовленном компанией ICAR (Италия). Ее внешний вид показан на рис. 2. Подробно конденсаторная ячейка описана в [6]. Она имеет следующие технические характеристики: запасаемая энергия – 64 кДж; емкость – 400 мкФ; максимальное напряжение – 18 кВ; индуктивность замещаемых индукторов: № 1–25 мкГн, № 2–40 мкГн, № 3 – 80 мкГн; максимальный ток – 60 кА; размеры (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота) –  $398 \times 333 \times 795$  мм.

На рис. 3 представлена блок-схема модуля. Модуль [12] содержит 8 конденсаторных ячеек, 8 низ-

ковольтных блоков запуска, защитный контактор  $K$  с нормально-замкнутыми высоковольтными контактами для нейтрализации заряда конденсаторов, зарядное устройство и блок управления. Модуль питается от трехфазной промышленной электрической сети  $3 \times 380$  В, 50 Гц. Разрядный ток выводится из модуля через 16 коаксиальных кабелей, по два кабеля от каждой конденсаторной ячейки. Эти кабели передают разрядный ток через кабельный коллектор в нагрузку.

Каждый модуль соединен с удаленным пультом управления электрическим кабелем для передачи сигналов управления и дуплексной волоконно-оптической линией связи для передачи информации о работе блоков, входящих в состав модуля. Кроме того, синхронизирующие импульсы для запуска р.в.д.-ключей в конденсаторных ячейках передаются от пульта управления к низковольтным блокам запуска через 8 волоконно-оптических линий. Компьютер, соединенный с пультом управления, служит для предварительного задания режимов работы модулей, а также для отображения на мониторе диагностической информации о работе установки и ее составных частей.

## 2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления установки включает в себя аппаратуру управления и контроллеры, размещенные в модулях и в пульте управления. Контроллер пульта соединен волоконно-оптической линией и интерфейсом RS-485 с контроллерами модулей. Интерфейс RS-485 используется также для информационного обмена с другими периферийными контроллерами и с измерительными приборами – киловольтметрами. Компьютер соединен с контроллером пульта управления беспроводным интерфейсом Wi-Fi.

Система управления и модули могут находиться в состояниях 1 (исходное состояние), 2 (готовность), 3 (заряд), 4 (после заряда), 5 (после импульса). При нормальной работе состояния изменяются в естественной последовательности 1–2–3–4–5–1 при нажатии оператором установки соответствующих кнопок управления на пульте. В случае любых непредвиденных обстоятельств оператор может перевести систему управления из любого состояния в состояние 1 (исходное состояние). В результате зарядное устройство модуля будет выключено, высоковольтные контакты *K* (рис. 3) замкнутся и энергия, запасенная в конденсаторах, выделится в балластных резисторах конденсаторных ячеек. Главным назначением контроллеров является проверка и диагностика модулей и пульта управления. В случае неправильного функционирования любых блоков контроллеры прерывают естественную последовательность состояний работы установки и принудительно



Рис. 2. Внешний вид конденсаторной ячейки.

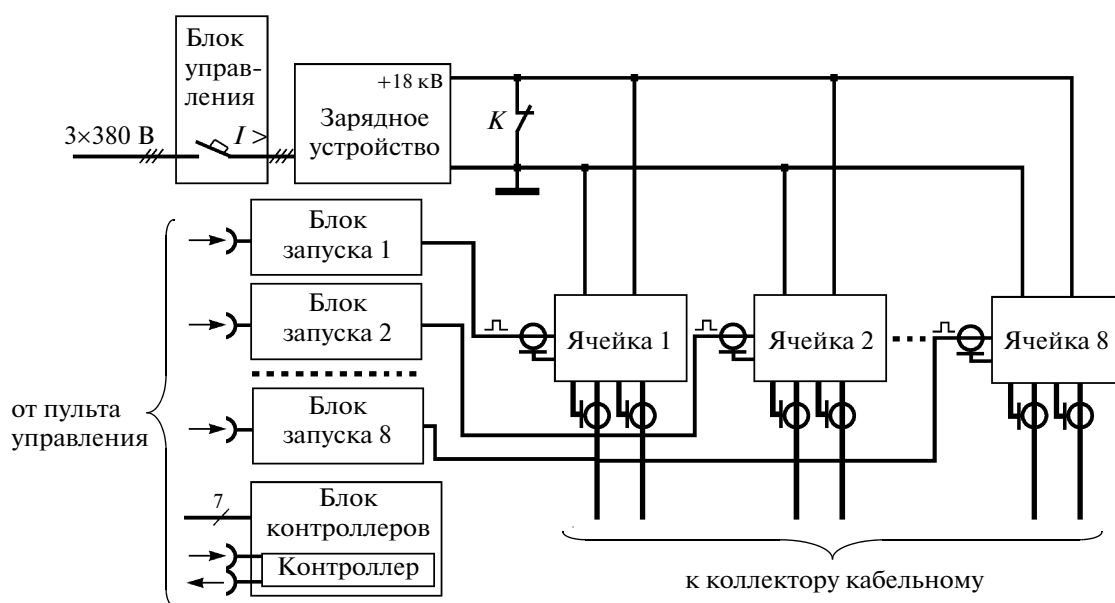
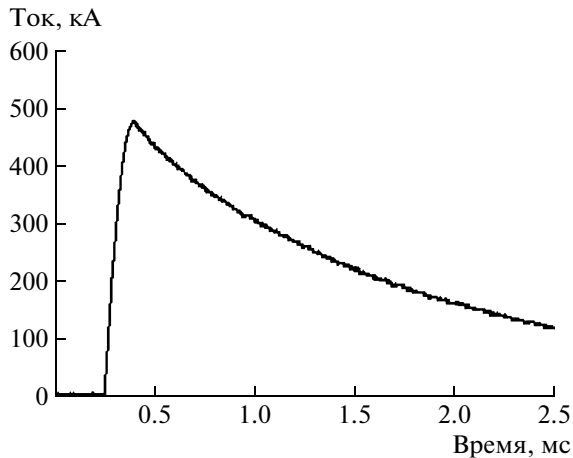
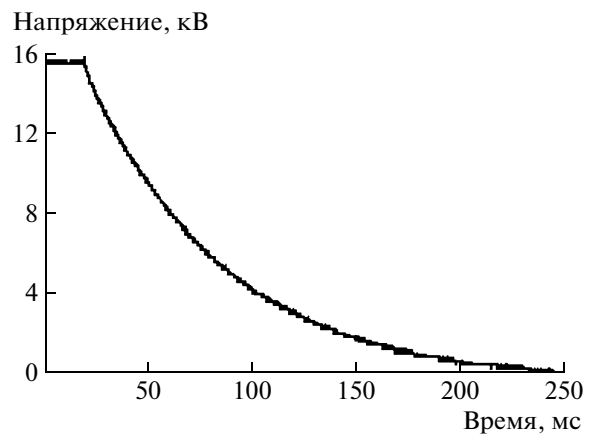


Рис. 3. Блок-схема модуля.



**Рис. 4.** Ток при синхронном разряде одного модуля на короткозамкнутый коллектор. Начальное напряжение на конденсаторах  $U_0 = 18$  кВ.



**Рис. 5.** Напряжение на конденсаторах при синхронном разряде модуля в режиме холостого хода (без нагрузки).

переводят систему управления в состояние *I* (исходное состояние).

### 3. РЕЖИМ ПРОГРАММИРУЕМОГО РАЗРЯДА

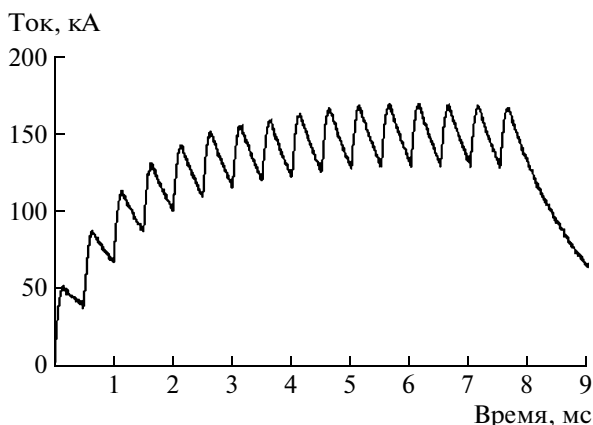
Режим программируемого разряда реализуется при одновременном запуске конденсаторных ячеек [8–10]. Установка имеет 16 конденсаторных ячеек и 16 независимых каналов запуска. Время запуска задается программатором [13], который размещен в пульте управления и соединен с контроллером пульта через интерфейс RS-485. Контроллер пульта загружает уставки времени в программатор перед зарядом конденсаторных ячеек. После завершения зарядного процесса оператор нажимает кнопку Pulse и программатор генерирует последовательность импульсов света в соответ-

ствии с предварительно заданной программой, которые запускают импульсный разряд конденсаторных ячеек.

Режим программируемого разряда создает возможность согласовывать форму импульса тока с электродинамическими и электромеханическими процессами в нагрузке, а также обеспечивает оптимальный режим выделения энергии из конденсаторной батареи. Как правило, режим программируемого разряда повышает к.п.д. комплекса конденсаторная батарея – нагрузка. Данная установка спроектирована специально для работы в режиме программируемого разряда и ее 16 ступеней запуска делают возможным изменять форму импульса тока в широком диапазоне.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Установка испытывалась при коротком замыкании в нагрузке и в режиме холостого хода. В течение испытаний на конденсаторных ячейках были установлены индукторы  $L = 25$  мкГн. Осциллограммы импульсов тока и напряжения, полученные при этих испытаниях, представлены соответственно на рис. 4 и 5, а на рис. 6 приведен пример осциллограммы тока в режиме программируемого разряда. Все испытания подтвердили заданные параметры и работоспособность установки.



**Рис. 6.** Ток при программируемом разряде двух модулей на короткозамкнутый коллектор. Начальное напряжение на конденсаторах  $U_0 = 14$  кВ. Задержка между моментами времени запуска разряда конденсаторных ячеек 500 мкс.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shannon J., Krickhuhn P., Dethlefsen R. // Digest of Technical Papers of 6th IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, USA. 1987. P. 26.
2. Spahn E., Lichtenberg M., Hatterer F. // Proceedings of 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 10–11 April 1995. Paper 79.

3. *Weise Th.H.G.G.* // Digest of Technical Papers of 14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Texas, USA. June 2003. P. 547.
4. *Herbig J., Appleton R.* // Digest of Technical Papers of 15th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Monterey, Ca, USA. June 2005. P. 1195.
5. *Nery J.M., Human B.M.* // Digest of Technical Papers of 16th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, NM, USA. June 2007. P. 1736.
6. *Фридман Б.Э., Коротков С.В., Мартыненко В.А. и др.* // ПТЭ. 2008. № 6. С. 51.
7. *Kovrizhnykh N.A., Drozdov A.A., Enikeev R.Sh. et al.* // Digest of Technical Papers of 17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington, DC, USA. June 2009. P. 646.
8. *Фридман Б.Э.* // Электричество, 1989. № 12. С. 36.
9. *Emelin P.Yu., Fridman B.E., Rutberg Ph.G.* // Digest of Technical Papers of 9th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, NM, USA. June 1993. P. 568.
10. *Фридман Б.Э.* // Электричество. 1999. № 6. С. 42.
11. *Enikeev R.Sh., Fridman B.E.* // Digest of Technical Papers of 17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington, DC, USA. June 2009. P. 382.
12. *Fridman B.E., Enikeev R.Sh., Kovrizhnykh N.A. et al.* // Digest of Technical Papers of 17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington, DC, USA. June 2009. P. 61.
13. *Фридман Б.Э., Благодатов И.Г., Варава Н.И. и др.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 93.