

ЭЛЕКТРОНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.319.53

**КОНДЕНСАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА С ФОРСИРОВАННЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ**

© 2024 г. Б. Э. Фридман<sup>a,b,\*</sup>, А. В. Васильев<sup>a</sup>, Р. Ш. Еникеев<sup>a,b</sup>,  
А. В. Коркунов<sup>a</sup>, Д. Е. Попков<sup>a</sup>, К. С. Сапожников<sup>a,\*\*</sup>, П. В. Томашевич<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова  
Россия, 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3

<sup>b</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А

\*e-mail: [fridman@sintez.niiefa.spb.su](mailto:fridman@sintez.niiefa.spb.su)

\*\* e-mail: [sapozhnikov@sintez.niiefa.spb.su](mailto:sapozhnikov@sintez.niiefa.spb.su)

Поступила в редакцию 14.08.2024 г.

После доработки 23.08.2024 г.

Принята к публикации 18.09.2024 г.

Конденсаторная ячейка 120 кДж, 50 кВ предназначена для работы в емкостном накопителе энергии с запасаемой энергией в несколько мегаджоулей. Предложена и обоснована двухконтурная схема ячейки, состоящая из “быстрого” и “медленного” разрядных контуров. Быстрый разрядный контур, включающий в себя конденсатор с относительно небольшой запасаемой энергией и быстродействующий псевдоискровой коммутатор разрядного тока, обеспечивает заданную длительность фронта напряжения на нагрузке, не превышающую 100 нс.. Медленный контур с основной конденсаторной батареей и вакуумным разрядником способен генерировать импульс тока амплитудой до 500 кА при заданной длительности фронта тока до 10 мкс. Описана конструкция конденсаторной ячейки и представлены результаты исследования переходных процессов при ее разряде, в том числе высокочастотных колебаний в кабельной линии длиной 20 м, соединяющей ячейку с нагрузкой. Приведены результаты испытаний прототипа конденсаторной ячейки.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В емкостных накопителях энергии (ЕНЭ) с запасаемой энергией в несколько мегаджоулей и напряжением в десятки киловольт коммутатор разрядного тока определяет во многом облик установки и ее структуру. Создатели ЕНЭ стремятся использовать ключи с максимальным допустимым током, способные работать в режиме синхронного разряда многих конденсаторных ячеек на одну общую нагрузку. Это обеспечивает оптимальную структуру ЕНЭ.

Одним из перспективных коммутаторов для больших ЕНЭ является вакуумный разрядник, изготавливаемый компанией ООО “ВЭИ-АВИС” [1]. Этот ключ доказал свою работоспособность во многих ЕНЭ [2, 3]. Последние модели вакуумных разрядников (РВУ-52) могут коммутировать разрядный ток до 500 кА при напряжении до 40 кВ. Особенностью вакуумных разрядников является относительно большое время их включения; длительность спада напряжения между электродами при его срабатывании составляет 1–1.5 мкс. Для некоторых приложений, в частности для ЕНЭ, предназначенных для формирования и разгона плазменных сгустков, большое время включения коммутаторов и, соответственно, относительно большая длительность фронта напряжения на нагрузке недопустимы.

Задачу применения разрядников, способных коммутировать большие импульсные токи и заряды в ЕНЭ, к которым предъявляются требования “быстрого” включения, можно решить путем включения в состав ЕНЭ дополнительных конденсаторных ячеек с относительно малой запасаемой энергией, снабженных быстродействующими коммутаторами разрядного тока [4]. Такое техническое решение было реализовано в установке плазменного фокуса [5], в которой ЕНЭ состоит из основных “медленных” конденсаторных ячеек с вакуумными разрядниками РВУ-47 с общей запасаемой энергией 390 кДж и дополнительных “быстрых” ячеек с псевдоискровыми коммутаторами – тиратронами ТДИ1-50/45 с энергией 30 кДж. Все ячейки в этой установке соединяются с нагрузкой индивидуальными кабельными линиями

В статье рассматривается конденсаторная ячейка для ЕНЭ с запасаемой энергией в несколько мегаджоулей, в которой реализовано два контура: “медленный” контур 120 кДж с вакуумным разрядником и “быстрый” контур 1.9 кДж с тиратроном в качестве коммутатора разрядного тока. В отличие от установки [5], для связи, описываемой ячейки с нагрузкой, используется одна кабельная линия, составленная из набора высоковольтных коаксиальных кабелей.

## 2. ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВВОДА ЭНЕРГИИ ИЗ ЕНЭ В НАГРУЗКУ

Предположим, что в разрядном контуре емкостью  $C$  и индуктивностью  $L$  используется идеальный коммутатор разрядного тока, мгновенно переходящий в проводящее состояние. Оценим величину энергии  $W_l$ , которая может быть передана из конденсаторов в нагрузку в начале разряда:

$$W_l = \int_0^t U_l I dt, \quad (1)$$

где  $U_l$  – напряжение на нагрузке,  $I$  – ток разряда конденсаторов,  $t$  – время.

Для начала разрядного процесса в контуре с идеальным ключом можно считать, что

$$\frac{dI}{dt} = I' \approx \text{const} \text{ и } I(t) \approx I' t.$$

Применим к интегралу в формуле (1) теорему о среднем:

$$W_l = \int_0^t U_l I dt = U_{l,av} \int_0^t I dt \approx U_{l,av} I' \frac{t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $U_{l,av}$  – некоторое среднее значение напряжения на нагрузке в начальный период времени  $t$ .

Обозначим через  $k_l = U_{l,av}/U_0$  коэффициент, определяющий долю среднего напряжения на нагрузке. Тогда  $I' \approx (1 - k_l) \cdot U_0/L$ . Подставляя это равенство в формулу (2), получим, что доля энергии, выделившейся в нагрузке в начале разряда, к моменту времени  $t$  равна

$$\eta = \frac{2W_l}{cU_0^2} \approx \frac{t^2}{LC} (k_l - k_l^2), \quad 0 \leq k_l \leq 1. \quad (3)$$

Максимальная доля этой энергии  $\max_{k_l}(\eta) = 0.25t^2/(LC)$  достигается при  $k_l = U_{l,av}/U_0 = 0.5$  (рис. 1).

**Рис. 1.** Доля энергии, выделяющейся в нагрузке в начале разряда в течение времени  $t = 1$  мкс, для разрядного контура с идеальным коммутатором...

На рис. 1 показана зависимость доли энергии, выделяющейся в нагрузке в течение первой микросекунды в случае применения идеального ключа в конденсаторной ячейке, параметры которой определены в табл. 1. Эта доля не может превышать 0.62% от запасаемой в конденсаторах энергии. Следовательно, компенсация потери энергии, вызванной задержкой включения реального разрядного коммутатора, может быть обеспечена посредством “быстрого” ввода энергии от дополнительного источника импульсов с быстродействующим коммутатором и с достаточно малой запасаемой энергией.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРНОЙ ЯЧЕЙКИ

**Таблица 1.** Технические требования, предъявляемые к конденсаторной ячейке

Техническая характеристика	Значение
Емкость $C$ , мкФ	96
Максимальное напряжение $U_m$ , кВ	50
Запасаемая энергия $W$ , кДж	120
Максимальная амплитуда разрядного тока $I_m$ , кА	320
Время нарастания тока до максимума в режиме короткого замыкания, мкс	10
Длительность фронта импульса напряжения на нагрузке, мкс	$\leq 0.1$
Длительность заряда, с	$\leq 120$

Ячейка должна функционировать при положительной и отрицательной полярности напряжения заряда конденсаторов.

Для обеспечения требования к длительности фронта напряжения на нагрузке в состав конденсаторной ячейки введен “быстрый” разрядный контур напряжением 50 кВ с

запасаемой энергией 1.875 кДж, которая составляет 1.6% от энергии, запасаемой в основной (“медленной”) части конденсаторной ячейки.

#### 4. КОНДЕНСАТОРЫ

В конденсаторной ячейке использованы конденсаторы, разработанные и изготовленные компанией ООО “КВАР”, г. Серпухов. Основная (“медленная”) батарея конденсаторов в ячейке составлена из 8 конденсаторов ИЭПС-50-12 УХЛ4; в “быстром” контуре применен конденсатор ИЭПС-50-1.5 УХЛ4 (табл. 2, рис. 2, 3).

В ячейке имеет место колебательный разряд конденсаторов. В таком режиме ресурс импульсных конденсаторов ограничен. В принципе, возможно исключение колебаний напряжения на конденсаторах путем применения кроубарного коммутатора в разрядном контуре ячейки. Однако при этом возникает риск самопроизвольного пробоя кроубарного ключа, при котором произойдет выделение в ячейке всей запасенной энергии, и будут большие разрушения.

Колебательный режим разряда конденсаторов потребовал увеличения электрической прочности конденсаторной изоляции и, соответственно, размеров конденсаторов.

Производились испытания конденсаторов при полном напряжении 50 кВ с нагрузкой, индуктивность которой соответствовала режиму короткого замыкания ячейки. Было испытано три опытных образца конденсаторов, объем испытаний для каждого образца – 1000 импульсов. После испытаний значимые отклонения в емкости и  $\text{tg}\delta$  у конденсаторов не обнаружены. Характерные осциллограммы тока и напряжения при этих испытаниях приведены на рис. 4.

**Таблица 2.** Технические характеристики конденсаторов

Марка конденсатора	ИЭПС-50-12 УХЛ4	ИЭПС-50-1.5 УХЛ4
Количество в конденсаторной ячейке	8	1
Емкость конденсатора, мкФ	12	1.5
Максимальное рабочее напряжение, кВ	50	50
Испытательное напряжение, кВ	60	60
Собственная индуктивность (без коаксиального вывода), нГн	62	35
Габаритные размеры, мм <sup>3</sup> (длина×ширина×высота)	340×620×690	320×320×700
Масса, кг	190	110

**Рис. 2.** Конденсатор ИЭПС-50-12 УХЛ4

**Рис. 3.** Конденсатор ИЭПС-50-1.5 УХЛ4

**Рис. 4.** Осциллограммы тока  $I$  и напряжения на конденсаторе  $U_c$  при испытании конденсатора ИЭПС-50-12 УХЛ4

## 5. КОММУТАТОРЫ РАЗРЯДНОГО ТОКА

Для коммутации разрядного тока в двухконтурной конденсаторной ячейке используются следующие устройства:

- два вакуумных разрядника РВУ-52, соединенных последовательно, они используются в качестве основного коммутатора для “медленного” разрядного контура конденсаторной ячейки;
- псевдоискровой коммутатор – тиратрон ТДИ4-100к/75П, который используется для коммутации тока в “быстром” разрядном контуре ячейки [4].

В табл. 3 представлены характеристики этих газоразрядных ключей.

**Таблица 3.** Технические характеристики газоразрядных коммутаторов конденсаторной ячейки.

Наименование прибора	РВУ-52	ТДИ4-100л/75П
Изготовитель	ООО “ВЭИ-АВИС”, Москва	ООО “Импульсные технологии”, Рязань
Напряжение, кВ	0.5–40	5–70
Ток, кА	5–500	50
Коммутируемый заряд, Кл	$\leq 180$	–
Длительность первой полуволны тока, мкс	–	$\leq 5.0$
Время включения, мкс	$1.0 \pm 0.2$	0.1
Напряжение импульса поджига, кВ	$10 \pm 5$	4–15
Ток импульса поджига, А	500	80–150
Габаритные размеры, мм <sup>2</sup>	$\varnothing 143 \times 197$	$\varnothing 150 \times 165$

## 6. КОАКСИАЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ

Среднее расстояние от ячейки, установленной в большом емкостном накопителе энергии, до нагрузки составляет 20 м. Подвод тока разряда конденсаторов к нагрузке будет осуществляться кабельной линией, которая является частью разрядного контура ячейки и составлена из включенных параллельно коаксиальных кабелей. Для этой кабельной линии используется коаксиальный кабель КВИМ (табл. 4) (изготовитель АО “ОКБ КП”, Мытищи, Московская область).

**Таблица 4.** Характеристики коаксиального кабеля КВИМ

Техническая характеристика	Значение	Примечание
Максимальное рабочее напряжение, кВ	80	
Максимальный импульсный ток, кА	40	
Погонная индуктивность, мкГн/м	0.12	
Наружный диаметр, мм	(18.1±0.8)	
Сечение внутреннего проводника, мм <sup>2</sup>	7.5	
Допустимое значение интеграла действия тока $\int_0^{\infty} i^2 dt$ , А <sup>2</sup> ·с	≤ 10 <sup>6</sup>	При нагреве кабеля на 100°С

## 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРНОЙ ЯЧЕЙКИ С “БЫСТРЫМ” И “МЕДЛЕННЫМ” КОНТУРАМИ

На рис. 5 приведена эквивалентная схема конденсаторной ячейки, принятая при моделировании. Конденсатор  $C_1$  “медленного” контура разряжается через резистор  $R(t)$ , зависимость сопротивления которого от времени воспроизводит медленное включение вакуумного разрядника. Конденсатор  $C_2$  “быстрого” контура разряжается через идеальный ключ  $S_f$ , который мгновенно переходит в замкнутое состояние. Параметры эквивалентной схемы рис. 5 приведены в табл. 5.

**Рис. 5.** Эквивалентная схема конденсаторной ячейки

**Таблица 5.** Элементы эквивалентной схемы, приведенной на рис. 5

Наименование элемента	Значение
Емкость ячейки основная $C_1$ , мкФ	96
Емкость цепи быстрого разряда $C_2$ , мкФ	1.5
Индуктивность основной части ячейки $L_1$ , нГн	240
Индуктивность цепи быстрого разряда $L_2$ , нГн	74
Индуктивность кабельной линии и коллектора $L_0$ , нГн	192
Сопротивление цепи быстрого разряда $R_2 + R_0$ , мОм	30
Сопротивление цепи медленного разряда $R(\infty) + R_0$ , мОм	15.6
Погонное сопротивление кабеля $R'_{cab}$ , мОм/м	4.8
Сопротивление кабельной линии $R_0 = \frac{R'_{cab} l_{cab}}{n_{1,cab}}$ , мОм	6.4
Сопротивление в цепи быстрого разряда $R_2$ , мОм	118.6
Установившееся сопротивление в цепи медленного разряда $R(\infty)$ , мОм	10.8

При моделировании использовалась аппроксимация сопротивления вакуумного разрядника (4). График зависимости сопротивления вакуумного разрядника от времени приведен на рис. 6, формула (4) показывает зависимость  $R(t)$ :

$$R(t) = \begin{cases} R_{01} = R_{02} \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^3 = 100 \text{ Ом, если } 0 \leq t \leq t_1 = 0.1 \text{ мкс,} \\ R_{02} \left(\frac{t_2}{t}\right)^3, \text{ если } t_1 \leq t \leq t_2 = 1 \text{ мкс,} \\ R_{02} + \frac{R_{03} - R_{02}}{t_3 - t_2} (t - t_2), \text{ если } t_2 \leq t \leq t_3 = 2 \text{ мкс,} \\ R_0 = R_\infty = 0.001 \text{ Ом, если } t \geq t_3 = 2 \text{ мкс.} \end{cases} \quad (4)$$

**Рис. 6.** Сопротивление вакуумного разрядника  $R(t)$

Ниже приведены уравнения (5) переходного процесса в схеме на рис. 5. Графики напряжения и тока при синхронном разряде “быстрого” и “медленного” контуров представлены на рис. 7 и 8. Эти графики демонстрируют эффект компенсации задержки перехода в проводящее состояние вакуумного разрядника посредством использования в конденсаторной ячейке “быстрого” разрядного контура:

$$\begin{aligned} U_1 &= L_1 \frac{dI_1}{dt} + R(t)I_1 + L_0 \left( \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \right) + R_0(I_1 + I_2), \\ U_2 &= L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + L_0 \left( \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \right) + R_0(I_1 + I_2), \\ I_1 &= -C_1 \frac{dU_1}{dt}, I_2 = -C_2 \frac{dU_2}{dt}, \\ U_1|_{t=0} &= U_{1,0}, U_2|_{t=0} = U_{2,0}, I_1|_{t=0} = 0, I_2|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

**Рис. 7.** Зависимости от времени напряжений в схеме рис. 5

**Рис. 8.** Зависимости от времени токов разряда “медленного”  $I_1$  и “быстрого”  $I_2$  контуров,  $U_0 = 30 \text{ кВ}$ .

## 8. ДВУХКОНТУРНАЯ КОНДЕНСАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА

Схема конденсаторной ячейки представлена на рис. 9. В табл. 7 приведены технические характеристики конденсаторной ячейки. Компоновки блока коммутаторов и ячейки показаны на рис. 10, 11, фотография прототипа конденсаторной ячейки дана на рис. 12.

**Рис. 9.** Схема конденсаторной ячейки

**Таблица 6.** Технические характеристики конденсаторной ячейки

Характеристика	Значение	Примечание
Максимальное напряжение $U_m$ , кВ	50	
Емкость “медленного” контура $C_1$ , мкФ	96	
Емкость “быстрого” контура $C_2$ , мкФ	1.5	

Максимальный ток $I_m$ , кА	600	При коротком замыкании
Длина кабельной линии $l$ , м	20	
Количество выходных коаксиальных кабелей	16	
Индуктивность разрядного контура (с кабельной линией) $L_1$ , нГн	432	При коротком замыкании

**Рис. 10.** Компоновка блока коммутаторов

**Рис. 11.** Компоновка конденсаторной ячейки

**Рис. 12.** Прототип конденсаторной ячейки

## 9. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ТИРАТРОНА

При включении тиратрона FV3 (рис. 9, 10) в кабельной линии ячейки возникают высокочастотные колебания. С использованием методов вычислений [6] был выполнен расчет волновых процессов в конденсаторной ячейке с кабельной линией (рис. 13) для режимов холостого хода и короткого замыкания. Результаты расчетов представлены на графиках рис. 14, 15. Поскольку длительность фронта импульса напряжения определяется как интервал времени нарастания напряжения от  $0.1U_0$  до  $0.9U_0$  (где  $U_0$  – напряжения заряда конденсатора), графики (рис. 14б) свидетельствуют о том, что техническое требование к длительности фронта импульса напряжения на нагрузке (не более 0.1 мкс) будет выполнено.

**Рис. 13.** Эквивалентная схема “быстрого” разрядного контура конденсаторной ячейки

**Рис. 14.** Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений  $U/U_0$  в схеме

**Рис. 15.** Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений  $U/U_0$  (а, б)

## 10. ИСПЫТАНИЕ ПРОТОТИПА ДВУХКОНТУРНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ ЯЧЕЙКИ

Прототип конденсаторной ячейки (рис. 12) был испытан в опытах холостого хода и короткого замыкания. На рис. 16 приведены осциллограммы напряжений на выходе



разомкнутой кабельной линии при разряде “быстрого” контура, “медленного” контура и при синхронном разряде всей конденсаторной ячейки. Длительность фронта напряжения определялась как время изменения сигнала от  $0.1U_0$  до  $0.9U_0$  (где  $U_0$  – напряжения заряда конденсаторов ячейки) составила 100 нс (рис. 16в).

**Рис. 16.** Осциллограммы напряжений на выходе кабельной линии в опытах холостого хода.

На рис. 17 представлены осциллограммы тока разряда в режиме короткого замыкания. Эти осциллограммы показывают, что время нарастания тока до максимума в режиме короткого замыкания меньше требуемой величины 10 мкс.

**Рис. 17.** Осциллограммы тока на выходе кабельной линии при разряде в режиме короткого замыкания

## 11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При заданных технических характеристиках конденсаторных ячеек в случае идеального (без задержек) включения разрядного коммутатора в нагрузку в течение первой микросекунды поступит не более 0.6% от запасенной в конденсаторах энергии. Это позволяет применить для формирования тока в начальной стадии разрядного процесса дополнительный “быстрый” разрядный контур с относительно небольшой запасаемой энергией и ограниченным током.

Схема двухконтурной конденсаторной ячейки, у которой “быстрый” контур с малой запасаемой энергией включается псевдоискровым коммутатором (тиратроном), а “медленный” разрядный контур с основной запасаемой в ячейке энергией коммутируется вакуумным разрядником, решает техническую задачу коммутации без задержек большого импульсного тока.

Преимуществами двухконтурных ячеек являются предельная начальная скорость ввода энергии в нагрузку и возможность отдельно настраивать режимы разряда “быстрых” и “медленных” контуров ячеек, что создает дополнительные возможности для физического эксперимента.

Расчеты и испытания прототипа двухконтурной конденсаторной ячейки подтвердили ее работоспособность при коммутации без задержек разрядного тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василевский М.А., Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. и др. // ПТЭ. 1986. № 6. С. 123.

2. *Емелин П.Ю., Рутберг Ф.Г., Фридман Б.Э.* // ПТЭ. 1993. № 5. С. 109.
3. *Фридман Б.Э., Благодатов И.Г., Варава Н.И., Корижский А.П., Лекс А.Г., Рутберг Ф.Г., Стогов А.Ю., Стогов В.С.* // ПТЭ. 2001. №3. С. 93.
4. *Бочков В.Д., Дягилев В.М., Королев Ю.Д., Усхич В.Г.* // ПТЭ. 1998. № 5. С. 676.
5. *Юрков Д.И., Дулатов А.К., Лемешко Б.Д., Андреев Д.А., Голиков А.В., Михайлов Ю.В., Прокуратов И.А., Селифанов А.Н., Фатиев Т.С.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 45.
6. *Фридман Б.Э., Медведев М.В.* // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 5. С. 66.  
<https://doi.org/10.1134/S0002331019050066>.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Доля энергии, выделяющейся в нагрузке в начале разряда в течение времени  $t = 1$  мкс, для разрядного контура с идеальным коммутатором. Параметры разрядного контура:  $C = 96$  мкФ,  $L = 420$  нГн.
- Рис. 2.** Конденсатор ИЭПС-50-12 УХЛ4.
- Рис. 3.** Конденсатор ИЭПС-50-1.5 УХЛ4.
- Рис. 4.** Осциллограммы тока  $I$  и напряжения на конденсаторе  $U_c$  при испытании конденсатора ИЭПС-50-12 УХЛ4.
- Рис. 5.** Эквивалентная схема конденсаторной ячейки.
- Рис. 6.** Сопrotивление вакуумного разрядника  $R(t)$ .
- Рис. 7.** Зависимости от времени напряжений в схеме рис. 5: напряжение заряда конденсаторов  $U_0 = 30$  кВ;  $U_1$  – напряжение на конденсаторах “медленного” контура  $C_1$ ,  $U_2$  – напряжение на конденсаторе “быстрого” контура  $C_2$ ,  $U_s$  – падение напряжения на резисторе  $R(t)$  (вакуумном разряднике).
- Рис. 8.** Зависимости от времени токов разряда “медленного”  $I_1$  и “быстрого”  $I_2$  контуров,  $U_0 = 30$  кВ.
- Рис. 9.** Схема конденсаторной ячейки:  $C_1$ – $C_8$  – конденсаторы ИЭПС-50-12;  $C_9$  – конденсатор ИЭПС-50-1.5;  $FV_1$ ,  $FV_2$  – вакуумный разрядник РВУ-52;  $FV_3$  – тиратрон ТДИ4-100К/75;  $R_1$  – балластный резистор 20 кОм, 50 кВ, 320 кДж;  $R_2$  – балластный резистор 2 кОм, 50 кВ, 32 кДж;  $R_3$  – балластный резистор 20 кОм, 50 кВ, 20 кДж;  $R_4$  – балластный резистор 2 кОм, 50 кВ, 2 кДж;  $R_5$ ,  $R_6$  – резистор 24 мОм, 50 кВ.
- Рис. 10.** Компоновка блока коммутаторов.
- Рис. 11.** Компоновка конденсаторной ячейки.
- Рис. 12.** Прототип конденсаторной ячейки.
- Рис. 13.** Эквивалентная схема “быстрого” разрядного контура конденсаторной ячейки:  $C = 1.5$  мкФ,  $L = 120$  нГн,  $R = 0.2$  Ом,  $l = 20$  м (16 кабелей КВИМ). Ключ  $S$  разомкнут в режиме холостого хода и замкнут в режиме короткого замыкания.

- Рис. 14.** Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений  $U/U_0$  в схеме рис. 13 в режиме холостого хода (расчет),  $U_0$  – напряжение заряда конденсатора.
- Рис. 15.** Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений  $U/U_0$  (**а, б**) и относительных токов  $I/U_0$  (**в, г**) в схеме рис. 13 в режиме короткого замыкания.
- Рис. 16.** Осциллограммы напряжений на выходе кабельной линии в опытах холостого хода. Напряжение заряда конденсаторов  $U_0 = 20$  кВ: **а** – разряд “быстрого” контура, **б** – разряд “медленного” контура, **в** – разряд двухконтурной конденсаторной ячейки.
- Рис. 17.** Осциллограммы тока на выходе кабельной линии при разряде в режиме короткого замыкания: **а** – разряд “быстрого” контура; **б** – разряд “медленного” контура; **в** – разряд двухконтурной конденсаторной ячейки.

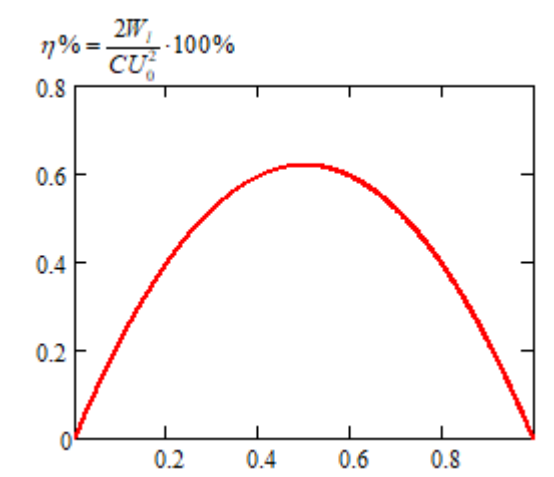


Рис. 1.



**Рис. 2.**



**Рис. 3.**

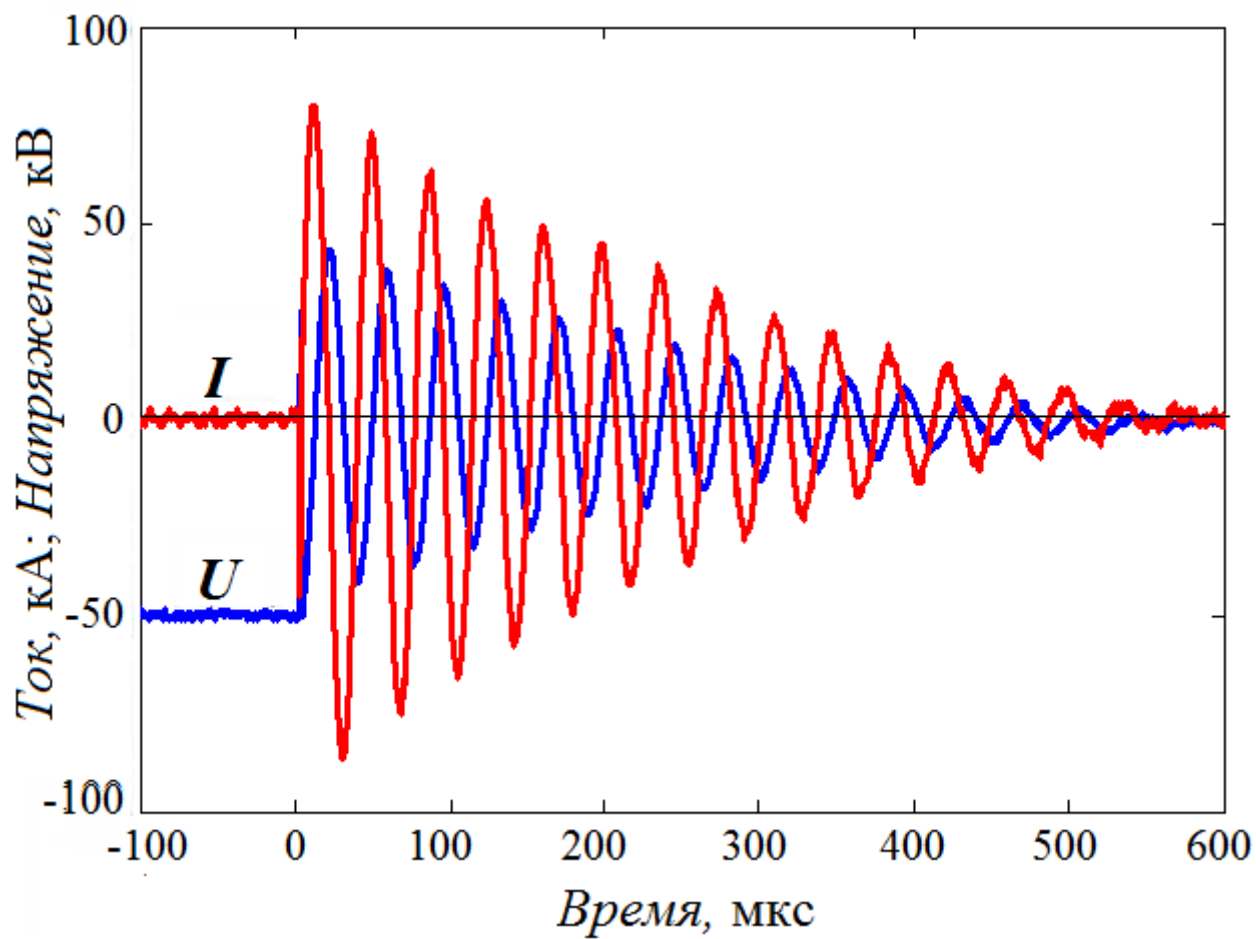


Рис. 4.



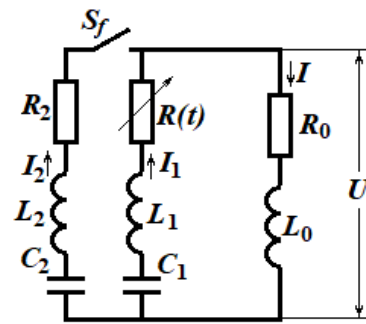
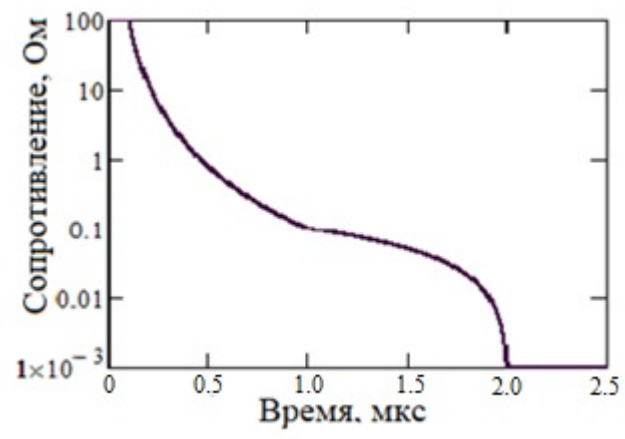


Рис. 5.



**Рис. 6.**

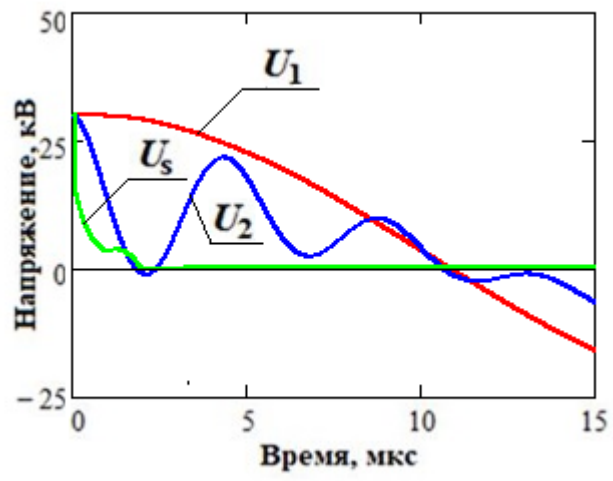


Рис. 7.

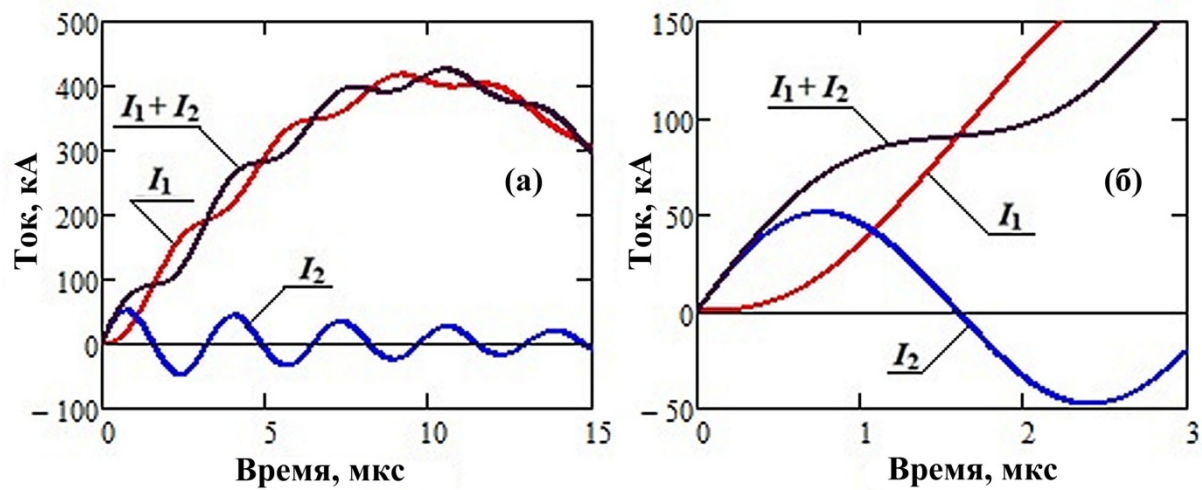


Рис. 8.

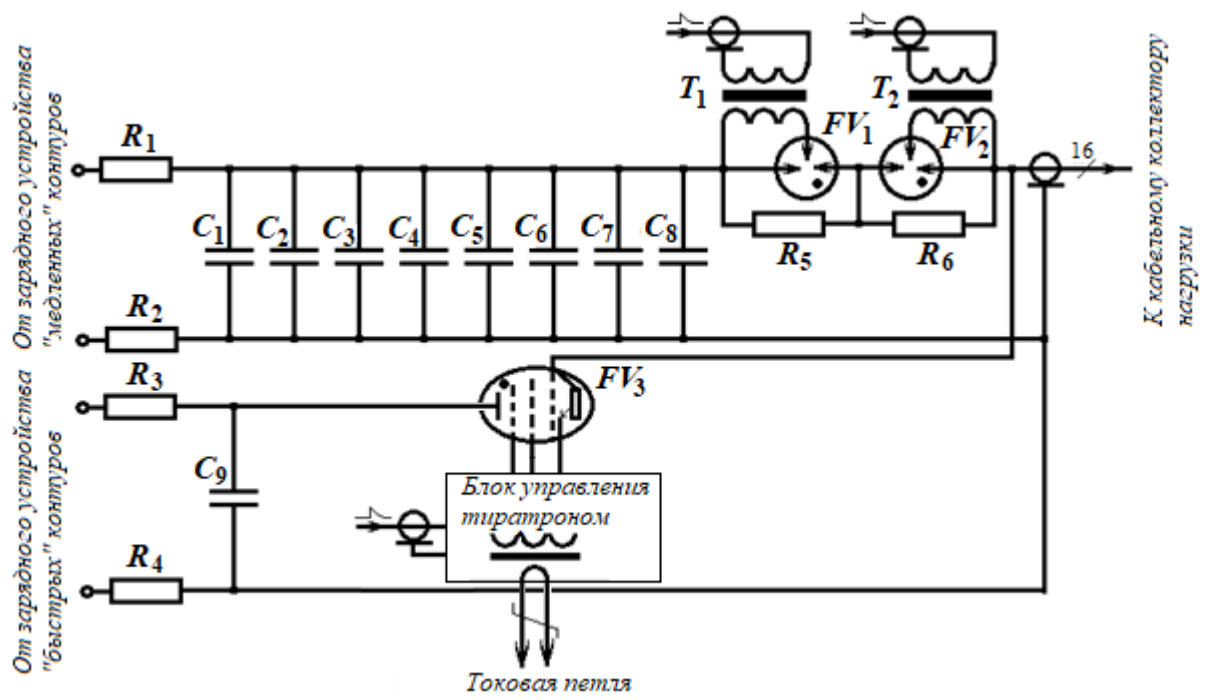
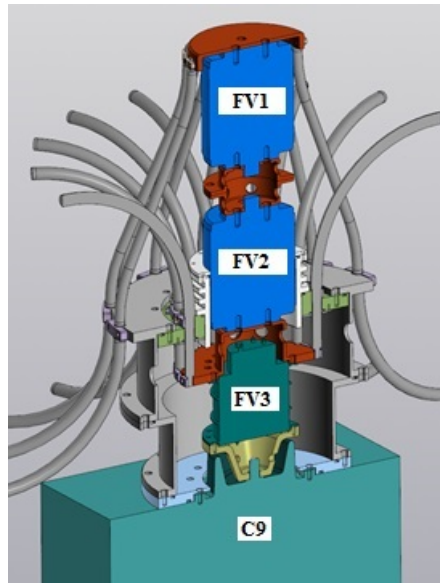
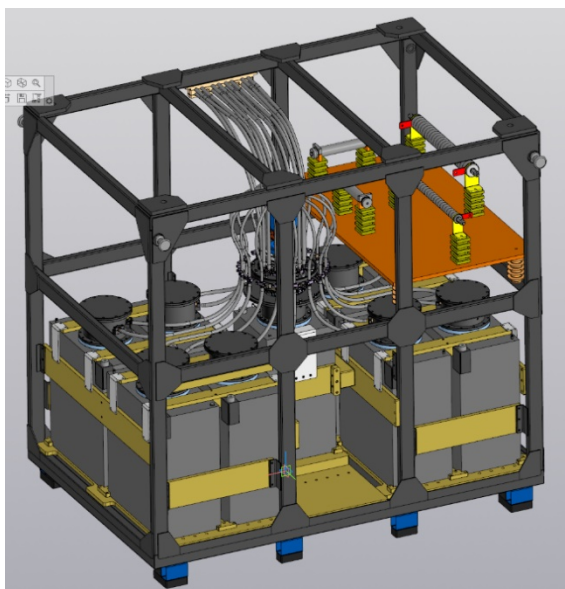


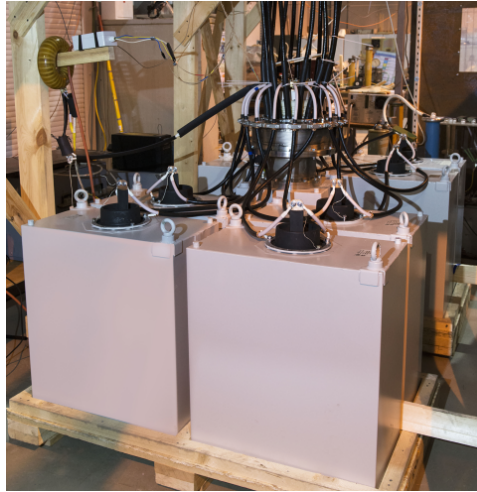
Рис. 9.



**Рис. 10.**



**Рис. 11.**



**Рис. 12.**



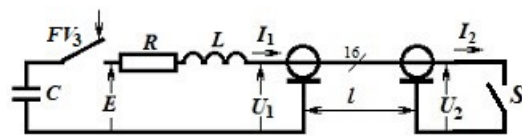


Рис. 13.

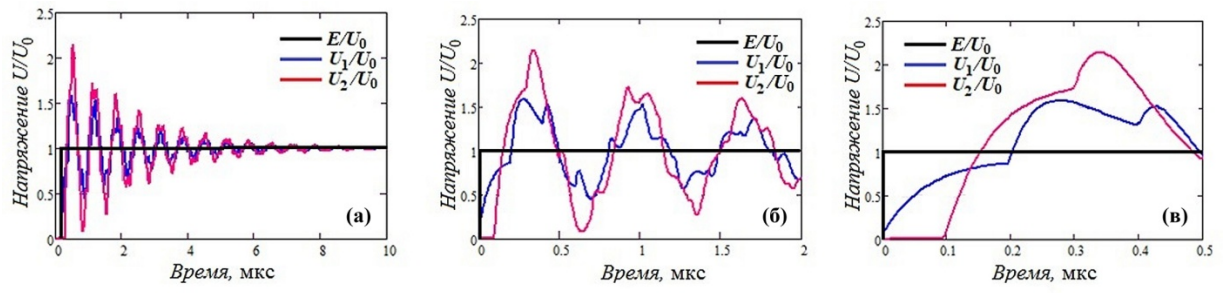


Рис. 14.

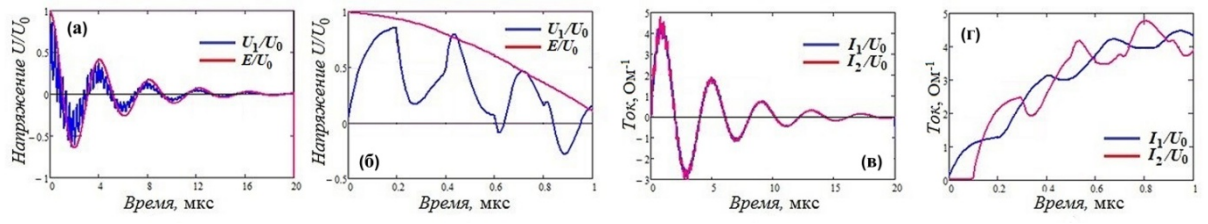
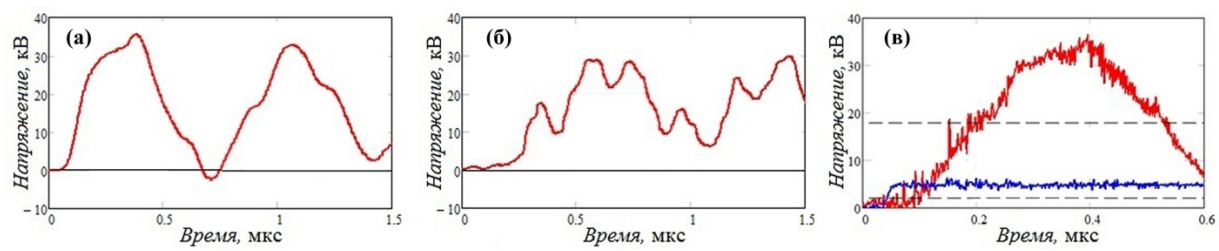
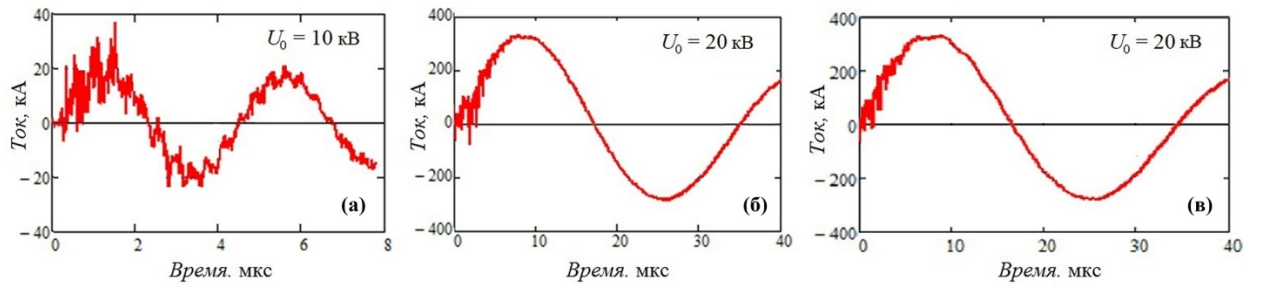


Рис. 15.



**Рис. 16.**



**Рис. 17.**