ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 2, с. 100–109

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.319.53

КОНДЕНСАТОРНАЯ ЯЧЕЙКА С ФОРСИРОВАННЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

© 2025 г. Б. Э. Фридман[a,b,*], А. В. Васильев[a], Р. Ш. Еникеев[a,b], А. В. Коркунов[a], Д. Е. Попков[a], К. С. Сапожников[a,**], П. В. Томашевич[a]

[a] Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия,196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3

[b] Государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А

* e-mail: fridman@sintez.niiefa.spb.su

** e-mail: 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.

DOI: 10.31857/S0032816225020118, **EDN:** GKNMIE

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-А-ВИС” [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 быстродей-

ствующими 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:

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

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

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

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

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

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

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 $I' \approx (1 - k_l) \cdot U_0/L$. Поставляя это равенство в формулу (2), получим, что доля энергии, выделившейся в нагрузке в начале разряда, к моменту времени t равна

$$\eta = \frac{2W_l}{CU_0^2} \approx \frac{t^2}{LC}\left(k_l - k_l^2\right), \quad 0 \le k_l \le 1. \qquad (3)$$

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

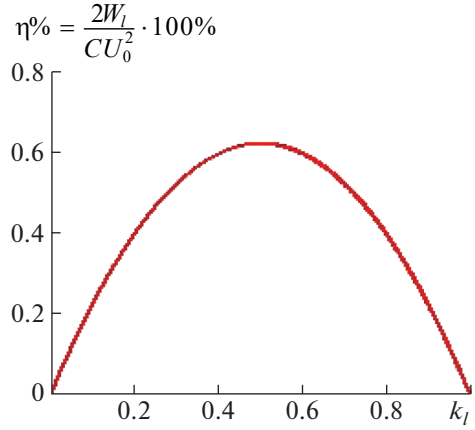

Рис. 1. Доля энергии, выделяющейся в нагрузке в начале разряда в течение времени t = 1 мкс, для разрядного контура с идеальным коммутатором. Параметры разрядного контура: C = 96 мкФ, L = 420 нГн.

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

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	⩽ 0.1
Длительность заряда, с	⩽ 120

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

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).

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 (длина × ширина × высота), мм^3	340×620×690	320×320×700
Масса, кг	190	110

В ячейке имеет место колебательный разряд конденсаторов. В таком режиме ресурс импульсных конденсаторов ограничен. В принципе, возможно исключение колебаний напряжения

Рис. 2. Конденсатор ИЭПС-50-12 УХЛ4.

Рис. 3. Конденсатор ИЭПС-50-1.5 УХЛ4.

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 tg δ у конденсаторов не обнаружены. Характерные осциллограммы тока и напряжения при этих испытаниях приведены на рис. 4.

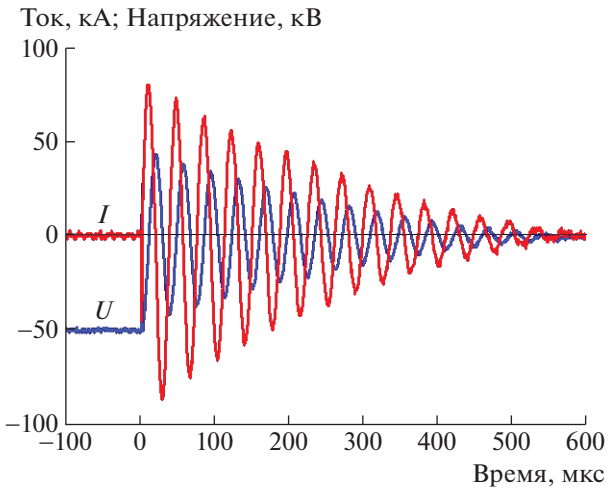

Рис. 4. Осциллограммы тока I и напряжения на конденсаторе U_c при испытании конденсатора ИЭПС-50-12 УХЛ4.

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.

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 3. Технические характеристики газоразрядных коммутаторов конденсаторной ячейки

Наименование прибора	РВУ-52	ТДИ4-100л/75П
Изготовитель	ООО “ВЭИ-А-ВИС”, Москва	ООО “Импульсные технологии”, Рязань
Напряжение, кВ	0.5–40	5–70
Ток, кА	5–500	50
Коммутируемый заряд, Кл	⩽180	–
Длительность первой полуволны тока, мкс	–	⩽5.0
Время включения, мкс	1.0±0.2	0.1
Напряжение импульса поджига, кВ	10±5	4–15
Ток импульса поджига, А	500	80–150
Габаритные размеры, мм^2	∅143×197	∅150×165

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^2	7.5	–
Допустимое значение интеграла действия тока $\int_0^\infty i^2 dt$, А$^2\cdot$с	⩽ 10^6	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

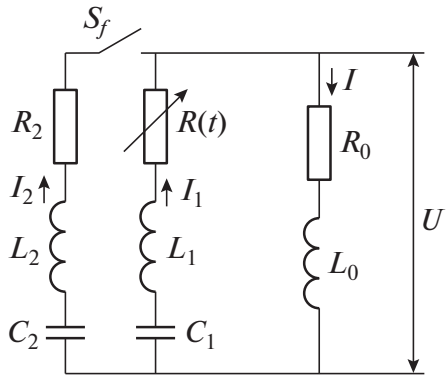

Рис. 5. Эквивалентная схема конденсаторной ячейки.

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.

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

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

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 посред-

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 $R_0=\dfrac{R'_{\partial cab}l_{cab}}{n_{1,cab}}$, мОм	6.4
Сопротивление в цепи быстрого разряда R_2, мОм	118.6
Установившееся сопротивление в цепи медленного разряда $R(\infty)$, мОм	10.8

ством использования в конденсаторной ячейке “быстрого” разрядного контура:

$$\begin{cases} U_1=L_1\dfrac{dI_1}{dt}+R(t)I_1+L_0\left(\dfrac{dI_1}{dt}+\dfrac{dI_2}{dt}\right)+R_0\left(I_1+I_2\right), \\ U_2=L_2\dfrac{dI_2}{dt}+R_2I_1+L_0\left(\dfrac{dI_1}{dt}+\dfrac{dI_2}{dt}\right)+R_0\left(I_1+I_2\right), \\ I_1=-C_1\dfrac{dU_1}{dt}, \\ I_2=-C_2\dfrac{dU_2}{dt}, \\ U_1\big|_{t=0}=U_{1,0},\ U_2\big|_{t=0}=U_{2,0},\ I_1\big|_{t=0}=0,\ I_2\big|_{t=0}=0. \end{cases} \quad (5)$$

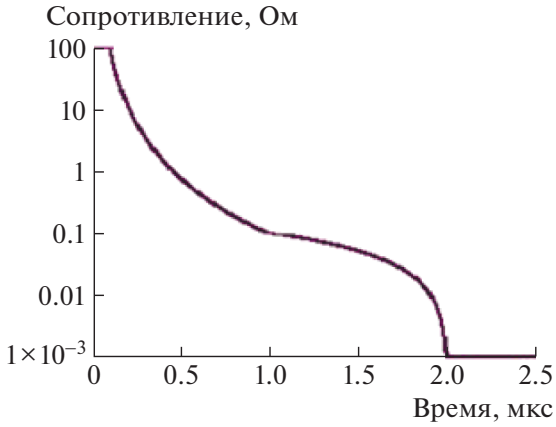

Рис. 6. Сопротивление вакуумного разрядника $R(t)$.

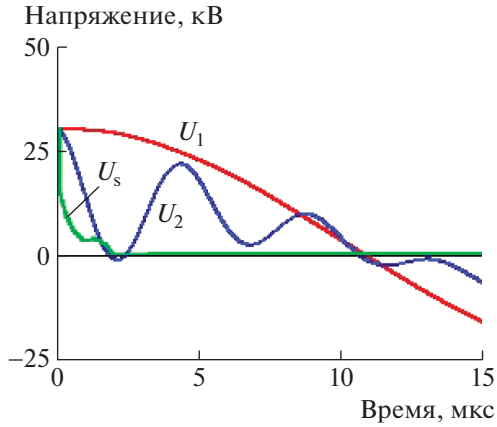

Рис. 7. Зависимости от времени напряжений в схеме рис. 5: напряжение заряда конденсаторов $U_0 = 30$ кВ; U_1 – напряжение на конденсаторах “медленного” контура C_1, U_2 – напряжение на конденсаторе “быстрого” контура C_2, U_s – падение напряжения на резисторе $R(t)$ (вакуумном разряднике).

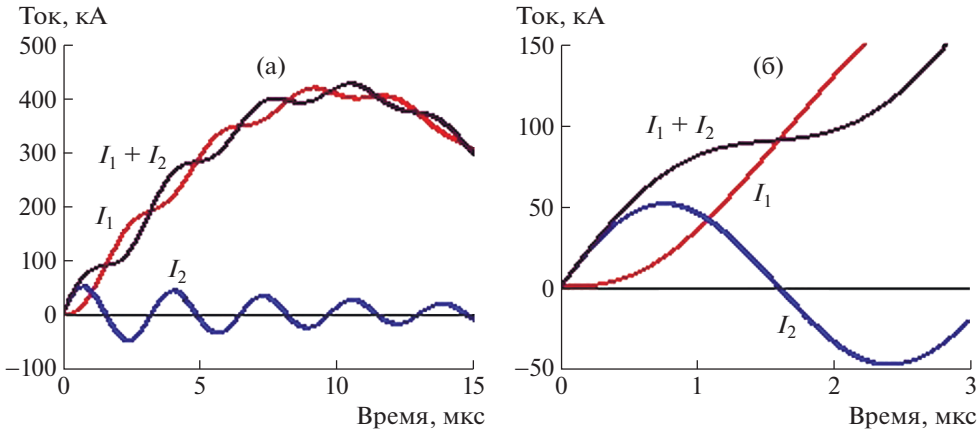

Рис. 8. Зависимости от времени токов разряда “медленного” I_1 и “быстрого” I_2 контуров, $U_0 = 30$ кВ.

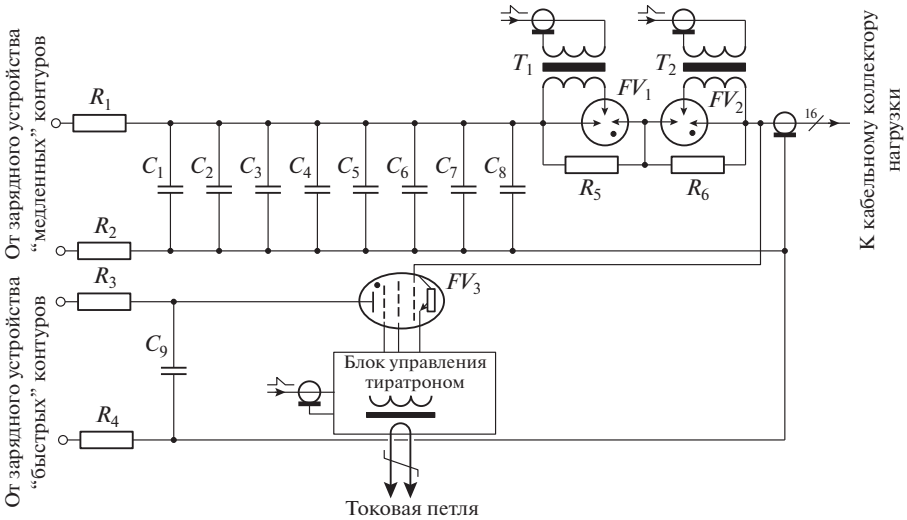

Рис. 9. Схема конденсаторной ячейки: C_1–C_8 – конденсаторы ИЭПС-50-12; C_9 – конденсатор ИЭПС-50-1.5; FV_1, FV_2 – вакуумный разрядник РВУ-52; FV_3 – тиратрон ТДИ4-100К/75; R_1 – балластный резистор 20 кОм, 50 кВ, 320 кДж; R_2 – балластный резистор 2 кОм, 50 кВ, 32 кДж; R_3 – балластный резистор 20 кОм, 50 кВ, 20 кДж; R_4 – балластный резистор 2 кОм, 50 кВ, 2 кДж; R_5, R_6 – резистор 24 мОм, 50 кВ.

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.

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

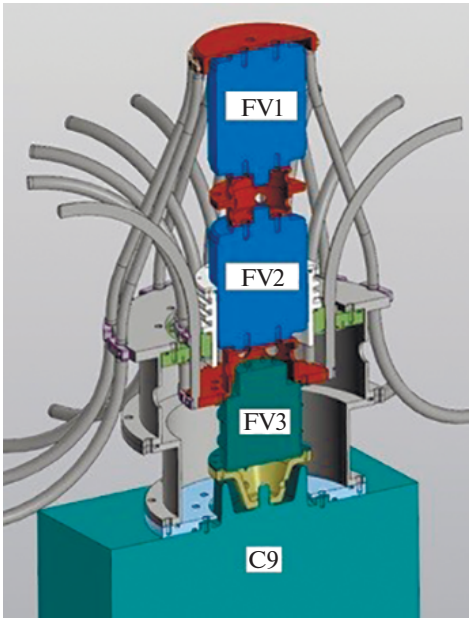

Рис. 10. Компоновка блока коммутаторов.

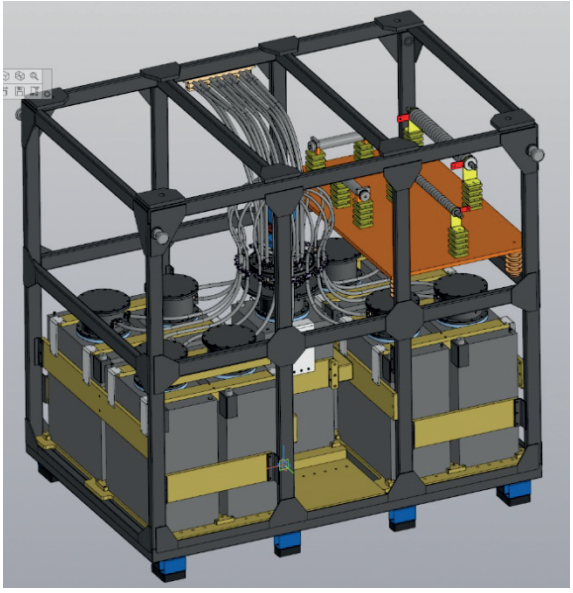

Рис. 11. Компоновка конденсаторной ячейки.

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

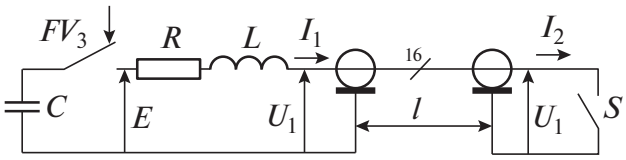

Рис. 13. Эквивалентная схема “быстрого” разрядного контура конденсаторной ячейки: $C = 1.5$ мкФ, $L = 120$ нГн, $R = 0.2$ Ом, $l = 20$ м (16 кабелей КВИМ). Ключ S разомкнут в режиме холостого хода и замкнут в режиме короткого замыкания.

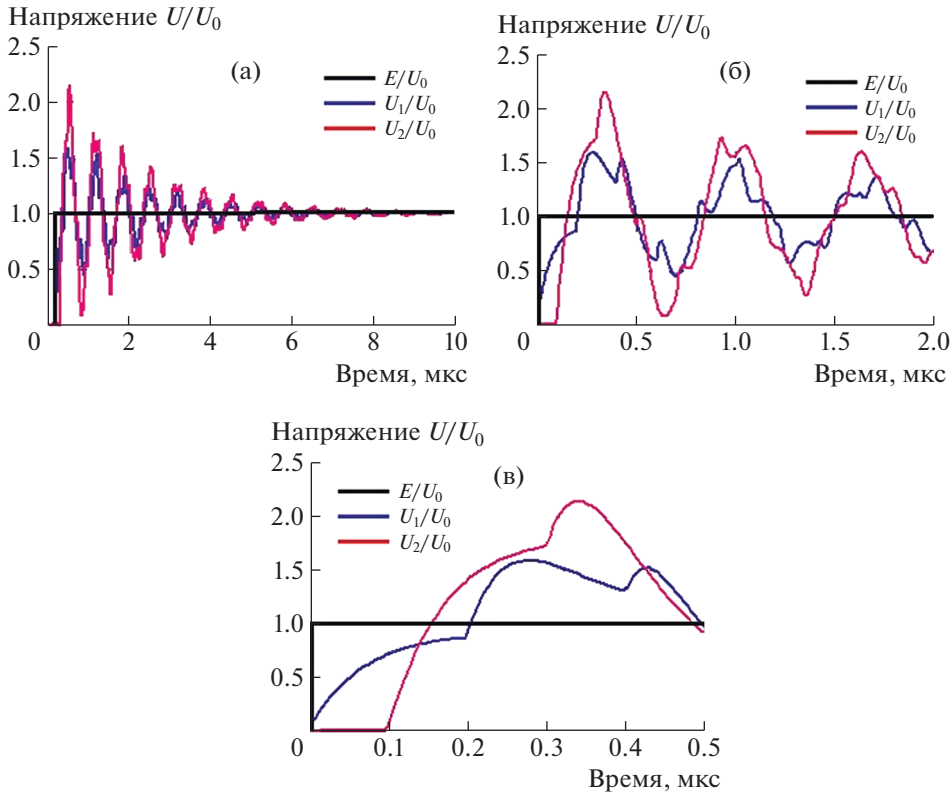

Рис. 14. Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений U/U_0 в схеме рис. 13 в режиме холостого хода (расчет), U_0 – напряжение заряда конденсатора.

техническое требование к длительности фронта импульса напряжения на нагрузке (не более 0.1 мкс) будет выполнено.

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).

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.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При заданных технических характеристиках конденсаторных ячеек в случае идеального (без задержек) включения разрядного коммутатора

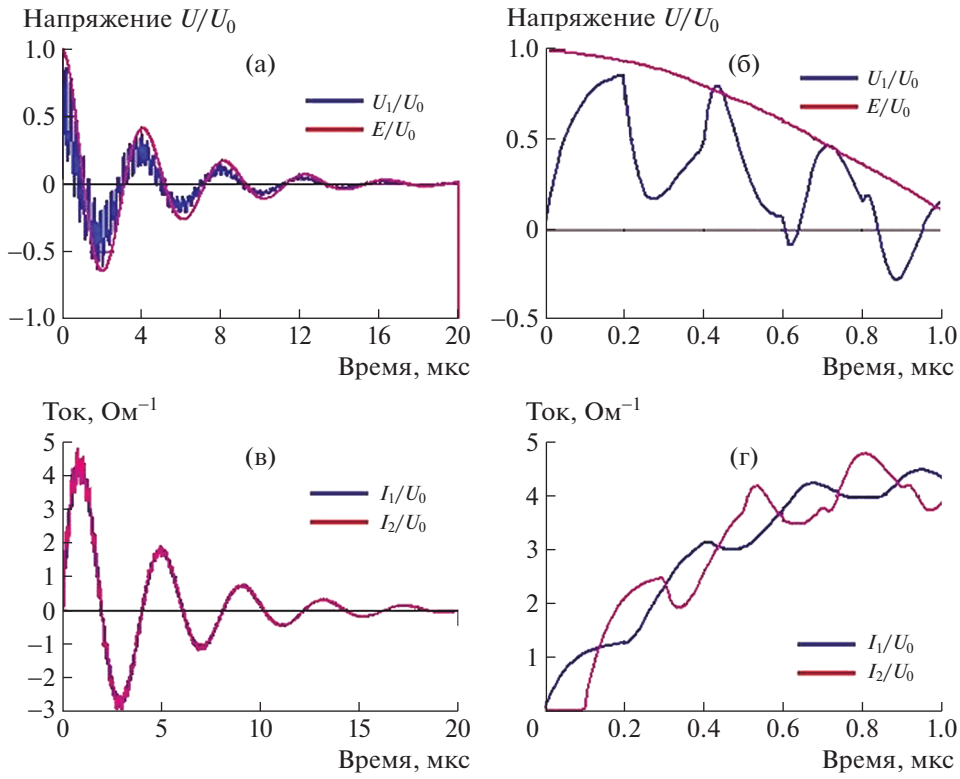

Рис. 15. Зависимости от времени относительных безразмерных напряжений U/U_0 (**а, б**) и относительных токов I/U_0 (**в, г**) в схеме рис. 13 в режиме короткого замыкания.

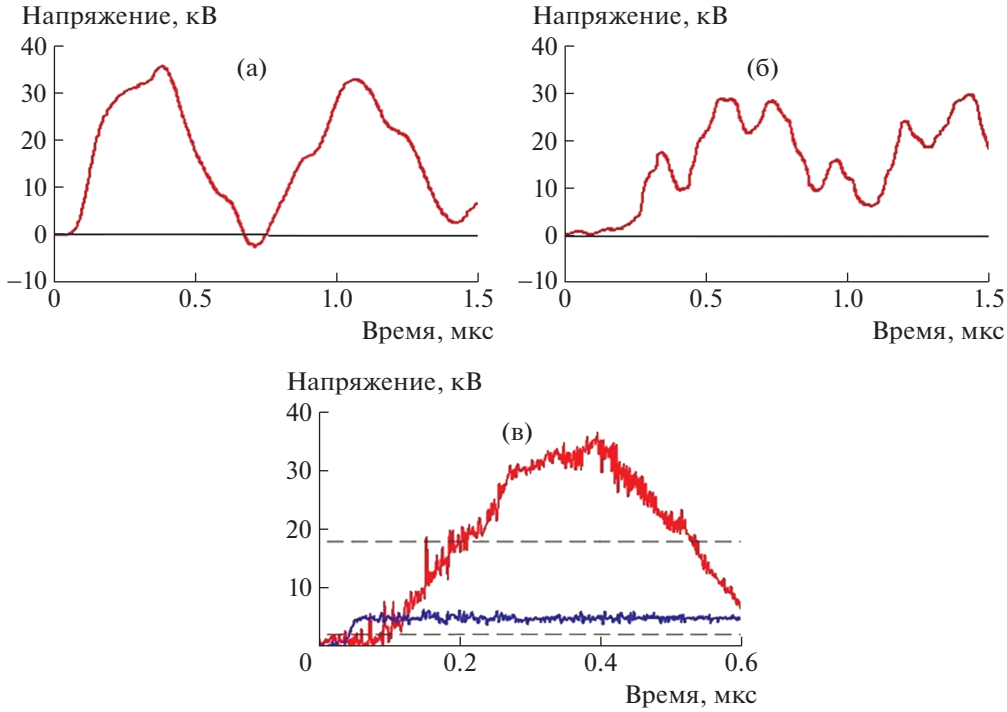

Рис. 16. Осциллограммы напряжений на выходе кабельной линии в опытах холостого хода. Напряжение заряда конденсаторов U_0 = 20 кВ: **а** – разряд “быстрого” контура, **б** – разряд “медленного” контура, **в** – разряд двухконтурной конденсаторной ячейки.

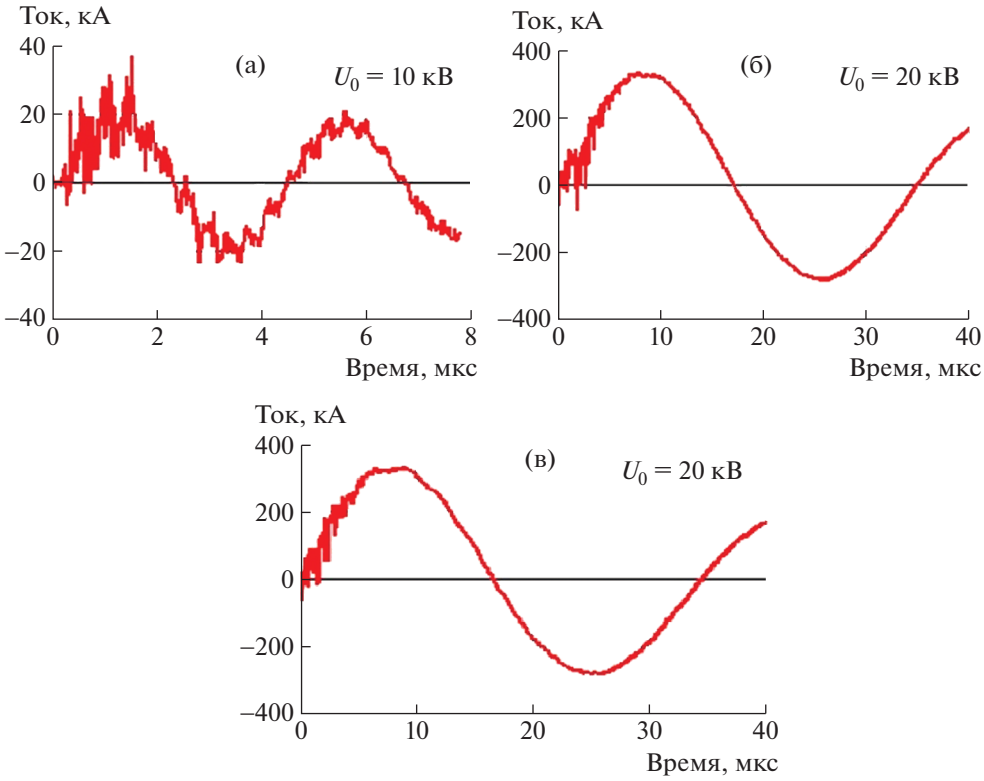

Рис. 17. Осциллограммы тока на выходе кабельной линии при разряде в режиме короткого замыкания: **а** – разряд “быстрого” контура; **б** – разряд “медленного” контура; **в** – разряд двухконтурной конденсаторной ячейки.

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.