

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЕЙ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ СТЕНДА СИЛОВОГО ЛАЗЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

RESULTS OF TESTS OF A CAPACITOR BANK' MODULES IN TEST BENCH OF POWER LASER AMPLIFIER

*В. В. Свиридов¹, А. Г. Арзев¹, С. А. Бельков¹, М. А. Василевский², В. М. Водовозов², И. В. Галахов¹,
Л. С. Ганин¹, Д. В. Гетман², В. В. Ерёмкин², Е. В. Коженков¹, А. В. Креков¹, В. И. Лесков¹,
В. А. Осин¹, Е. Б. Пильгун², Д. А. Сенник¹, М. В. Чистопольский¹*

*V. V. Sviridov¹, A. G. Arzev¹, M. A. Vasilevsky², V. M. Vodovozov², I. V. Galakhov¹, L. S. Ganin¹,
D. V. Getman², V. V. Yeryomkin², E. V. Kozhenkov¹, A. V. Krekov¹, V. I. Leskov¹, V. A. Osin¹,
E. B. Pilgun², D. A. Senik¹, M. V. Chistopolsky¹*

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

E-mail: postmaster@iskra5.vniief.ru

²АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

E-mail: postmaster@iskra5.vniief.ru

²JSC «NIIIEFA named after D. V. Yefremov»

В ОАО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова (С.-Петербург) создан специализированный стенд, являющийся прототипом усилительного блока неодимовой лазерной установки, разработка которой ведется в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Для питания ламп накачки силового усилителя стенда используется емкостной накопитель энергии, состоящий из 7 унифицированных модулей. В накопителе модулей запасается около 6 МДж электрической энергии при зарядном напряжении 24 кВ. В качестве коммутаторов в модулях применены реверсивно включаемые динисторы (РВД). В работе представлены основные результаты испытаний накопителя в течение 2016–2017 годов. Впервые показана одновременная работа семи модулей на штатную ламповую нагрузку.

Введение

В настоящее время для проведения исследований в области лазерного термоядерного синтеза в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается неодимовая лазерная установка. Накачка активных элементов силовых лазерных усилителей установки будет осуществляться с помощью импульсных ксеноновых ламп. Усилители лазера содержат 8640 импульсных ламп, в каждую из которых необходимо вложить около 37 кДж электрической энергии. В установке будут использованы ксеноновые лампы трубчатого исполнения типа ИНП43/1800, имеющие внутренний диаметр колбы 43 мм и расстояние между электродами 1800 мм.

Для обеспечения электрической энергией ламп накачки усилителей установки предназначена система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ), в основе которой лежит емкостной накопитель – конденсаторная батарея. Накопитель содержит 432 унифицированных мо-

дуля, которые должны срабатывать одновременно от общей системы синхронизации установки.

Разработка конструкции высоковольтных блоков модулей и их изготовление проводилось в ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (г. С.-Петербург). Ключевым элементом модуля накопителя является высоковольтный коммутатор импульсов тока, который создан в ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) на базе реверсивно включаемых динисторов. В накопителе используются конденсаторы на основе металлизированного диэлектрика с высокой плотностью запасаемой энергии. В модулях установки будут применены конденсаторы фирм ICAR (Италия) и КВАР (г. Серпухов).

Для повышения эффективности накачки, стабилизации пусковых характеристик импульсных ламп, а так же для тестирования ламп между срабатываниями в лазерной установке используется система предионизации ламп. Предионизация осуществляется с помощью специального разряд-

ного контура в каждом модуле емкостного накопителя. В качестве разрядника в контуре предионизации использован так же коммутатор на РВД. Ключ предионизации и блоки для запуска РВД-коммутаторов разработаны в ФТИ им. Иоффе (г. С.-Петербург).

Отработка модулей СНКЭЭ проводится на специальных стендах. В качестве нагрузки используются омические эквиваленты с сопротивлением около 0,5 Ом, что близко к рабочему сопротивлению ламп, и штатные импульсные лампы, установленные в кассеты. Одним из таких стендов является стенд силового лазерного усилителя в ОАО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова (С.-Петербург).

Цель данной работы заключалась в исследовании работоспособности модулей системы СНКЭЭ при одновременном срабатывании на ламповую нагрузку на стенде лазерного усилителя.

рис. 1, а принципиальная электрическая схема на рис. 2 [1].



Рис. 1. Общий вид модуля конденсаторной батареи

Модуль емкостного накопителя энергии

Модуль СНКЭЭ предназначен для генерации импульсов тока с требуемыми параметрами в 20-ти импульсных ксеноновых лампах накачки. Один модуль обеспечивает питанием три ламповые кассеты одной секции лазерного усилительного блока. Общий вид модуля представлен на

В модуле СНКЭЭ запасается 835 кДж электрической энергии при рабочем напряжении 24 кВ. Десять накопительных конденсаторов модуля (C1-C10) разряжаются на нагрузку – импульсные лампы (FL1-FL20) – с помощью одного РВД-коммутатора (A1) [2]. Через коммутатор протекает импульс тока амплитудой 250 кА и длительностью около 500 мкс.

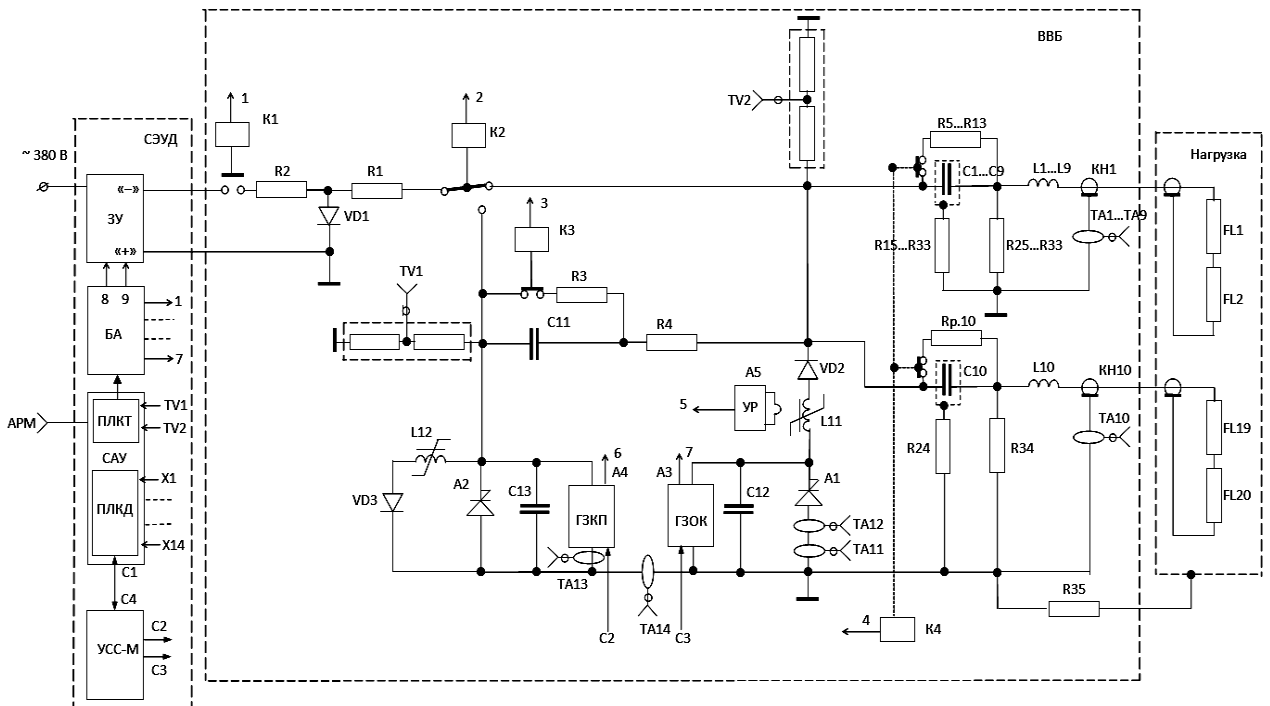


Рис. 2. Структурная схема модуля СНКЭЭ

Обозначения к схеме модуля ЕНЭ. С1÷С10 – конденсаторы основного разрядного контура; С11 – конденсатор предионизации; А1 – силовой коммутатор типа КРД25-250; L11, L12 – насыщающийся дроссель; VD1–диод С2-50; VD2 – диодная сборка СДК25-250; С11 – конденсатор предионизации; А2, VD3 – коммутатор предионизации; L1÷L10 – токоформирующие индуктивности; FL1÷FL20 – импульсные лампы; КН1÷КН10 – высоковольтные кабели КВИСРФВ; ГЗОК – генератор запуска основного коммутатора; ГЗКП – генератор запуска коммутатора предионизации; R1, R2, R25÷R34 – зарядные резисторы; R_{p1}÷R_{p10}, R3 – разрядные резисторы; R15÷R24 – дополнительные резисторы; R4 – сопротивление согласующее; К1÷К3 – высоковольтные переключатели; К4 – высоковольтный многоконтактный замыкатель; УР – устройство размагничивания; ТА1÷ТА14 – датчики тока; TV1, TV2 – делитель напряжения; СЭУД – стойка электропитания, управления и диагностики; АРМ – автоматизированное рабочее место.

В модуле используются конденсаторы с высокой плотностью энергии (около 1 кДж/см³) на основе металлизированного диэлектрика с самовосстанавливающимися свойствами фирмы ICAR (Италия).

Параллельно основному разрядному контуру, состоящему из 10 идентичных цепей, включен контур предионизации ламп накачки, заряд и разряд конденсатора С11 в котором осуществляется с помощью РВД-коммутатора А2 и диода VD3. Модуль работает в двух режимах. В тестовом режиме предварительно заряженный конденсатор С11 с помощью коммутатора предионизации разряжается в нагрузку. В основном режиме заряжены конденсаторы С1...С10 и с разновременностью около 250 мкс происходит срабатывание двух коммутаторов А2 и А1, причем А1 срабатывает с задержкой. Таким образом, в лампах формируются два импульса тока, первый импульс – импульс предионизации, энергия которого составляет около 1,5 % от энергии основного импульса разряда в лампах.

Генераторы ГЗОК и ГЗКП для управления РВД-коммутаторами, выполненные на высоковольтных тиристорах, запускаются с помощью световых импульсов.

Управление и зарядка конденсаторной батареи в модуле осуществляется от специальной стойки СЭУД, в состав которой входят: зарядное устройство ЗУ, блок автоматики БА, система автоматического управления САУ, устройство системы синхронизации УСС-М [3]. Для диагности-

ки разряда накопителя используются пояса Роговского с пассивными интеграторами (ТА1-ТА14). Напряжение на накопительных конденсаторах измеряется с помощью высокоомных делителей напряжения TV1, TV2.

В стойках СЭУД модулей накопителя реализован способ оперативного запрета пуска основного коммутатора. Контроллер диагностики в реальном масштабе времени выполняет регистрацию импульсов токов в ламповых контурах и сравнение токов предионизации с эталонными величинами. В случае существенного отклонения параметров тока происходит запрет запуска коммутатора А1 того модуля, где выявлена аномалия в разрядном контуре. Данный модуль в эксперименте не участвует, и его конденсаторы разряжаются на балластные резисторы.

Стенд силового лазерного усилителя

В 2016 году в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова (С.-Петербург) создан стенд, являющийся прототипом модуля силового усилителя многоканальной лазерной установки. Структурная схема стенда представлена на рис. 3. Стенд состоит из накопителя энергии, лазерного усилителя и пульта управления. Накопитель энергии представляет собой семь идентичных модулей. Запасенная в конденсаторной батарее энергия передается в ламповую нагрузку при помощи высоковольтных коаксиальных кабелей длиной 30 м.

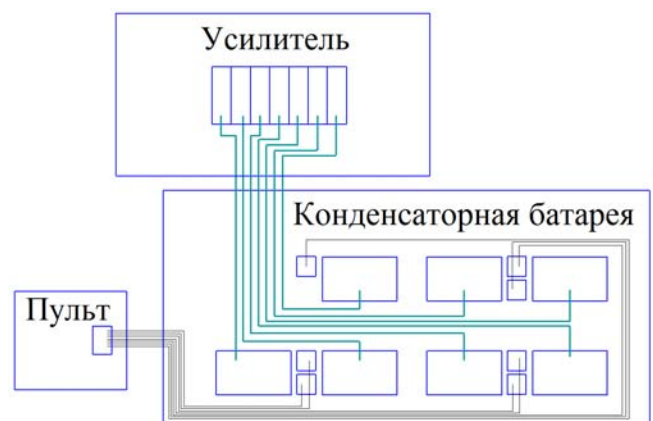


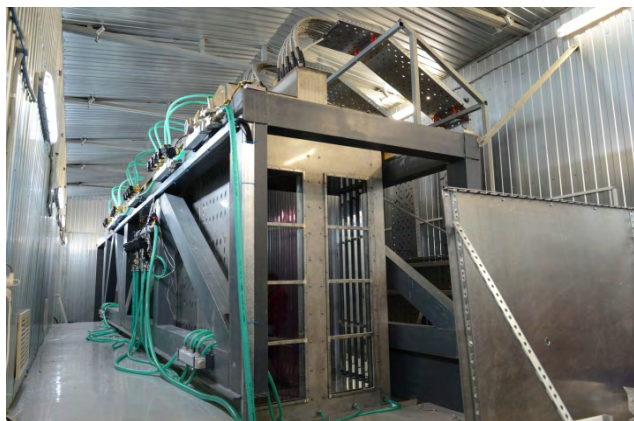
Рис. 3. Структурная схема стенда

Стенд размещен в трех помещениях. В первом (рис. 4, а), расположены модули СНКЭЭ. Во втором (рис. 4, б), установлены 7 секций блока лазерного усилителя с лампами накачки. Управляющий комплекс стенда размещен в третьем помещении (рис. 4, в) и состоит из прототипа местного пульта управления (МПУ) СНКЭЭ с синхронизатором –

опытным образцом локального устройства системы синхронизации СНКЭЭ. Управление модулями накопителя осуществляется посредством оптических линий связи, соединяющих сервер МПУ с СЭУД модулей.



а



б

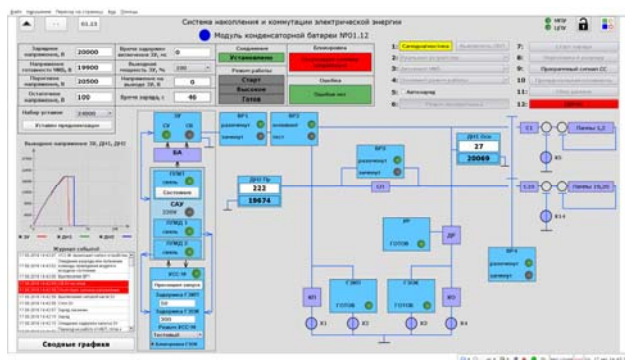


в

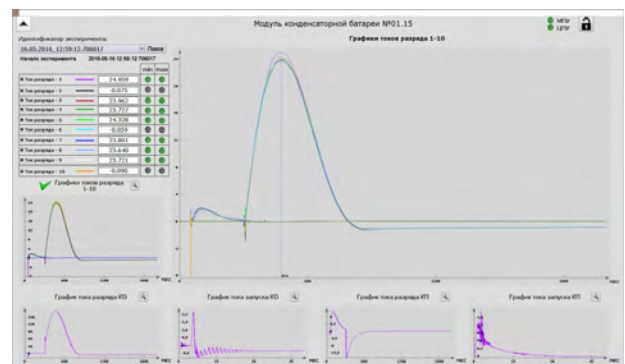
Рис. 4. Помещения стенда: а – СНКЭЭ; б – усилитель; в – управляющий комплекс

Специальное программное обеспечение (СПО) МПУ СНКЭЭ, разработанное ФГУП «ФНПЦ-НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (г. Нижний Новго-

род) под управлением ОС AstraLinux, определяет функциональное назначение автоматизированной системы управления, контроля и диагностики СНКЭЭ и ее возможности. СПО позволяет задавать условия эксперимента на стенде: количество модулей, зарядное напряжение, режим работы (тестовый или основной), управлять процессами измерения параметров модуля в процессах заряда и разряда и реализует операции накопления, обработки и визуализации измерительной информации. Графический интерфейс СПОМПУ СНКЭЭ изображен на рис. 5. Данные, полученные в ходе эксперимента, сохраняются в файлах подсистемы отчетности.



а



б

Рис. 5. Графический интерфейс СПОМПУ СНКЭЭ: а – управления модулем; б – диагностики разряда модуля

Результаты испытаний модулей СНКЭЭ в составе стенда

Испытания модулей СНКЭЭ в составе стенда силового лазерного усилителя проводились при зарядных напряжениях на накопителе от 18 до 24 кВ. В качестве нагрузки каждого модуля использовалось 14 ламп ИМП43/1800, расположенных в центральной и одной боковой кассетах. Временная задержка между импульсами (основным и предионизации) составляла около 250 мкс.

Основные характеристики СНКЭЭ стенда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики СНКЭЭ стенда

Зарядное напряжение, кВ	18–24
Максимальная запасенная энергия, МДж	4,0
Время заряда накопителя, с	60
Минимальная пауза между срабатываниями, мин	15
Количество ламповых контуров	49
Максимальный разрядный ток в ламповом контуре, кА	25
Разрядный ток в модуле, кА	170
Длительность импульса тока (по уровню 0,3 от амплитуды), мкс	340

На рис. 6 представлены характерные осциллограммы токов в лампах, основном коммутаторе и коммутаторе предионизации, полученные при рабочем напряжении 24 кВ с помощью системы диагностики СЭУД модуля.

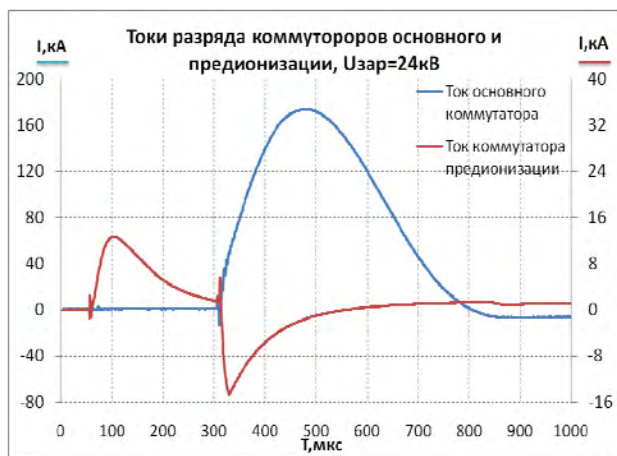
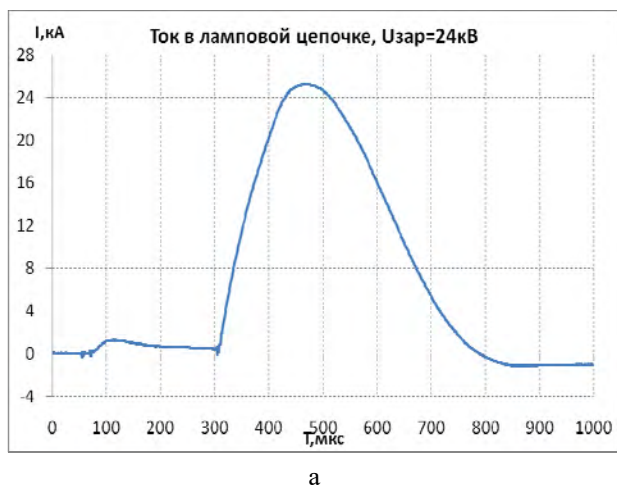


Рис. 6. Характерные осциллограммы: а – токов в ламповой цепи, б – токов в коммутаторах основном (1) и предионизации (2)

Основной импульс тока в лампах имеет следующие параметры: амплитуда – ~25 кА, длительность – около 360 мкс (по уровню 0,35). Импульс тока предионизации имеет амплитуду около 1,5 кА. Амплитуда тока в силовом коммутаторе составляет около 170 кА. Импульс тока в контуре предионизации двухполярный с амплитудой в прямом направлении около 13 кА, в обратном – около 15 кА.

Количество срабатываний модулей СНКЭЭ при различных режимах работы стенда представлено в табл. 2. Всего за 2016–2017 год было сделано от 474 – до 624 срабатываний каждым модулем, в том числе при одновременном пуске всех семи модулей – 383 включения, из которых 267 – при напряжении 24 кВ.

Таблица 2

Количество срабатываний модулей СНКЭЭ

U, кВ	№ МКБ							Семь МКБ
	12	13	14	15	16	17	18	
18	37	37	37	37	37	37	37	36
20	67	49	49	41	45	41	41	39
22	57	59	59	41	55	41	41	39
23	10	16	16	4	10	4	4	2
24	306	434	463	378	366	352	351	267
Σ	477	595	624	501	513	475	474	383

При рабочем напряжении 24 кВ на модулях накопителя в лазерном усилительном модуле получено требуемое значение коэффициента усиления слабого сигнала.

Одним из основных критериев отсутствия деградации элементов РВД-коммутатора является его ток утечки. Токи утечки силовых коммутаторов модулей были измерены по окончании испытаний. Значения токов при напряжении 24 кВ каждого из 7 коммутаторов составили менее 10 мкА и практически не изменились в результате испытаний, что говорит о целостности коммутаторов.

Важной характеристикой работы накопителя в создаваемой установке является стабильность (повторяемость) от опыта к опыту значений напряжений заряда конденсаторной батареи. Данный параметр был проанализирован для всех модулей стенда.

Величины напряжений на конденсаторах всех 7 модулей и на зарядных устройствах (ЗУ) в 116 опытах при рабочем напряжении 24 кВ в режиме одновременного срабатывания представлены на рис. 7, 8. На основе данных представленных на рис. 7 и 8 для каждого модуля были вычислены: среднееарифметическое значение напряжения, среднеквадратичное отклонение, размах (разница

между максимальным и минимальным значением), нестабильность (отношение размаха к среднеарифметическому значению). Полученные значения представлены в табл. 3 и 4.

Максимальный разброс напряжений составляет: на зарядных устройствах – 58 В (~0,24 % от

заданной уставки) и 83 В (~0,34 % от величины уставки) на конденсаторах модулей. Данные по нестабильности зарядных напряжений укладываются в технические требования, предъявляемые к модулям накопителя энергии создаваемой установки.

Таблица 3

Значения напряжения на модуле

№ МКБ	12	13	14	15	16	17	18
Среднеарифметическое, В	24123	24138	24140	24134	24102	24217	24180
Среднеквадратичное отклонение, В	13,01	15,20	13,83	13,45	13,04	14,85	14,47
Размах, В	63	75	76	75	62	76	83
Нестабильность, %	0,26	0,31	0,31	0,31	0,26	0,31	0,34

Таблица 4

Значения напряжения на ЗУ

№ ЗУ	12	13	14	15	16	17	18
Среднеарифметическое, В	23967	23979	23978	23963	23987	23961	23966
Среднеквадратичное отклонение, В	9,60	6,22	5,54	5,92	4,80	9,25	6,93
Размах, В	58	32	35	35	29	51	44
Нестабильность, %	0,24	0,13	0,15	0,15	0,12	0,21	0,18

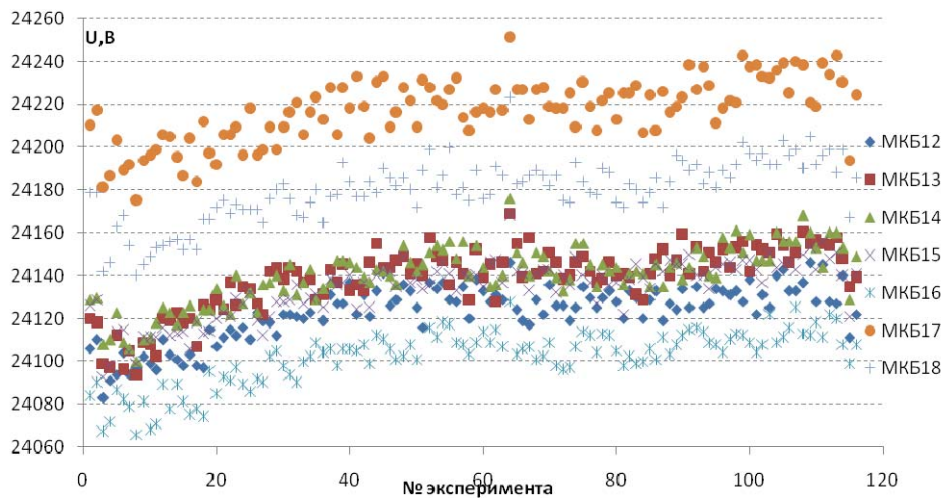


Рис. 7. Напряжения на конденсаторах модулей в момент срабатывания

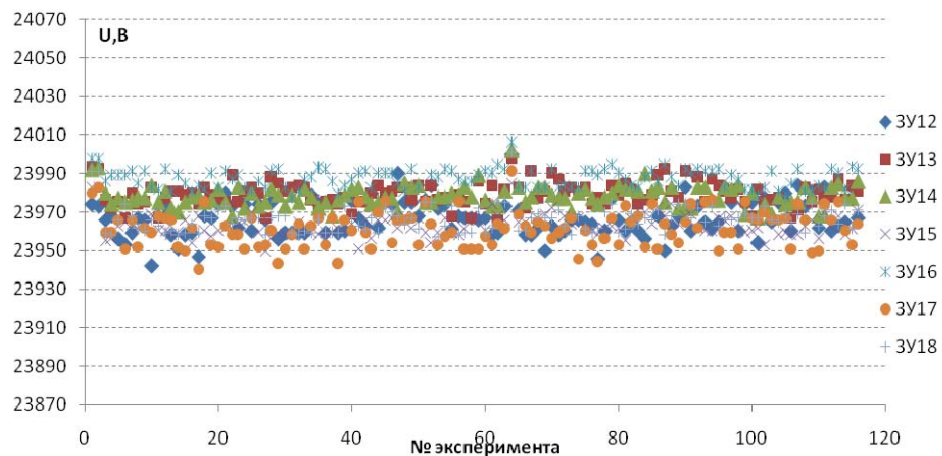


Рис. 8. Зарядные напряжения на ЗУ перед срабатыванием

Основные отказы модулей СНКЭЭ и ламповых кассет

При испытаниях на стенде были выявлены ряд отказов в работе высоковольтных блоков и стоек СЭУД модулей и в ламповых кассетах.

В одном из модулей при работе в тестовом режиме произошел пробой в месте разделки кабеля КВИСРФВ, соединяющего накопительный конденсатор с силовым РВД-коммутатором. Причина заключалась в нарушении изоляции кабеля при его изготовлении (разделке).

В стойках СЭУД были выявлены следующие неисправности: отказ двух зарядных устройств из-за выхода из строя IGBT модулей и отказы двух контроллеров диагностики.

Два срабатывания накопителя произошло в нештатных режимах по причине отказов в работе ламповых кассет. В первом случае был обрыв провода одной из ламп, во втором – пробой изолятора в кассете. В обеих ситуациях сработал запрет пуска основного коммутатора модулей. На рис. 9 показаны импульсы токов предионизации модуля, который срабатывал на кассету с пробитым изолятором. Видно, что один из токов отсутствует и на ~300 мкс нет силового тока в лампах (срабатывание запрета пуска). В результате удалось избежать серьезных разрушений ламповых кассет.

Заключение

В НИИЭФА им. Д. В. Ефремова (С.-Петербург) создан стенд, являющийся прототипом модуля силового лазерного усилителя создаваемой

установки. Кроме отработки усилителя на стенде испытывались 7 модулей системы накопления и коммутации электрической энергии установки.

Всего на стенде за 2016–2017 год было сделано порядка 500 срабатываний каждым модулем СНКЭЭ. Одновременно семью модулями при зарядном напряжении 24 кВ выполнено 267 пусков. Параметры импульсов токов в лампах (амплитуда – около 25 кА, длительность импульса – около 360 мкс) соответствуют требуемым значениям. Ток утечки силовых РВД-коммутаторов не изменился в результате испытаний, что свидетельствует о целостности полупроводниковых элементов коммутаторов.

Проанализирована стабильность зарядных напряжений на накопительных конденсаторах модулей от опыта к опыту. По результатам 116-ти групповых опытов при рабочем напряжении 24 кВ разброс напряжений составляет около 0,3 %, что соответствует техническим требованиям.

В двух нештатных ситуациях, связанных с отказами в работе ламповых кассет (обрыв провода лампы и пробой изолятора), при групповых срабатываниях в стойках СЭУД модулей срабатывала функция запрета пуска основного коммутатора модулей. Таким образом, удалось избежать серьезных разрушений элементов лазерного усилителя.

Выявлены ряд отказов в работе высоковольтных блоков (пробой кабеля), стоек СЭУД (зарядные устройства, контроллеры диагностики) модулей.

По результатам исследований проводится анализ причин отказов выхода из строя элементов модулей и ламповых кассет.

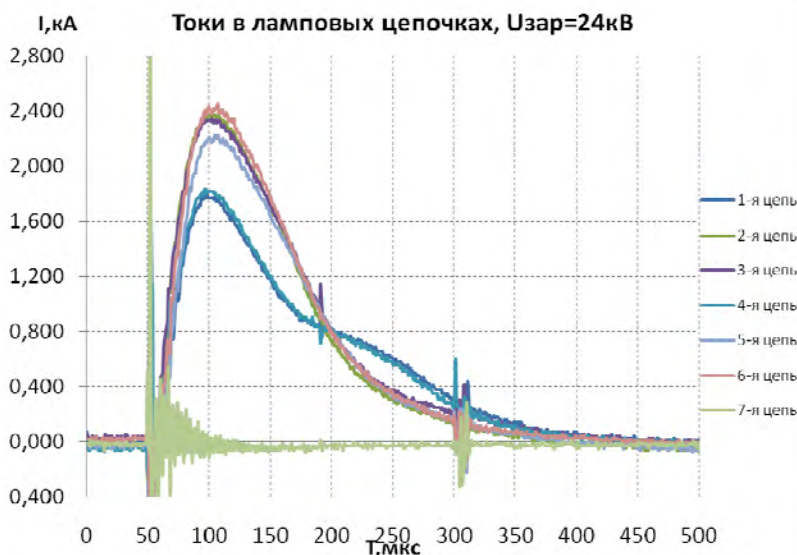


Рис. 9. Оциллограмма токов предионизации при нештатном пуске модуля

Список литературы

1. Ганин Л. С., Арзев А. Г., Беспалов Е. А., Бродский И. А., Галахов И. В., Коженков Е. В., Креков А. В., Лесков В. И., Логутенко С. Л., Осин В. А., Свиридов В. В., Сеник Д. А., Чистопольский М. В. Модуль емкостного накопителя с запасенной энергией 900 кДж на базе реверсивно включаемых динисторов для питания ламп накачки мощного неодимового лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» по теме «Проблемы физики высоких плотностей энергии», Саров. 2016. Т. 2. С. 55–62.

2. Свиридов В. В., Арзев А. Г., Беспалов Е. А., Бродский И. А., Галахов И. В., Ганин Л. С., Коженков Е. В., Креков А. В., Лесков В. И., Логутенко С. Л., Осин В. А., Сеник Д. А., Чистополь-

ский М. В. Высоковольтный коммутатор мощных импульсов тока на основе реверсивно включаемых динисторов для емкостного накопителя энергии неодимового лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» по теме «Проблемы физики высоких плотностей энергии». Саров. 2016. С. 148–155.

3. Бродский И. А., Галахов И. В., Ганин Л. С., Логутенко С. Л., Осин В. А., Сеник Д. А., Чистопольский М. В. Автоматизированная система электропитания, управления и диагностики модуля емкостного накопителя энергии мощного неодимового лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» по теме «Проблемы физики высоких плотностей энергии». Саров. 2016.