

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ МОДУЛЯ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ МОЩНОГО НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

*И. А. Бродский, И. В. Галахов, Л. С. Ганин,
С. Л. Логутенко, В. А. Осин, Д. А. Сенник, М. В. Чистопольский*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

Введение

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведется разработка неодимовой лазерной установки нового поколения [1], предназначенной для проведения экспериментальных исследований в области лазерного термоядерного синтеза и в интересах ядерно-оружейного комплекса.

Система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) является одной из основных систем лазерной установки. С помощью СНКЭЭ в лазерных установках осуществляется обеспечение электрической энергией источников накачки лазерных усилителей. В качестве источников накачки используются импульсные ксеноновые лампы, в которых происходит преобразование электрической энергии в световую, последняя и используется для накачки активных элементов усилителей.

СНКЭЭ состоит из 432 унифицированных модулей емкостного накопителя энергии. Каждый модуль соответствует одной секции блока усилителя (СБУ).

Модульная структура накопителей энергии наиболее целесообразна при использовании в качестве нагрузки большого количества параллельно включенных источников света, работающих синхронно, но независимо друг от друга. Она дает возможность снизить индуктивность разрядного контура и повысить амплитуду тока в нагрузке, понизить вероятность возникновения серьезных аварийных ситуаций, унифицировать элементную базу и снизить время проведения ремонтных и профилактических работ.

Модуль СНКЭЭ представляет собой функционально законченное устройство, обладающее собственными системами заряда, разряда, синхронизации, управления и диагностики (рис. 1). Структура СНКЭЭ такого типа схожа со структурой конденсаторной батареи установки NIF [2] и

несколько отличается от структуры конденсаторных батарей установок «Искра-5» [3] и «Луч» [4], у которых имеется развитая сеть внешних связей по цепям зарядки, синхронизации, управления и диагностики.

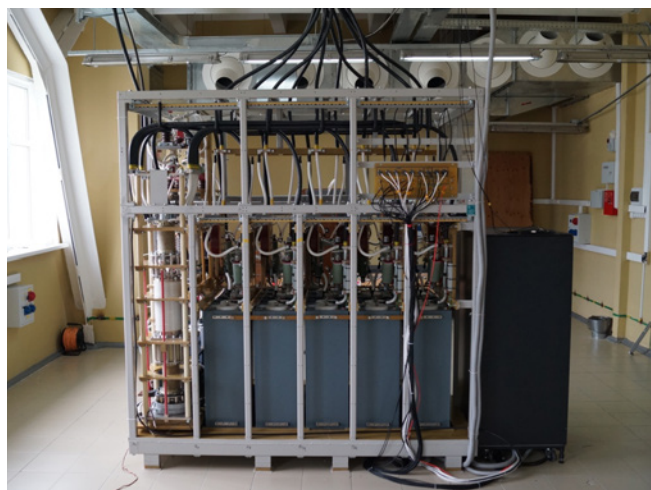


Рис. 1. Опытный образец модуля емкостного накопителя энергии СНКЭЭ лазерной установки

Извне к модулю подводится электропитание от промышленной сети 380 В. Между модулем накопителя, местным пультом управления (МПУ) и системой синхронизации (СС), посредством волоконно-оптических линий связи, организовано информационное взаимодействие для обмена сигналами управления, диагностики и синхронизации работы элементов модуля.

Структурная схема модуля СНКЭЭ представлена на рис. 2.

Конструктивно модуль СНКЭЭ состоит из высоковольтного блока (ВБ) и стойки электропитания, управления и диагностики (СЭУД). Основными элементами высоковольтного блока являются [5]:

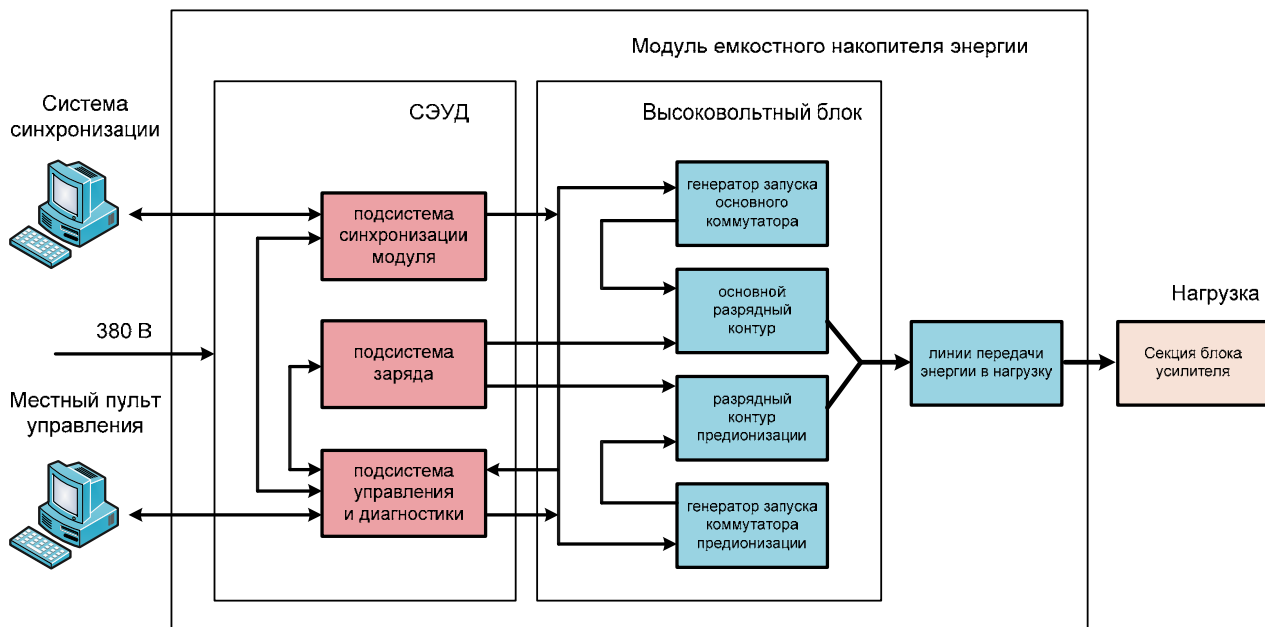


Рис. 2. Структурная схема модуля емкостного накопителя энергии СНКЭЭ

- конденсаторная батарея основного контура и контура предионизации;
- высоковольтные автоматические коммутационные аппараты;
- коммутаторы основного контура и контура предионизации совместно с генераторами запуска;
- высоковольтные элементы разрядных контуров;
- высоковольтные кабельные линии,

Стойка СЭУД выполняет функции подсистем заряда, синхронизации, управления и диагностики модуля накопителя.

Назначение, состав и конструктивное исполнение СЭУД

СЭУД предназначена для размещения технологического оборудования, обеспечивающего в соответствии с заданным алгоритмом решение следующих задач:

- подготовку к проведению эксперимента;
- управление зарядом накопителей энергии модуля;
- управление разрядом накопителей энергии (синхронизированную передачу накопленной энергии в импульсные ксеноновые лампы накачки СБУ);
- диагностику токов разряда;
- первичный анализ данных диагностики токов разряда;
- обработку, накопление и трансляцию результатов эксперимента на местный пульт управления (МПУ) СНКЭЭ.

СЭУД включает в свой состав следующие функционально законченные устройства:

- 1) источник бесперебойного питания (ИБП);
- 2) устройство системы синхронизации – модульное (УСС-М);
- 3) блок контроллеров системы автоматизированного управления (БК САУ) модуля СНКЭЭ;
- 4) блок релейной автоматики (БА);
- 5) зарядное устройство накопительных конденсаторов (НК) модуля – ЗУ25;
- 6) комплект соединительных кабелей.



Рис. 3. Внешний вид СЭУД (вид спереди, сзади)

СЭУД (рисунок 3) конструктивно выполнена в виде стандартной 19" приборной стойки с ЭМС защитой. Электропитание стойки выполняется от трехфазной сети переменного тока 380В, 50Гц. Органы управления и контроля работы СЭУД расположены на передней панели изделия.

Управление СЭУД производится от МПУ по сети Ethernet посредством многомодовой дуплексной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Взаимодействие СЭУД и СС установки обеспечивает временной момент коммутации энергии в импульсные ксеноновые лампы накачки. Подключение к СС выполняется посредством симплексной ВОЛС.

Назначение блоков СЭУД

Источник бесперебойного питания (ИБП).

Источник бесперебойного питания (ИБП) типа Smart-UPS SUA1500RMI2U обеспечивает:

- электропитание блоков БК САУ модуля СНКЭЭ, УСС-М и системы управления (СУ) ЗУ;
- защиту подключенного оборудования от перебоев в электроснабжении, снижения напряжения в сети, кратковременного провала напряжения, скачков напряжения и тока;
- фильтрацию помех в сети электропитания,
- защиту блоков стойки от опасных высоковольтных воздействий посредством отсоединения оборудования от сети электропитания на интервале заряда накопителей модуля и последующей коммутации запасенной энергии в нагрузку.

Включение ИБП выполняется после подачи напряжения на СЭУД по сигналу от МПУ, выключение – после обесточивания стойки;

Переключение ИБП в режим электропитания от аккумуляторной батареи выполняется перед началом процесса подготовки к заряду, переключение в режим электропитания от сети – после разряда модуля в нагрузку.

Зарядное устройство (ЗУ).

Зарядное устройство (ЗУ) предназначено для обеспечения безопасного, стабилизированного и экономичного заряда конденсаторов модуля накопителя до заданного напряжения с необходимой точностью и стабилизацию заряда в течение требуемого интервала времени [6].

ЗУ представляет собой преобразователь электроэнергии с промежуточным звеном повышенной частоты. Принцип действия ЗУ заключается в преобразовании выходного напряжения сетевого вы-

прямителя в квазисинусоидальные импульсы зарядного тока, следующие с частотой до 50 кГц.

Основные технические параметры ЗУ приведены в табл. 1.

Таблица 1
Основные технические характеристики ЗУ

Наименование параметра	Значение
Среднее значение выходной мощности при заряде накопителей энергии до 25 кВ, кВт	15, не менее
Диапазон регулирования выходного напряжения, кВ	от 10 до 25
Дискретность регулирования выходного напряжения, В	50
Полярность выходного напряжения	отрицательная
Статическая погрешность задания выходного напряжения, %	±1,0, не более
Относительная погрешность измерения выходного напряжения встроенным вольтметром, %	±1,0, не более
Нестабильность зарядного напряжения от цикла к циклу, %	±0,3, не более
Время заряда накопителей емкостью 3000 мкФ в режиме максимальной зарядной мощности до напряжения 24,0 кВ, с	70, не более
Время удержания напряжения на выходе, с	60, не более

Электронные защиты ЗУ выполняют автоматическое отключение заряда в следующих условиях:

- при внутреннем коротком замыкании транзисторного преобразователя;
- при достижении напряжением на выходе ЗУ напряжения отсечки;
- при превышении напряжением на выходе ЗУ заданного напряжения более чем на 2 кВ;
- при коротком замыкании в нагрузке;
- при пробое накопителя энергии во время заряда;
- при превышении времени заряда 130 секунд;
- при включении в режиме холостого хода.

Блок автоматики (БА).

Блок автоматики (БА) представляет собой комбинированное многофункциональное устройство, в качестве коммутационных элементов которого использованы электромагнитные реле и контакторы. БА предназначен для выполнения следующих функций:

- подачи напряжения питания на устройства ВБ – генератор запуска коммутатора предиониза-

ции (ГЗКП), генератор запуска основного коммутатора (ГЗОК), устройство размагничивания токоограничивающего дросселя (УР), коммутирующие устройства (высоковольтные реле и замыкатель);

- управления силовым питанием ЗУ;
- трансляции состояний технологического оборудования;
- обеспечения защиты оборудования ВБ от короткого замыкания, возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Технические характеристики БА приведены в табл. 2.

Таблица 2
Основные технические характеристики БА

Наименование параметра	Значение
Напряжение питающей сети, В	380 ± 10%
Частота питающей сети, Гц	50 ± 1
Количество входов с напряжением 220В	1
Количество выходов с напряжением 220В	11
Количество выходов с напряжением +24В	1
Количество дискретных входов	11
Количество дискретных выходов	16

Блок контроллеров системы автоматизированного управления модуля СНКЭЭ.

БК САУ модуля СНКЭЭ представляет собой набор связанных информационно сетью устройств, предназначенных для управления оборудованием модуля накопителя, контроля его состояния, регистрации и обработки сигналов разрядных токов.

Структурная схема САУ модуля СНКЭЭ приведена на рис. 4.

В состав БК САУ входят:

- программируемый логический контроллер технологический (ПЛКТ);
- программируемый логический контроллер диагностики (ПЛКД);
- модуль интеграции;
- коммутационное оборудование.

ПЛКТ БК САУ обеспечивает выполнение следующих функций:

- обмен информацией с МПУ с помощью протокола Modbus TCP/IP;
- контроль состояния и управление оборудованием модуля для обеспечения выполнения алгоритма работы в соответствии с конфигурацией эксперимента;
- программирование, управления работой выхода и контроль состояния ЗУ (установка напря-

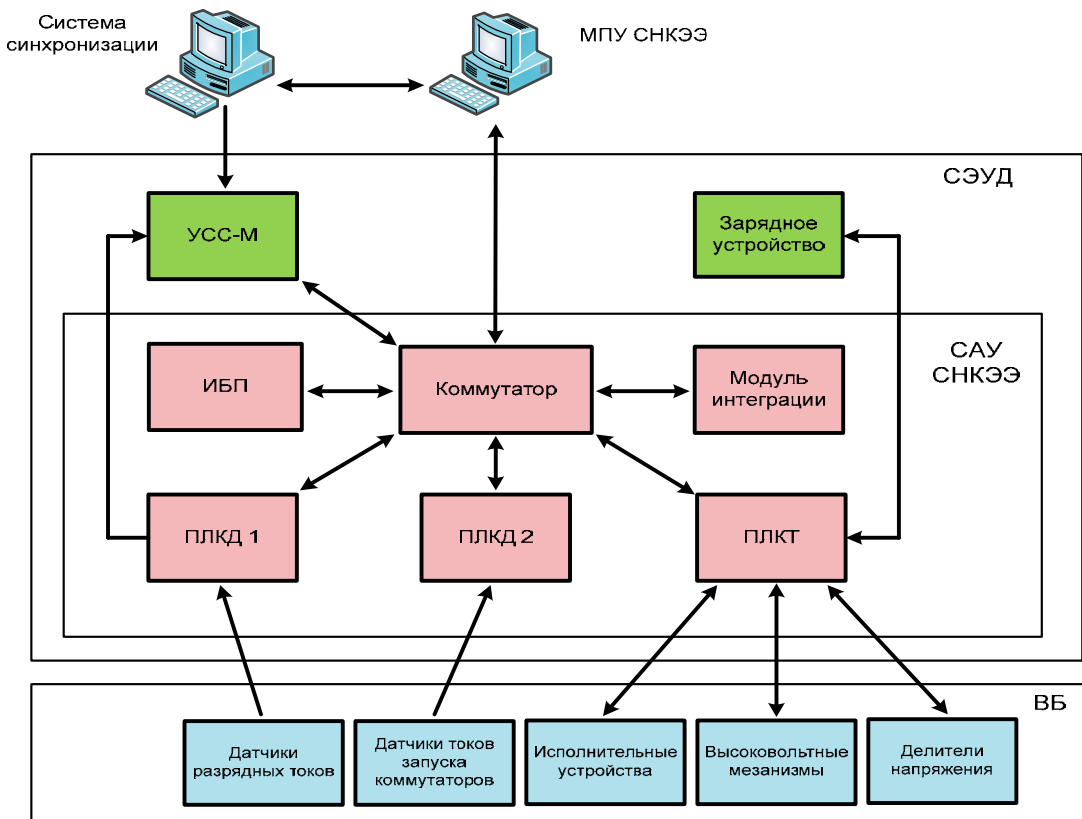


Рис. 4. Структурная схема САУ модуля СНКЭЭ

жения заряда, порогового напряжения, запуск начала заряда, принудительная остановка заряда, измерение напряжения выхода, контроль ошибок и блокировок);

- отслеживание возникновения нештатных ситуаций, контроль состояния блокировок, приведение оборудования модуля в исходное состояние.

Таблица 3

Основные технические характеристики БК САУ модуля СНКЭЭ

Наименование параметра	Значение
Количество входных каналов ввода напряжения делителей, шт.	2
Напряжение каналов ввода напряжения делителей, В	+5
Пределы основной, приведенной к диапазону, погрешности преобразования напряжения входных аналоговых сигналов, %	+0,3, не более
Количество входных дискретных сигналов в виде замыкания/размыкания "сухого контакта", шт.	16
Ток замкнутого "сухого контакта", мА	10, не более
Количество выходных дискретных сигналов в виде замыкания нормально разомкнутых контактов реле, шт.	12
Ток выходных дискретных сигналов, А	0,5, не более
Количество входных аналоговых каналов для контроля сигналов с датчиков тока, шт.	14
Напряжение входных аналоговых каналов для контроля сигналов с датчиков тока, В	+5
Частота дискретизации входных аналоговых каналов для контроля сигналов с датчиков тока (запуска коммутаторов), МГц	1(40)
Пределы основной, приведенной к диапазону, погрешности преобразования сигналов с датчиков тока, %	±2, не более

ПЛКД БК САУ предназначен для:

- регистрации, аналого-цифрового преобразования и записи во внутреннюю память сигналов импульсных разрядных токов модуля накопителя: тока основного коммутатора, токов единичных разрядных контуров, тока контура предионизации и токов запуска основного коммутатора и коммутатора предионизации. В качестве датчиков тока используются пояса Роговского.

- выполнения в реальном масштабе времени, непосредственно до момента запуска основного коммутатора, диагностики импульсных разрядных токов предионизации каждого лампового контура

СБУ и сравнение получаемых данных с эталонными величинами по заданному алгоритму, с целью разрешения/запрещения формирования и трансляции пускового импульса от УСС-М к ГЗОК.

Модуль интеграции предназначен для реализации функций взаимодействия с МПУ.

Технические характеристики БК САУ модуля СНКЭЭ приведены в табл. 3.

Устройство системы синхронизации – модульное (УСС-М).

Устройство системы синхронизации (УСС-М) предназначено для формирования и трансляции импульсов, обеспечивающих синхронизированный запуск системы диагностики разряда и генераторов запуска коммутаторов модуля в заданные моменты времени и с заданной точностью.

УСС-М представляет собой трехканальный логический генератор микросекундных импульсов с управляемой временной задержкой. Запуск трансляции импульсов осуществляется по команде из программы управления верхнего уровня или по внешнему оптическому сигналу, поступающему от системы синхронизации.

Функции УСС-М:

- прием сигнала запуска от системы синхронизации;
- генерация и трансляция стартового сигнала для запуска ПЛКД БК САУ;
- генерация и трансляция пусковых сигналов на ГЗКП и ГЗОК;
- блокировка формирования и трансляции пускового сигнала ГЗОК при отсутствии разрешающего оптического сигнала от ПЛКД БК САУ.

Настройка параметров пусковых сигналов УСС-М осуществляется из программы управления верхнего уровня.

Оциллограмма импульсов запуска ПЛКД, ГЗКП и ГЗОК, в соответствии с установленными временными задержками относительно запуска ПЛКД, представлена на рис. 5.

Программное обеспечение

Специальное программное обеспечение САУ СНКЭЭ (СПО нижнего уровня) разработано с использованием библиотек, поставляемых в комплекте с контроллерами САУ. СПО состоит из:

- прикладной программы и конфигурации контроллера ПЛКТ, разработанной в интегрированной среде разработки CoDeSys;

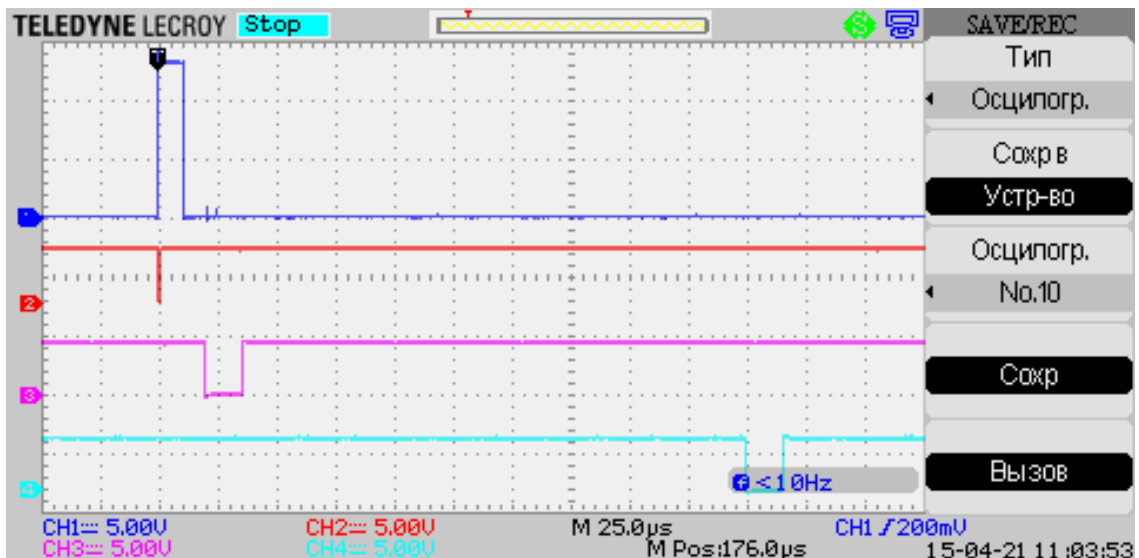


Рис. 5. Осциллограмма импульсов запуска ПЛКД (CH2), ГЗКП (CH3) и ГЗОК (CH4) относительно входного сигнала УСС-М (CH1). задержки: импульс ГЗКП относительно импульса ПЛКД – 20 мкс, импульс ГЗОК относительно импульса ПЛКД – 250 мкс.

- прикладных программ ПЛКД, разработанных в среде исполнения DRV с использованием управляющей библиотеки BARDY;

- программного обеспечения модуля интеграции.

Программное обеспечение МПУ СНКЭЭ (СПО верхнего уровня) представлено:

- комплектом тестовых программных приложений, разработанных под управлением операционной системы Microsoft Windows 7 Professional и позволяющих проводить испытания одного модуля накопителя и его составных частей;

- комплексным специальным программным обеспечением МПУ СНКЭЭ, разрабатываемым специалистами ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Н. Новгород под управлением операционной системы Astra Linux CE 1.10 (OREL) на основе базовой программной платформы SCADA.

На рис. 6 представлен графический интерфейс СПО МПУ СНКЭЭ.

Результаты работы диагностического блока СПО МПУ СНКЭЭ, выполняющего графическое отображение форм импульсов, зарегистрированных ПЛКД (токов основного коммутатора и коммутатора предыонизации, токов запуска коммутаторов, токов единичных цепей разрядного контура), приведены на рис. 7.

Результаты экспериментов с СЭУД

За время испытаний опытного образца СЭУД проведено более 500 срабатываний модуля

СНКЭЭ в различных режимах и с различными комбинациями нагрузки. Испытания подтвердили высокую эффективность решений, принятых при разработке и создании автоматизированной системы. Установлено, что все технические требования к системе были практически реализованы. Блоки СЭУД успешно обеспечивают выполнение возложенных функциональных задач. Возникновения нештатных и аварийных ситуаций, некорректной работы, повреждений и (или) выхода из строя элементов СЭУД в ходе испытаний отмечено не было.

Подтверждена работоспособность специального программного обеспечения СЭУД. При проведении испытаний установлено, что СПО точно выполняет последовательность действий в соответствии с алгоритмом работы модуля СНКЭЭ. Негативного влияния на работоспособность операционной системы, базового программного обеспечения, иных программных приложений, установленных на ПЭВМ, выявлено не было. Разработанные программные средства СЭУД являются гибкими программными продуктами, доступными к адаптации и модернизации при возникновении дополнительных требований.

По результатам испытаний был предложен ряд доработок с целью упрощения конструкции, улучшения технических характеристик, унификации аппаратных и программных средств, уменьшения затрат на изготовление системы.

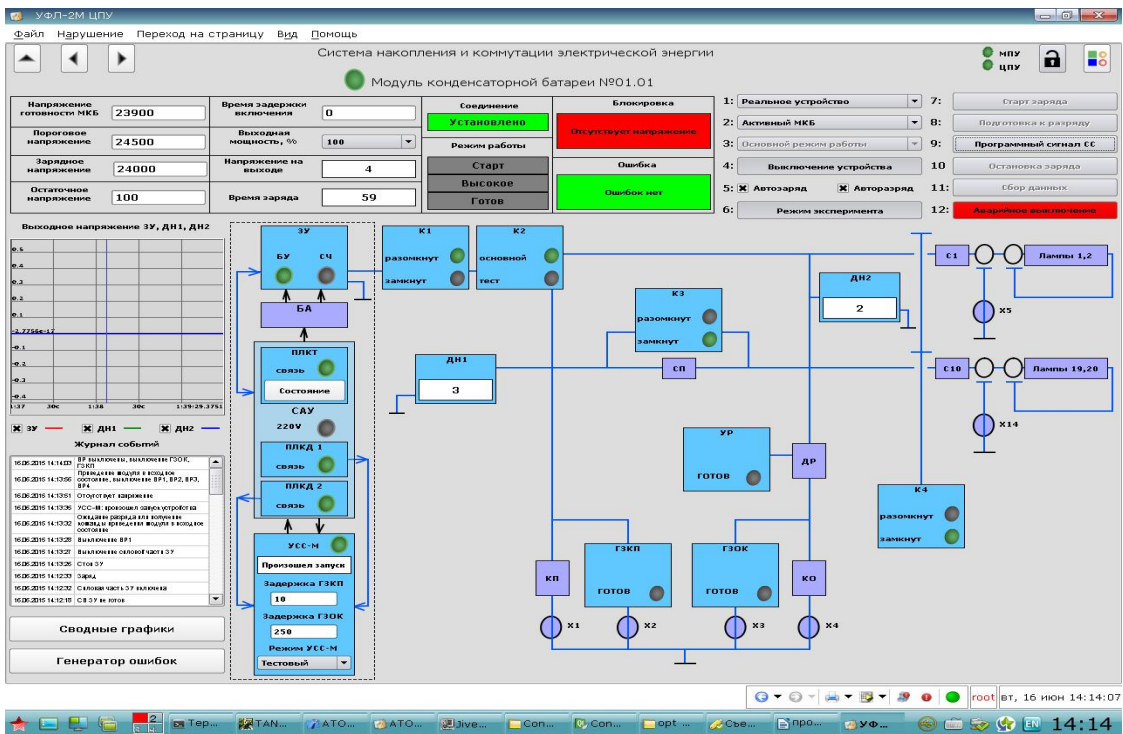


Рис. 6. Графический интерфейс управляющего блока СПО МПУ СНКЭЭ

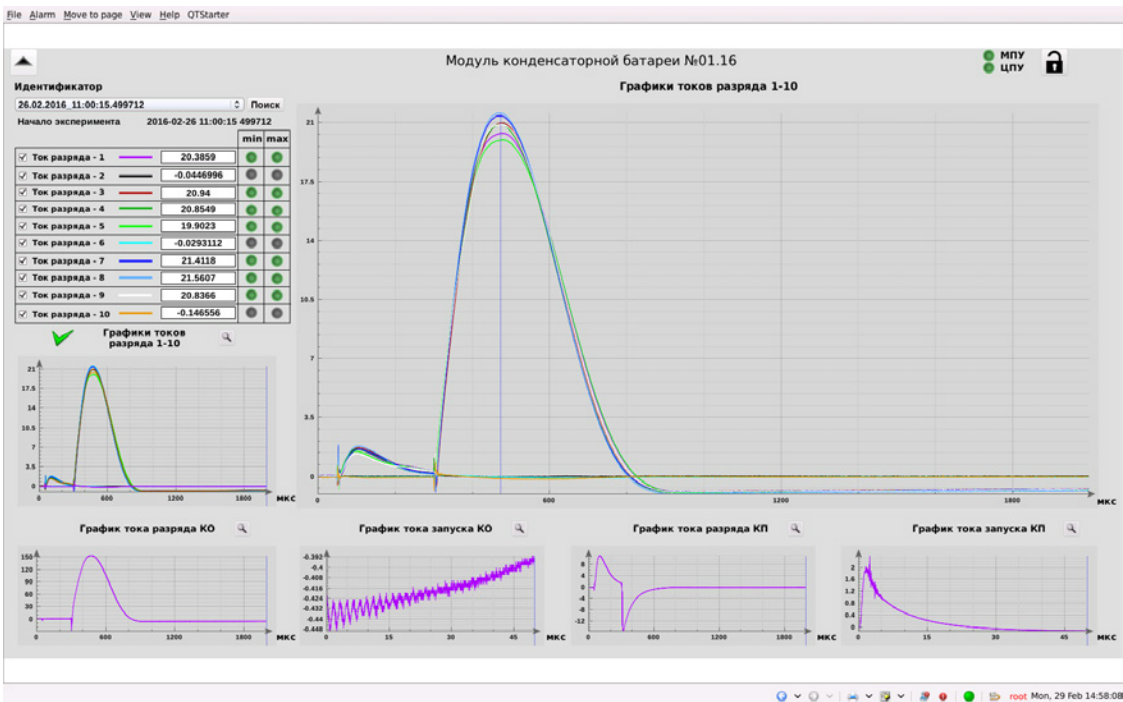


Рис. 7. Интерфейс диагностического блока СПО МПУ СНКЭЭ (графики импульсов разрядных токов модуля)

Заключение

В докладе представлены результаты разработки автоматизированной системы электропитания, управления и диагностики модуля системы накопления

и коммутации электрической энергии лазерной установки.

Описаны элементы, входящие в состав стойки электропитания, управления и диагностики, приведены выполняемые функции и основные технические характеристики оборудования стойки.

Показатели надежности СЭУД соответствуют стандартным требованиям и опираются на применение проверенных аппаратных решений, представляющих запас для масштабирования и соответствия возникающим в процессе эксплуатации функциональным задачам.

В настоящее время проводятся комплексные испытания стоек СЭУД в составе опытной партии модулей СНКЭЭ.

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. «Концепция построения лазерной установки нового поколения». Сборник докладов XXXIX Международной конференции по физике плазмы и УТС, Москва, 2012. С 17.

2. G. Hammon III, M. A. Newton. «NIF Amplifier Power Conditioning System (PCS). Design Basis Document», January 1, 2001.

3. Безуглов В. Г., Галахов И. В., Гашеев А. С. и др. «Комплекс емкостных накопителей энергии установки «Искра-5», ПТЭ, № 3, 1991. С. 100–103.

4. Безуглов В. Г., Беляев С. А., Галахов И. В. и др. «Емкостные накопители энергии на основе реверсивно включаемых динисторов для накачки неодимовых лазеров». Труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения «Проблемы физики высоких плотностей энергии», Саров, 2010, С. 302–312.

5. Ганин Л. С., Беспалов Е. А., Бродский И. А., Галахов И. В., Логутенко С. Л., Осин В. А., Се́ник Д. А. «Высоковольтный стенд по аттестации модуля ёмкостного накопителя энергии мощного неодимового лазера». Сборник докладов 12-й научно-технической конференции «Молодёжь в науке», Саров, 2014. С. 143–147.

6. Копелович Е. А., Хватов С. В., Ваняев В. В., Троицкий М. М., Флат Ф. А. «Транзисторно-конденсаторные зарядные устройства мегаджоульных ёмкостных накопителей энергии». Электротехника, № 7, 2010. С. 11–16.