

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НЕОДИМОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEM FOR A CAPACITOR BANK OF Nd-GLASS LASER

Д. А. Сеник, А. Г. Арзев, И. В. Галахов, Л. С. Ганин, Е. Н. Задорожная, Е. В. Коженков, А. В. Креков, В. А. Осин, В. В. Свиридов, М. В. Чистопольский

D. A. Senik, A. G. Arzev, M. V. Chistopolsky, I. V. Galakhov, L. S. Ganin, E. V. Kozhenkov, A. V. Krekov, V. A. Osin, V. V. Sviridov, E. N. Zadorozhnaya

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

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

В докладе приведено обоснование методов регистрации параметров, характеризующих процессы заряда и разряда модулей накопителя энергии мощной неодимовой лазерной установки. Описаны инженерные решения, принятые при разработке комплекса аппаратных средств и программного обеспечения системы технической диагностики.

The paper presents diagnostic methods of charge and discharged processes in the modules of the system of electric energy storage. Describes engineering solutions, which were developed for creation a system for a technical diagnostics.

Введение

Система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) разрабатываемой неодимовой лазерной установки предназначена для обеспечения импульсной электрической энергией источников накачки комплекса силовых лазерных усилителей, построенных по модульному принципу и разделенных на универсальные секции. В качестве источников накачки активных элементов силового усилителя применяются импульсные газоразрядные лампы, наполненные ксеноном, которые способны создать свет нужного спектрального диапазона и требуемой высокой интенсивности. Каждая секция силового усилителя содержит три ламповые кассеты с двадцатью лампами, соединенными попарно - последовательно, которые обеспечивают накачку восьми активных элементов.

Основной элемент СНКЭЭ – емкостной накопитель энергии – разделен на унифицированные, функционально завершенные структурные единицы – модули СНКЭЭ (рис. 1). Модуль СНКЭЭ состоит из двух устройств [1] – высоковольтного блока (ВБ) и стойки электропитания, управления и диагностики (СЭУД). Каждый модуль запасает до 860 кДж энергии (при рабочем напряжении 24 кВ), затем коммутируемой в нагрузку через РВД - коммутатор. При этом к коммутатору подключено



Рис. 1. Модуль СНКЭЭ, состоящий из высоковольтного блока (ВБ) и стойки электропитания, управления и диагностики (СЭУД)

параллельно 10 независимых разрядных контуров, в каждом из которых происходит разряд одного конденсатора через формирующую индуктивность и коаксиальную линию на две импульсные лампы, соединенные последовательно. На лампы воздействует последовательность из двух импульсов тока – малоэнергетичного импульса тока предионизации (максимальная амплитуда тока – 3 кА, длительность импульса тока – 150 мкс) и силового импульса тока основного разряда (максимальная амплитуда тока – до 25 кА, длительность импульса

са тока – 450 мкс), задержанного относительно импульса предионизации на 250 мкс.

Разработка СНКЭЭ лазерной установки определила актуальность работы по созданию системы технической диагностики (СТД), входящей в состав автоматизированной системы управления (АСУ) и выполняющей регистрацию параметров модуля на стадии заряда и разряда в нагрузку [2].

Высокое напряжение накопителя энергии (до 24 кВ) и большие величины разрядных токов (до 250 кА), протекающих через коммутатор, определяют вероятность разрушения высоковольтных элементов. Поэтому в каждом физическом эксперименте возможен какой-либо отказ в системе накопления энергии, который необходимо обнаружить и устранить.

Сложность разработки СТД обуславливается следующими факторами:

- необходимостью разработки методики диагностики, под которой понимается выбор наиболее информативных параметров и способов их измерения, позволяющих определять работоспособность и максимально результативно обнаруживать отказы высоковольтных элементов;

- подбором комплекса технических средств и разработкой специализированного программного обеспечения для построения эффективной и надежной многоканальной измерительной системы;

- необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости системы накопления и технических средств СТД при разряде модулей, сопровождающегося возникновением мощных импульсных помех.

Подсистема диагностики заряда

Качество работы модуля СНКЭЭ на стадии заряда определяется двумя основными параметрами – точностью достижения заданной величины зарядного напряжения и стабильностью, т. е. повторяемостью (неизменностью) от опыта к опыту относительно начального значения при воздействии факторов внешней среды и с течением времени.

Определяющим параметром, который в полной мере характеризует процесс управления зарядом, является напряжение на накопительных конденсаторах. В составе ВБ модуля измерение напряжения выполняется как на накопительных конденсаторах в основном зарядном контуре, так и на конденсаторе предионизации.

Для измерения напряжения разработана конструкция специального высоковольтного омиче-

ского делителя, который компактен (рис. 2), содержит в составе высоковольтного плеча цепочку мощных прецизионных резисторов, имеющих погрешность $\pm 1\%$ и температурный коэффициент сопротивления $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, что обеспечивает высокую точность измерения и стабильность показаний.



Рис. 2. Высоковольтные омические делители напряжения (слева направо) киловольтметра В7-40, модуля СНКЭЭ и киловольтметра КВЦ-120

Аппаратно-вычислительная составляющая подсистемы контроля напряжения входит в состав АСУ модуля. Контроллер [4], оснащенный платой аналогового ввода, образует аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а в совокупности с двумя высоковольтными делителями напряжения – узел системы сбора и обработки величин напряжений на конденсаторах модуля. Суммарная погрешность измерения зарядного напряжения в системе определяется двумя составляющими – классом точности АЦП контроллера (0,03 %) и погрешностью делителя напряжения ($\pm 1\%$).

Подсистема диагностика разряда

Диагностика разряда модуля СНКЭЭ выполняется на основе регистрации полной формы разрядных токов, проходящих через ключевые элементы ВБ – основной коммутатор, коммутатор предионизации, лампы накачки, генераторы запуска коммутаторов (основного и предионизации).

Данный способ диагностики позволяет:

- оценить величину энергии, вложенной в источник света, измеряя амплитуду и форму разрядного тока в нагрузке при определенном уровне зарядного напряжения на накопителе энергии;

- выявить полный отказ или задержку срабатывания коммутатора модуля и каждого лампового контура;
- определить пусковые характеристики коммутаторов модулей;
- обнаружить нарушение работоспособности элементов разрядных контуров модулей;
- оценить синхронизацию срабатывания и энергетический вклад в ламповые контура.

Для получения полной информации о разрядных параметрах модуля, необходимо регистрировать 14 форм импульсов тока: основного коммутатора и коммутатора преионизации, десяти ламповых контуров и двух токов запуска коммутаторов.

В качестве измерителей разрядных токов модуля выбраны пояса Роговского с пассивной интегрирующей цепочкой 5 различных типов (рис. 3): ПР-5м, ПР-5б, рассчитанных на измерение тока до 5 кА, ПР-30, ПР-30с (ток до 30 кА), ПР-300 (ток до 300 кА). Пояса размещаются непосредственно в корпусе ВБ модуля в зоне действия высоковольтных помех и соединяются с входами АЦП радиочастотными кабельными линиями. Уровень выходного сигнала, формируемого поясами, составляет от 0 до 5 В. Для определения абсолютных характеристик измеряемого сигнала каждый пояс проходит индивидуальную калибровку на специализированном стенде, при этом обеспечивается точность измерения тока $\pm 5\%$ во всем амплитудно-временном диапазоне.

Диагностическое устройство выполнено в виде двух специализированных процессорных модулей цифровой обработки сигналов (ЦОС) [14], имеющих submodule АЦП и интерфейсную коммуникационную плату [4].

Первый модуль ЦОС предназначен для регистрации напряжений с двух поясов Роговского,

установленных в цепях генераторов запуска коммутаторов, с частотой 40 МГц на канал. Второй модуль ЦОС обеспечивает регистрацию напряжений с двенадцати поясов Роговского, установленных в ламповых контурах и контурах коммутаторов, основного и преионизации, с частотой 1 МГц на канал.

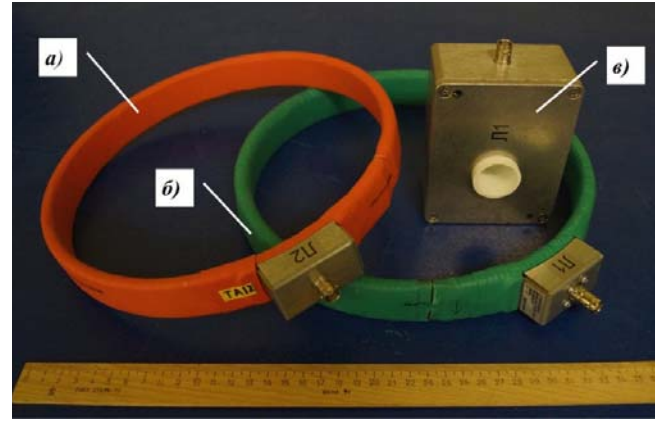


Рис. 3. Конструктивное исполнение датчиков тока: а – ПР-5б; б – ПР-300; в – ПР-30, ПР-30с, ПР-5м

Результаты испытаний СТД

После запуска специального программного обеспечения накопителя энергии СТД выполняет непрерывный мониторинг сигналов с делителей напряжения, аналого-цифровое преобразование и передачу получаемых данных на верхний уровень автоматизированной системы.

На рис. 4 приведен графический интерфейс программы управления верхнего уровня, отображающий динамику изменения напряжения на накопительных конденсаторах основного контура

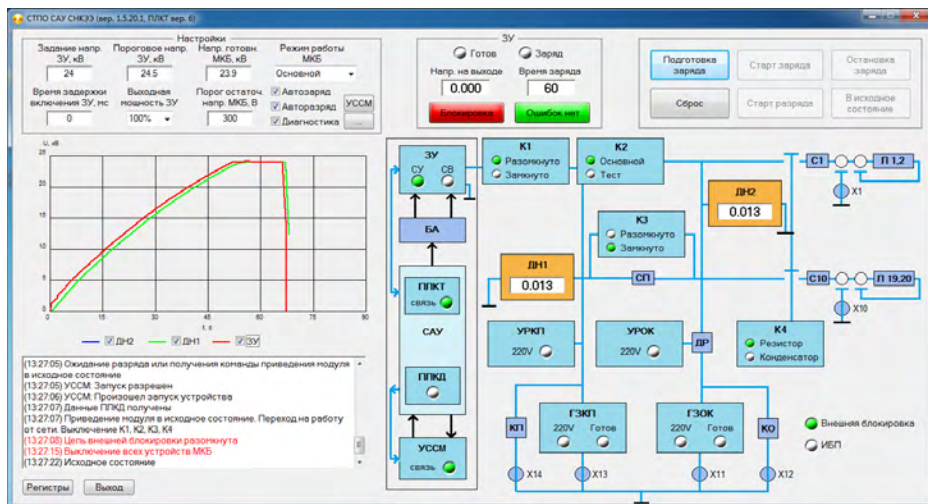


Рис. 4. Графический интерфейс программы управления

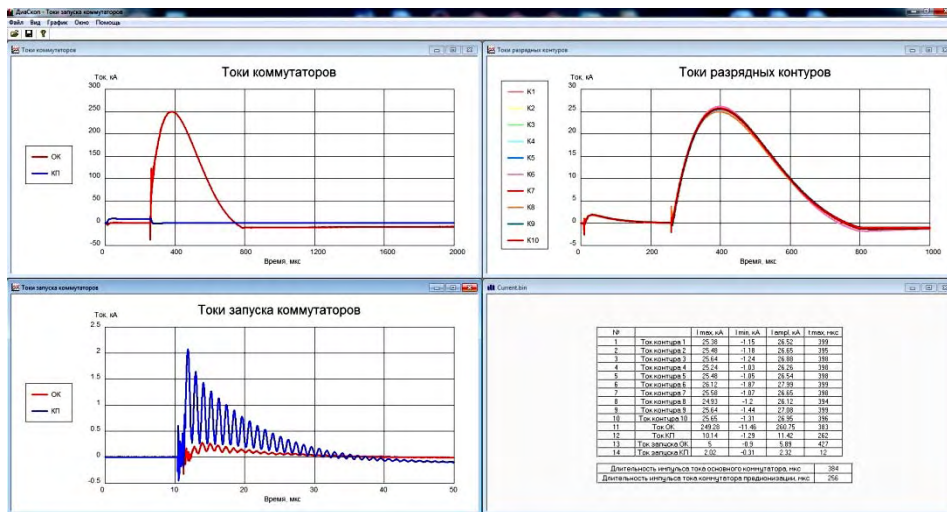


Рис. 5. Графический интерфейс программы диагностики разряда

и контура предионизации, зарегистрированную СТД в процессе заряда в основном режиме работы. Частота опроса делителей напряжения составляет 10 сэмп/с.

На рис. 5 приведен графический интерфейс программы диагностики разряда. Длительность регистрируемого временного диапазона двух импульсов тока запуска коммутаторов составляет 500 мкс с интервалом между отсчетами 25 нс, двух импульсов тока коммутаторов и десяти в ламповых контурах – 2000 мкс с интервалами между отсчетами 1 мкс.

Проверка точности измерения зарядного напряжения, выполненная при помощи киловольтметра спектрального цифрового КВЦ-120, имеющего предел допускаемой основной погрешно-

сти 0,25 % показала, что для СТД погрешность измерения напряжения в диапазоне от 10 кВ до 24 кВ не превышает 0,15 %.

Проверка точности измерения амплитуд токов разряда проводилась сравнением результатов измерения токов СТД с результатами измерения токов при помощи цифрового осциллографа с частотой 100 МГц с применением эталонных датчиков тока, имеющих точность $\pm 1\%$. В качестве эталонных датчиков использовались пояса Роговского с активным интегратором LFR 30/300, CWT 1500B (Англия) и с пассивным интегратором Pearson 5046 (США), Определено, что СТД с использованием штатных поясов Роговского обеспечивает измерение величин токов с точностью не хуже $\pm 5\%$ (рис. 6–9).

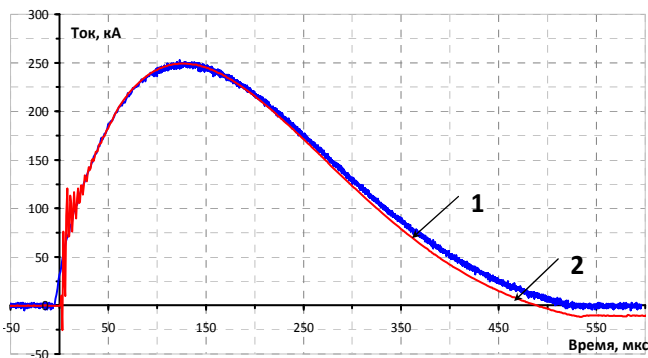


Рис. 6. Импульс тока через основной коммутатор при зарядном напряжении 23 кВ. 1 – осциллограмма сигнала эталонного пояса CWT 1500B; 2 – сигнал штатного пояса PR-300, зарегистрированный подсистемой разряда СТД

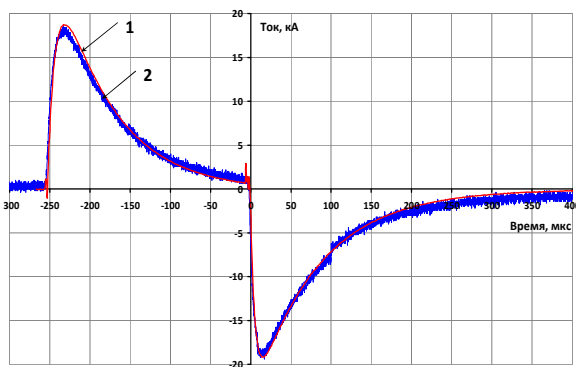


Рис. 7. Импульс тока через коммутатор предионизации при зарядном напряжении 23 кВ. 1 – сигнал штатного пояса PR-30, зарегистрированный подсистемой разряда СТД; 2 – осциллограмма сигнала пояса LFR 30/300

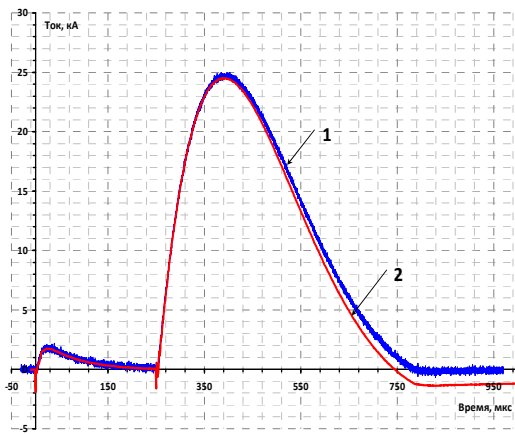


Рис. 8. Импульс тока в единичном разрядном контуре при зарядном напряжении 23 кВ. 1 – сигнал штатного пояса ПР-30, зарегистрированный подсистемой разряда СТД; 2 – осциллограмма сигнала эталонного пояса LFR 30/300

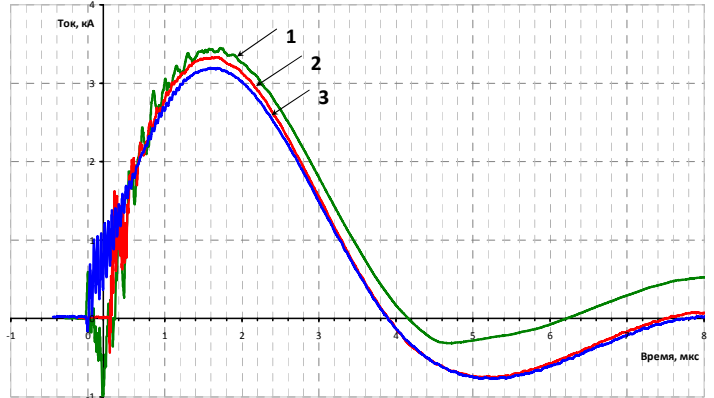


Рис. 9. Осциллограммы тока, зарегистрированные на испытательном стенде. 1 – эталонный пояс Pearson 5046; 2 – пояса ПР-5 м; 3 – пояс ПР-56

После проведения эксперимента амплитудные и временные характеристики зарядного напряжения и разрядных токов автоматически заносятся в базу данных, сгенерированную в рамках подсистемы отчетности СТД с целью проведения анализа и прогнозирующего диагностирования работоспособности накопителя электрической энергии.

Заключение

В докладе приведены результаты исследования и разработки системы технической диагностики, предназначенной для регистрации параметров заряда и разряда модулей СНКЭЭ.

Практические результаты, полученные в результате испытаний модулей на стендах ИЛФИ, подтверждают, что СТД работает корректно, обладает необходимой информативностью и заявленной точностью измерения, обеспечивает сохранение результирующих данных.

Данные СТД позволили разработать методы обнаружения отказов и деградации (изменения параметров) высоковольтных элементов модулей, в том числе: пробой изоляции кабеля в зарядном контуре, ламповом контуре, на входе в передающую линию до токоформирующего индуктора; несрабатывания генераторов запуска коммутаторов; задержки срабатывания и несрабатывания ламп накачки.

Список литературы

1. Ганин Л. С., Галахов И. В., Осин В. А., Сенник Д. А. и др. Модуль емкостного накопителя с запасенной энергией 900 кДж на базе реверсивно включаемых динисторов для питания ламп накачки мощного неодимого лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» по теме «Проблемы физики высоких плотностей энергии». Саров, 2016. С. 55–62.
2. Галахов И. В., Осин В. А., Сенник Д. А., Чистопольский М. В и др. Автоматизированная система электропитания, управления и диагностики модуля емкостного накопителя энергии мощного неодимого лазера // Сборник докладов международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения» по теме «Проблемы физики высоких плотностей энергии». Саров, 2016. Т. 2. С. 42–49.
3. Система ввода-вывода Fastwel I/O CPM713. Контроллер узла сети MODBUS TCP. Руководство по конфигурированию и программированию сетевых средств. © 2005-2013 Fastwel Co Ltd.
4. Цивилёв А. М., Дорохин С. А., Смехов Д. Г. Базовый модуль ЦОС ADP101E1. Техническое описание и руководство по эксплуатации. ЗАО «Инструментальные Системы». Москва, 2012.