

# ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАРЯДА, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В НАКОПИТЕЛЕ ЭНЕРГИИ НЕОДИМОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

## PROTECTION OF CONTROL, CHARGE AND DIAGNOSTICS EQUIPMENT FROM ELECTROMAGNETIC NOISE IN THE POWER CAPACITOR BANK OF Nd-GLASS LASER

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

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

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

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

В докладе описывается проблема электромагнитной совместимости автоматизированной системы заряда, управления и диагностики с энергетической частью накопителя электрической энергии лазерной установки. Обоснованы методы защиты и реализованные инженерные решения, проверенные в ходе проведения испытаний системы накопления.

### Введение

Высоковольтные электрофизические установки создают в окружающем пространстве электромагнитные поля, которые индуцируют импульсные токи и напряжения в близко расположенных объектах. Это является одной из серьезных технических проблем таких установок, которую принято называть проблемой электромагнитной совместимости (ЭМС) систем, выполняющих функции управления, контроля состояния и диагностики с энергетической частью накопителя энергии. Непринятие мер по защите оборудования от воздействия электромагнитных полей неизбежно приведет к отказам оборудования и, как следствие, неоправданному росту экономических и технических издержек, связанных с ремонтом или заменой комплектующих.

### Механизмы возникновения и методы борьбы с помехами в системе накопления энергии

Система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) лазерной установки состоит из 432 модулей СНКЭЭ с запасаемой энергией до 860 кДж каждый [1] при зарядном напряжении

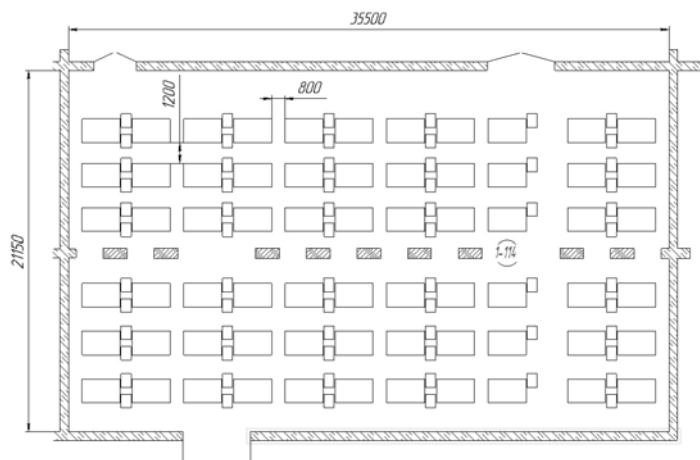
до 24 кВ. Модуль СНКЭЭ состоит из двух устройств (рис. 1, а) – высоковольтного блока (ВБ) и стойки электропитания, управления и диагностики (СЭУД). Размещение модулей запланировано в восьми помещениях накопителя (4 помещения с 66 модулями и 4 помещения с 42 модулями) с достаточно плотной компоновкой в помещении (рис. 1, б), предусматривающей проходы между модулями не более 1,2 м.

Электронная аппаратура СЭУД, управляющие и информационные цепи располагаются в непосредственной близости к силовому электрооборудованию ВБ. Импульсные напряжения, возникающие при разряде ВБ на нагрузку, на 3–4 порядка превышают напряжения диагностических и управляющих сигналов СЭУД. Указанные факторы определяют актуальность решения задачи по обеспечению помехоустойчивости и надежной работы автоматизированной системы управления СНКЭЭ в условиях мощных импульсных электромагнитных полей, а также в случае возникновения различного рода аварийных и нештатных ситуаций.

Цифровые узлы, схемы и современные промышленные контроллеры, используемые в СЭУД [2], имеют высокую скорость ввода-вывода данных и обладают высокой чувствительностью



а



б

Рис. 1. Модуль ШКЭЭ, состоящий из высоковольтного блока (ВБ) и стойки электропитания, управления и диагностики (СЭУД) (а); план размещения модулей ШКЭЭ в помещении накопителя энергии (б)

цепей ввода и вывода информации. Помехи, возникающие как в каналах связи, так и во внутренних цепях устройств и цепях сопряжения с датчиками и приемниками информации, могут приводить к изменению показаний отображающих индикаторов, зависанию контроллеров и процессоров, формированию и выполнению ложных команд, что негативно сказывается на достоверности управляющей, диагностической и измерительной информации.

Основными электромагнитными помехами, возникающими при работе накопителя энергии, являются:

1. Импульсные помехи, возникающие при высокочастотных переходных процессах на стадии развития разряда в импульсных лампах – нагрузке высоковольтного блока. Они проявляются в виде выбросов напряжения в сети электропитания, в разрядном контуре – при этом выброс в 1,5–2 раза превышает зарядное напряжение (рис. 2, а),

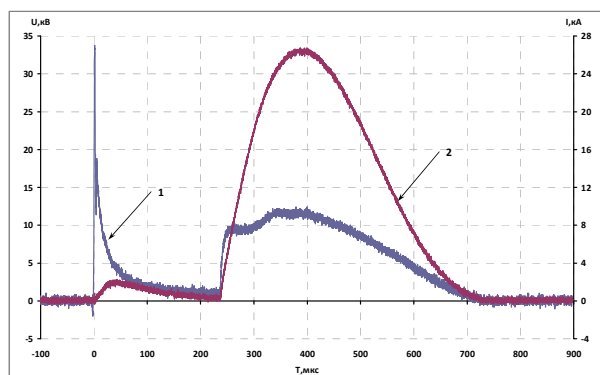
а также между контурами заземления ВБ и СЭУД (рис. 2, б).

2. Высокочастотные колебательные затухающие токи аномально высокой амплитуды и затухающее колебательное магнитное поле, возникающие в разрядных контурах модуля в аварийных ситуациях: при пробоях нагрузочных кабелей, коротких замыканиях, разрушениях ламп накачки (рис. 3).

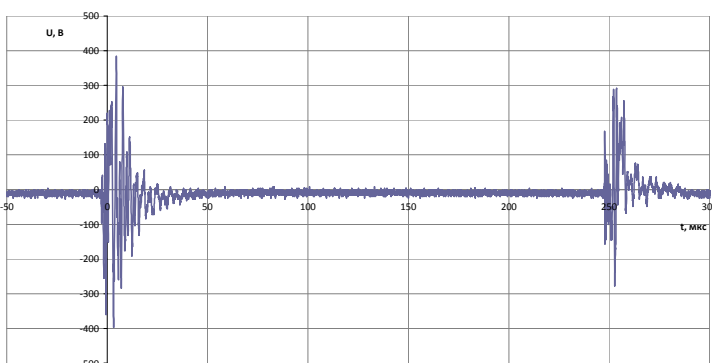
3. Помехи в виде вихревых токов в проводниках, а также емкостных токов, воздействующих на кабели, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры.

Методы борьбы с помехами разделяются на пять основных групп [3]:

- рациональное размещение генерирующего помехи оборудования и связанного с этим оборудованием различных «слаботочных» систем;
- подавление помех в местах их возникновения (активные меры помехоподавления);



а



б

Рис. 2. Импульс напряжения на лампах 1 и ток в ламповом контуре 2 (а); импульсы напряжения между земляными контурами ВБ и СЭУД при срабатывании коммутаторов предионизации и основного (б)

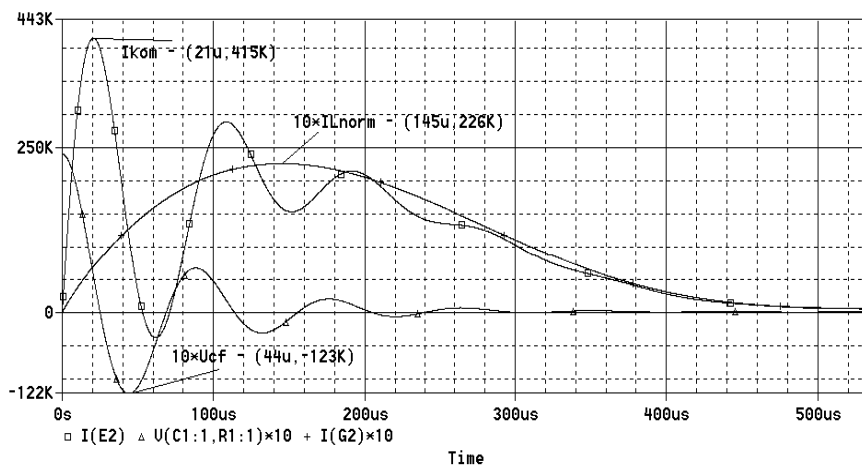


Рис. 3. Расчетные зависимости: тока через коммутатор  $I_{ком}$ , тока  $I_{Lnorm}$  в исправном разрядном контуре, напряжения на конденсаторе аварийного контура  $U_C$  при пробое на входе в передающую линию до токоформирующего индуктора

- ослабление и защита от проникновения электромагнитных полей в чувствительные к ним цепи (экранирование);
- выполнение нескольких контуров заземления;
- повышение помехоустойчивости сигнальных и управляющих цепей, измерительного электронного оборудования путем использования разделения характеристик полезных сигналов и паразитных помех (локальная помехоустойчивость).

Получить требуемое ослабление паразитных сигналов можно только комплексным использованием одновременно нескольких мер для подавления всех видов электромагнитных связей.

### Система заземления

Для СНКЭЭ разработана отдельная, двухмагистральная система заземления модулей, имеющая одну «общую точку» – главную заземляющую шину здания установки. Магистраль технологического заземления – «силовая земля» – предназначена для заземления высоковольтных компонентов модуля: каркаса ВБ, силовых элементов разрядных контуров, коммутаторов «силовых» цепей генераторов запуска коммутаторов и низкопотенциального вывода зарядного устройства. Контур «силовой земли» выполнен в виде арматурной сетки фундаментной плиты (рис. 4), имеющей размер ячейки  $\sim 250 \times 250$  мм и соединенной с глубинными заземлителями, установленными по периметру помещения. Контур соединяется с наружным контуром заземления здания. Магистраль системного заземления – «радиотехническая земля» – предназначена для заземления низковольтных компонен-

тов: блоков управления генераторами запуска коммутаторов, устройствами размагничивания токоограничивающих дросселей; высоковольтных делителей напряжения и общих шин устройств диагностики и управления, размещенных в СЭУД. Между высоковольтными компонентами «силовой земли» и низковольтными компонентами «радиотехнической земли» отсутствуют гальванические связи.



Рис. 4. Плотность арматурной сетки контура заземления в фундаментной плите

### Активные меры помехоподавления (экранирование)

Основным источником помех в модулях СНКЭЭ являются разрядные контура. Наиболее эффективным способом ограничения выхода энергии за пределы разрядных контуров является экранирование.

Корпус каждого модуля выполнен в виде каркаса, изготовленного из стального оцинкованного профиля замкнутого сечения, закрытого со всех сторон стальными, сплошными и перфорированными панелями (рис. 5). Конденсаторы соединены с коммутатором и с нагрузкой коаксиальными кабелями. Таким образом, энергия, передаваемая от конденсаторов к нагрузке, локализована и минимально влияет на работу остальных ВБ и стоек, расположенных в одном помещении.

Экранирование устройств СЭУД выполнено посредством размещения электронного оборудования в металлических приборных корпусах, представляющих собой фактически закрытые суб-блоки, имеющие надежные электрические контакты между панелями и щели минимального размера. Блоки, в свою очередь, установлены в шкаф Schroff Varistar, обладающий повышенной системой электромагнитной защиты. Особенностью такого шкафа является применение специального оцинкованного каркаса, наличие контактных лепестков на внешних панелях выполненной путем создания вокруг размещенного в шкафу оборудования замкнутого проводящего контура (клетки Фарадея). Ввод кабельных трасс в СЭУД выполнен с использованием экранированных кабельных сальников, установленных на верхней панели и цоколе шкафа. Описанный способ сплошного экранирования обеспечивают защиту блоков СЭУД на уровне 75÷77 дБ в диапазоне частот от 30 до 600 ГГц.

### Пассивные меры помехоподавления

Пассивные меры позволяют минимизировать проникновение сигналов помехи в линии электропитания и коммуникаций.

В отличие от централизованной системы взаимосвязанного распределения кабельных линий накопителя энергии установки «Искра-5», все виды сигналов управления, контроля и диагностики модулей СНКЭЭ независимы и разделены на четыре группы:

- сигналы высокого уровня – высоковольтные сигналы (постоянного и импульсного напряжения выше 1 кВ);

- сигналы среднего уровня – управляющие, релейно-коммутируемые сигналы 220 В, 50 Гц и сигналы контроля состояния оборудования напряжением 24 В постоянного тока;

- сигналы низкого уровня – информационные сигналы (5 В постоянного тока, сформированные делителями напряжения и датчиками тока);

- оптические сигналы, предназначенные для: коммуникации между местным пультом управления (МПУ) СНКЭЭ и СЭУД, запуска ГЗКП и ГЗОК.

Импульсные сигналы высокого уровня от накопительных конденсаторов к нагрузке транспортируются по коаксиальным кабелям сечением 50 мм<sup>2</sup>, проложенным в металлических коробах, которые заземлены на магистраль «силового» заземления. Остальные три группы сигналов транспортируются по кабелям, проложенным внутри каркаса ВБ в пластиковых коробах, что является дополнительным изолятором между проводниками кабелей и «силовой» землей. Сигналы среднего уровня транспортируются по экранированным кабелям типа «витая пара», сигналы низкого уровня – по коаксиальным кабелям, оптические сигналы запуска генераторов – по многомодовым волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), оптические сигналы обмена информацией между МПУ СНКЭЭ и СЭУД – по одномодовым ВОЛС.



Рис. 5. Внешний вид защитных панелей каркаса ВБ

## Локальная помехоустойчивость

Обеспечение локальной помехоустойчивости состоит из схемотехнических мероприятий, подавляющих паразитные сигналы, как между блоками СЭУД, так и внутри блоков - между функциональными узлами вплоть до печатных плат. В зависимости от конкретных особенностей блоков основными способами являются трансформаторные и оптронные гальванические развязки, электрические фильтры.

В измерительных линиях высоковольтных делителей напряжения для ограничения перенапряжений применяются многоступенчатые ограничители (модули защиты от импульсных перенапряжений), построенные с применением разрядников, варисторов и ограничительных диодов. Для защиты дискретных входов технологического контроллера используются промышленные модули гальванической развязки.

Электропитание основных устройств СЭУД осуществляется от источника бесперебойного питания (ИБП), переключающегося в режим автономной работы от аккумуляторной батареи в процессах подготовки и проведения заряда и разряда накопителей модуля, что на стадии заряда и разряда изолирует указанные устройства от внешних цепей питания.

## Помехозащищенность в процессе разряда

После проведения заряда накопительных конденсаторов модуля до рабочего напряжения конденсаторы отключаются от зарядной линии посредством высоковольтного реле, обеспечивающего защиту зарядного устройства от возможного импульсного напряжения.

Энергия модуля транспортируется к нагрузке по коаксиальным кабелям, причем в каждом разрядном контуре заземляется только одна точка – оплетка кабеля (рис. 6).

Для диагностики разряда модуля СНКЭЭ выполняется регистрация полной формы разрядных токов, проходящих через ключевые элементы ВБ – основной коммутатор, коммутатор предионизации, лампы накачки, генераторы запуска коммутаторов (основного и предионизации), для чего измеряется форма аналоговых сигналов с 14 датчиков тока в диапазоне длительностей до 2000 мкс с погрешностью регистрации не более 5 %.



Рис. 6. Стойка основного коммутатора. Место заземления нагрузочных кабелей разрядных контуров ВБ модуля

Помехоустойчивость системы диагностики разряда СНКЭЭ реализована с помощью следующих технических мер:

- отсутствие гальванической связи датчиков тока с высоковольтными цепями и установка их в обратных токопроводах разрядных контуров;
- расположение измерительных кабелей в коробах, изолированных от высоковольтных цепей;
- включение входных линий АЦП модулей ЦОС по дифференциальной схеме, исключающей заземление;
- осуществление электропитания модулей ЦОС на этапах заряда-разряда от аккумуляторной батареи ИБП, исключающей соединение с внешней питающей сетью;
- применение оптоволоконной развязки пусковой цепи комплекса диагностики и оптоволоконных линий для передачи информации на верхний уровень управления.

## Выводы

Электромагнитная совместимость модулей СНКЭЭ, каждый из которых запасает энергию до 860 кДж при зарядном напряжении 24 кВ и имеет суммарный ток разряда до 250 кА, с автоматизи-

рованной системой заряда, управления и диагностики достигается реализацией следующих мероприятий:

– локализация электромагнитной энергии в пределах разрядных контуров ВБ за счет передачи энергии по коаксиальным кабелям, экранирования каркаса ВБ и блоков СЭУД, введения нескольких независимых контуров заземления (активные меры помехоподавления).

– минимизация проникновения сигналов помехи в линии связи между ВБ и СЭУД и через них на входы блоков системы управления и диагностики (пассивные меры помехоподавления);

– повышение устойчивости аппаратуры СЭУД к воздействию сигналов помехи (локальная помехоустойчивость).

Результаты, полученные при проведении исследований и эксплуатации модулей накопителя в составе испытательных стендов, показали эффективность комплексного использования разработанных защитных мер, обеспечивших надежную работу СНКЭЭ.

## 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. Уильямс Т., Армстронг К. «ЭМС для систем и установок». – М.: Издательский дом «Техноло-гии», 2004.