

# МОДУЛЬ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ С ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ 900 КДЖ НА БАЗЕ РЕВЕРСИВНО ВКЛЮЧАЕМЫХ ДИНИСТОРОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЛАМП НАКАЧКИ МОЩНОГО НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

*Л. С. Ганин, А. Г. Арзев, Е. А. Беспалов, И. А. Бродский, И. В. Галахов,  
Е. В. Кожженков, А. В. Креков, В. И. Лесков, С. Л. Логутенко, В. А. Осин,  
В. В. Свиридов, Д. А. Сенник, М. В. Чистопольский*

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

## Введение

В настоящее время в России создаётся неодимовая лазерная установка нового поколения [1]. Система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ) является одной из основных составных частей данной установки и представляет собой емкостной накопитель энергии. В СНКЭЭ на этапе заряда идет относительно медленное накопление электрической энергии, поступающей от питающей электрической сети. Затем, по управляющей команде, производится быстрая коммутация накопителя и передача с минимальными потерями накопленной в нем электрической энергии в импульсные ксеноновые лампы накачки силовых усилителей (СУ). При разработке конструкции емкостного накопителя создаваемой лазерной установки нового поколения использован принцип разбиения на модули. Таким образом, в состав емкостного накопителя будет входить 432 модуля. Каждый модуль унифицирован и имеет в качестве нагрузки 20 ламп, установленных в три ламповых кассеты, которые накачивают восемь активных элементов секции силового усилителя. Таким образом, каждый модуль СНКЭЭ соответствует одной секции усилителя. Такая структура обеспечивает наибольшую гибкость при проведении различных экспериментов, а также профилактических и регламентных работ.

### 1. Описание и обоснование выбранной конструкции модуля системы накопления и коммутации электрической энергии

В состав модуля СНКЭЭ входят:

- высоковольтный блок (ВБ);
- стойка электропитания, управления и диагностики (СЭУД);

- нагрузка (лампы или резистивный эквивалент ламповой нагрузки).

Питание модуля осуществляется от промышленной сети напряжением ~380 В. Зарядное устройство ЗУ25, которое находится в стойке СЭУД, в соответствии с определенной программой, задаваемой блоком контроллеров системы автоматического управления (также находится в стойке СЭУД) заряжает до выбранного напряжения (максимально 24 кВ) конденсаторы высоковольтного блока. До прихода команды «пуск» на основной коммутатор конденсаторы сохраняют накопленную энергию. Сигнал запуска основного коммутатора и коммутатора предыонизации приходит по оптоволоконным линиям от стойки СЭУД, после чего по кабельным линиям происходит передача энергии от модулей СНКЭЭ к секциям СУ. При этом также происходит обмен сигналами управления и диагностики между местным пультом управления и стойкой СЭУД.

Таким образом, модуль СНКЭЭ представляет собой функционально законченное устройство со своей системой заряда, синхронизации, управления и диагностики. Такая структура емкостного накопителя лазерной установки нового поколения аналогична структуре емкостного накопителя установки NIF [2], и несколько отличается от структуры емкостных накопителей установок «Искра-5» [3] и «Луч» [4], у модулей которых имеется развитая сеть внешних связей по зарядным цепям, синхронизации, управления и диагностики. Отсутствие таких связей позволяет значительно снизить затраты на кабельные линии и повышает общую помехозащищенность системы. Кроме того, исполнение модулей ЕНЭ в виде функционально законченных блоков облегчает проведение наладочных работ, а также их эксплуатацию.

## 2. Основные параметры модуля СНКЭЭ

Основные параметры опытного образца модуля СНКЭЭ лазерной установки нового поколения:

1. Максимальное рабочее напряжение емкостного накопителя – 24 кВ.
2. Максимальная запасаемая энергия накопителя – 900 кДж.
3. Максимальная амплитуда тока через основной коммутатор – 250 кА.
4. Заряд, переносимый через основной коммутатор – 70 Кл.
5. Длительность импульса разрядного тока (на уровне 10 % от максимальной амплитуды) ~500 мкс.
6. Количество разрядных контуров – 10.
7. Максимальная амплитуда знакопеременного импульса тока через коммутатор предыонизации – 50 кА.
8. Время заряда накопителя ~ 60 с.
9. Частота срабатываний – 1 срабатывание в 10 минут.
10. Срок службы – не менее 10000 срабатываний.

## 3. Принципиальная электрическая схема модуля СНКЭЭ

При разработке принципиальной электрической схемы модуля были проанализированы схемы модулей КБ известных мощных неодимовых

лазерных установок «Луч» (Россия), «Beamlet» и «NIF» (США), «L.I.L.» и «LMJ» (Франция) [4–8]. Для будущей установки была выбрана схема основного разрядного контура, где основной коммутатор размещен между высоковольтными выводами конденсаторов точкой заземления, по аналогии с установками «Луч», «Beamlet», «L.I.L.» и «LMJ». Очевидным достоинством этой схемы является тот факт, что разрядные контуры каждой ламповой цепи фактически независимы друг от друга и при каком-либо отказе в одном контуре разряд в остальных происходит штатным образом.

В отличие от модуля накопителя установки «Луч», модуль КБ лазерной установки нового поколения содержит контур предыонизации, включенный аналогично схемам установок «L.I.L.» и «LMJ». В этой схеме для основного разрядного контура и контура предыонизации используется одно зарядное устройство. Разработанная принципиальная схема позволяет осуществлять два режима работы модуля: основной режим с предыонизацией и тестовый режим, при котором работает только контур предыонизации, позволяя осуществлять проверку работоспособности ламп между срабатываниями импульсом тока с малой энергией (около 1 % от энергии рабочего импульса). Это обеспечивается двумя высоковольтными переключателями К2 и К3. Высоковольтный переключатель К1 подключает и отключает зарядное устройство к зарядной линии. Принципиальная электрическая схема модуля ЕНЭ показана на рис. 1.

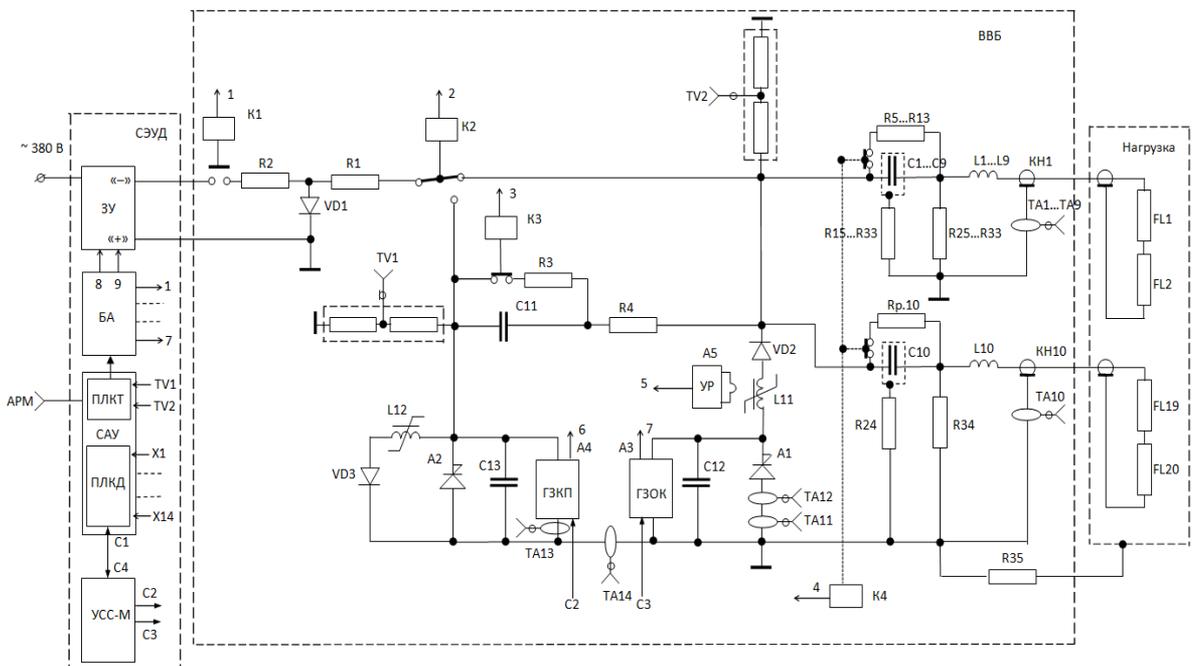


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема модуля СНКЭЭ

На схеме обозначены:

$C1 \div C10$  – импульсные конденсаторы основного разрядного контура;

A1 – основной коммутатор типа КРД25-250;

L11, L12 – насыщающийся дроссель;

VD1  $\div$  VD3 – диоды;

C11 – конденсатор предыонизации;

A2 – коммутатор предыонизации типа КПИ25-50;

L1  $\div$  L10 – токоформирующие индуктивности;

FL1  $\div$  FL20 – импульсные лампы

КН1  $\div$  КН10 – высоковольтные кабели КВИ-300;

ГЗОК – генератор запуска основного коммутатора;

ГЗКП – генератор запуска коммутатора предыонизации;

R25  $\div$  R34 – зарядные резисторы;

Rp1  $\div$  Rp10 – разрядные резисторы;

R3 – разрядный резистор;

R15  $\div$  R24 – дополнительные резисторы;

R4 – сопротивление согласующее;

R1, R2 – резисторы;

ЗУ – зарядное устройство;

K1  $\div$  K3 – высоковольтные переключатели;

K4 – высоковольтный замыкатель;

БА – блок автоматики;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

ПЛКТ – программируемый логический контроллер технологический;

САУ – система автоматического управления;

ПЛКД – программируемый логический контроллер диагностики;

УСС-М – устройство системы синхронизации – модульное;

УР – устройство размагничивания;

ТА1  $\div$  ТА14 – датчики тока;

TV1, TV2 – делитель напряжения;

КН1  $\div$  КН10 – высоковольтный кабель.

### 3.1. Высоковольтный блок модуля СНКЭЭ

#### 3.1.1. Основной накопитель энергии

Основной накопитель энергии предназначен для накопления электрической энергии, поступающей из питающей сети, с последующей её коммутацией и передачей в нагрузку – импульсные лампы накачки.

В состав накопителя входят:

1. 10 накопительных конденсаторов ( $C1-C10$ ) с рабочим напряжением до 24 кВ и емкостью 290 мкФ.

2. Узел коммутатора основного контура, состоящий из:

- полупроводникового коммутатора (A1) КРД250-25 на базе реверсивно-включаемых динисторов [9,10] на рабочее напряжение до 25 кВ и максимальный коммутируемый ток до 300 кА;

- магнитного дросселя (L11) с насыщающимся сердечником, имеющего время насыщения около 1,5 мкс при рабочем напряжении до 25 кВ;

- защитного диода (VD1) СДК250-25 на рабочий ток до 300 кА и обратное напряжение до 25 кВ.

3. Токоформирующие индуктивности (L1-L10) величиной 30-35 мкГ с омическим сопротивлением не более 5 мОм в количестве 10 штук.

4. Высоковольтные импульсные кабели (КН1-КН10), предназначенные для передачи энергии, накопленной в конденсаторах модуля, к лампам, рассчитаны на рабочее импульсное напряжение до 50 кВ и ток до 30 кА с омическим сопротивлением менее 50 мОм в количестве 10 штук длиной около 30 м.

5. Зарядные керамические резисторы (R25-R34) величиной 1 кОм в количестве 10 штук.

6. Демпфирующие керамические резисторы (Rp1-Rp10) величиной 5 кОм, способные рассеивать энергию около 95 кДж в количестве 10 штук.

7. Дополнительные резисторы (R15-R24) величиной 24 Ом типа ТВО-60, предназначенные для подавления высокочастотных колебаний при перезаряде емкости вывод-корпус накопительных конденсаторов.

8. Высоковольтный многоконтактный замыкатель (K4), предназначенный для подключения/отключения электрических цепей модуля конденсаторной батареи к зарядному устройству, а также для размыкания/замыкания выводов накопительных конденсаторов.

#### 3.1.2. Контур предыонизации

Контур предыонизации включается параллельно основному разрядному контуру и срабатывает примерно за 200–300 мкс до срабатывания разрядника основного контура. При этом на импульсные лампы накачки воздействуют два импульса тока: первый малоэнергетичный импульс тока (импульс предыонизации) предназначен для пробоя ламп и создания в них к моменту прихода второго импульса ксеноновой плазмы, а второй (основной импульс) – для непосредственной передачи в лампы заданной электрической энергии. Использование контура предыонизация ламп увеличивает общую эффективность лазерной установки и стабилизирует пусковые характеристики ламп. Контур предыонизации используется также для проверки (режим «тестирования») ламп в ин-

тервалах между срабатываниями основного разрядного контура.

Основными элементами контура являются:

1. Накопительный конденсатор (С11) емкостью 75 мкФ и рабочим напряжением до 25 кВ.
2. Разрядник (А2) на рабочее напряжение до 25 кВ и коммутируемый ток до 50 кА (полупроводниковый коммутатор типа КПИ).
3. Резистор (Rп) величиной около 1 Ом, обеспечивающий требуемые параметры импульса тока предыонизации и построенный на базе керамических резисторов.
4. Высоковольтные переключатели для переключения модуля в режим «тестирование» (К2) и для обеспечения разряда конденсатора С11 на балластный резистор R11 (К3).

### 3.2. Нагрузка

1. Ламповая нагрузка, представляющая собой 20 импульсных ксеноновых ламп ИНП 43/1800 (лампы с длиной разрядного промежутка 1800 мм и внутренним диаметром колбы 43 мм), располагающихся в 3 каскадах.

2. Резистивная сборка типа SK/1011 – эквивалент ламповой нагрузки, представляющий собой 10 керамических резисторов с сопротивлением около 0,5 Ом.

### 3.3. Стойка электропитания, управления и диагностики

В состав каждого модуля входит стойка электропитания управления и диагностики (СЭУД), в состав которой входит: зарядное устройство, блок автоматики, система автоматического управления, устройство системы синхронизации модульное.

Общий вид опытного образца модуля СНКЭЭ представлен на рис. 2.

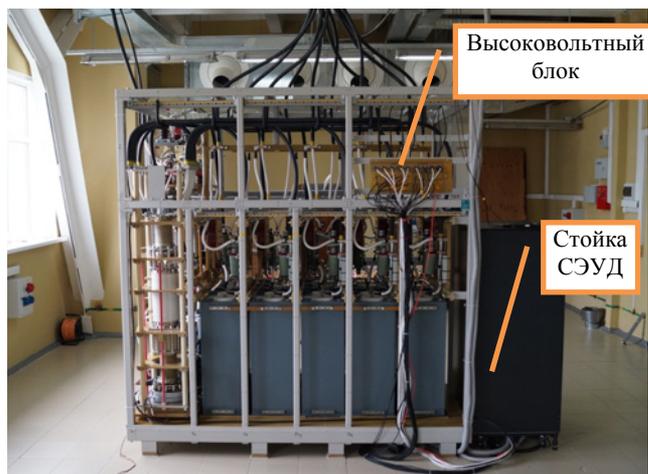


Рис. 2. Общий вид опытного образца модуля СНКЭЭ на испытаниях

Интерфейс программы управления модуля ЕНЭ и системы диагностики СЭУД представлены на рис. 3 и рис. 4.

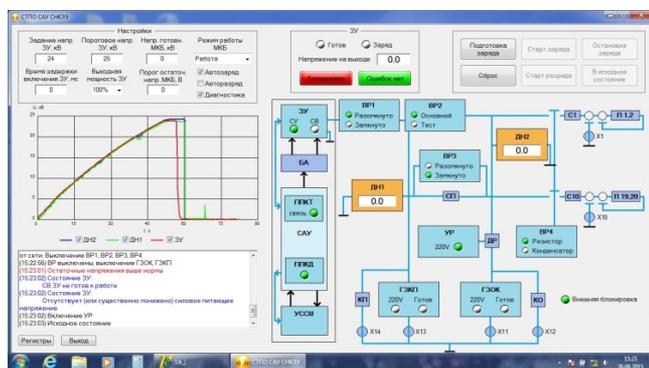


Рис. 3. Интерфейс программы управления СПЮ модуля СНКЭЭ

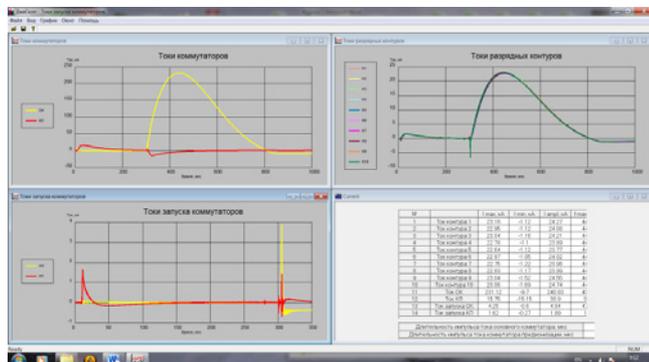


Рис. 4. Интерфейс системы диагностики САУ СЭУД

## 4. Испытания высоковольтного блока модуля ЕНЭ

### 4.1. Испытания в тестовом режиме.

Испытания в тестовом режиме (только предыонизация) проходили при зарядном напряжении 24 кВ. На рисунке 5 представлена характерная осциллограмма импульса тока в одном из десяти разрядных контуров в тестовом режиме. Токи разрядных контуров регистрируются поясами ТА1-ТА10. Форма импульсов токов в каждом из разрядных контуров практически одинакова, амплитуды токов при напряжении 24 кВ составили около 1,75 кА и длительности (на уровне 0,1 от амплитуды) около 220 мкс.

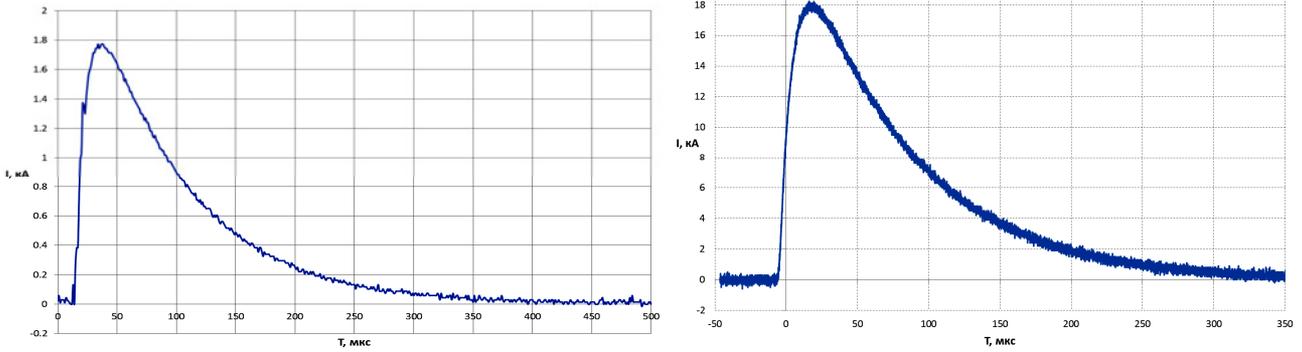


Рис. 5. Характерная осциллограмма импульса тока в разрядном контуре (слева) и через коммутатор предыонизации (справа), в тестовом режиме

На рис. 5 представлена также осциллограмма импульса тока через коммутатор предыонизации, зарегистрированного поясом ТА14 при напряжении 24 кВ. Амплитуда тока коммутатора предыонизации при таком напряжении составила около 17,5 кА, что соответствует сложению токов десяти разрядных контуров, длительность импульса тока (по уровню 0,1 от амплитуды) – около 220 мкс. Форма и длительность импульсов токов разрядных контуров совпадают с током через коммутатор предыонизации.

#### 4.2. Испытания в основном режиме

Испытания в основном режиме проходили при зарядном напряжении 24 кВ. Осциллограммы импульсов токов коммутатора предыонизации и основного коммутатора, зарегистрированных поясами ТА12 и ТА14, показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что при срабатывании коммутатора предыонизации через него начинает течь ток (ток заряда емкости предыонизации). Далее при срабатывании силового коммутатора (отсечка 0 на оси длительности T) через него, помимо

основного разряда, начинает разряжаться конденсатор предыонизации, при этом через коммутатор предыонизации течет ток, обратный по направлению к току предыонизации. Таким образом, коммутатор предыонизации пропускает знакопеременный импульс тока. Амплитуда первой полуволны тока предыонизации составила 18 кА, длительность первой полуволны тока (по уровню 0,1 от амплитуды) около 220 мкс. Амплитуда второй полуволны (ток разряда конденсатора предыонизации через основной коммутатор) составила 17 кА, и длительность второй полуволны (по уровню 0,1 от амплитуды) – около 220 мкс. Ток предыонизации в тестовом режиме, представленный на рис. 5, полностью совпадает с первой полуволной тока предыонизации на рис. 6.

В момент включения основного коммутатора ток разряда конденсатора предыонизации суммируется с основным коммутируемым током. Происходит увеличение скорости нарастания основного тока ( $di/dt$ ). Из рис. 6 видно, что при срабатывании основного коммутатора скорость нарастания тока составляет  $di/dt \approx 10$  кА/мкс, что значительно вы-

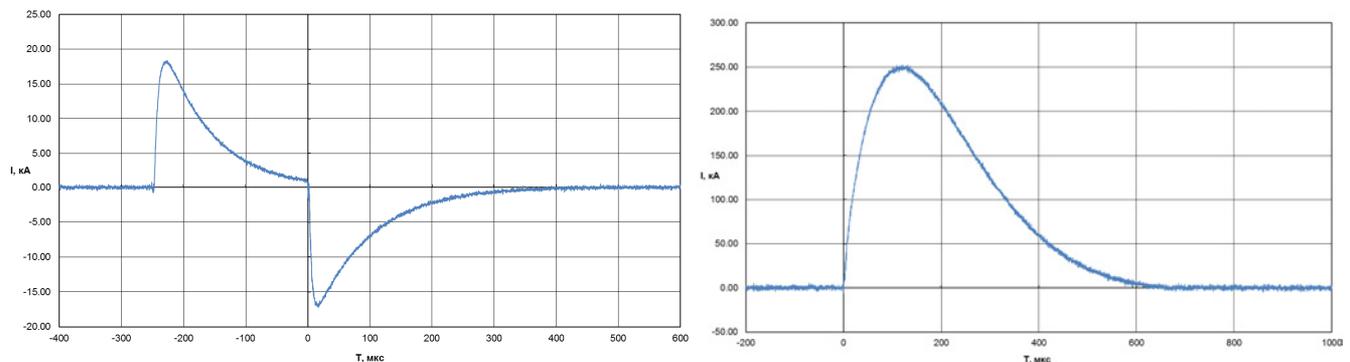


Рис. 6. Осциллограмма импульса тока через коммутатор предыонизации (слева) и через основной коммутатор (справа) в основном режиме

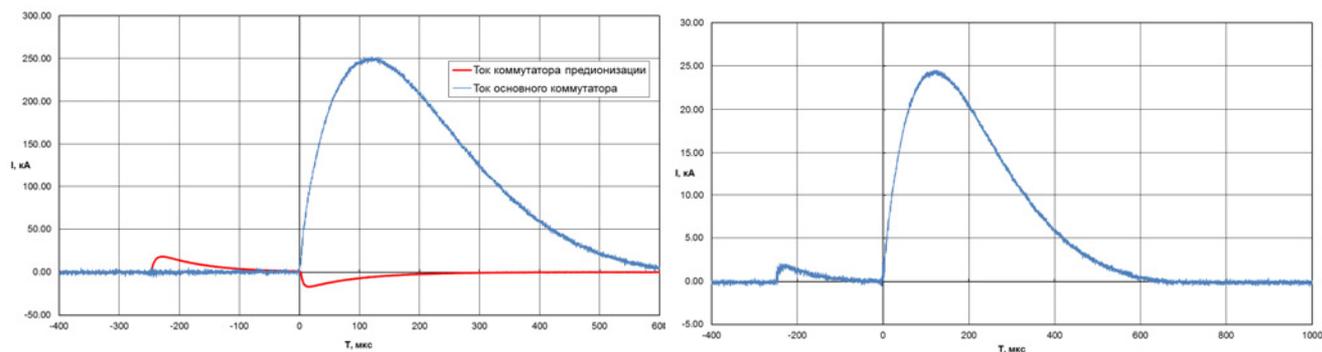


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока через коммутатор предыонизации и основной коммутатор (слева) и импульса тока в одном из разрядных контуров (справа) в основном режиме с предыонизацией

ше, чем скорость дальнейшего нарастания тока  $dl/dt \approx 1$  кА/мкс. Амплитуда и длительность (по уровню 0,1 от амплитуды) импульса тока, протекающего через основной коммутатор, составляют 247–248 кА и 500 мкс соответственно.

На рис. 7 представлена осциллограмма импульсов тока коммутатора предыонизации и основного коммутатора в основном режиме при напряжении 24 кВ. Перед испытанием в программе управления в окне времени задержек включения основного коммутатора по отношению к коммутатору предыонизации было задано значение 250 мкс. Из осциллограммы видно, что время задержки 250 мкс между включениями коммутаторов соответствует заданному значению. На том же рис. 7 представлена осциллограмма импульса тока в одном из разрядных контуров в основном режиме.

Форма импульсов токов в каждом из разрядных контуров практически одинакова. Амплитуды основного тока и тока предыонизации в разрядном контуре при напряжении 24 кВ составили около 24,5 кА и 1,8 кА. При сложении амплитуд токов десяти разрядных контуров получим величины тока предыонизации около 18 кА и основного тока около 245 кА. Форма и длительность импульсов токов разрядных контуров совпадают с первой полуволной тока предыонизации и током основного коммутатора, представленных на рис. 7.

### 4.3. Результаты испытаний

Испытания высоковольтного блока опытного образца модуля ЕНЭ мощной неодимовой лазерной установки проводились в тестовом и основном режиме с предыонизацией при максимальном зарядном напряжении 24 кВ. В ходе выполнения испытаний в качестве нагрузки использовалась резистивная сборка, сопротивление которой эквивалентно сопротивлению 20 импульсных ламп на-

качки. Помимо контроля целостности изоляции и элементов модуля КБ при проведении испытаний измерялось напряжение и время заряда, амплитуда и длительность токов разрядных контуров ламповых цепей, основного коммутатора и коммутатора предыонизации.

На первом этапе испытания проводились в тестовом режиме (только предыонизация) при максимальном зарядном напряжении 24 кВ. В процессе испытаний поясами Роговского регистрировались и измерялись импульсы токов разрядных контуров ламповых цепей и токов, проходящих через коммутатор предыонизации. Форма импульсов токов в каждом из разрядных контуров практически одинакова, амплитуды токов при напряжении 24 кВ составили около 1,75 кА, длительности импульсов тока на уровне 0,1 от амплитуды составляли около 220 мкс. При этом амплитуда тока коммутатора предыонизации при напряжении 24 кВ составила около 17,5 кА, таким образом, показано, что деление тока по всем ветвям модуля происходит равномерно. Форма и длительность импульсов токов разрядных контуров совпадают с формой и длительностью тока через коммутатор предыонизации.

На втором этапе испытания проводились в основном режиме с предыонизацией при максимальном зарядном напряжении 24 кВ. В процессе испытаний поясами Роговского регистрировались и измерялись импульсы токов разрядных контуров ламповых цепей, основного коммутатора и коммутатора предыонизации.

1. Амплитуда первой полуволны тока предыонизации составила 18 кА и длительность (по уровню 0,1 от амплитуды) – около 220 мкс. Амплитуда второй полуволны (ток разряда конденсатора предыонизации через основной коммутатор) составила 17 кА и длительность (по уровню 0,1 от амплитуды) – также около 220 мкс. Как амплитуда, так и

длительность первой полуволны тока предыонизации в основном режиме полностью совпадает с током предыонизации в тестовом режиме.

2. Амплитуда и длительность (по уровню 0,1 от амплитуды) импульса тока, протекающего через основной коммутатор, составляют около 247-248 кА и 500 мкс соответственно. Перед испытанием в программе управления в окне времени задержек включения основного коммутатора по отношению к коммутатору предыонизации было задано значение 250 мкс. Экспериментально показано, что время задержки 250 мкс между включениями коммутаторов соответствует заданному значению.

3. Форма импульсов токов в каждом из разрядных контуров практически одинакова. Амплитуды основного тока и тока предыонизации в разрядном контуре при напряжении 24 кВ составили около 24,5 кА и 1,8 кА. При сложении амплитуд токов десяти разрядных контуров получим величины тока предыонизации около 18 кА и основного тока около 245 кА. Это подтверждает то, что деление тока по всем ветвям модуля происходит равномерно. Форма и длительность импульсов токов разрядных контуров совпадают с первой полуволной тока предыонизации и током основного коммутатора.

На основе полученных данных в результате проведенных испытаний показано, что все элементы модуля СНКЭЭ работают без сбоев в штатном режиме. Токи в контуре предыонизации и в основном разрядном контуре распределяются равномерно по ветвям, что доказывает правильность выбранной электрической схемы модуля.

### Заключение

В данной работе представлены результаты испытаний высоковольтного блока опытного образца модуля СНКЭЭ, проведены регистрация и измерение выходных токовых характеристик модуля, а также обработка полученных данных. Испытания проводились в тестовом и основном режиме высоковольтного блока опытного образца модуля СНКЭЭ при максимальном зарядном напряжении 24 кВ. Помимо контроля целостности изоляции и элементов модуля регистрировались и измерялись напряжение и время заряда, амплитуды и длительности токов разрядных контуров ламповых цепей, основного коммутатора и коммутатора предыонизации.

На основе проведенных испытаний и полученных данных показано, что все элементы модуля

СНКЭЭ работают без сбоев в штатном режиме. Токи в контуре предыонизации и в основном разрядном контуре распределяются равномерно по разрядным контурам ламповых цепей, что доказывает правильность выбранной электрической схемы модуля.

На данный момент выполнено около 1000 включений модуля конденсаторной батареи в тестовом режиме, основном режиме без предыонизации и с предыонизацией. При запланированной интенсивности работы создаваемой неодимовой лазерной установки нового поколения одно срабатывание в сутки это количество включений модуля ЕНЭ соответствует примерно 5 годам эксплуатации лазерной установки.

### 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, 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., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др., «Конденсаторная батарея 25кВ, 5МДж с полупроводниковыми РВД – коммутаторами для питания импульсных ламп неодимового лазера установки «Луч», Сборник докладов международной конференции X Харитоновские чтения «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии», Саров, 11–14 марта, 2008.

5. Larson Douglas W. "Beamlet Pulsed-Power System" // UCRL-LR-105821, 1995.

6. E. S. Fulkerson, M. A. Newton, S. Hulsey, J. Hammon, W. B. S. Moore "NIF Power Conditioning System Testinf at LLNL" // Proceeding of 13<sup>th</sup> IEEE International Conference, Las Vegas, USA, 2001, pp. 1238-1241.

7. Andre M., Berger M., Contant J. et al. "High energy laser system development at Centre d'etudes de Limeile in France" // Proc. Of the IAEA Tech. Comm. Meeting on Driver for ICF at Osaka, Japan, 15-19 April 1991. Edited by D.Banner and S.Nakai, ILE, Osaka University, 1992.

8. Marret J.-P., Rubin-de-Cervens D., Pere P., Pattelli P., Naud J.-C., Esteban D. "Energy Bank of "Laser Megajoule" at CEA" // Presented at 3<sup>rd</sup> International Conference "Solid State Lasers for Applications

to Inertial Confinement Fusion” Monterey, CA, USA, 1998.

9. Горбатьюк А. В., Грехов И. В., Костина Л. С., Коротков С. В Яковчук Н. С. «Мощный переключатель микросекундного диапазона – ре-

версивно-включаемый динистор» // ЖТФ, 1983 г., т. 53, № 9, с.1822-1825.

10. Тучкевич В. М., Грехов И. В. «Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами». // Л.: Наука, 1988.