

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.18>

УДК: 621.373, 621.3.064

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

1-МА, 40-КВ ЛТД СТУПЕНЬ С ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

А.А. Жерлицын¹, Е.В. Кумпяк¹, А.Д. Ленский¹, А.В. Павленко², А.Н. Григорьев²¹ ИСЭ СО РАН 634055, Томск, проспект Академический, 2/3² РФЯЦ-ВНИИТФ 456770, Снежинск, Челябинская область, ул. Васильева, 13, а/я 245

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. В работе представлены конструкция и результаты испытаний мегаамперной ЛТД ступени с зарядным напряжением 40 кВ в изоляции которой не используется трансформаторное масло или газ повышенного давления. Размеры ступени составляют 2,8 м × 2,8 м, длина в осевом направлении 22 см. Емкостной накопитель ступени состоит из 120 конденсаторов (40 кВ, 100 нФ) и 40 многоканальных, многозачерных разрядников. При зарядном напряжении 40 кВ в нем запасается 9,6 кДж энергии. В согласованной нагрузке ~20 мОм ступень генерирует импульс тока амплитудой ~1 МА и фронтом ~200 нс. Данная ЛТД ступень демонстрирует возможность упрощения конструкции и эксплуатации мощных ЛТД генераторов за счет снижения зарядного напряжения и использования сухого воздуха при атмосферном давлении для электрической изоляции как внутри ступеней, так и внутри разрядников.

Ключевые слова: генераторы мощных высоковольтных импульсов, ЛТД генератор, ЛТД ступень, первичный емкостной накопитель энергии, управляемый многозачерный многоканальный разрядник.

Автор для переписки: Жерлицын Андрей Алексеевич, andzh@oit.hcei.tsc.ru

Введение

Интерес к генераторам импульсов тока с амплитудой мегаамперного уровня и субмикросекундным фронтом обусловлен исследованиями в области физики высоких плотностей энергии [1]. При этом для сверхмощных генераторов следующего поколения рассматриваются схемы с прямым выводом энергии из первичного емкостного накопителя в нагрузку без использования промежуточных накопителей. Основными технологиями построения таких генераторов являются “быстрые” генераторы Аркадьева-Маркса [2] и их более мощная разновидность “impedance-matched Marx” [3, 4], а также ЛТД генераторы (от английской аббревиатуры LTD – Linear Transformer Driver) [5, 6]. Последняя предложена в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) и активно развивается в настоящее время, как в России, так и за рубежом.

ЛТД генераторы относятся к импульсным генераторам индукционного типа и представляют собой последовательный ряд идентичных индукторов (ЛТД ступеней), образующих индукционную систему, при этом емкостной накопитель энергии располагается непосредственно внутри индукторов. Емкостные накопители энергии ЛТД ступени состоит из параллельно включенных идентичных ветвей (секций), содержащих конденсаторы, которые заряжаются до напряжения в десятки-сотни киловольт и коммутируются своим управляемым разрядником.

Были созданы ЛТД ступени с максимальным зарядным напряжением 100 кВ и временем вывода энергии порядка 100 нс [7–10]. В секциях таких ступеней используются конденсаторы американского либо китайского производства емкостью 10–100 нФ, предназначенные для режима работы с однократными импульсами. В качестве изоляции секций в емкостных накопителях энергии используется трансформаторное масло [7, 8], воздух [9], элегаз или газовые смеси на его основе [10]. В качестве рабочей среды разрядников секций используется воздух при атмосферном или повышенном давлении.

Отличительной особенностью ЛТД ступени, представленной в данной работе, является использование конденсаторов российского производства с более низким рабочим зарядным напряжением 40 кВ, которые допускают частотный режим работы. В качестве внешней изоляции ступени и рабочей среды разрядников используется осушенный воздух при атмосферном давлении. Использование воздуха атмосферного давления в качестве изоляции позволило выполнить ступень без сплошного герметичного корпуса и реализовать следующие важные преимущества. Во-первых, простоту конструкции, что положительно сказывается на надежности и стоимости, как самой ступени, так и установки на ее основе. Во-вторых, возможность обслуживания элементов ступени без полной разборки, что особенно важно при ее работе в составе модуля. Кроме того, воздух не требует дополнительных резервуаров для хранения, а также в отличие от других газов или смесей не токсичен.

1. Секция первичного емкостного накопителя энергии ступени

Конструкция и фотография секции первичного емкостного накопителя созданной ЛТД ступени приведены на Рис. 1. В секции используются три конденсатора К75-74, 100 нФ, 40 кВ (ЗАО «Элкод», г. Санкт-Петербург). Выводы конденсаторов залиты в корпус из компаунда на основе эпоксидной смолы и кварцевой пыли. В корпусе выполнена полость, в которую помещается разрядник. Выводы конденсаторов соединяются с высоковольтным электродом разрядника и со сборным электродом нагрузки. Габаритные размеры секции – 430 мм × 326 мм × 104 мм, вес секции – 16,5 кг.

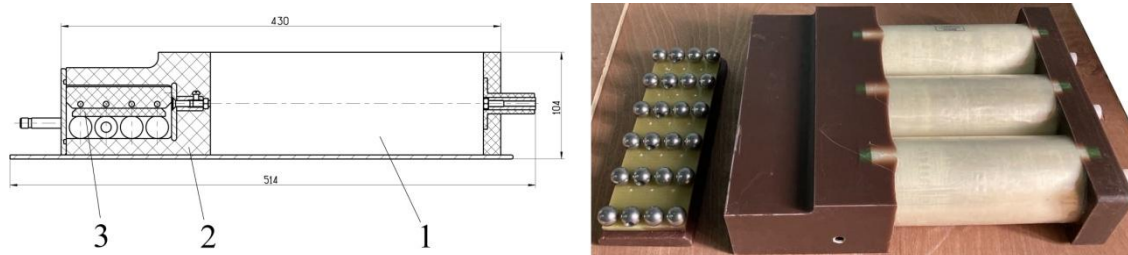


Рис. 1. Секция ЛТД ступени на основе трех конденсаторов 100 нФ, 40 кВ:
1– конденсаторы; 2– корпус секции; 3– разрядник.

Для коммутации конденсаторов используется многозазорный многоканальный управляемый искровой разрядник, работающий в среде воздуха атмосферного давления. Пять зазоров в разряднике образованы между плоским сборным электродом конденсаторов секции, четырьмя рядами сферических электродов диаметром 22 мм и плоским земляным электродом. Длина единичного зазора составляет 3 мм, суммарная длина зазора между сборным электродом конденсаторов и земляным электродом – 15 мм. Сферические электроды размещены в шести рядах, так что возможно формирование до шести параллельных искровых каналов. Равномерное распределение напряжения по электродам разрядника осуществляется резистивными делителями, размещенными в корпусе разрядника. Пусковой импульс подается в каждый из каналов разрядника на электроды второго ряда относительно низковольтного электрода. Развязка основного разрядного контура и пусковой цепи по постоянному напряжению обеспечивается за счет разделительной емкости между пусковым проводником и пусковыми электродами второго ряда.

2. Конструкция ЛТД ступени

Конструкция ЛТД ступени показана на Рис. 2. Емкостной накопитель ступени содержит 40 секций, включенных параллельно. При зарядном напряжении 40 кВ в емкостном накопителе ЛТД ступени запасается 9,6 кДж энергии. Габаритные размеры ступени 2,8 м × 2,8 м, высота в осевом направлении 22 см.

Секции разбиты на четыре идентичных сегмента по 10 секций в каждом. Десять секций одного сегмента размещаются попарно на двух уровнях. Высоковольтные выводы секций первого и второго уровней объединяются через систему кросс-вводов (конволют). Четыре сегмента расположены по сторонам квадратной опорной плиты и закреплены к плите с низковольтной стороны с помощью болтовых соединений. Отсоединив болтовое соединение между основанием сегмента и основанием ступени можно извлечь любой из сегментов для ревизии секций без полной разборки ступени.

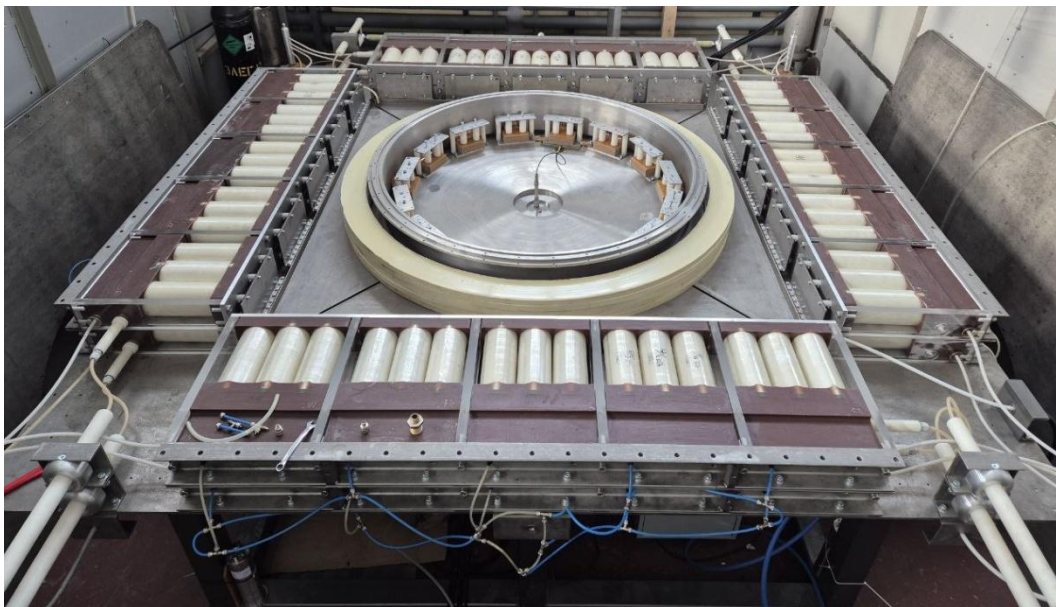


Рис. 2. Фотография ЛТД ступени со снятой верхней плитой.

В центральной части ступени расположен ферромагнитный сердечник, набранный из пяти колец. Кольца сердечника ступени намотаны лентой из электротехнической стали ЭТ-3425 толщиной 0.05 мм и шириной 18 мм. Размеры кольца по стали: $OD \times ID \times h = 1568 \text{ мм} \times 1388 \text{ мм} \times 18 \text{ мм}$, где OD – внешний диаметр, ID – внутренний диаметр, h – высота. Длина средней магнитной линии $\ell_t = 0.5 \cdot \pi \cdot (OD + ID) \approx 4,6 \text{ м}$. Сечение стали в каждом кольце, с учетом коэффициента заполнения $k \approx 0,8$, равно 13 см^2 , что для сердечника из пяти колец дает сечение $S_t \approx 65 \text{ см}^2$. Кольца сердечника монтируются на опорном стальном кольце, к которому крепятся сборные электроды ступени. Стальное кольцо является внешним электродом выходной коаксиальной линии ЛТД ступени.

Сегменты ступени изолированы от опорной плиты изоляторами из оргстекла толщиной 15 мм. Проходной изолятор между объемами ступени и выходной линией также имеет толщину 15 мм. На внешних стенках ступени размещены разъемы для зарядных кабелей, пусковых кабелей, кабеля подмагничивания, а также газовой магистрали, обеспечивающей подачу и сброс сухого воздуха в разрядниках.

3. Схема исследования параметров ЛТД ступени

Программа исследования включала как работу с единичными секциями или сегментом, так и с ЛТД ступенью в целом. Схема исследования характеристик ступени приведена на Рис. 3.

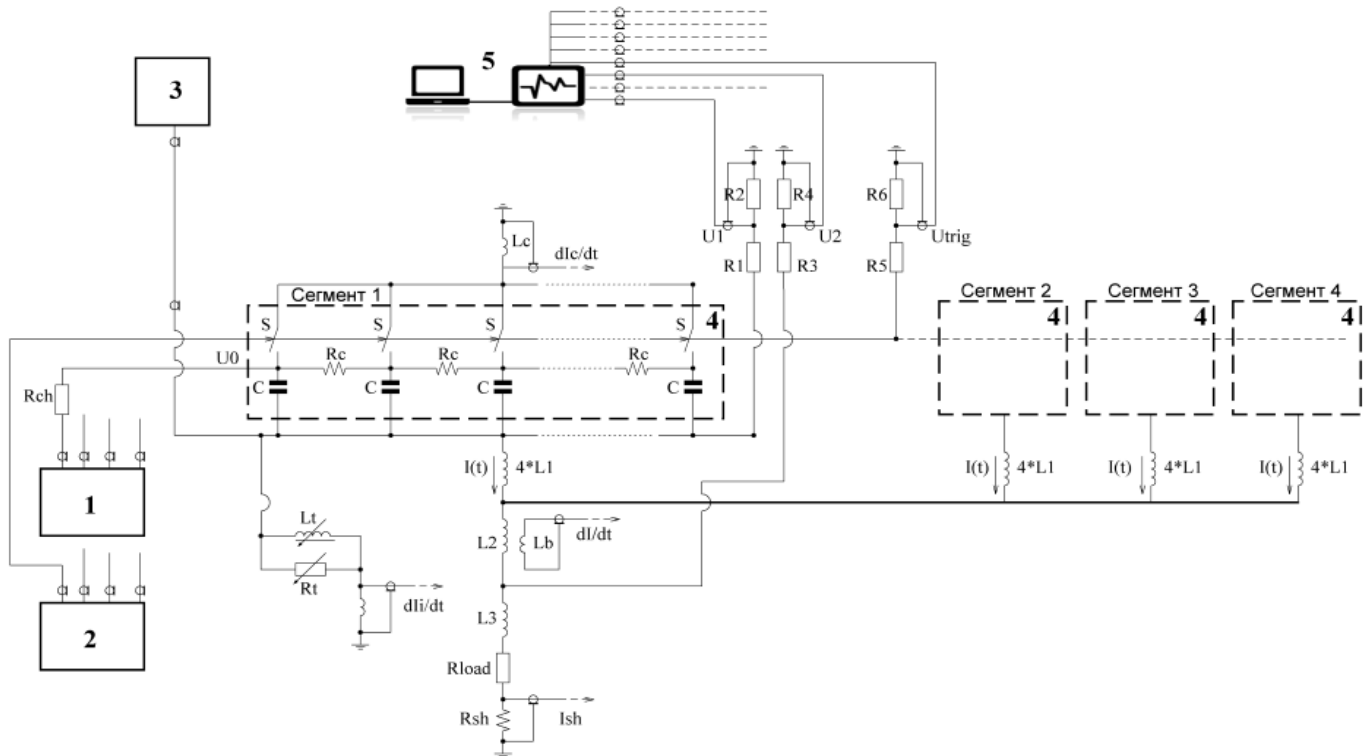


Рис. 3. Схема исследования ЛТД ступени: 1 – высоковольтный источник питания; 2 – генератор запускающих импульсов; 3 – генератор подмагничивания; 4 – сегмент; 5 – осциллограф; R_{ch} и R_c – зарядные резисторы; L_1 – индуктивность сборного электрода; L_2 , L_3 и R_{load} – индуктивность и сопротивление нагрузки; L_t , R_t – индуктивность и сопротивление, замещающие индуктор ступени с ферромагнитным сердечником. Система регистрации: резистивный делитель R_1 – R_2 для измерения напряжения на выходе сегментов U_1 ; резистивный делитель R_3 – R_4 для измерения напряжения на нагрузке U_2 ; резистивный делитель R_5 – R_6 для измерения пускового импульса напряжения U_{trig} ; индуктивный шунт L_c для измерения производной тока dI_c/dt в одном из сегментов ступени и последующего восстановления из регистрируемого сигнала тока сегмента и расчета тока четырех сегментов I_c (ток емкостного накопителя ступени); индуктивный датчик L_b для измерения производной тока dI/dt в нагрузке ступени; резистивный шунт R_{sh} для измерения тока в нагрузке ступени I_{load} ; индуктивный шунт для измерения производной тока dI_i/dt в индукторе ступени и последующего восстановления тока индуктора I_i из регистрируемого сигнала.

Секции заряжаются напряжением положительной полярности U_0 от высоковольтного источника питания постоянного тока. Для запуска разрядников секций на управляющие электроды разрядников всех секций подается от пускового генератора импульс напряжения отрицательной полярности со средней скоростью нарастания около 1 кВ/нс.

В исследованиях ступени использовалась активная схема размагничивания сердечника, когда ступень запускается в момент времени достижения током размагничивания амплитудного значения. Импульс тока размагничивания подавался на сборный электрод ступени. Амплитуда тока размагничивания I_p составляла около 3 кА, соответственно, реализовывалась максимальная напряженность магнитного поля размагничивания $I_p/\ell_t = 0,6$ кА/м. Напряженность 0,6 кА/м соответствует индукции $B \approx 1.7$ Тл на кривой намагничивания стали ЭТ3425. Положим, что индукция насыщения электротехнической стали B_s около 1.8 Тл. Тогда при перемагничивании сердечника основным импульсом ступени перепад индукции составит $\Delta B \approx 3.5$ Тл. Для сердечника из пяти колец оценочное значение вольт-секундного интеграла сердечника, соответствующее полному перемагничиванию, составляет $VS = \Delta B \times S_t \sim 20$ мВ·с.

Система регистрации включала резистивные делители напряжения, индуктивные и резистивные токовые шунты. Расположение датчиков показано на схеме Рис. 3. Для регистрации сигналов использовались цифровые осциллографы Tektronix с полосой регистрации 500 МГц.

4. Результаты испытаний

4.1. Параметры секции

В испытаниях секции получены ее эквивалентные электрические параметры и параметры выходного импульса, данные по ресурсу и стабильности срабатывания секции.

Эквивалентные электрические параметры одной секции и сборки из двух секций, соединенных параллельно через конволюту, определены в опыте

короткого замыкания. Емкость секций C_B измерена прибором Е7-23М (измеритель иммитанса). Эквивалентные индуктивность L_B и сопротивление R_B определены из осциллограммы тока короткого замыкания (Рис. 4) в соответствии с выражениями:

$$L_B = \frac{T^2}{C_B \left(4\pi^2 + \ln^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right)}, \quad (1)$$

$$R_B = \frac{2L_B}{T} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right), \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – два максимума на осциллограмме, сдвинутых на период T . Расчет производился по нескольким периодам. Полученные параметры обобщены в Таблице 1.

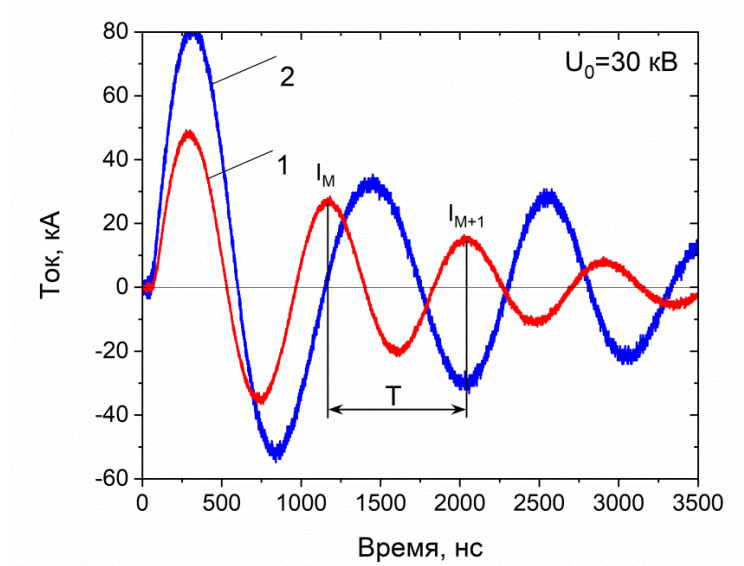


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы тока короткого замыкания одной секции (кривая 1) и двух секций, соединенных параллельно через конволюту (кривая 2), при зарядном напряжении $U_0 = 30$ кВ.

Таблица 1. Эквивалентные емкость C_B , индуктивность L_B , сопротивление R_B единичной секции и сборки из двух параллельных секций, а также их волновое сопротивление $\rho = \sqrt{\frac{L_B}{C_B}}$ и временная постоянная разряда $\tau = \sqrt{L_B C_B}$.

	C_B , нФ	L_B , нГн	R_B , Ом	ρ , Ом	τ , нс
Одна секция	316	54	0.030	0.41	131
Две секции и конволюта	625	42	0.015	0.26	162

Временная постоянная разряда единичной секции составляет около 130 нс. При включении двух секций параллельно волновое сопротивление разрядного контура снижается менее чем вдвое, а временная постоянная разряда возрастает до ~160 нс из-за появления добавочной индуктивности конволюты.

Параметры выходных импульсов секции получены при разряде на резистивную нагрузку, изготовленную из параллельно соединенных резисторов ТВО-10, 27 Ом. Сопротивление нагрузки варьировалось за счет изменения количества параллельных резисторов. «Согласованный» режим разряда секции, т.е. режим с максимальной мощностью вывода энергии из емкостного накопителя энергии, реализуется при сопротивлении нагрузки $R_{load} \approx 0,6$ Ом (Рис. 5). В этом режиме при зарядном напряжении 35 кВ секция обеспечивает импульс тока разряда амплитудой 30 кА с фронтом импульса по уровню (0,1–0,9) от амплитудного значения около 125 нс. В нагрузку выводится энергия за время ~300 нс с пиковой мощностью ~0,5 ГВт.

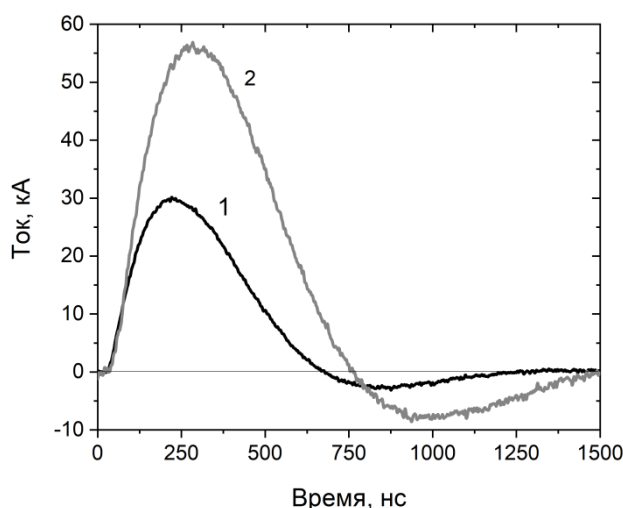


Рис. 5. Ток разряда при зарядном напряжении 35 кВ: 1 – единичная секция, нагрузка 0,6 Ом; 2 – сборка из двух секций, нагрузка 0,3 Ом.

В случае включения двух секций параллельно через конволюту максимальная выходная мощность реализуется при сопротивлении нагрузки $R_{load} \approx 0,3$ Ом. В «согласованной» нагрузке амплитуда тока разряда составляет 56 кА. Фронт импульса по уровню (0,1–0,9) от амплитудного значения увеличивается со 125 до 150 нс в сравнении с единичной секцией.

В исследованиях многоканальной коммутации разрядника секции получено, что при средней скорости нарастания пускового напряжения $\geq 0,5$ кВ/нс одновременно зажигаются все шесть каналов с вероятностью более 50 % [11].

4.2. Стабильности запуска разрядника и ресурс секции

Для сборки из двух секций выполнено исследование стабильности запуска и ресурса. Зарядное напряжение в ресурсных испытаниях составляло $U_0 = 35$ кВ. Использовалась резистивная нагрузка, которая обеспечивала режим разряда с реверсом импульса напряжения около ~ 10 %. Из экспериментальных осциллограмм определялось время задержки t_d импульса напряжения на нагрузке U относительно импульса пускового напряжения U_{trig} по уровню 0,1 от амплитудного значения. Рассчитывалось среднее значение $\langle t_d \rangle$ в серии импульсов, а также среднеквадратичные отклонения от среднего значения σ . Среднеквадратичное отклонение времени задержки (джиттер) характеризует стабильность времени срабатывания разрядников секций.

Экспериментальные данные по времени задержки обобщены на Рис. 6.

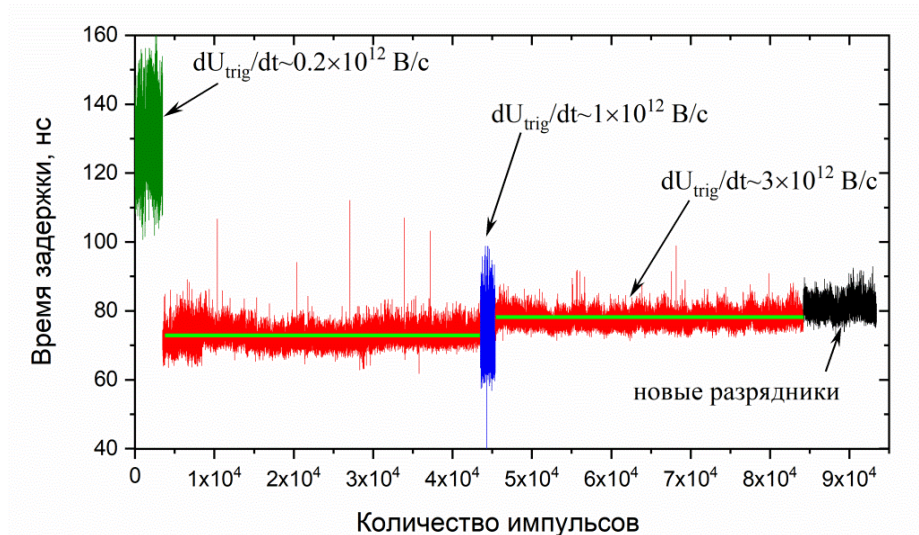


Рис. 6. Время задержки t_d импульса напряжения на нагрузке U относительно импульса пускового напряжения U_{trig} .

Всего выполнено $9,5 \times 10^4$ включений. В среднем в день выполнялось по 1500 – 2500 включений. При средней скорости нарастания импульса

пускового напряжения ~ 3 кВ/с джиттер секций в дневных сериях в среднем составлял около 2.2 нс, т.е. реализовывалась наносекундная точность включения. Серия из $\sim 8,5 \times 10^4$ включений выполнена без смены и обслуживания разрядников, после чего разрядники были извлечены и осмотрены. Критических изменений в разрядниках, препятствующих их дальнейшему использованию, не выявлено. Последующая серия из $\sim 1 \times 10^4$ выполнена с новыми разрядниками. За всю серию исследований изменений секция сохранила свою работоспособность.

Продемонстрирована стабильная работа секции при частоте следования импульсов 1 Гц и 5 Гц [11].

4.3. Параллельная работа секций

В работе [12] исследован джиттер системы, составленной из независимых параллельно включенных секций. Согласно результатам работы, если имеется N независимых секций с равным джиттером, то суммарный джиттер системы параллельных секций с погрешностью не более 10 % аппроксимируется выражением:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_s}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где N – число параллельных секций, σ_s – джиттер отдельной секции. Вопрос заключался в том, насколько правомерно допущение о равенстве джиттеров секций и каков будет суммарный джиттер системы параллельных секций, если их джиттеры окажутся различными.

Исследована параллельная работы секций в составе сегмента ЛТД ступени. Нагрузка для каждой из секций в составе сегмента состояла из 15 шт. параллельных резисторов ТВО-10, 27 Ом. Для регистрации токов разряда секций применялись резистивные шунты, установленные в ветвь каждой секции. Из осциллограмм токов и пускового напряжения определялись время задержки между приходом пускового импульса напряжения и срабатыванием каждой секции, а также время задержки между приходом пускового импульса

напряжения и срабатыванием всего сегмента. Время задержки определялось как время между уровнями 10 % от амплитудного значения пускового импульса напряжения и амплитудного значения импульсов тока разряда.

Значения джиттеров десяти секций и сегмента обобщены на Рис. 7. Статистика по каждому значению набрана в серии из 50 импульсов. Данные демонстрируют, что джиттеры секций в составе сегмента значительно различаются. Так, при зарядном напряжении $U_0 = 35$ кВ и скорости нарастания пускового импульса ~ 2 кВ/нс значения джиттера десяти секций варьируются от минимального значения $\sigma_{min} = 1.1$ нс до максимального значения $\sigma_{max} = 2.7$ нс. При этом джиттер сегмента, составленного из этих секций, составляет $\sigma_0 = 1$ нс.

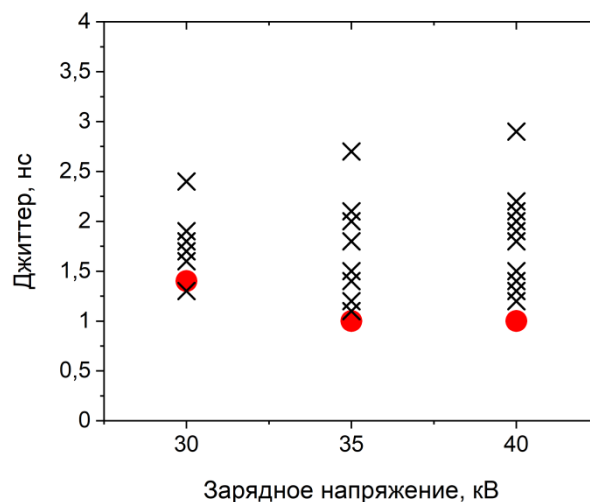


Рис. 7. Экспериментальные значения джиттеров десяти секций (×) и значения джиттера сегмента из десяти таких секций (●).

4.4. Параметры ЛТД ступени

Параметры выходных импульсов ЛТД ступени получены при разряде на резистивную нагрузку, составленную из фольговых резисторов. Резисторы размещаются на диаметре 1,1 м внутри объема выходной линии ступени. В испытаниях центральный объем ступени заполнялся элегазом с целью исключить утечки тока с элементов нагрузки и вдоль поверхности изолятора.

Осциллограммы тока разряда и расчетных кривые выходной мощности ЛТД ступени при зарядном напряжении $U_0 = 40$ кВ для нагрузки с сопротивлением 17 мОм, 24 мОм и 38 мОм приведены на Рис. 8.

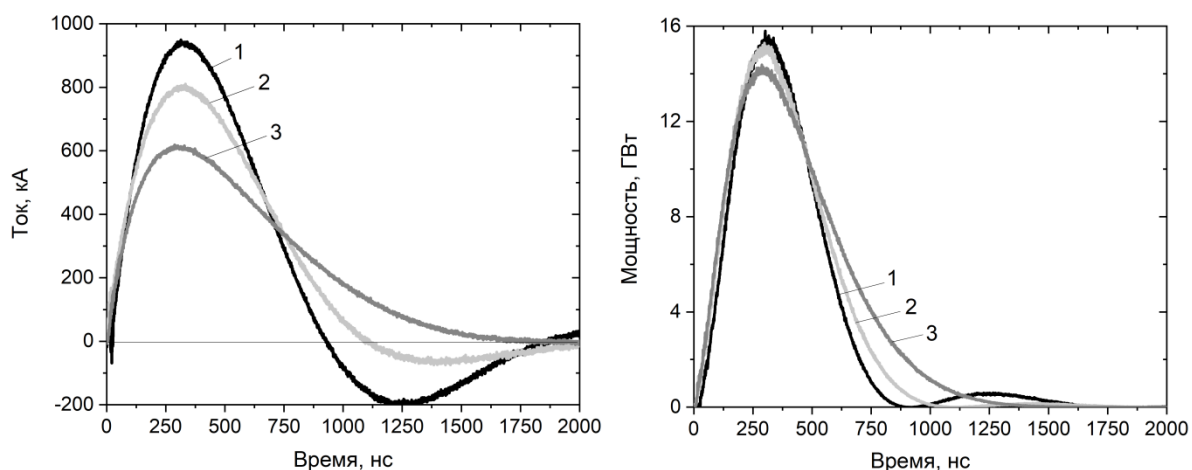


Рис. 8. Экспериментальные осциллограммы тока разряда и расчетные кривые мощности ЛТД ступени на нагрузке $R_{load} = 0.017 \text{ Ом}$ (1), 0.024 Ом (2) и 0.038 Ом (3). Зарядное напряжение ступени $U_0 = 40 \text{ кВ}$.

Максимальная мощность вывода энергии из емкостного накопителя энергии реализуется в режиме разряда ЛТД ступени на нагрузку с сопротивлением $\sim 0.02 \text{ Ом}$. В этом режиме разряда при $U_0 = 40 \text{ кВ}$ реализуется импульс тока амплитудой 0.94 МА с фронтом по уровню $(0.1-0.9)$ около 190 нс . При этом ток в цепи индуктора ступени составляет единицы процентов от тока в нагрузке. В нагрузку выводится более 70% запасенной в емкостном накопителе энергии с пиковой мощностью $\sim 15.5 \text{ ГВт}$ за характерное время $\approx 450 \text{ нс}$. За характерное время выбрана длительность между уровнями $(0.1-0.9)$ от максимального значения.

Заключение

Создана ЛТД ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления, в которой реализована возможность проведения профилактики и ремонта емкостного накопителя без полной разборки ступени, что критически важно в крупных установках, где используются модули в составе многих последовательно включенных ЛТД ступеней. ЛТД ступень позволяет получить при зарядном напряжении 40 кВ на нагрузке около 0.02 Ом импульс с мощностью 15.5 ГВт и током 0.94 МА с временем нарастания по уровню $(0.1-0.9)$ менее 200 нс .

Для секций емкостного накопителя ЛТД ступени проведен цикл ресурсных испытаний и исследований по стабильности запуска. Выполнено порядка 10^5 включений. Джиттер секций составляет единицы нс при средней скорости нарастания импульса пускового напряжения ~ 1 кВ/нс. Изменений параметров конденсаторов секций и критических изменений в разрядниках, препятствующих их дальнейшему использованию, за всю серию импульсов не выявлено. Продемонстрирована успешная работа секции при частоте следования импульсов около 1 Гц.

Литература

1. Sinars D.B. et al. Review of pulsed power-driven high energy density physics research on Z at Sandia // Physics of Plasmas. – 2020. – Т. 27. – №. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0007476>
2. Lam S.K. et al. Fast discharge energy storage development for advanced X-ray simulators // IEEE transactions on plasma science. – 2005. – Т. 33. – №. 2. – С. 982-989. <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.845089>
3. Stygar W.A. et al. Impedance-matched Marx generators // Physical Review Accelerators and Beams. – 2017. – Т. 20. – №. 4. – С. 040402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.040402>
4. Guegan B. et al. Mega-volt impedance-matched Marx // 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). – IEEE, 2021. – С. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PPC40517.2021.9733131>
5. Bostrikov A.N. et al. Primary energy storages based on linear transformer stages // Laser and Particle Beams. – 2003. – Т. 21. – №. 2. – С. 295-299. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212209>
6. Kim A.A., Mazarakis M.G. The story of the LTD development // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Т. 48. – №. 4. – С. 749-756. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2954210>

7. Kim A.A. et al. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages // Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams. – 2009. – Т. 12. – №. 5. – С. 050402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.12.050402>
8. Kim A.A. et al. Development of the ultra-fast LTD stage // 2002 14th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS). – IEEE, 2002. – Т. 1. – С. 81-84. <https://doi.org/10.1063/1.1530807>
9. Kovalchuk B.M. et al. Pulse generators based on air-insulated linear-transformer-driver stages // Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams. – 2013. – Т. 16. – №. 5. – С. 050401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.16.050401>
10. Jiang X. et al. A gas-insulated mega-ampere-class linear transformer driver with pluggable bricks // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Т. 91. – №. 12. <https://doi.org/10.1063/5.0028451>
11. Жерлицын А.А., Кумпак Е.В. Секция первичного емкостного накопителя энергии с изоляцией воздухом атмосферного давления и зарядным напряжением 40 кВ // 2024 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024). – 2024. – С. 492-497. <https://doi.org/10.56761/EFRE2024.S4-P-032002>
12. Ким А.А. и др. Джиттер искровых разрядников ЛТД // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – №. 9-2. – С. 156.

Для цитирования:

Жерлицын А.А., Кумпак Е.В., Ленский А.Д., Павленко А.В., Григорьев А.Н. 1-МА, 40-кВ ЛТД ступень с воздушной изоляцией // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.18>