

## ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ ЛИТИЙ-ПОЛИМЕРНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

© 2021 г. А. А. Васеленок<sup>а</sup>, В. А. Гурашвили<sup>а</sup>, И. Д. Джигайло<sup>а,\*</sup>, Д. А. Кириленко<sup>а</sup>,  
А. К. Кондратенко<sup>а</sup>, В. Н. Кузьмин<sup>а</sup>, В. С. Немчинов<sup>а</sup>, А. Е. Полтанов<sup>а</sup>,  
В. И. Сень<sup>а</sup>, Н. Г. Туркин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, владение 12

\*e-mail: dji@triniti.ru

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 17.08.2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований и проведен анализ опыта эксплуатации источника питания непрерывного газового лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи без промежуточного преобразователя. Продемонстрирована продолжительная (более четырех лет) работа высоковольтного аккумуляторного источника питания в составе лазерной установки при напряжении холостого хода 7.76 кВ, напряжении под нагрузкой 6.1 кВ, токе нагрузки до 250 А, мощности более 1.5 МВА и энергозапасе 550 МДж. Время срабатывания ключа для отключения нагрузки при пробоях в разрядной камере не превышало 120 мкс. Приведены результаты измерений внутреннего сопротивления аккумуляторов и его изменения в процессе эксплуатации.

DOI: 10.31857/S003281622101016X

При создании лазерных мобильных комплексов важным элементом является источник питания непрерывного газового разряда, к которому предъявляются сложные требования по энергетическим и массогабаритным параметрам.

Современные литий-полимерные аккумуляторы имеют высокие удельные показатели по запасаемой энергии – 400 кДж/кг (540 МДж/м<sup>3</sup>) и отдаваемой мощности – 2.5 кВт/кг (500 кВт/м<sup>3</sup>) [1].

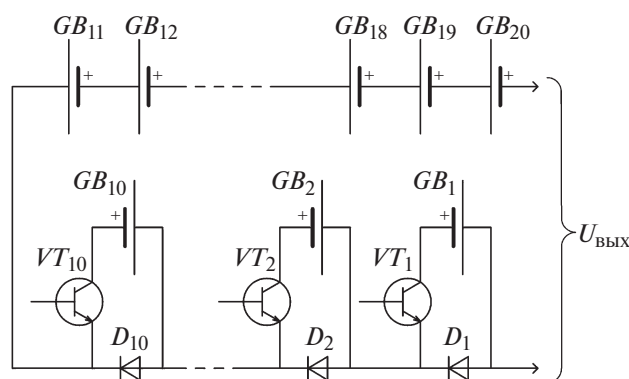
При этом аккумуляторный источник питания имеет следующие достоинства:

- при практически постоянной готовности к работе время подключения к нагрузке составляет десятки микросекунд;
- при отключении активной нагрузки, которое происходит за время менее 150 мкс, подключения балластной нагрузки не требуется;
- для работы источника не требуются расходные материалы;
- источник имеет простую конструкцию и относительно несложную электрическую схему.

Специфичная нагрузка, какой является разрядный промежуток газового лазера, требует от источника питания достаточно высокого напряжения (6–7 кВ) при токе до 300 А. Характер нагрузки активный, в процессе рабочего цикла она постоянна.

Для получения высокого напряжения аккумуляторные блоки с током, равным номинальному току нагрузки, соединены последовательно. Дополнительными элементами в данной схеме являются высоковольтный ключ, система разъединителей, разделяющих аккумуляторную батарею на относительно низковольтные секции с напряжением по 500–600 В, и дискретный регулятор напряжения. Вес дополнительного оборудования в данной схеме не превышает 10–15% от веса аккумуляторов. Регулировка напряжения на нагрузке осуществляется путем переключения числа последовательно подсоединяемых секций аккумуляторов [2].

Источник питания выполнен на основе 144 литий-полимерных аккумуляторов емкостью 21 А · ч, изготовленных по заказу в ООО “Источники питания”, г. Казань [1]. Каждый аккумулятор состоит из 13 ячеек с напряжением холостого хода 4.2 В, которые соединены последовательно. Максимальное напряжение холостого хода полностью заряженного аккумулятора составляет 54.6 В. Все 13 ячеек заключены в общий пластмассовый корпус с размерами 143 × 95 × 220 мм. Аккумулятор снабжен системой выравнивания напряжения на ячейках в процессе заряда батареи, которая предохраняет каждую ячейку от перезаряда. Масса одного аккумулятора составляет 5820 ± 50 г.



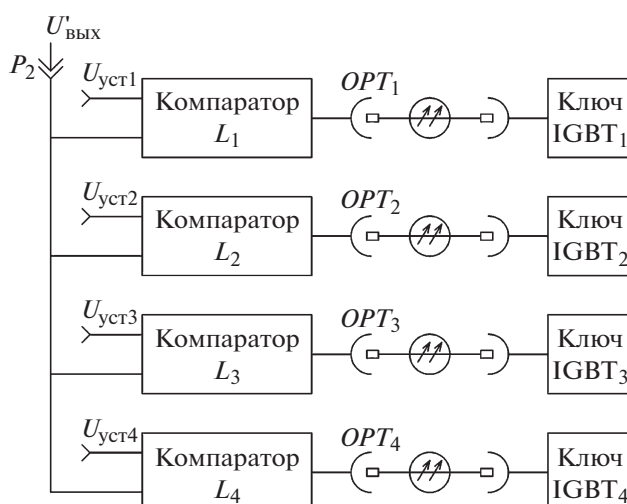
**Рис. 1.** Схема дискретного регулятора напряжения.  $GB_1$ – $GB_{20}$  – аккумуляторы;  $VT_1$ – $VT_{10}$  – CM600HU-12F;  $D_1$ – $D_{10}$  – 403CNQ100PBF.

Поскольку электрическая прочность пластмассового корпуса аккумулятора была недостаточной для обеспечения безопасной эксплуатации источника при максимальном напряжении 8 кВ, то полки металлических стеллажей были изготовлены из стеклотекстолита марки СТЭФ толщиной 5 мм. На одной полке стеллажа размещены 2 группы по 9 аккумуляторов. Группы были разделены стеклотекстолитовыми стенками толщиной 5 мм, и в каждой группе между аккумуляторами проложены стеклотекстолитовые пластины толщиной 3 мм. Все аккумуляторы одной группы соединялись последовательно на изоляционной планке, установленной в середине наружной стороны полки. Напряжение холостого хода одной группы аккумуляторов составляло  $485 \pm 2$  В.

Максимальное напряжение холостого хода на двух последовательно соединенных стеллажах равно  $7760 \pm 32$  В.

Регулировка напряжения на источнике в процессе работы была выполнена по принципу коммутации аккумуляторов ( $GB_1$ – $GB_{20}$ ) с помощью транзисторного ключа на основе IGBT-модуля CM600HU-12F ( $VT_1$ – $VT_{10}$ ) и диода Шоттки 403CNQ100PBF ( $D_1$ – $D_{10}$ ), как показано на схеме рис. 1 [2]. Например, для напряжения нагрузки 7 кВ подключение аккумулятора с напряжением 48 В изменит выходное напряжение на 0.7%. Падение же напряжения на диоде  $D_{10}$  составит всего 0.014%, а на IGBT-модуле ~0.03% от напряжения на нагрузке. Таким образом, точность поддержания напряжения на нагрузке с помощью данной схемы можно довести до  $\pm 0.5\%$ .

Для элементов регулятора напряжения были использованы радиаторы, позволявшие обеспечить длительную работу без принудительного охлаждения. При числе регулирующих ячеек 10 диапазон регулирования составлял 0–490 В, а масса модулей



**Рис. 2.** Блок-схема управления регулировкой напряжения аккумуляторного источника питания.  $OPT_1$ – $OPT_4$  – оптические кабели.

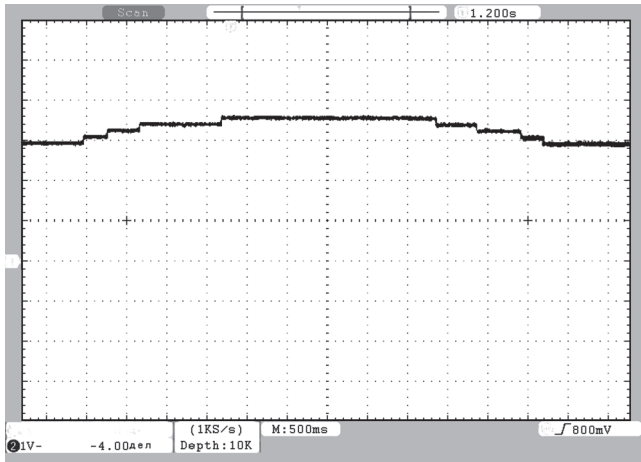
IGBT и десяти диодов Шоттки с соответствующими радиаторами не превышала 30 кг.

Управление IGBT-модулями регулятора осуществлялось через драйверы ДР1280П-БВ-65, имеющие высоковольтную развязку от силовой цепи на уровне 15 кВ. Управляющий сигнал на драйверы подавался через оптоволоконный кабель.

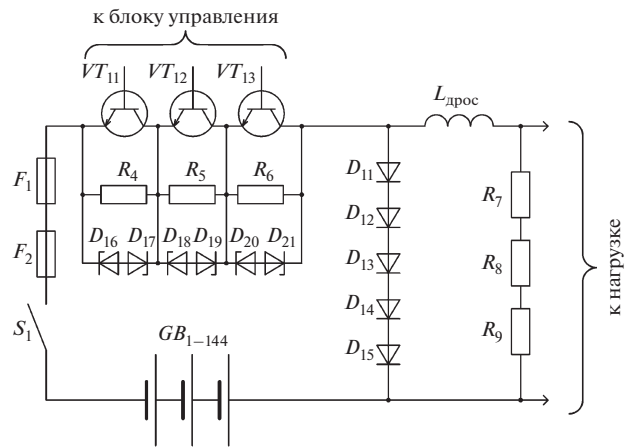
Схема управления регулятором напряжения приведена на рис. 2.

На разъем  $P_2$  подавалось напряжение, пропорциональное выходному напряжению источника, которое сравнивалось с напряжениями уставок компараторов  $L_1$ – $L_4$ , управляющих драйверами IGBT-регулятора через оптические кабели  $OPT_1$ – $OPT_4$ . Осциллограмма процесса регулирования выходного напряжения аккумуляторного источника питания приведена на рис. 3.

Подключение нагрузки к источнику осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 4. Подача напряжения на нагрузку от источника осуществлялась силовым ключом в составе трех высоковольтных модулей IGBT типа CM900HB-90H, включенных последовательно ( $VT_{11}$ – $VT_{13}$ ). Номинальный ток модуля 900 А, номинальное напряжение каждого модуля 4.5 кВ. Для равномерного распределения напряжения источника между модулями в закрытом состоянии модули шунтировались сопротивлениями ТВО-20 по 900 кОм ( $R_4$ – $R_6$ ). Однако, поскольку неактивированная газоразрядная камера (г.р.к.) могла иметь сопротивление до нескольких мегаом, то начальное напряжение на ней при закрытых модулях  $VT_{11}$ – $VT_{13}$  и включенных разьединителях могло достигать нескольких киловольт. Чтобы уменьшить начальное напря-



**Рис. 3.** Осциллограмма процесса регулирования выходного напряжения аккумуляторного источника питания. Масштаб: по горизонтали – 500 мс/деление, по вертикали – 1 кВ/деление.



**Рис. 4.** Схема соединений источника с нагрузкой.  $VT_{11}-VT_{13}$  – СМ900НВ-90Н;  $D_{16}-D_{21}$  – ОНС233-200;  $F_1-F_2$  – плавкие предохранители;  $R_4-R_6 = 900$  кОм;  $R_7-R_9 = 270$  кОм;  $L_{дрос} = 1$  мГн.

жение при закрытых ключах, нагрузка шунтировалась сопротивлениями  $R_7-R_9$  по 270 кОм.

Для предохранения модулей от перенапряжений в переходных режимах они шунтировались симметричными полупроводниковыми ограничителями напряжения ОНС233-200 ( $D_{16}-D_{21}$ ). Ограничители выбраны с таким расчетом, чтобы в переходных режимах при коммутации напряжение на модуле не превышало 3 кВ. Номинальная ударная рассеиваемая мощность для ОНС233-200 составляет около 200 кВт в течение 10 мкс, что при разбросе времени выключения модулей 0.5 мкс гарантирует защиту модулей от перенапряжения.

Управление модулями силового ключа осуществлялось через драйверы ДР1280П-БВ-12 по оптическому кабелю. Силовой ключ включался по команде с пульта управления лазерной установкой (ПУЛУ). Отключение осуществлялось как по сигналу с ПУЛУ об окончании разряда, так и по сигналу датчика защиты при превышении током нагрузки установленного допустимого значения.

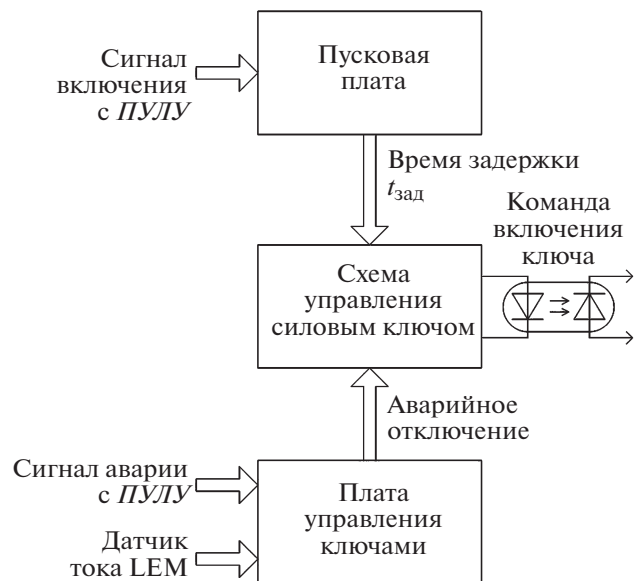
Схема управления ключом приведена на рис. 5.

Пусковая плата с антидребезговой схемой принимала релейный сигнал с ПУЛУ и через оптрона передавала команду на включение силового ключа. На компараторе, расположенном на плате управления ключами, с помощью переменного резистора выставлялось значение тока, соответствующее допустимому уровню.

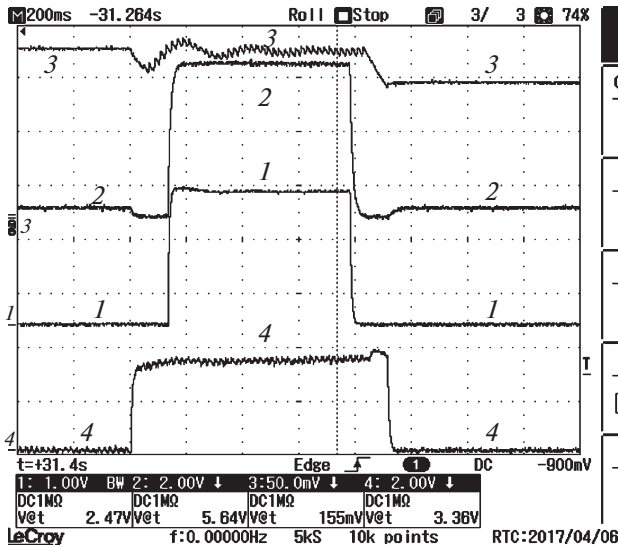
Уровень тока во время работы отслеживался датчиком постоянного тока производства фирмы LEM. Если ток разряда превышал заданный допустимый уровень, компаратор выдавал сигнал на оптрона, которые шунтировали команду включения силового ключа, и ключ отключался.

Чтобы при снижении тока ключ опять не включился, компаратор ставился на самоблокировку.

Сигнал отключения ключа при превышении током заданного значения передавался на ПУЛУ и фиксировался световым сигналом на плате управления ключами. Характерные осциллограммы работы ключа на натурную нагрузку приведены на рис. 6. Ключ обеспечивал малое время коммутации (включение и отключение нагрузки), определяемое только параметрами внешней цепи (см. рис. 7).



**Рис. 5.** Блок-схема управления силовым ключом. ПУЛУ – пульт управления лазерной установкой.

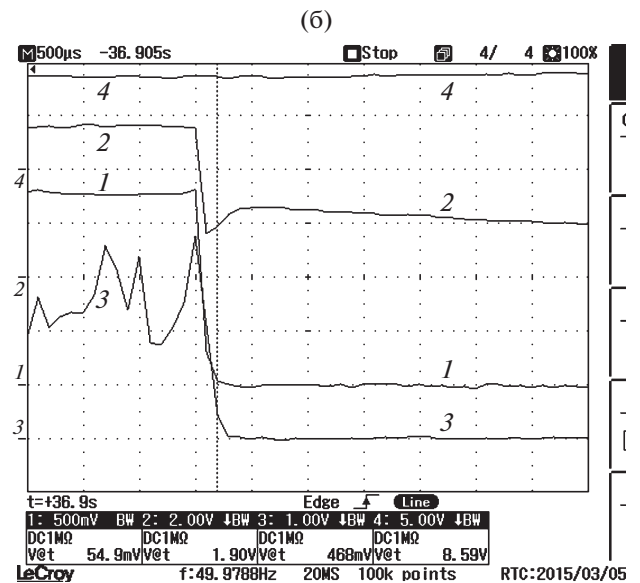
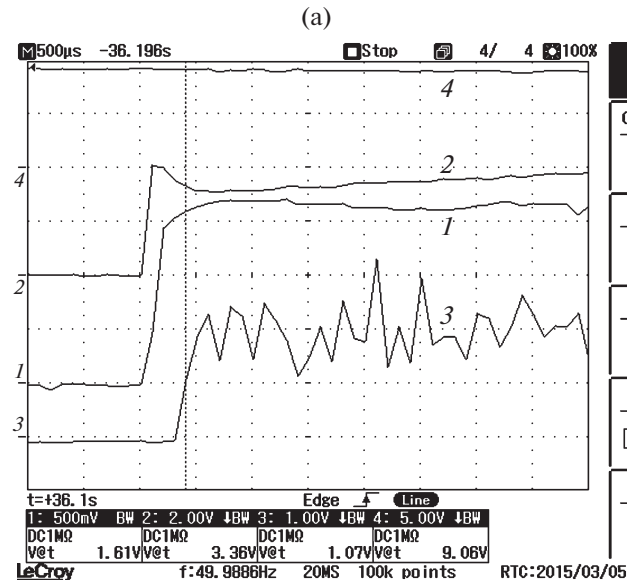


**Рис. 6.** Работа силового ключа аккумуляторного источника на натурную нагрузку: 1 – ток через газоразрядную камеру  $I_{\text{ГРК}} = 247$  А; 2 – напряжение на газоразрядной камере  $U_{\text{ГРК}} = 5.64$  кВ; 3 – ускоряющее напряжение на устройстве ионизации  $U_{\text{уи}} = 155$  кВ; 4 – ток нагрузки устройства ионизации  $I_{\text{уи}} = 336$  мА. Все цифры даны в точках пересечения линий осциллограмм с курсором. Масштаб по горизонтали 200 мс/деление, длительность работы 0.8 с.

Согласно осциллограммам, длительности включения и отключения напряжения на нагрузке (кривая 2) не превышают 120 мкс и определяются исключительно индуктивностью цепей подвода питания.

Поскольку распределенная индуктивность цепей подвода питания на участке аккумуляторы–разъединители составляла несколько десятков микрогенри, возникала возможность появления перенапряжений на модулях в момент отключения ключом нагрузки от источника. Для снижения этих перенапряжений на выходе аккумуляторной сборки в схему введена емкость  $C_1$  (20 мкФ, 10 кВ). Однако при включении разъединителя, который подавал полное напряжение аккумуляторной батареи на ключи, эта емкость и распределенная индуктивность цепей подвода питания образовывали колебательный контур, в котором  $C_1$  заряжалась практически до двойного напряжения батареи – 12–14 кВ. Чтобы избежать этого, было реализовано двухступенчатое включение последнего разъединителя (рис. 8.): на первой ступени полное напряжение аккумуляторной батареи подавалось на емкость  $C_1$  через балластное сопротивление, а затем вторая ступень разъединителя шунтировала его.

При пробое в разрядной камере резко падает сопротивление нагрузки, что равносильно переходу источника в режим короткого замыкания.



**Рис. 7.** Осциллограммы фронтов включения (а) и отключения (б) нагрузки: 1 – ток через газоразрядную камеру  $I_{\text{ГРК}}$ ; 2 – напряжение на газоразрядной камере  $U_{\text{ГРК}}$ ; 3 – сигнал с датчика излучения лазера; 4 – ускоряющее напряжение на устройстве ионизации  $U_{\text{уи}}$ . Временное разрешение 0.5 мс/деление.

При напряжении источника 7.6 кВ ток короткого замыкания мог превзойти 2000 А, а скорость его нарастания могла превысить 80 А/мкс. Чтобы ограничить скорость роста тока в цепи нагрузки в режиме короткого замыкания, последовательно с нагрузкой включался дроссель с  $L_{\text{дрос}} = 1$  мГн. Дроссель ограничивал скорость роста тока в цепи нагрузки при коротком замыкании до уровня  $dI/dt = U_{\text{ном}}/L_{\text{дрос}} = 7000 \text{ В} \cdot 10^{-6} / 0.001 \text{ Гн} = 7 \text{ А/мкс}$ .

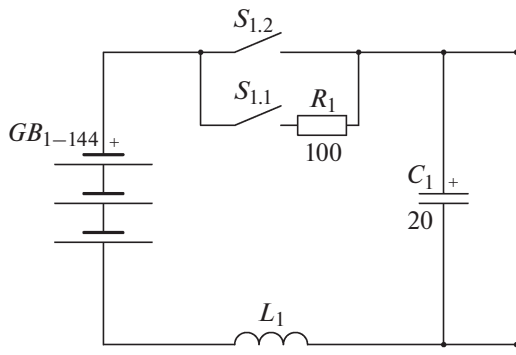


Рис. 8. Схема двухступенчатой подачи полного напряжения на емкость  $C_1$ .  $L_1$  – индуктивность подводных проводов.

Основная задача дросселя – не дать току короткого замыкания за время отключения превысить коммутационную способность полупроводниковых модулей, входящих в силовой ключ.

Уровень тока нагрузки отслеживал бесконтактный датчик типа LT500-S/SP92-TU, генерировавший аналоговый сигнал, пропорциональный току нагрузки. Время задержки сигнала в нем не превышало 1.5 мкс. Сигнал передавался на компаратор системы управления ключом. Компаратор, настроенный на превышение сигналом допустимого значения тока уставки ( $I_{уст}$ ), выдавал команду на запираение силового ключа. Время от момента превышения током нагрузки значения тока уставки до момента срабатывания ключа не превышало 20 мкс. Характерная осциллограмма процесса отключения тока короткого замыкания при пробое нагрузки приведена на рис. 9.

Согласно данной осциллограмме, ток нагрузки (кривая 1) при пробое за время около 40 мкс нарастает с 200 А до выставленного ограничительного значения 320 А тока уставки  $I_{уст}$  и через 30 мкс начинает спадать. Энергия, выделившаяся в разрядном промежутке за время короткого замыкания – пробоя, ограничена величиной 200–300 Дж, что не вызывает деструктивных изменений в г.р.к.

Чтобы избежать перенапряжений на силовом ключе при отключении нагрузки, в схему введены кроубарные диоды ( $D_{11}–D_{15}$ , см. схему на рис. 4). В этом случае ток цепи нагрузки замыкается в контуре “дроссель–нагрузка–кроубарный диод”, и энергия, запасенная в индуктивностях нагрузки и подводных линий, относительно медленно рассеивается в этом контуре.

Для защиты от возможного выхода из строя аккумуляторов в случае отказа силового ключа при коротком замыкании в нагрузке в схеме предусмотрена пассивная защита в виде двух со-

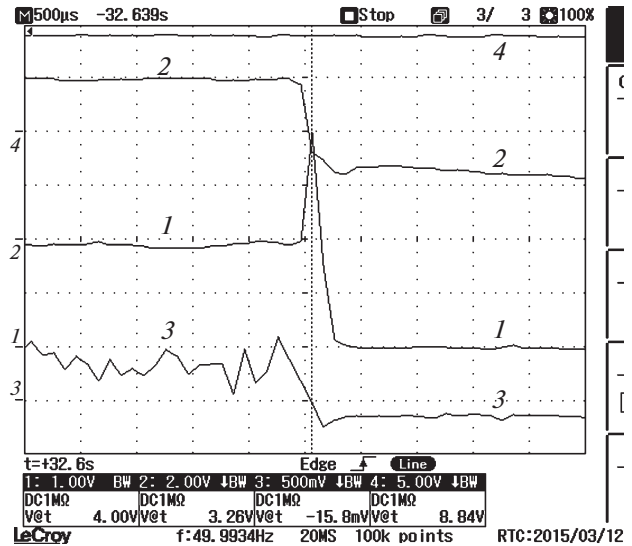


Рис. 9. Осциллограмма тока короткого замыкания при отключении нагрузки: 1 – ток через газоразрядную камеру  $I_{грк}$ ; 2 – напряжение на газоразрядной камере  $U_{грк}$ ; 3 – сигнал с датчика излучения лазера; 4 – ускоряющее напряжение на устройстве ионизации  $U_{уи}$ . Масштаб по горизонтали 500 мкс/деление.

единенных последовательно плавких предохранителей  $F_1–F_2$ .

Источник питания был укомплектован аккумуляторами, для которых изготовитель гарантировал не менее 100 циклов заряд-разряд с глубиной разряда 50%. Источник эксплуатировался в течение четырех лет. Максимальный ток разряда, указанный в техническом паспорте на новый аккумулятор, был равен 250 А в течение 10 с и 400 А в течение 1 с. Всего было проведено более 200 включений источника на нагрузку в виде разряда в г.р.к. При этом ток разряда изменялся в диапазоне от 100 до 250 А при длительности процесса от 0.8 до 3 с.

Успешно аккумуляторная батарея была отключена ключом в восьми из девяти случаев возникновения короткого замыкания в нагрузке. В этих случаях ток не превышал 380 А до срабатывания ключа. В одном из случаев пробоя в г.р.к. вышедший из строя ключ не отключил источник питания от нагрузки, пробой в г.р.к. длился около 1 с, за это время ток в цепи вырос до 612 А. Отключение было обеспечено перегоранием плавкого предохранителя  $F_1$ .

За одно включение от аккумулятора отбиралось от 0.25 до 0.8% его емкости. Как только напряжение на аккумуляторе снижалось до 50.2–50.5 В, проводилась его подзарядка до напряжения 52.4–52.8 В. Подзарядка проводилась током 7–9 А от зарядных устройств мощностью 800 ВА. Зарядные устройства имели наклон выходной ха-

**Таблица 1.** Процентные доли аккумуляторов с различными диапазонами значений  $R_{вн}$

Процент аккумуляторов от общего количества, %	$R_{вн}$ , Ом
25.3	от 0.033 до 0.06
30.7	от 0.061 до 0.09
25.3	от 0.091 до 0.12
18.7	от 0.121 до 0.34*

\*Выведены из эксплуатации

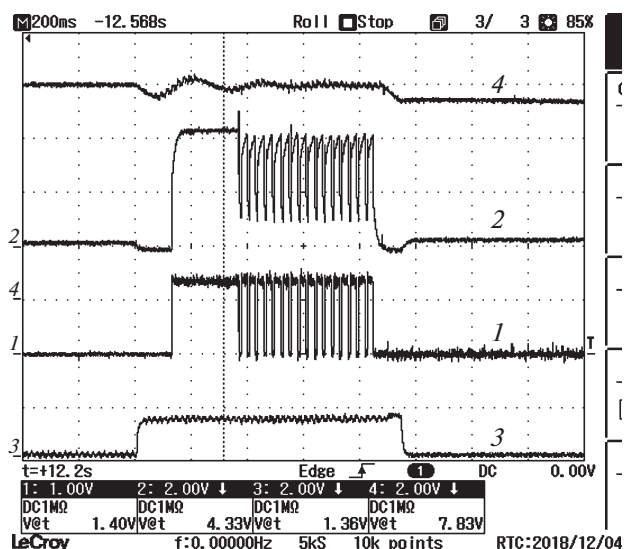
рактические характеристики, ограничивающий выходной ток до 9 А при выходном напряжении 54 В, и автоматически отключались при достижении аккумуляторами напряжения свыше  $53 \pm 0.1$  В. Напряжение каждого аккумулятора контролировалось с периодичностью 1 раз в 3 недели. Аккумуляторы эксплуатировались при температуре от +15 до +25°C.

В процессе эксплуатации источника (т.е. за 4 года) внутреннее сопротивление аккумуляторов  $R_{вн}$  постепенно увеличивалось. В начале эксплуатации  $R_{вн}$  составляло 0.03–0.04 Ом для всех 144 аккумуляторов. В течение двух лет работы (149 включений) оно держалось практически на этом же уровне, но через 4 года (более 200 включений)  $R_{вн}$  у всех аккумуляторов возросло. Кратность увеличения  $R_{вн}$  для различных аккумуляторов составила от 1.5 до 11 раз. Процентные доли аккумуляторов с разным увеличением  $R_{вн}$  приведены в табл. 1.

Напряжение аккумуляторов с внутренним сопротивлением менее 0.09 Ом (т.е. для 56% от общего числа) при токе 220 А уменьшалось не более чем на 6.8 В (~13%). Поэлементная проверка аккумулятора с  $R_{вн} = 0.34$  Ом показала, что одна из 13-ти ячеек аккумулятора имела нулевое напряжение, тогда как остальные 12 ячеек имели напряжение в пределах 3.9–4.0 В. Внутреннее сопротивление ячейки с нулевым напряжением равнялось 0.24 Ом. У остальных 12-ти ячеек суммарное  $R_{вн}$  находилось в пределах 0.1 Ом.

Отсюда можно сделать вывод, что данный режим эксплуатации привел к необратимым деструктивным изменениям 18.7% аккумуляторов, что препятствовало их дальнейшей эксплуатации. Однако значительная часть аккумуляторов (около 25.3%) сохранила параметры, близкие к начальным. Это позволяет надеяться, что дальнейшее совершенствование технологии изготовления и контроля качества продукции позволит продлить срок службы таких аккумуляторов в столь жестких режимах эксплуатации.

Поскольку возрастание  $R_{вн}$  аккумулятора при длительных (более 2 с) включениях с токами нагрузки более 200 А может привести к разогреву ячейки аккумулятора и лавинному нарастанию ее



**Рис. 10.** Периодические отключения силового ключа, вызванные снижением питания на драйверах управления ключами: 1 – ток через газоразрядную камеру  $I_{грк}$ ; 2 – напряжение на газоразрядной камере  $U_{грк}$ ; 3 – ускоряющее напряжение на устройстве ионизации  $U_{и}$ ; 4 – ток нагрузки устройства ионизации  $I_{и}$ . Масштаб по горизонтали 200 мс/деление.

температуры, необходимо вводить методы контроля состояния каждого аккумулятора в составе батареи, позволяющие оперативно реагировать на происходящие в процессе эксплуатации деструктивные изменения состояния аккумулятора.

Наиболее перспективным видится снижение за деструктивными изменениями, происходящими в аккумуляторах, по степени изменения их внутреннего сопротивления. Для этого каждый аккумулятор предлагается снабдить преобразователем напряжения DC/DC, который подсоединяется к клеммам аккумулятора. Выход преобразователя через трансформатор, обеспечивающий достаточную прочность изоляции, подключается к системе контроля и управления. Такой способ контроля позволит практически мгновенно реагировать на нарушения в режиме работы в каждом отдельном элементе (аккумуляторе) источника.

Система управления и контроля все 4 года эксплуатации работала в штатном режиме, она обеспечивала прием команд на запуск силового ключа и его отключение с ПУЛУ, выключала ключ при превышении током нагрузки заданного значения  $I_{уст}$  и сигнализировала об этом. Длительная эксплуатация системы управления и контроля позволяет говорить о надежности выбранных схемных и конструкторских решений. Единственный сбой работы произошел из-за снижения ниже допустимого уровня сетевого напряжения на блоке питания драйверов силового ключа, что привело к несанкционированному периодическому отклю-

чению ключа (рис. 10). Следует отметить и положительную сторону этого явления: ключ показал возможность работы схемы в импульсно-периодическом режиме.

Результаты четырехлетней эксплуатации устройства показали, что аккумуляторный источник питания без промежуточного, повышающего напряжение преобразователя может быть успешно использован для питания разряда электроионизационного непрерывного лазера. Была подтверждена возможность:

– коммутации на нагрузку высокого напряжения (до 7.5 кВ) при токах до 250 А;

– быстросрабатывающей защиты нагрузки путем ограничения допустимого тока при дуговом пробое, что существенно повышает ресурс работы нагрузки;

– дискретной регулировки напряжения на выходе источника;

– обеспечения безопасности эксплуатации высоковольтной сборки аккумуляторов за счет разделения ее на секции с напряжением 400–500 В.

Максимальная мощность, генерируемая источником, составила 1.9 МВт, его масса равна 1300 кг при объеме 2.5 м<sup>3</sup>. Эти параметры источника позволяют использовать его для питания мобильных лазерных комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.sskgroup.ru/tree/?lang=rus&id=182/>Литиевые аккумуляторы – основная информация. НПО ССК.
2. *Полтанов А.Е., Кондратенко А.К., Рындин В.Н., Асанов С.В., Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н.* Патент № 2619058 РФ // Бюл. № 14. Опубликовано 11.05.2017.