

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРНЫХ МАГНИТОВ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

© 2023 г. А. А. Шиянов^а, Ю. М. Сеннов^а, С. В. Чистилин^а, Г. М. Мустафа^а, С. И. Гусев^{а,*},
В. Н. Карпинский^б, Г. Г. Ходжибагиян^б, А. А. Шурыгин^б, Н. В. Травин^б

^аООО “НПП ЛМ Инвертор”

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12

^бОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: gusev-si@lm-inverter.ru, gusev-si@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260 мощностью 2.2 МВт предназначен для питания сверхпроводящих структурных магнитов Бустера коллайдерной установки NICA, создаваемой в Объединенном институте ядерных исследований. Источник формирует периодические импульсы тока трапециевидной формы амплитудой до 10 кА с точностью 0.001–0.01%. Источник выполнен на основе модульных многоуровневых транзисторных преобразователей напряжения в комбинации с емкостным накопителем энергии на 6.1 МДж, обеспечивающим снижение влияния мощной импульсно-периодической нагрузки на сеть общего пользования и снимающим проблему проникновения возмущений из сети в цепи питания сверхпроводящих магнитов.

DOI: 10.31857/S0032816223020118, EDN: UXQSYW

ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ в настоящее время ведутся работы по созданию ион-ионного коллайдера NICA [1]. Коллайдер NICA предназначен для фундаментальных исследований в области релятивистской физики. Основной целью этого проекта является проведение в ближайшие годы экспериментов по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной кварк-глюонной материи и поиск возможного образования “смешанной фазы” такой материи. Эксперименты будут реализованы в режиме столкновения встречных ион-ионных пучков. Проект NICA предполагает создание интеллектуальной прецизионной системы электропитания и управления всем ускорительным комплексом, включая Бустер, Нуклотрон, коллайдер и каналы транспортировки пучков. Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260 является частью этой системы.

Использование сверхпроводящих технологий позволяет существенно снизить энергопотребление ускорителя. Кроме того, реализация такой технологии приводит к уменьшению размеров ускорительных комплексов и массы их магнитных элементов. Все это способствует заметному снижению потребления электроэнергии и расходов на капитальное строительство. Наличие

сверхпроводимости вносит ряд специфических требований к системам электропитания, управления, алгоритмам работы ускорителя. Также требуется создать систему эвакуации энергии из магнитных элементов при их переходе из сверхпроводящего в “теплое” состояние.

Система электропитания ускорителя должна обеспечить формирование магнитных полей в сверхпроводящих элементах с высокой точностью и с заданной скоростью изменения. Для Бустера это требование выливается в создание системы питания с пиковой мощностью 2.2 МВт.

Надежность работы системы питания заключается в обеспечении безопасного и устойчивого функционирования всего комплекса физического и электротехнического оборудования, в том числе сверхпроводящих магнитов, при эвакуации накопленной энергии в случае срыва сверхпроводимости в каком-либо из элементов.

Особой задачей системы питания является обеспечение прецизионного соблюдения заданного закона изменения поля в дипольных магнитах и отношения градиентов полей в квадрупольных магнитах к полю диполей во всем динамическом диапазоне от 0 до 1.8 Тл с требуемой точностью, как правило, 0.001–0.01%.

Стандартный цикл изменения поля в дипольных магнитах Бустера имеет трапецеидальную форму с участками неизменного тока (“столами тока”) на уровне инжекции пучка в области малых токов и вывода пучка при максимальном поле. Фазы стола тока и роста тока сопрягаются переходными участками, изменяющимися по закону с отсутствием изломов во 2-й производной. Сверхпроводящий магнит – это идеальная индуктивность, а значит, при циклической работе в фазе завода тока напряжение на источнике должно быть максимальным, на столе тока – равным нулю, и при выводе тока в режиме рекуперации энергии напряжение будет максимально отрицательным. Такой режим работы источника с предельными перепадами напряжения и при этом с прецизионным выдерживанием значения тока требует специальных схемотехнических решений и глубокой проработки подсистем регулирования.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ТИПА ПИТ11-260

Прецизионный источник тока типа ПИТ11-260, предназначенный для питания сверхпроводящих структурных дипольных и квадрупольных магнитов ускорителя Бустера NICA импульсно-периодическим током амплитудой до 10 кА с относительной стабильностью отслеживания уровня тока 10^{-4} , выполнен на основе транзисторных преобразователей напряжения в комбинации с емкостным накопителем энергии на 6.1 МДж. Для обеспечения работы Бустера токи его структурных магнитов должны периодически изменяться с большой скоростью. При использовании сверхпроводящих магнитов мощность регулирующего источника является периодической переменной со значительной амплитудой и ничтожным средним значением (постоянной составляющей).

Предыдущее поколение источников тока магнитов ускорителей строилось на основе ведомых сетью тиристорных преобразователей. Скорость регулирования в них ограничена длительностью периода электрической сети, а переменная мощность транслируется в сеть, вызывая нарушение показателей качества электрической энергии.

Развитие мощных управляемых электрических вентилях – транзисторов с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT) и обновление способов регулирования вентилях преобразователей электричества позволяют перейти к более эффективному построению источников тока. Лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ разработала структуру нового источника и требования к нему. Согласно последним, источник должен:

а) использовать преимущества сверхпроводящей индуктивной нагрузки, работающей в циклическом режиме с фазами рекуперации энергии;

б) иметь улучшенные характеристики за счет использования современных технологий преобразования энергии с применением мощных и высокочастотных вентилях IGBT;

в) содержать накопитель энергии, поглощающий колебания энергии магнитов и разгружающий тем самым сеть общего пользования от низкочастотных колебаний.

Применение накопителя энергии отягощает источник. Тем не менее, оно было признано целесообразным по двум причинам. Колебания сетевой мощности мегаваттного диапазона порождают колебания сетевого напряжения (фликер), которые в любом случае должны быть снижены до предписанной в [2] величины. Существенней, однако, другое обстоятельство: источник питания магнитов ускорителя должен обеспечивать сверхвысокие показатели точности и стабильности, которые на несколько порядков превышают показатели стабильности напряжения сети общего пользования, предписанные тем же стандартом. Накопитель энергии, кроме устранения фликера, снимает также проблему проникновения возмущений из сети общего пользования от включения мощных двигателей, удаленных коротких замыканий и т.п. в цепи питания сверхпроводящих магнитов. Благодаря режиму рекуперации энергии из сверхпроводящих магнитов в накопитель энергии, осуществляемой источником на каждом цикле изменения поля в дипольных магнитах Бустера, обмен энергией с сетью сведен до незначительного уровня.

Научно-производственное предприятие “НПП ЛМ Инвертор” во взаимодействии с ЛФВЭ разработало и изготовило агрегат ПИТ11-260, а также дополнительные прецизионные источники коррекции тока в фокусирующих и дефокусирующих магнитах (ИП₂ и ИП₃ на рис. 1), обеспечивающие выполнение предписанных требований.

СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ТОКА

Схема включения источников тока и графики тока магнитов Бустера приведены на рис. 1 и 2, а основные параметры – в табл. 1.

Сверхпроводящие магниты L_m , L_f и L_d (см. рис. 1) соединены последовательно с ключами эвакуации энергии K_1 – K_4 . В нормальном состоянии ключи замкнуты и пропускают через себя ток. В случае детектирования внешней системой срыва сверхпроводимости ключ размыкается, и энергия, накопленная в магнитах, рассеивается на резисторах гашения поля, включенных параллельно ключам. Ключ эвакуации построен по

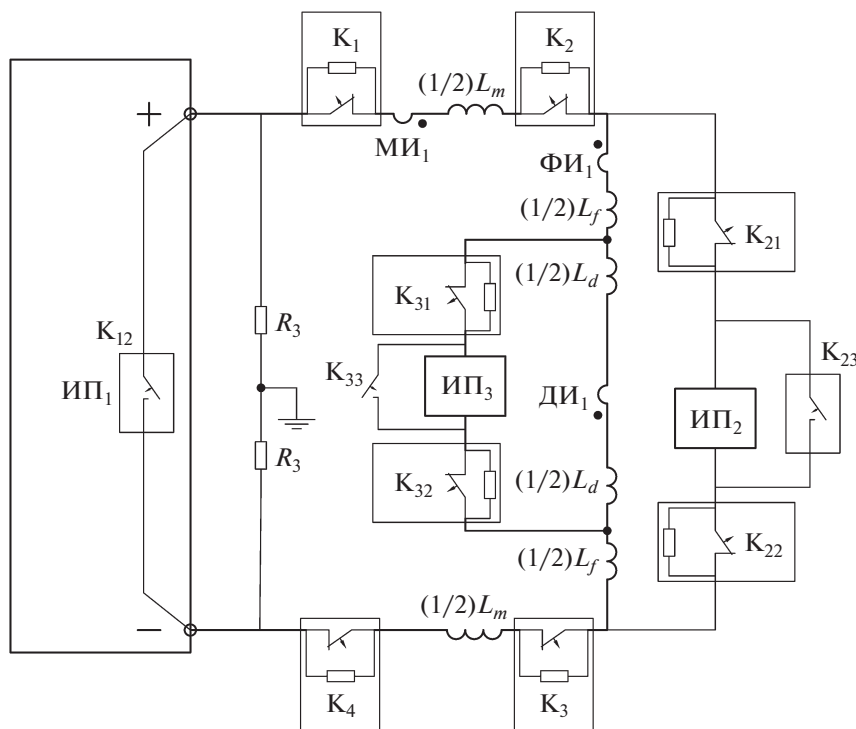


Рис. 1. Принципиальная схема системы питания Бустера. ИП – прецизионный источник тока; МИ – магнит дипольный измерительный; ФИ – фокусирующий измерительный квадрупольный магнит; ДИ – дефокусирующий измерительный квадрупольный магнит; К₁–К₄ – ключи эвакуации энергии.

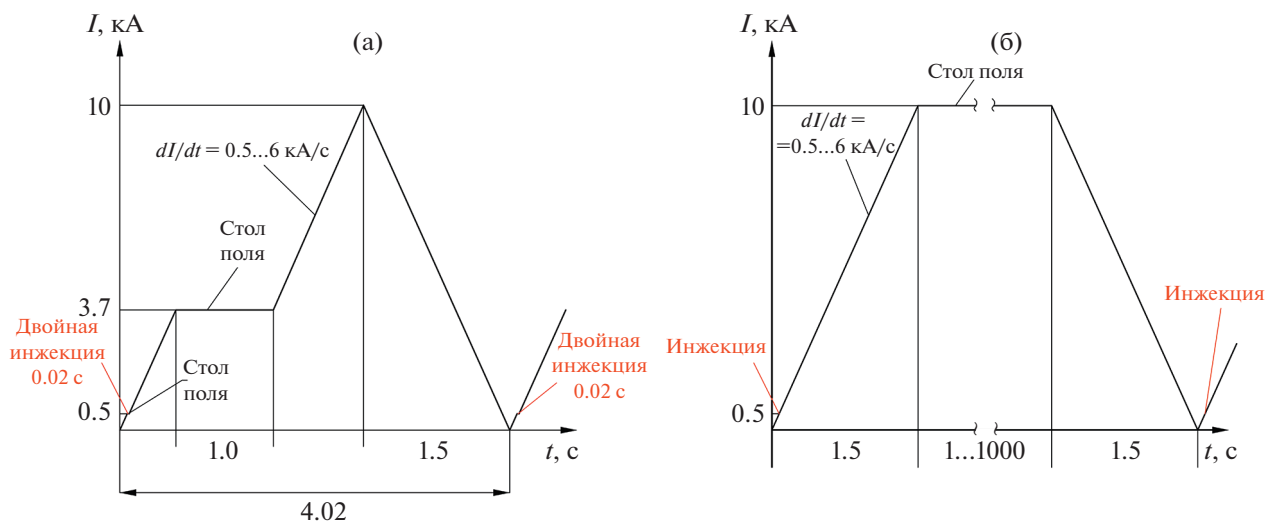


Рис. 2. Рабочие циклы основного источника питания ИП1: **а** – в составе инжекционной цепочки коллайдера NICA; **б** – при медленном выводе пучка из Бустера.

принципу тиристорно-конденсаторного коммутатора, основным силовым элементом которого служат четыре тиристора типа Т173-3200-12-74, включенные параллельно. Время размыкания ключа не более 200 мкс, время вывода энергии 0.5 с. Количество ключей и сопротивление резисторов гашения поля обеспечивают постоянную време-

ни вывода энергии 160 мс и ограничение напряжения на магнитах относительно “земли” при эвакуации до 500 В.

Требуемая точность отслеживания задания тока магнитов Бустера является экстраординарной и на 2-3 порядка превышает ту, которая предъявляется к обычным регулирующим преобразовате-

Таблица 1. Основные технические параметры ПИТ11-260

Параметр	Значение	Примечание
Входное питающее напряжение $U_{\text{н-15\%}}^{+10\%}$, кВ, на входных клеммах источника	0.38	
Максимальная мощность, кВт, потребляемая от сети, не более	500	
Максимальная мощность источника, МВт	2.86	
Максимальное выходное напряжение, В, источника не менее	± 260 dc	
Выходной ток, А, не менее ($I_{\text{макс}}$)	11 000 dc	
Индуктивность нагрузки, мГн	31	Штатный режим
	1–40	Наладочный режим
Относительная стабильность тока на участках его нарастания и спада	$2 \cdot 10^{-4}$	Должна обеспечиваться с момента инжекции тока $I = 500$ А и до конца стола тока (см. рис. 2)
Относительная стабильность тока на столе поля	$5 \cdot 10^{-5}$	Параметры цикла (см. рис. 2)
Пульсация выходного напряжения, мВ, на столе поля, пик–пик	≤ 215	При максимальном токе
	≤ 10	На полке инжекции
Диапазон установки выходного тока, % от $I_{\text{макс}}$	2–100	
Устойчивость к короткому замыканию	Да	
Режимы работы	Статический Динамический с $dI/dt = 0 \dots \pm 7$ кА/с	
Охлаждение	Воздушное принудительное (внутренние вентиляторы), жидкостное	
Вывод тока нагрузки из сверхпроводящих магнитов: – в циклическом режиме работы – при аварийном срыве сверхпроводимости	путем рекуперации энергии в накопитель энергии переводом источника в инверторный режим с одновременным введением резистора последовательно с нагрузкой (выполняется заказчиком)	
Частота следования циклов, Гц	0.25	
Минимальное количество токовых циклов без замены или ремонта каких-либо частей источника	$5 \cdot 10^6$	

лям электроэнергии, применяемым в электроприводах, электрохимии и других электротехнологиях. Вдобавок к этому прецизионность требуется не только в статических режимах, но и на интервалах нарастания и спада тока. При этом отягощающим обстоятельством является наличие точек излома в графиках изменения тока (см. рис. 2а, 2б). К требованиям по точности добавляются жесткие требования по фильтрации гармоник тока. Пульсации (шумы) источника не должны мешать работе измерительных, диагностических и управляющих систем Бустера. Весь этот комплекс условий вместе с требованием обеспечения продолжительной работы с циклически меняющимся током, замыкаемом в накопителе, определяют структуру силовой схемы источника и его системы регулирования.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ПИТ11-260

Современным базовым полупроводниковым прибором для регулируемых преобразователей электроэнергии является IGBT с управляемой прямой и неуправляемой большой обратной проводимостью. Четыре IGBT, соединенные в мостовую схему, образуют четырехполюсник с двумя портами: портом знакопостоянного напряжения (Direct Current – DC, переменные – u_d, i_d) и портом знакопеременного напряжения (Alternating Current – AC, переменные – u_a, i_a). Порт DC шунтируется сглаживающим конденсатором, а порт AC отделяется электрическим реактором (рис. 3а). Регулирование конверторного моста осуществляется путем широтно-импульсной модуляции (Pulse Width Modulation – PWM). Системное действие такого конвертора адекватно описывается усредненными значениями переменных u_d, i_d, u_a, i_a , которые являются непрерывными функциями и связаны друг с другом обыкновенными дифференциальными уравнениями. Функционально такой конвертор действует как регулируемый (авто)трансформатор (рис. 3б), в котором

$$\begin{aligned} u_a &= s u_d; \\ i_d &= s i_a, \end{aligned}$$

где $s(t)$ – регулируемый коэффициент передачи, равный заполнению цикла PWM; этот коэффициент устанавливается модулятором системы управления и может изменяться в диапазоне

$$-1 \leq s \leq 1.$$

Конвертор передает мощность между портами без потерь:

$$\forall t : u_a i_a \equiv u_d i_d$$

и является структурным блоком системы [3]. Его порт AC является четырехквadrантным, а порт

DC – двухквadrантным. Это свойство конвертора создает возможность двунаправленной передачи энергии: от накопителя в Бустер и от Бустера в накопитель, обеспечивая режим рекуперации энергии магнитов в накопитель на каждом этапе спада поля.

Транзисторный конвертор напряжения (Voltage Source Converter – VSC) естественным образом сопрягается с накопителем энергии емкостного типа. Для сопряжения достаточно присоединить к технологическому конденсатору порта DC дополнительную накопительную конденсаторную батарею. Напряжение $u_d(\cdot)$ при этом становится меняющимся в зависимости от отданной или принятой энергии. Однако это не препятствует правильному регулированию нагрузки, присоединенной к порту AC. Для получения требуемого напряжения нагрузки u_{az} необходимо только модифицировать передачу конвертора:

$$s(t) = \frac{u_{az}(t)}{u_d(t)}.$$

Необходимо, чтобы напряжение u_d не опускалось слишком низко:

$$\forall t : u_d(t) \geq u_{az}(t).$$

Для этого требуется, чтобы емкость накопителя C_d была достаточно велика. Именно такое естественное сопряжение регулирующего конвертора Бустера с накопителем энергии осуществлено в агрегате ПИТ11-260.

Конверторы нового поколения свободны от ограничения частоты переключений величиной частоты сети, которое было присуще ведомым сетью тиристорным конверторам. IGBT позволяет держать частоту переключений на уровне 3–4 кГц и даже 5 кГц. Тем самым существенно облегчается проблема фильтрации сопровождающих пульсаций, которые присущи как фазному регулированию (тиристорные конверторы), так и PWM (транзисторные конверторы). Однако из-за экстраординарных требований к пульсациям в системе питания Бустера такого повышения основной частоты оказалось недостаточно. Новая схема, позволяющая эффективно снизить пульсации, – это модульная многоуровневая система (ММС). ММС распространилась на конверторы электроприводов после изобретения Питера Хэммонда (Р. Hammond, [4]), а затем – после изобретения Райнера Марквардта (R. Markwardt, [5]) – и на конверторы передач постоянного тока. ММС Хэммонда и Марквардта являются высоковольтными. В них некоторое число N элементарных конверторов соединяются последовательно. Действуя с регулярным сдвигом фазы PWM на угол $2\pi/N$, последовательно включенные конверторы обеспечивают одновременно снижение ступени модуляции и

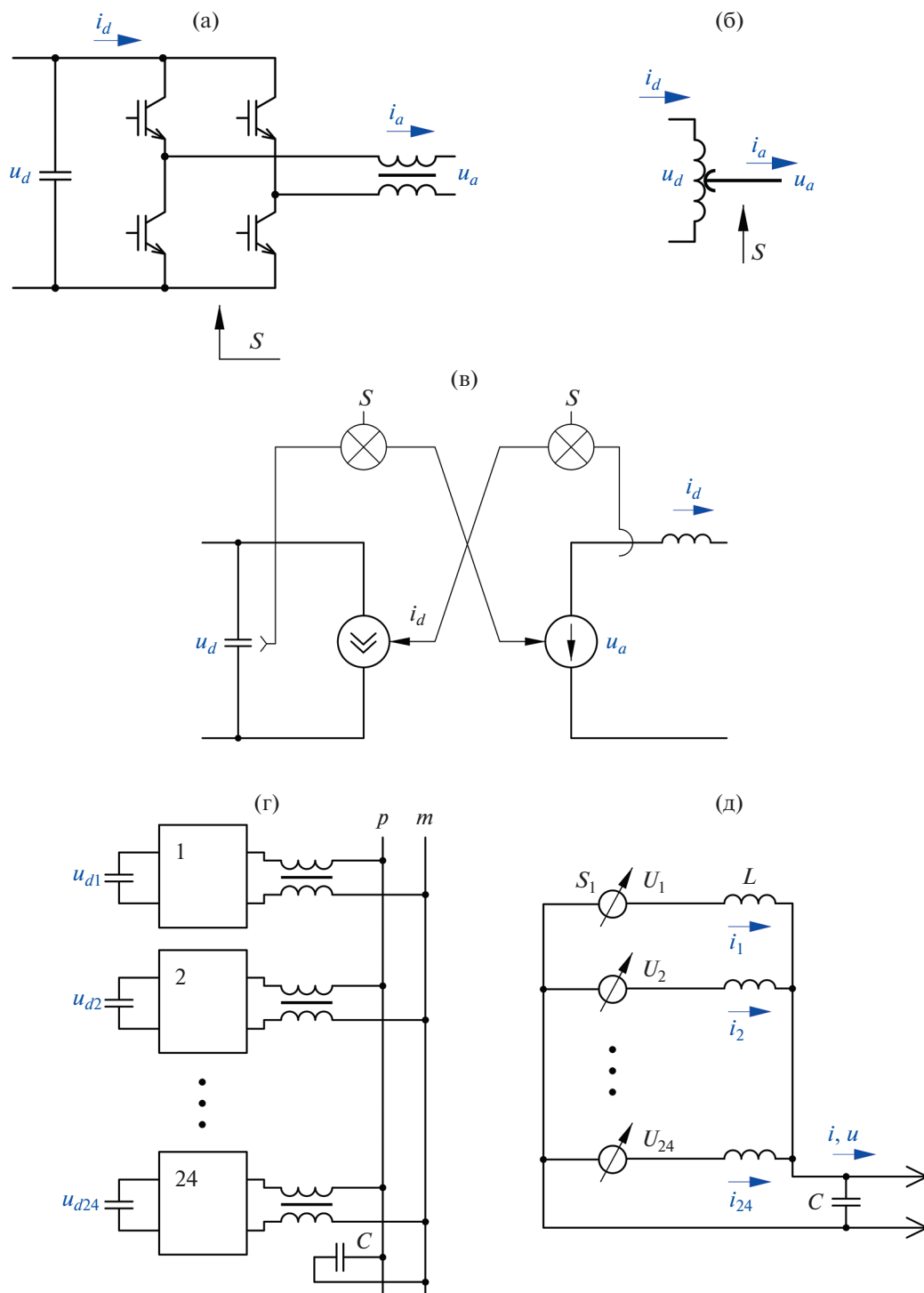


Рис. 3. Мостовая схема конвертора из четырех IGBT (а); функциональное представление регулируемым (авто)трансформатором (б); функциональное представление парой зависимых источников тока/напряжения (в); параллельная модульная многоуровневая система (г); схема замещения ММС (д).

N раз и такое же повышение результирующей частоты модуляции.

Система питания Бустера является сильноточной и низковольтной. Прямое применение ММС [4, 5] в ней невозможно. Поэтому для ПИТ11-260

была разработана параллельная ММС по структуре, представленной на рис. 3г. В ней

$$L \frac{di_k}{dt} = u_k - u, \quad k = 1, 2, \dots, N (N = 24, \text{ см. рис. 3г}).$$

Сложение дает

$$\frac{L}{N} \frac{di}{dt} = u_s - u,$$

где

$$u_s = \frac{1}{N} \sum u_k.$$

Каждое напряжение $u_k(\cdot)$ имеет ступень модуляции $u_d = 430$ В. В сумме u_s ступень снижается пропорционально N , как и при последовательном включении конверторов. В отличие от последнего, в параллельной ММС из-за необходимости поддержания малого смещения нейтрали удается реализовать кратность понижения ступени, равную только $N/2$.

ПИТ11-260 выполнен из $N = 24$ параллельных ячеек.

Период модуляции ячейки равен $2h = 2 \cdot 48$ мкс (h – период PWM).

Частота переключения транзисторов ячейки при этом $1/(4h) = 5.2$ кГц.

Шаг регулярного сдвига модуляции равен $h_0 = \frac{2h}{N/2} = 8$ мкс.

Результирующая частота модуляции при этом $1/h_0 \approx 125$ кГц.

Ступень результирующей PWM равна $430 \text{ В}/12 \approx 36$ В, а амплитуда основной гармоники $(1/2)36(4/\pi) = 22.9$ В.

Резонансная частота фильтра $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1.33$ кГц дает кратность подавления гармоник $(125/1.33)^2 \approx 8.9 \cdot 10^3$.

Расчетная амплитуда основной гармоники PWM на выходе ПИТ11-260 равна $22.9/(8.9 \cdot 10^3) = 2.6$ мВ.

Таким образом, применение ММС позволяет получить приемлемый уровень пульсаций уже при умеренной фильтрации (собственный период фильтра ≈ 0.75 мс).

Разбиение на большое количество ячеек, помимо решения задачи фильтрации, дает также решение сопутствующей задачи – обеспечение циклоустойкости IGBT. Из-за малой массы и малой теплоемкости кристаллы транзисторов весьма чувствительны к циклической нагрузке, а условия циклирования при питании Бустера гораздо более жесткие, чем в других тяжелых циклических применениях (период ≈ 4.5 с в сравнении с периодом 50–150 с в преобразователях, устанавливаемых в городском транспорте). Для обеспечения требуемого срока службы в ПИТ11-260 нагрузка IGBT снижена более чем вдвое. В каждой ячейке установлено два IGBT на 600 А, 1200 В. При этом средняя температура кристалла

транзистора снижена до $\approx 73^\circ\text{C}$, а циклический перепад температур – до $\approx 19^\circ\text{C}$.

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Современные накопители энергии, как правило, выполнены на литий-ионных аккумуляторах или на молекулярных “суперконденсаторах” [6]. Однако по результатам выполненных расчетов для ПИТ11-260 предпочтительным оказалось использование серийных электролитических конденсаторов. При длительности цикла нагрузки около 4 с и частоте следования циклов 0.25 Гц определяющим фактором является внутреннее сопротивление накопителя, т.е. рассеиваемая мощность, что приводит к неприемлемому ухудшению показателей при использовании аккумуляторов и “суперконденсаторов”. Электролитическая батарея определяется исключительно емкостью и в рассматриваемых условиях оказывается предпочтительной. В накопителе ПИТ11-260 используются конденсаторы на напряжение 450 В и емкостью 15 мФ. Минимальная емкость конденсаторной батареи определяется перепадом энергии магнитов Бустера ΔE_{Bu} и перепадом напряжений конденсаторов от $u_{dmx} \approx 450$ до $u_{dmn} \approx 280$ В:

$$C_d(u_{dmx}^2 - u_{dmn}^2) = 2\Delta E_{Bu}.$$

В ПИТ11-260 конденсаторная батарея разделена на блоки соответственно блокам конверторов, каждой конверторной ячейке сопоставлена своя ячейка накопителя. Для повышения надежности каждая комплексная ячейка “конвертор-накопитель” работает независимо: отказ в одной ячейке не вызывает повреждений и отключений других ячеек. Предусмотрено резервирование ячеек по принципу $(N - 1)$, а также дополнительный резерв на выход из строя отдельных конденсаторов и на старение конденсаторов. С учетом всех запасов установлено 4032 конденсатора – по 336 конденсаторов на каждую линию “конвертор-накопитель”. Общая энергоемкость составила 6.1 МДж. Разделение на блоки сняло проблему больших токов короткого замыкания системы постоянного тока с мощным накопителем – в расщепленной структуре все возможные короткие замыкания локализованы.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления ПИТ11-260 построена на основе комплекса аппаратно-программных средств Unicon, разработанного ООО “НПП ЛМ Инвертор”. Комплекс был разработан для управления высоковольтными преобразователями электроприводов и высоковольтными сетевыми фильтрокомпенсирующими преобразователями. Отличительные особенности Unicon:

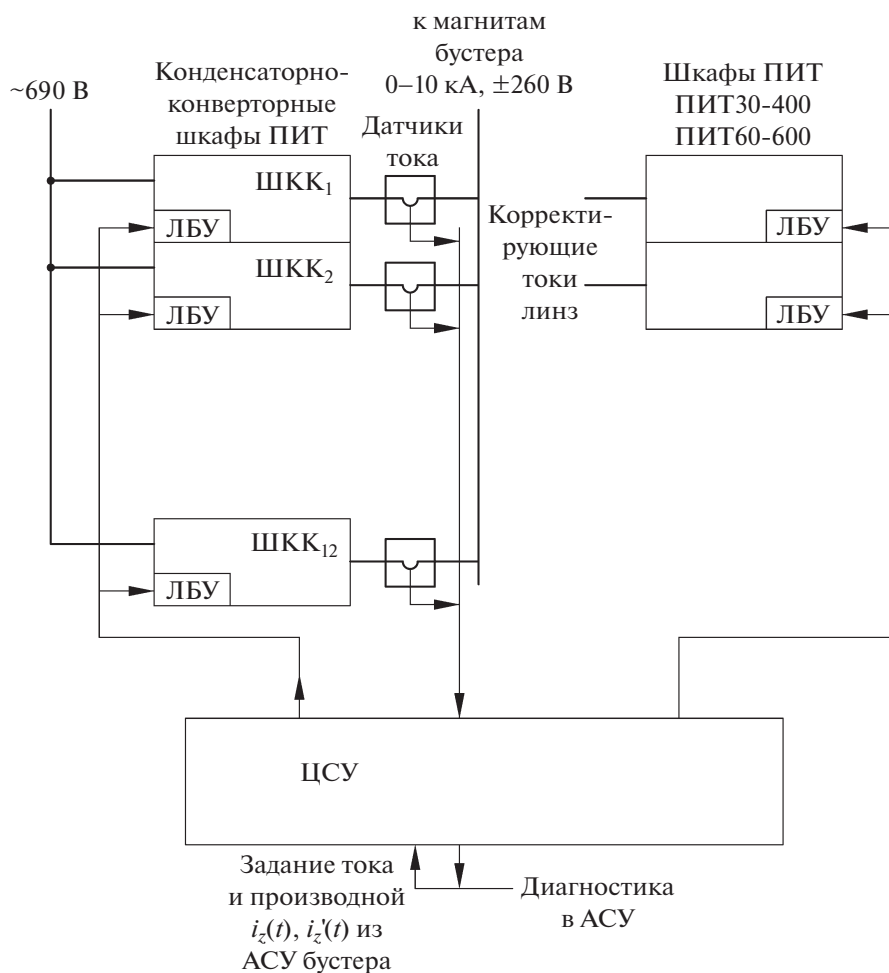


Рис. 4. Структура системы питания Бустера с основным и двумя корректирующими источниками. ЛБУ – локальный блок управления; АСУ – автоматизированная система управления; ШКК – шкаф конденсаторно-конверторный; ЦСУ – центральная система управления; ПИТ – прецизионный источник тока.

– использование встроенных аналого-цифровых преобразователей с оптоволоконными каналами связи со всеми применяемыми датчиками и драйверами;

– применение специального разделения функций между сигнальными процессорами (СП) и программируемыми логическими матрицами (ПЛМ), что обеспечивает высокую скорость расчетов и короткий интервал повторения расчетов;

– применение системы собственного питания системы управления с высокочастотной токовой петлей и одновитковыми трансформаторами вторичных источников питания, обеспечивающими ничтожность проходных емкостей.

Эти свойства Unicon позволили обеспечить высокую помехозащищенность ПИТ11-260.

Система управления ПИТ11-260 состоит из локальных блоков управления (ЛБУ) и центральной системы управления (ЦСУ). Конденсаторно-конверторные блоки ПИТ11-260 размещены в 12-ти

конденсаторно-конверторных шкафах (ШКК₁–ШКК₁₂, рис. 4). Каждый из них содержит локальный блок управления (ЛБУ₁–ЛБУ₁₂). Помимо них в ранге локальных действуют также контроллеры малых корректирующих источников ИП60-600 и ИП30-400 (ИП₂, ИП₃ на общей схеме питания Бустера на рис. 1).

ЦСУ принимает от циклозадающей аппаратуры (ЦЗА) Бустера текущие значения токов основного контура и корректирующих источников $i_z(t)_{0,1,2}$. Наряду с заданиями токов, для обеспечения прецизионности из ЦЗА пересылаются также производные токов заданий $i'_z(t)_{0,1,2}$. В ЦЗА возвращается требуемая диагностическая информация.

Широтная модуляция и исполнительный регулятор напряжения реализуются в каждом из 12-ти ШКК его собственным ЛБУ. Каждый из ШКК действует как самостоятельный регулируемый источник напряжения. ЦСУ определяет за-

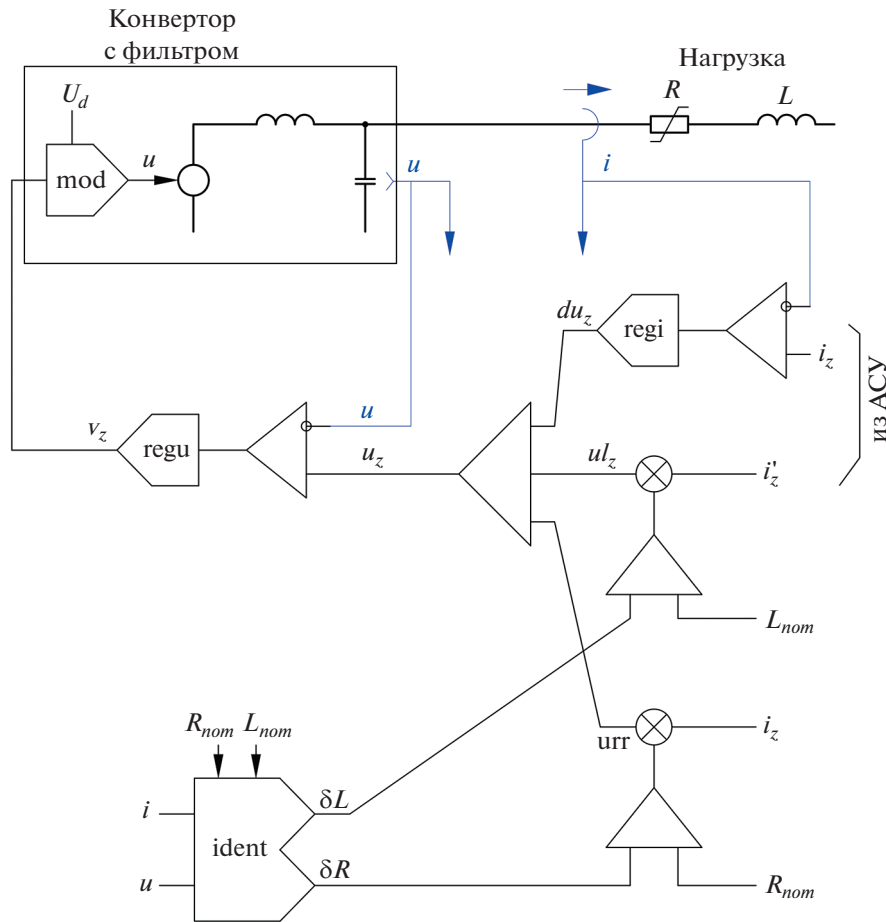


Рис. 5. Система регулирования тока магнитов с подчиненным регулятором напряжения regu (slave) с доминирующим регулятором regi (master) и подпором с блоком идентификации (коррекции) параметров.

дание напряжений ШКК, а также задание напряжений малых корректирующих источников. Период обновления заданий равен шагу сдвига модуляции модульной многоуровневой системы $h_0 = 8$ мкс.

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ

Программа управления системой “конвертор-накопитель”, осуществляемая ЦСУ, состоит из двух отдельных и различных ветвей. Основная ветвь – это программа регулирования тока Бустера. Она действует в быстром темпе с периодом повторения в микросекундном диапазоне ($h_0 \approx 8$ мкс), обеспечивая прецизионное и динамичное исполнение поступающего задания тока магнитов. Действие ее проявляется далее как независимая периодическая переменная – мощность $p_{bu}(t)$. В силу сверхпроводимости магнитов среднее значение $p_{bu}(t)$ равно нулю на цикле

$$\Delta E_{bu} = \int_T p_{bu}(t) dt = 0.$$

Из-за наличия несверхпроводящих частей это равенство не является строгим; имеются небольшие потери проводимости $p_r(t)$, которые компенсируются малым подзарядным выпрямителем системы. Вторая ветвь – вспомогательная служебная программа ЦСУ – это программа управления подзарядом накопителя. К этой программе не предъявляются сколь-нибудь сложные требования. От нее требуется лишь, чтобы напряжение накопителя не поднималось выше допустимого уровня (≈ 450 В) и не опускалось ниже необходимого для отслеживания тока минимального уровня (≈ 260 В). Здесь может быть применен примитивный разностный регулятор, в котором ток подзаряда корректируется дискретно, по измеряемым в началах проходящих циклов рассогласованиям напряжений (энергий). Такой регулятор можно построить по аналогии с обычным пропорционально-интегральным регулятором:

$$i_{s_{k+1}} = K \Delta U d_k + \frac{1}{N \tau} \sum \Delta U_m.$$



Рис. 6. Внешний вид ПИТ11-260, установленного на цокольном этаже Бустера.

Здесь $\Delta U d_k$ – текущее рассогласование, а $\sum \Delta U_m$ – накапливающаяся сумма (аналог интеграла); τ – постоянная времени регулятора. Такой регулятор обеспечивает апериодическую сходимость и астабизм. Темп его лежит в секундном диапазоне и исчисляется несколькими циклами.

Обычным средством для формирования тока в индуктивности было бы применение пропорционально-интегрального регулятора тока вида [7]

$$u_z = \left(k + \frac{1}{p\tau} \right) \Delta i. \quad (1)$$

В этом выражении

$$\Delta i = i_z - i,$$

где i_z – задание тока; i – измеренный ток, а u_z – задание напряжения усилителю-повторителю, который на силовом уровне повторяет сигнал систе-

мы управления с некоторой задержкой и некоторой погрешностью.

Интегральная часть регулятора обеспечивает астабизм, т.е. устранение ошибки в установившихся режимах, а пропорциональная часть обуславливает устойчивость и длительность переходных процессов [7]. Специфичность требований к источникам питания магнитов Бустера (см. табл. 1) не позволяет обойтись таким простым средством. Для динамичного и точного отслеживания задания тока с угловыми точками смены производной требуется, чтобы u_z в (1) изменялось бы в полном диапазоне при приращении Δi на величину $\approx 10^{-4}$. Требуемые для этого значения коэффициента усиления k нереализуемы из-за шумов. Положение не улучшает добавление в (1) дифференциальной составляющей. Таким образом, оказывается неизбежным переход к составной двухконтурной системе с подчиненным регулятором напряжения (система master-slave, рис. 5).

В этой системе динамичность улучшается при умеренном коэффициенте усиления по току путем применения подпора выхода регулятора тока reg_i напряжением:

$$u_z = du_z + Li'_z + Ri_z. \quad (2)$$

Для определения напряжения подпора (2), помимо i_z и i'_z , используются значения индуктивности L и сопротивления R . Параметры L , R известны лишь с ограниченной точностью и могут несколько изменяться в процессе работы. Поэтому в регуляторе требуется дополнительный блок – блок идентификации $ident$ [8, 9]. По измеренным переменным $i(t)$, $u(t)$ блок $ident$ определяет поправки к представленным предполагаемым значениям L_{nom} , R_{nom} :

$$L = L_{nom} + \delta L,$$

$$R = R_{nom} + \delta R.$$

Блок $ident$ действует перманентно и устраняет не только первоначальную погрешность, но и медленные изменения R , L при работе.

РЕАЛИЗАЦИЯ

На рис. 6 представлен внешний вид ПИТ11-260.

На рис. 7 показан вид шкафа управления источником тока (ШУПТ) ПИТ11-260. ШУПТ представляет собой отдельно стоящий шкаф с установленной внутри стандартной блочной универсальной конструкцией (“Ripac Vario”, Rittal) с размещенными в ней платами управления преобразователем. На передней двери ШУПТ установлены монитор с сенсорным экраном и панель местного управления. Последняя необходима для задания режимов работы преобразователя и управления им в местном режиме. На монитор



Рис. 7. Внешний вид шкафа управления источником тока: а – вид снаружи; б – вид изнутри.

выводится информация о состоянии преобразователя, текущей конфигурации силовой схемы, настройках регулятора, сообщениях о сработавших защитах и различные предупреждения (например, предупреждение о неправильно собранной силовой схеме) и т.д. Внутри ШУПТ установлен блок управления ЦСУ, внешний вид которого показан на рис. 8.

По структуре управления ПИТ11-260 разделен на группу из трех “логических” преобразователей, каждый из которых состоит из четырех ШКК. Каждым таким “логическим” преобразователем управляет свой блок управления группой преобразователей (БУГП), входящий в состав ЦСУ и содержащий две платы управления: плату цифрового сигнального процессора (ЦСП) и плату обмена данными с ЛБУ. Источники токодобавки ПИТ06-60Д и ПИТ03-40Д работают независимо друг от друга, но управляет ими один БУГП.

Обмен данными между ЛБУ и ЦСУ идет по оптическим линиям связи на скорости 100 Мбит/с.

Измерение мгновенных значений электрических параметров работы ПИТ11-260 (входные и выходные напряжения и токи, напряжения на конденсаторных батареях и т.д.) осуществляется на основе использования 16-битных АЦП фирмы Analog Devices и 24-битных АЦП фирмы Texas Instruments с последующим кодированием данных в ПЛИС Altera и передачей их в систему управления по оптоволоконной связи на скорости 50 Мбит/с. Дальнейшая обработка измеренных значений осуществляется платами ЦСП ЦСУ. Внешний вид платы ЦСП/ПЛМ приведен на рис. 9. На плате ЦСП/ПЛМ, установленной в ЦСУ ПИТ11-260, применена связка 32-битного двухъядерного микроконтроллера TMS320F28377D фирмы Texas Instruments и ПЛИС Artix-7 фирмы XILINX. На микроконтроллер возложены задачи

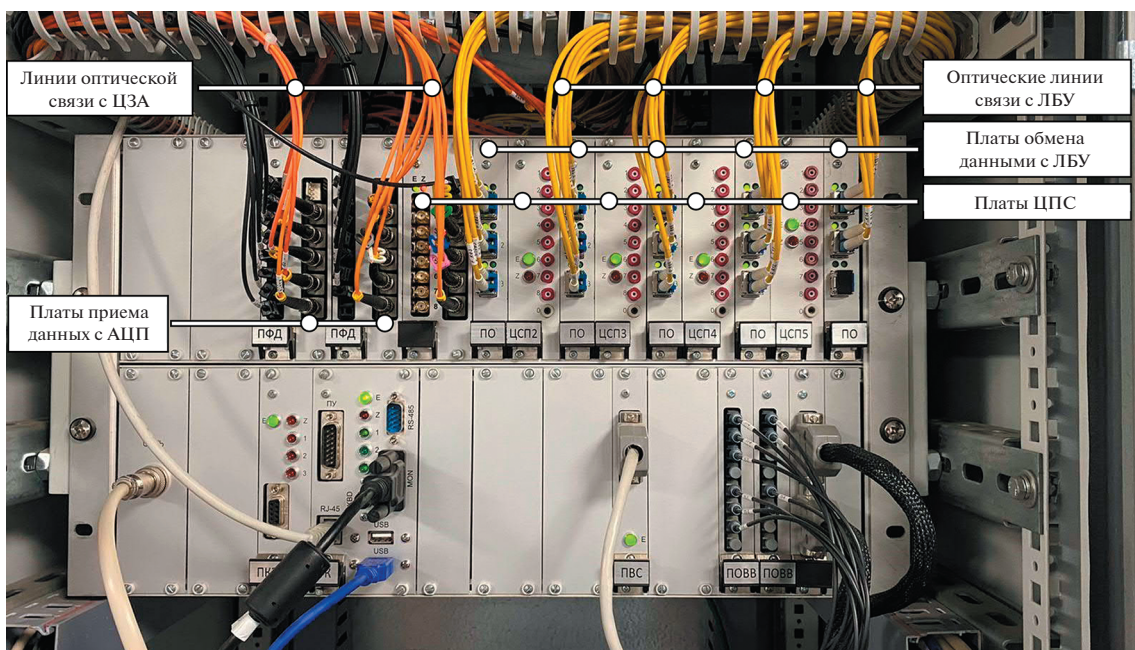


Рис. 8. Внешний вид блока управления ЦСУ. ЛБУ – локальный блок управления; ЦЗА – циклозадающая аппаратура; ЦСП – цифровой сигнальный процессор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

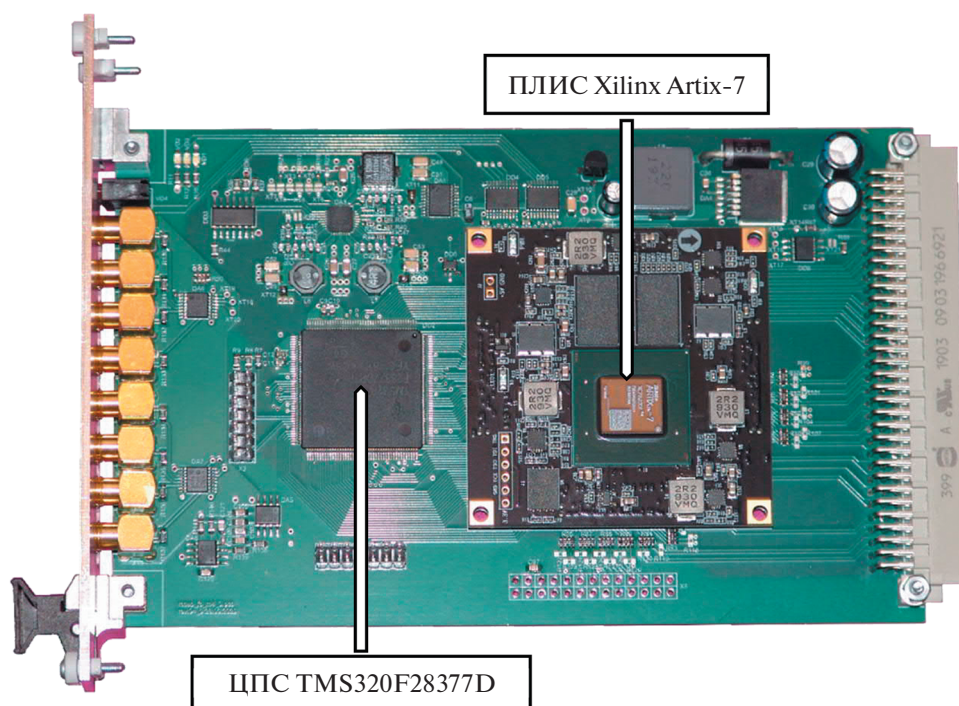


Рис. 9. Внешний вид платы ЦСП/ПЛИМ.

по управлению режимами работы и защитами преобразователей, расчету регуляторов тока и обработке данных, поступающих из локальных блоков управления. В ПЛИС реализованы различные периферийные блоки, отвечающие за прием

и ускоренную обработку данных с плат АЦП, межплатный обмен внутри блока управления ЦСУ и т.д. Использование ПЛИС для ускорения обработки данных с плат АЦП позволило проводить расчеты регулятора тока с шагом по времени 8 мкс.

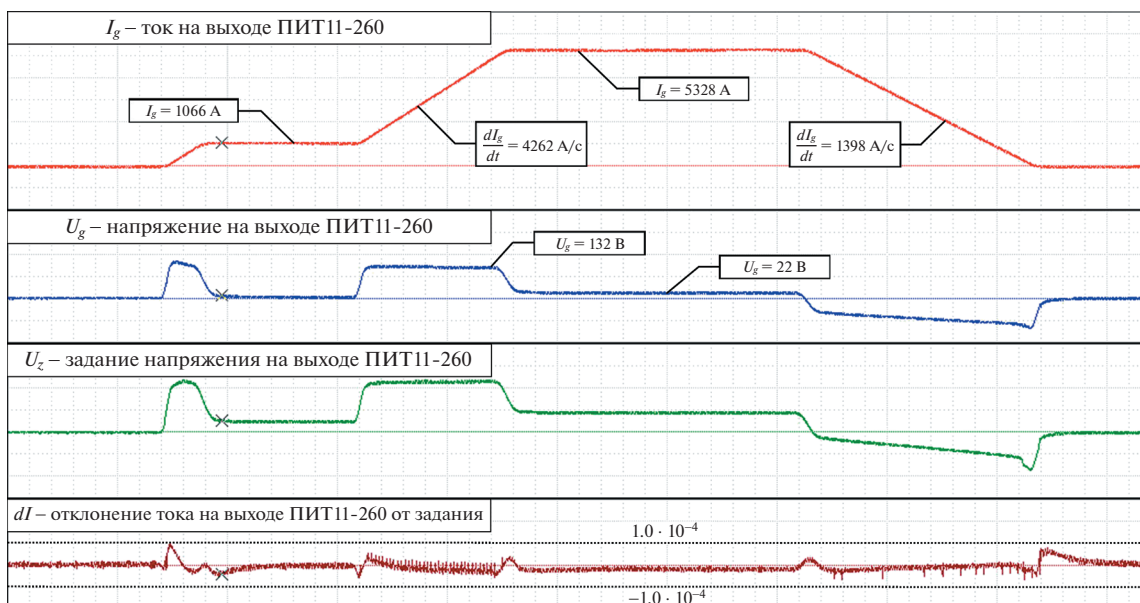


Рис. 10. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в сеансе работы Бустера. Один цикл.

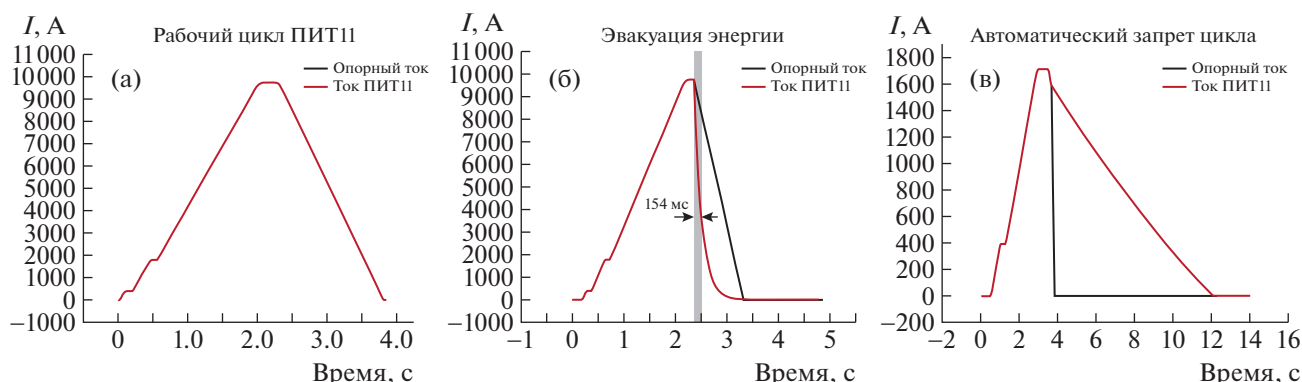


Рис. 11. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в штатном и аварийных режимах: а – рабочий цикл; б – технологический режим вывода тока с эвакуацией энергии из магнитов (постоянная времени 154 мс при расчетной величине 160 мс); в – вывод тока с возвратом энергии в емкостный накопитель.

Задание формы и амплитуды выходного тока осуществляется с внешней циклозадающей аппаратуры (ЦЗА). ЦЗА формирует синхроимпульс цикла “STROBE” и 6 опорных сигналов, каждый из которых состоит из двух серий цифровых импульсов, соответствующих росту (“СЕРИЯ +”) и уменьшению (“СЕРИЯ –”) задаваемого параметра. Для обеспечения помехозащищенности передача задания из ЦЗА в ЦСУ идет по оптическим линиям связи.

ЦСУ позволяет осуществлять работу преобразователя на нагрузку в любой конфигурации силовых шкафов. Это необходимо в случае вывода одного или нескольких силовых преобразователей из работы для проведения плановых работ по ремонту и/или техническому обслуживанию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

До начала работы на сверхпроводящие магниты выполнен цикл работы источника на эквивалентную нагрузку: проведены первичная настройка регулятора тока ПИТ11 и полноценные испытания ключей эвакуации с номинальным током. В первом технологическом сеансе Бустера в декабре 2020 г. были проведены пусконаладочные работы.

На рис. 10 приведена осциллограмма работы ПИТ11-260 с типовым циклом в сеансе работы Бустера, где I_g – ток на выходе ПИТ11-260, U_g – напряжение на выходе ПИТ11-260, U_z – задание напряжения на выходе ПИТ11-260 и dI – отклонение тока на выходе ПИТ11-260 от заданного значения.

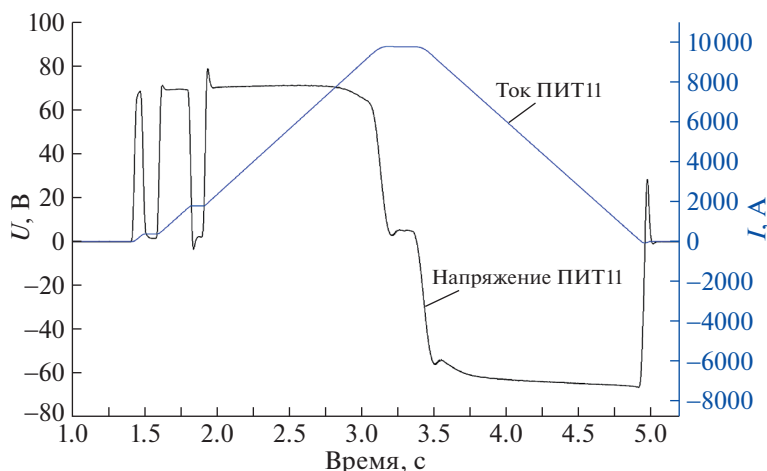


Рис. 12. Проектный цикл источника ПИТ11 Бустера в составе инжекционной цепи коллайдера NICA.

Максимальное напряжение на выходе источника составляет 132 В при скорости нарастания тока 4262 А/с. Максимальное отклонение тока от задания не превышает $1.0 \cdot 10^{-4}$ и наблюдается в угловых точках, где происходит смена производной задания выходного тока. При постоянном токе нагрузки (так называемый “стол тока”), равном 5328 А, напряжение на выходе преобразователя составляет всего 22 В. Отклонение тока от задания при этом меньше чем $5.0 \cdot 10^{-5}$. Осциллограммы работы ПИТ11-260 в штатном и аварийных режимах приведены на рис. 11, где показан вывод энергии из магнитов после размыкания ключей гашения поля (рис. 11б) и путем рекуперации энергии в накопитель за счет действия ПИТ11-260 (рис. 11в).

29 декабря 2020 г. был получен проектный цикл Бустера с максимальным током 9.7 кА и скоростью роста поля 7 кА/с (рис. 12). На осциллограмме напряжения прослеживаются эффекты насыщения магнитопроводов в области больших токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрегат ПИТ11-260 был введен в работу и успешно прошел испытания в ходе сеанса работы Бустера в декабре 2020 года. В ходе сеанса подтвержден высокий уровень функциональности, обеспеченный интеллектуальными схемотехническими решениями и новой конверторной техникой с IGBT. Применение встроенного накопи-

теля существенно снизило издержки по созданию сетевой инфраструктуры, сняло пульсирующую нагрузку сети и уменьшило ее искажения.

Совокупность принятых решений при создании оборудования системы питания сверхпроводящих магнитов Бустера и, прежде всего, источника ПИТ11-260 позволили построить высокоэффективную прецизионную преобразовательную энергосистему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex. Dubna, 2015.
2. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
3. Мустафа Г.М. // Электричество. 1987. № 2. С. 23.
4. Hammond P. US patent 5625545A. Опубл. 29.04.1997.
5. Marquardt R. Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors // Publication number DE10103031 (DE). 25.07.2002.
6. DIN EN 62391-1-2016. Fixed electric double-layer capacitors for use in electric and electronic equipment. Part 1: Generic specification (IEC 62391-1: 2015).
7. Смит О.Дж. Автоматическое регулирование. Пер. с англ. / Под ред. Е.П. Попова. М.: ГИФМЛ, 1962.
8. Калман Р., Фалб П., Арбив М. Очерки по математической теории систем. Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Мир, 1971.
9. Эйххофф П. Основы идентификации систем управления / Пер. с англ. М.: Мир, 1975.