

ПРЕЦИЗИОННАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ГРУПП МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ LEPTA

В. И. Каплин, В. Н. Карпинский, А. Ю. Рудаков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Сильноточные магниты ускорителей заряженных частиц, как правило, запитаны от индивидуальных прецизионных источников. В статье приводится вариант одновременного питания сразу нескольких групп магнитных элементов от одного источника с использованием вспомогательных токовых шунтов на примере позитронного накопителя LEPTA. Приведены данные по использованию линейного шунта и ключевого преобразователя. Рассмотрен вариант устройства системы питания с трансформацией отобранной энергии в аккумуляторную батарею и питанием от нее прецизионных источников питания корректирующих магнитов LEPTA. Приведен канал индивидуального цифрового преобразования элемента системы питания, позволяющий совместно с реверсивным прецизионным токовым шунтом строить эффективные интеллектуальные сбалансированные системы питания.

An individual power supply source is usually used for each group of the identical magnetic elements in the accelerators of charge particles. We discuss the power supply and control system on the basis of additional current shunts applied for simultaneous supply of several groups of magnets in the positron storage ring LEPTA. Data on the use of the shunt of the linear and key converter are provided. The option of the device of a power supply system with transformation of the recuperated energy in the storage battery and supply from it of the precision power supply sources of the correcting magnets of LEPTA is considered. The channel of individual digital transformation of power supply system elements is given which allows one to build together with a reverse precision converter effective intellectual balanced power supply systems.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Накопитель низкоэнергетичных позитронов LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) представляет собой инжекционно-накопительный комплекс, предназначенный для получения и накопления позитронов, генерации потока атомов позитрония и постановки экспериментов с ним. Установка LEPTA состоит из инжектора позитронов, накопителя с системой электронного охлаждения и комплекса детекторов для проведения физических экспериментов.

Питание магнитной системы LEPTA включает в себя три источника стабильного тока (ИСТР) [1]. Два питают все соленоиды накопителя, третий магнитную систему инжектора позитронов. Параметры ускорителя предполагают довольно близкие токи в соленоидах магнитной системы, находящиеся в диапазоне 650–800 А при изменении активного сопротивления соленоидов в диапазоне 3–15 мОм. Целесообразно запитать группы соленоидов последовательно, а для выравнивания полей применять три токовых шунта. Еще

два шунта необходимы для отбора части тока от каждой половины септума независимо для настройки горизонтального смещения пучков в септуме. Значения амплитуд токов и напряжений магнитной системы накопителя и магнитной системы инжектора сведены в таблицу. Общая энергоёмкость установки LEPTA составляет ~ 500 кВт. Схема питания магнитной системы приведена на рис. 1.

Для устойчивой циркуляции электронного пучка охлаждения и управления прецизионными процессами совмещения и разделения позитронного и охлаждающего пучков долговременная точность установки токов питания магнитов должна быть не хуже 0,05 %.

Режим работы энергосистемы — статический при работе таких узлов, как токовые шунты-регуляторы, системы подавления пульсаций (активные фильтры), источники питания корректирующих обмоток магнитной системы ускорителя. При этом необходимо учитывать переходные процессы, обусловленные реактивными элементами системы,

Расчетные величины токов возбуждения элементов накопителя LEPTA

Магнитный элемент LEPTA	Ток в элементе (при $I_{\text{ИСТР}} = 740$ А), А	Напряжение на элементе (при $I_{\text{ИСТР}} = 740$ А), В	Ток шунта, А
Короткий тор 1	740	2,5	—
Короткий тор 2	740	2,5	—
Септумный соленоид	663	24	—
Септум	543	0,75	0–120
		0,75	0–120
Прямой соленоид	680	10	0–60
Длинный тор 1	690	7,7	0–50
Длинный тор 2	690	7,7	0–50

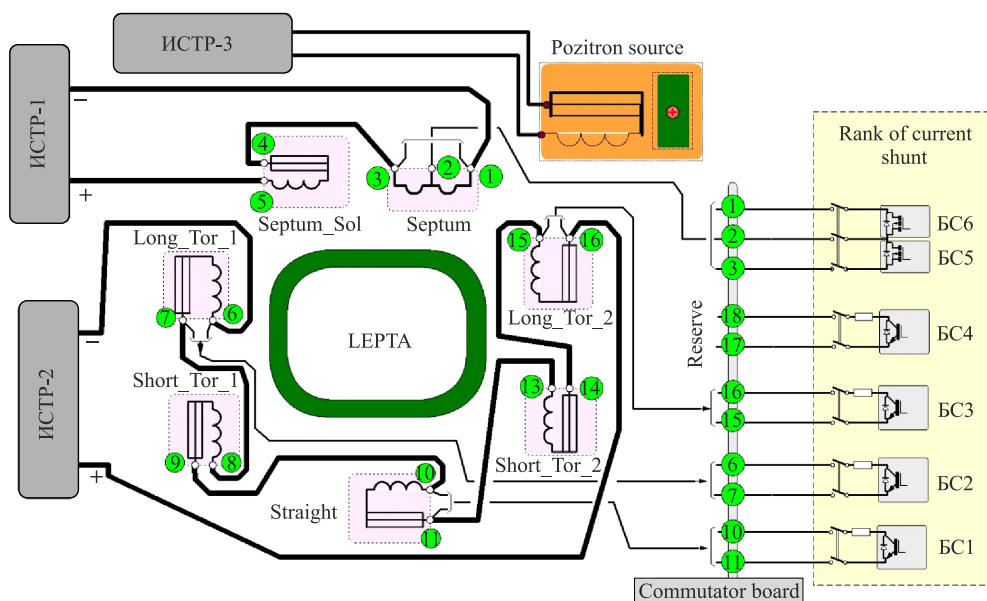


Рис. 1. Схема питания структурных магнитных элементов LEPTA

включая динамические индуктивности нагрузок, диапазон которых 0,1–1 мГн, емкости пассивного фильтра каждого агрегата питания, подбираемые при наладке контура питания конкретного потребителя, составляющие 0,001–0,08 Ф.

Дополнительная особенность энергосистемы установки LEPTA проявляется в специальной конструкции магнитной системы, когда внутри септумного соленоида и позитронной ловушки располагаются металлические узлы электрических и вакуумных устройств ускорителя. Корпуса этого оборудования под влиянием температурных и пондеромоторных эффектов могут замкнуться на отдельных участках соленоидов, что приводит к непрогнозируемым процессам с неуправляемым энерговыделением. Эти моменты обязательно надо учитывать при разработке шунтов-регуляторов.

АНАЛОГОВЫЕ ТОКОВЫЕ ШУНТЫ

Существует широкий выбор силовой полупроводниковой техники и элементов, работающих в ключевом режиме, с токами 100, 300 А и более и с высокими рабочими напряжениями вплоть до 1700 В. Для выбора приборов, способных работать в линейном режиме, надо учитывать специфические характеристики элементов. Для решения поставленной задачи были выбраны современные силовые ключевые элементы. За основу силовых регулирующих элементов шунтов с рабочим напряжением более 5 В взят IGBT-транзистор типа GA200SA60U и для шунтов септума с рабочим напряжением менее 1 В MOSFET-транзистор типа IRFP2907 с очень низким сопротивлением открытого канала [2, 3]. При разработке схемотехнических решений блоков и узлов шунтов учитывались следующие моменты:

- при штатных включениях и отключениях систем питания и в процессе оптимизации работы ускорителя возникают режимы, при которых можеткратно превышать напряжение на магнитных элементах,
- сопряжения управляющей и силовой электроники шунтов с энергонасыщенным импульсным и высоковольтным оборудованием ускорителя.

Разработанная схема регулирования и защит с силовым блоком приведена на рис. 2.

В основе силовой части схемы лежит транзистор VT, соединенный с нагрузкой через автоматический выключатель SP, и балластный резистор R_6 , несущий функции ограничения максимального тока в аварийных режимах и частично разгружающий VT по выделяемой мощности. Величина R_6 оптимизируется для выбранной рабочей токовой точки за счет переключения (на схеме не показаны). Помимо этого R_6 обладает также и индуктивной составляющей на уровне 20 мкГн, способствующей ограничению пиковых аварийных токов. Дополнительную защиту силовой части регулятора от мощных импульсных ударов осуществляет демпфирующая высокочастотная емкость C_d . Диод VD предназначен для защиты от появления на выходных зажимах напряжения обратной полярности.

Устройство снабжено каналом автоматического включения охлаждающего вентилятора силового элемента при достижении им температуры 45 °С. Силовой элемент токового шунта защищен от возникновения перенапряжений в силовых цепях (VS3), перегрева радиатора VT свыше 60 °С, перегрузки VT по току и нештатных режимов электроники при просадках питания собственных нужд регулятора.

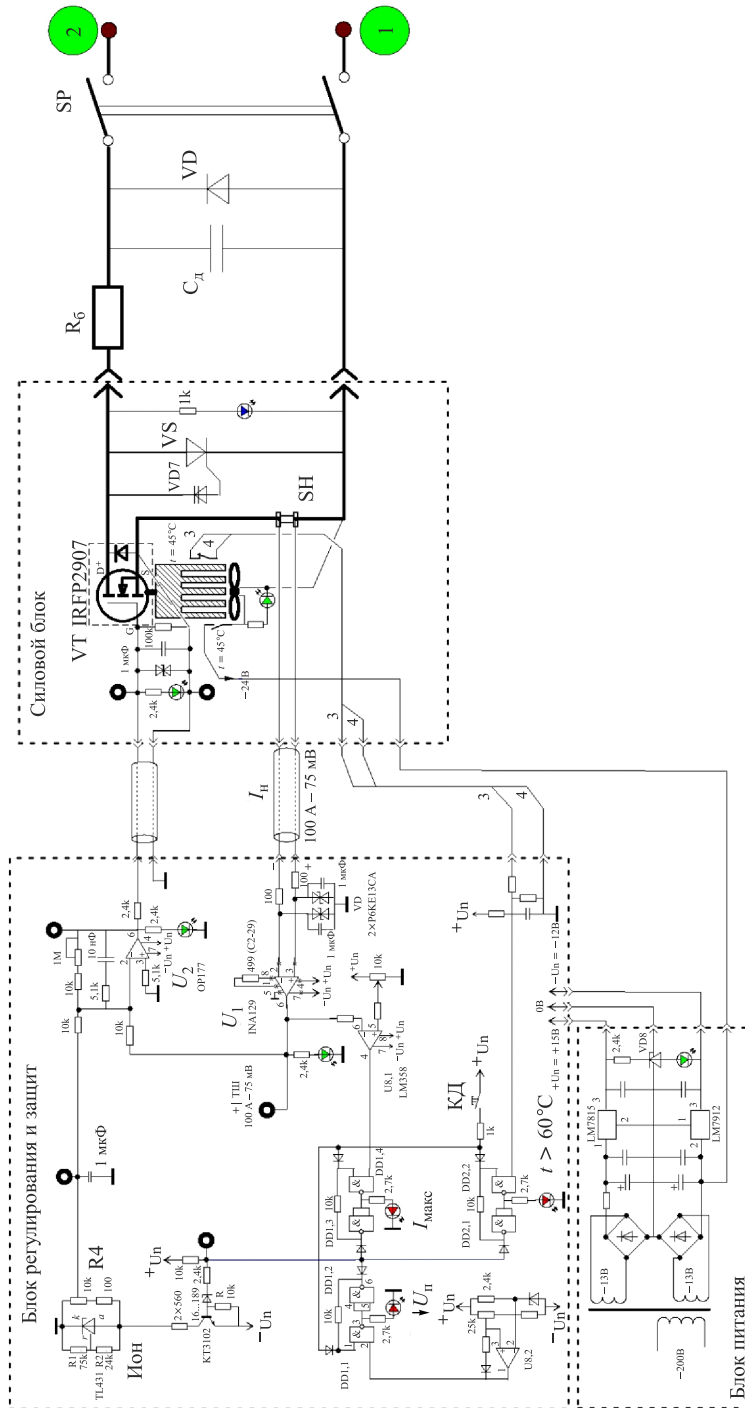


Рис. 2. Принципиальная схема токового шунта

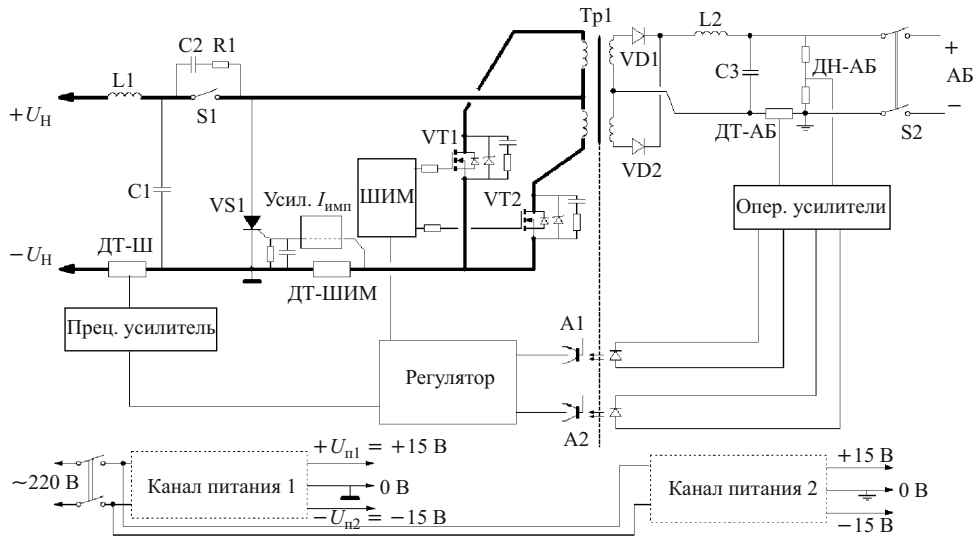


Рис. 3. Структурная схема источника заряда аккумуляторной батареи

Событие, вызвавшее отключение, запоминается узлом защиты и высвечивается на лицевой панели блока. После устранения первопричины схема вводится в рабочее состояние.

Шунт обеспечивает относительную точность отбора тока лучше 10^{-4} , что с учетом соотношения отбираемого и основного тока магнита LEPTA соответствует заданным требованиям.

Конструктивно все токовые шунты сведены в одну стойку. Каждый шунт имеет свой силовой автомат, блок регулятора и блок управления. Блок питания электроники, формирующий шесть гальванически развязанных каналов, является общим для всех. Такая компоновка устройств позволяет упростить эксплуатацию, более эффективно проводить работы по наладке и решению исследовательских задач.

Силовой блок выполнен в виде законченного элемента, соединяющегося с внешними цепями через один разъем типа РП14-30 для регуляторов с IGBT-транзисторами и двумя разъемами того же типа для регуляторов с MOSFET-транзисторами (рис. 3).

При монтаже особое внимание уделялось компоновке элементов защиты и силового регулятора, разводке силовых цепей и взаимному расположению силовых и прецизионных цепей.

КЛЮЧЕВОЙ ТОКОВЫЙ ШУНТ

Задача прецизионного отбора тока на установке LEPTA успешно решена, тем не менее существующая система токоотбора имеет ряд функциональных ограничений, а именно:

— и IGBT-, и MOSFET-транзисторы обладают нелинейной характеристикой управления, определяемой структурой приборов, что ограничивает динамический диапазон их работы и усложняет процедуру оптимизации выбора рабочей точки;

— существенные тепловыделения на силовом транзисторе ограничивают возможность увеличения токовой загрузки;

— энергия, выделяемая на силовых элементах регулятора, рассеивается, что в итоге снижает КПД всей системы.

Следующий шаг в развитии токовых шунтов сделан в сторону управляемого интеллектуального преобразователя постоянного тока, построенного по ключевому принципу. При этом требуемая часть энергии с отдельного потребителя в виде постоянного тока прецизионно отбирается и сохраняется в аккумуляторной батарее, имеющейся в ЛЯП ОИЯИ для питания оперативных цепей. В свою очередь, аккумуляторная батарея может использоваться для питания прецизионным током других потребителей, например, корректирующих магнитов LEPTA. Вариант построения такого преобразователя и рассматривается далее.

Для заряда аккумуляторной батареи (АБ) от токового шунта, отбирающего часть энергии от магнитного элемента LEPTA, соблюдается ряд мер для безаварийной работы всего комплекса в целом. Структурная схема такого источника изображена на рис. 3.

Преобразовательная часть двухплечевого инвертора состоит из ключевого устройства, выполненного на MOSFET-транзисторах VT1, VT2, схемы управления ими — контроллера, формирующего широтно-импульсно модулированные (ШИМ) импульсы управления, трансформатора Tr1, работающего на частоте преобразования 25 кГц, быстрых выпрямительных диодов VD1, VD2. Для защиты входных/выходных устройств предназначены автоматические выключатели S1 и S2. Сложным и важным узлом преобразователя, согласующим параметры источника — левая часть схемы и параметры потребителя — правая часть — АБ, является высокочастотный трансформатор. Другая его функция — гальваническая развязка магнитного элемента и АБ. Со стороны LEPTA включена демпфирующая цепь L1–C1, предназначенная для повышения качества отбираемого тока и датчик этого тока ДТ-Ш. Узел быстродействующей защиты, выполненный на базе тиристора ТЧИ 100-8 — VS1 и датчика импульсного тока ДТ-ШИМ, обеспечивает безопасную работу силовых транзисторов VT1, VT2 в случае превышения импульсным током инвертора допустимых значений (наличие сквозных токов, нарушение штатной работы ШИМ контроллера и т. д.). Для разгрузки контактов S1, размыкающихся при включении VS1, используется демпферная цепь R1–C2. Снижение пульсаций тока заряда АБ обеспечивается фильтром L2–C3. Контроль выходных параметров источника со стороны АБ осуществляется датчиком тока заряда ДТ-АБ и датчиком напряжения ДН-АБ. Двуполярное питание аналоговой электроники осуществляется двумя гальванически развязанными источниками.

При построении такого преобразователя особое внимание уделено силовому ключевому узлу с высокочастотным трансформатором. Работа силовой части инвертора определяется способностью транзисторов безаварийно преобразовывать входную энергию постоянного тока в управляемые кванты энергии с частотой ШИМ, передаваемой посредством трансформатора в нагрузку. Параметры трансформатора, как то индуктивность рассеивания, паразитные емкости собственно обмоток и межобмоточные и т. д., оказывают принципиальное влияние на работу транзисторов и качество передаваемой энергии. Высокочастотный трансформатор разработан авторами статьи и специалистами ОАО «Транспласт», Санкт-Петербург.

Также большое значение имеет правильное выполнение монтажа с минимальной длиной соединительных проводов, оптимальное взаимное расположение составных частей

преобразователя с исключением электромагнитного влияния друг на друга и применением специальных импульсных конденсаторов, выполнение силовых линий связи бифилярным монтажом [4]. Принципиально-монтажная схема инвертора приведена на рис. 4. Выпрямительные диоды с высокой стороны VD1, VD2 должны эффективно работать на частотах преобразования, а также обладать минимальными собственными емкостями.

Входное напряжение $U_{\text{п}}$ приходит на специальный импульсный конденсатор $C_{\text{имп}}$, имеющий малое внутреннее резистивное сопротивление и индуктивность. Все последующие силовые соединения внутри инвертора сделаны непосредственно с выводов $C_{\text{имп}}$. При запириании силового транзистора VT1 (либо VT2) с высокой скоростью спада тока в паразитных индуктивностях рассеивания трансформатора и соединительных проводов возникает перенапряжение, которое может привести к пробое полевому транзистора и спровоцировать высокочастотные колебания в силовом контуре. Компьютерное моделирование переходных процессов позволяет сделать качественные оценки необходимости применения снабберных цепей (блоков Снаб_{1,2}).

В качестве ключевых элементов VT1, VT2 для преобразователя заряда АБ взяты транзисторы Power MOSFET, изготовленные по технологии HEXFET типа IRFP2907 с параметрами $V_{\text{dss}} = 75 \text{ В}$, $I_d = 209 \text{ А}$, $R_{\text{ds(on)}} = 4,5 \text{ мОм}$. Выбраны элементы снабберной цепи: защитный диод VD1 типа 1.5KE47C с ограничением напряжения на уровне 47 В, резистор $R1 = 0,33 \text{ Ом}$ мощностью 10 Вт, импульсный конденсатор $C1 = 2,2 \text{ мкФ}$ и разрядный диод VD2 типа 48СТQ060.

Конструктивно Тр1 собран на четырех П-образных сердечниках типа ПК40 × 16 феррита марки 2500НМС. На двух симметрично намотанных катушках обмотки W1–W7 (W8–W14) располагаются следующим образом: ближе к магнитопроводу находится вы-

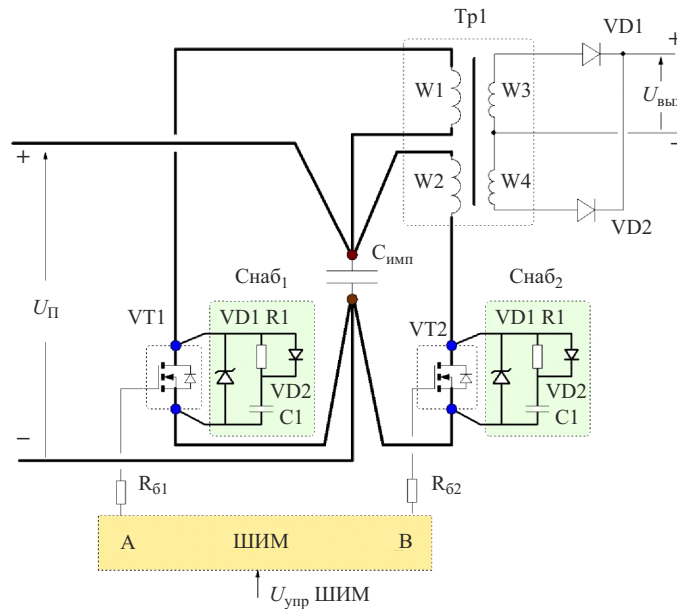


Рис. 4. Принципиально-монтажная силовая схема инвертора

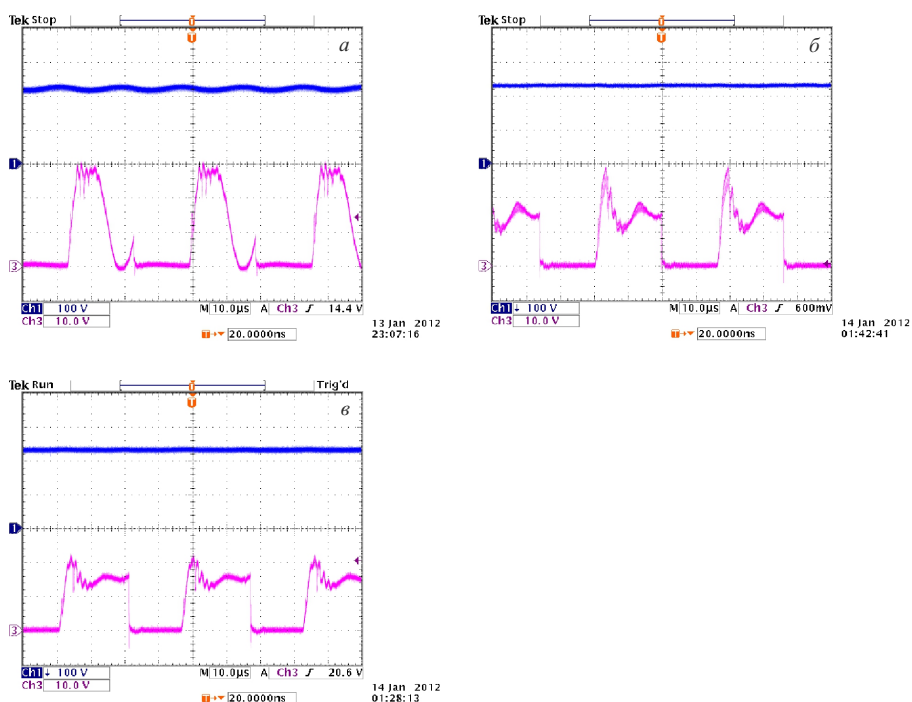


Рис. 5. Осциллограммы работы инвертора при заряде аккумуляторной батареи: а) начало заряда (ток шунта 70 А); б) средняя фаза заряда; в) завершение заряда. Луч 1 — U_{AB} , луч 3 — U_{ds} транзистора VT1

соковольтная обмотка $W5 = 19$ витков, затем через изоляцию располагается обмотка, выполненная из медной полосы толщиной 0,7 мм $W1 = W2 = 1$ виток со средней точкой. Следующий слой $W3 = W4 = 1$ виток повторяет конструкцию $W1, W2$. Далее следуют два внешних слоя $W6 = W7 = 19$ витков. Обмотки $W5, W6, W7$ ($W12, W13, W14$) выполнены проводом диаметром 0,9 мм. Такая конструкция трансформатора позволяет обеспечить максимальное потокосцепление первичной и вторичной обмоток и тем самым эффективно передать энергию.

В силовой схеме параллельно включаются обмотки $W1, W3, W8, W10$, представляющие собой одно плечо инвертора, аналогично включаются обмотки другого плеча. Высоковольтные обмотки соединяются в зависимости от задачи последовательно или параллельно, но всегда симметрично на обеих катушках.

Проведен эксперимент по отбору ключевым шунтом постоянного тока соленоида накопителя ЛЕРТА с передачей этой энергии на заряд АБ. Осциллограммы этого процесса приведены на рис. 5.

Применение высокоэффективного прецизионного токового шунта позволяет обеспечить требуемую точность тока в магнитном элементе. В настоящее время разрабатывается схема и конструкция шунта с реверсом тока, т. е. с возможностью не только отбирать, но и добавлять ток в соленоид из АБ. Технологически это возможно с сохранением высокой эффективности преобразования. Реверсивный преобразователь позволяет принципиально по-другому строить всю систему питания.

СТОЙКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ КОРРЕКТОРОВ

В состав магнитной системы накопителя LEPTA входит несколько корректирующих магнитов с требуемым током возбуждения до 5 А при напряжении до 30 В. Целесообразно питать подобного рода нагрузки от источника, получающего энергию, уже имеющуюся внутри системы. Блок-схема питания группы таких магнитов от аккумуляторной батареи, заряжаемой от токовых шунтов LEPTA, изображена на рис. 6.

Напряжение аккумуляторной батареи АБ подается через коммутирующее устройство SW на понижающий преобразователь DC/DC, к выходу которого подключен буферный накопитель энергии в виде конденсаторной батареи. Управление током индивидуального корректора CM осуществляется прецизионным регулятором Reg по команде с персонального компьютера PC.

Контроль целостности изоляции цепей АБ осуществляется узлом CI. DC/DC преобразователь предназначен для гальванической развязки цепей аккумуляторной батареи от нагрузки и согласования уровней напряжения батареи и номинального для корректоров напряжения — около 40 В.

На рис. 7 приведена блок-схема прецизионного аналого-ключевого преобразователя.

Регулятор тока питается постоянным напряжением U_{ps} уровня 40 В, приходящим на пассивный фильтр L–C. Рабочая полоса частот и величины индуктивности и емкости фильтра выбираются исходя из условий исключения взаимного влияния источника питания и регулятора, обеспечения требуемого отбора энергии с необходимой точностью. Ключевая часть регулятора SW построена по схеме понижающего преобразователя, позволяющей получить высокий КПД, хорошие массогабаритные параметры, которые важны в условиях высокой плотности оборудования на кольце накопителя LEPTA. Узел состоит из полевого *p*-канального транзистора, диода, дросселя и группы конденсаторов. Расчетная рабочая частота ключевого регулятора в данном применении зависит от параметров нагрузки (источник может включаться на разные корректирующие обмотки и соответственно могут меняться индуктивная и резистивная составляющие) и выбора рабочих точек силовых элементов, поэтому она не фиксирована, а изменяется в диапазоне от нескольких десятков герц до 100 кГц.

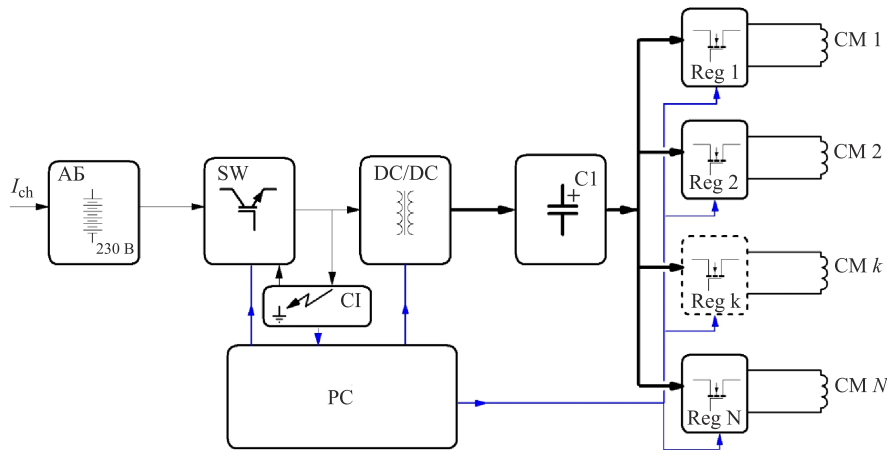


Рис. 6. Блок-схема системы питания корректоров LEPTA от аккумуляторной батареи

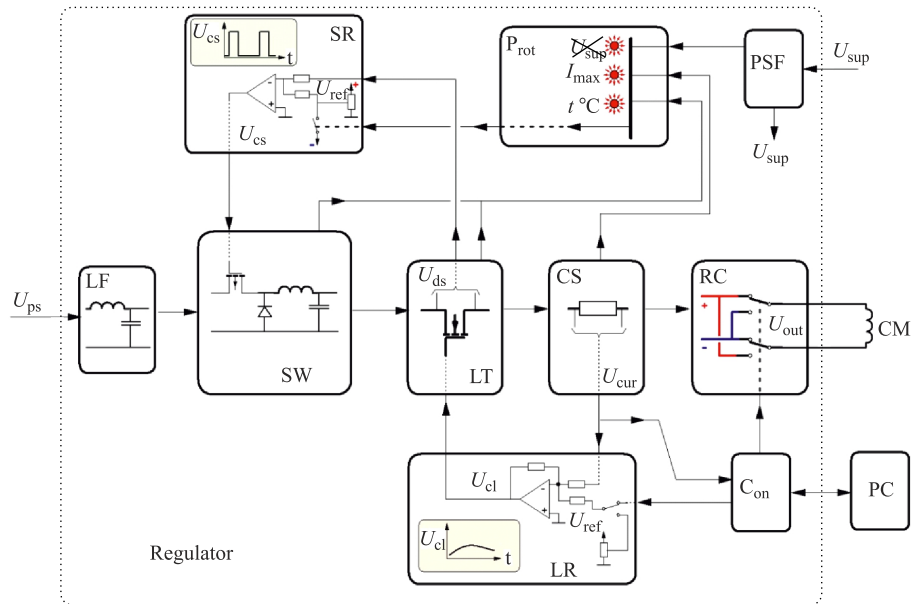


Рис. 7. Блок-схема прецизионного аналого-ключевого преобразователя

Для обеспечения требуемой стабильности выходного тока ± 5 мА от заданного значения во всем диапазоне изменения выходного тока от 0 до 5 А и работы на широкий спектр нагрузок используется линейный регулятор LT, выполненный на базе полевого транзистора. Для снижения потерь на этом транзисторе при указанном характере работы принята схема стабилизации падения напряжения на его стоке-истоке U_{ds} . Этот принцип реализуется посредством стабилизации U_{ds} ключевым регулятором SR через управление понижающим преобразователем SW. Управление транзистором LT осуществляется линейным регулятором тока LR, на вход которого поступает сигнал опорной функции либо с внутреннего задатчика, либо с внешнего задающего устройства PC. Сигнал обратной связи поступает с датчика тока CS. При превышении выходным током величины более 10 мА формируется информационный сигнал о наличии тока в нагрузке, используемый в качестве индикации и для выполнения операции реверса тока узлом RC. Контуром регулирования тока обеспечивается относительная точность поддержания заданного параметра — выходного тока на уровне $5 \cdot 10^{-4}$. Нормализованный сигнал об измеренном токе передается для контроля внешней системой компьютера — PC.

При работе на установке LEPTA возникает необходимость оперативно изменять направление поля в корректоре, что возможно сделать при переплюсовке выходного напряжения. Эту функцию осуществляет реверсивный коммутатор RC, управляемый либо с местного пульта, либо от PC через узел C_{on} . Процесс переключения коммутатора синхронизирован с сигналом отсутствия тока. Контроль состояния реле осуществляется светодиодом, включенным в канал управления током обмотки реле и выведенным на лицевую панель блока.

Регулятор снабжен узлом защит P_{rot} с каналами снятия тока при просадке напряжения питания собственных нужд, перегрузке по току и перегреве силовых элементов. Каждый

канал защиты имеет световую индикацию и триггерную защелку для фиксации события. Ввод в активное состояние регулятора после устранения причины аварийного отключения осуществляется кнопкой деблокировки, расположенной на блоке.

При разработке печатной платы блока регулятора была проведена оптимизация ее топологии и тщательная компоновка элементов с целью минимизации потерь коммутации и повышения стабильности работы ключевого преобразователя. При проектировании печатной платы выдерживались принципы: силовые цепи были сделаны как можно короче, минимизирована длина проводников к дросселю, транзистору и диоду ключевого преобразователя, шины питания и линии подключения нагрузки выполнены короткими и широкими проводниками, компоненты и проводники, чувствительные к наводкам тока и напряжения, удалены от узлов коммутации. Блок регулятора собран на базе стандартной ячейки типа «Вишня».

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ КАНАЛ ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Построение эффективной системы питания невозможно без информации о состоянии всех составных ее устройств. При введении интеллектуального управления системой требования к каналам мониторинга и воздействия на устройства еще более возрастают. Для решения этой задачи в элементы системы питания LEPTA заложены схемы диагностики и внешнего управления, построенные на базе разработанного специального универсального модуля ввода/вывода «Индивидуальный канал цифрового преобразования» (ИКЦП) (рис. 8). Каждое устройство ИКЦП содержит восемь цифровых входов, восемь цифровых выходов, два аналоговых 16-разрядных входа, один аналоговый 16-разрядный выход.

С помощью платы ИКЦП можно осуществлять управление и вести удаленный контроль за работой любого силового агрегата установки LEPTA с компьютера. Адаптирова-

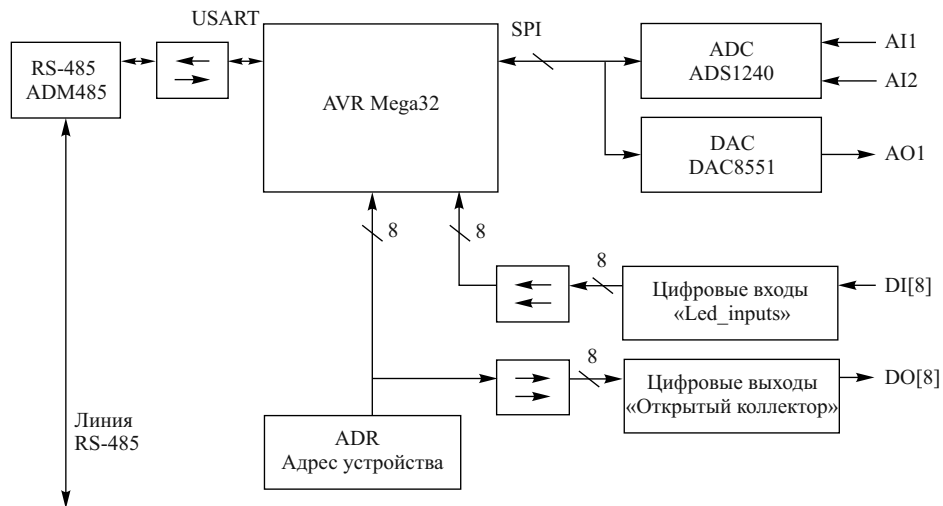


Рис. 8. Структурная схема устройства ИКЦП

ние к выбранному типу подконтрольного устройства определяется выбором типа силовой части ИКЦП, без изменения цифровой части (см. рис. 8).

Устройство ИКЦП состоит из цифровой и силовой плат. Цифровая плата включает в себя управляющий микроконтроллер AVR Mega32, 24-разрядный АЦП с четырехканальным мультиплексором, 16-разрядный ЦАП, преобразователь интерфейса RS-485 и адресозадающий переключатель. Опорный сигнал для аналоговых выводов составляет +2,5 В. Силовая плата устройства состоит из оптических преобразователей уровня сигнала и выбирается в зависимости от элемента управления. Силовая плата соединяется с цифровой платой с помощью штырьковых разъемов PLS и PBS. Управление устройством ИКЦП осуществляется по линии передачи данных RS-485. Программирование управляющего микроконтроллера осуществляется через SPI-интерфейс ISP-программатором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономически целесообразно строить сильноточные прецизионные системы питания групп магнитных элементов с применением относительно недорогого промышленного силового источника со средней точностью поддержания выходного тока (до 1%), прецизионных реверсивных токовых регуляторов кВт-й мощности, включенных параллельно каждому соленоиду, аккумуляторной батарее, устройств мониторинга и управления всеми элементами. При такой конфигурации оборудования можно реализовать разные варианты функционирования комплекса с высоким суммарным КПД. Наиболее оптимальный представляется в виде алгоритма с автоматическим выбором рабочих токов всех устройств с нулевым током заряда/разряда аккумуляторной батареи. В этом случае энергетически сбалансированная система питания фактически имеет один канал поступления энергии с ее прецизионной интеллектуальной эффективной циркуляцией внутри комплекса между составными частями.

Реализовано одновременное питание сразу нескольких групп магнитных элементов от одного мощного прецизионного источника с использованием вспомогательных токовых шунтов на примере позитронного накопителя ЛЕРТА. Обеспечено требуемое качество магнитных полей основных соленоидов — токов источников питания и токовых шунтов не хуже 0,05%. Созданы эффективные прецизионные источники питания группы корректирующих обмоток. В итоге обеспечена возможность гибкого управления рабочей точкой накопителя ЛЕРТА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта 16.516.11.6118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплин В. И. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 3. С. 489–494.
2. Руководство по выбору MOSFET, IGBT и микросхем драйверов. Компэл. www.kompel.ru
3. <http://www.irf.com/indexsw.html>
4. Семенов Ю. Б. Силовая электроника для любителей и профессионалов. Солон-Р, 2001.

Получено 31 мая 2012 г.