

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА ФАЗОТРОНЕ ЛЯП ОИЯИ, РЕАЛИЗУЕМАЯ ОТ ОДНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ РАЗНЫХ ТОКАХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИНЗАХ

*В. И. Каплин, В. Н. Карпинский,
Ю. А. Поляков, А. Ю. Рудаков, В. И. Смирнов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена система группового электропитания нескольких последовательно включенных электромагнитных линз тракта проводки пучков фазотрона от одного источника питания с различными токами в каждой из линз. Предложена интеллектуальная схема управления, позволяющая минимизировать потребление электроэнергии при заданных токах в элементах путем перераспределения токов основного источника питания и токов в локальных регуляторах.

The intellectual power supply and control system is presented for the group of the electromagnetic lenses in the Phasotron beam transport channel supplied from one power supply source. The intellectual power supply and control system is proposed to provide minimization of the power consumption at redistribution of the lenses currents between the main power supply and additional local regulation power supply sources.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальная система питания с несколькими потребителями МВт-мощности на фазотроне представлена в работе [1]. Питание каждого элемента магнитной оптики (электромагнитов и электромагнитных линз) каналов транспортировки пучков фазотрона [2] производится по разработанным в 1960-х гг. схемам от индивидуального машинного преобразователя, имеющего низкий КПД. В настоящее время до 90% работы ускорителя ориентировано на протонную терапию на канале медицинского пучка. Задача повышения эффективности работы системы питания электромагнитов и электромагнитных линз этого канала с целью экономии электроэнергии является актуальной. Замена существующих источников питания фазотрона на современные источники питания МВт-мощности затруднительна из-за их высокой стоимости. Настоящая работа направлена на разработку системы питания элементов канала с другим принципом организации устройств. Ключевые положения этой системы:

- последовательное соединение магнитов и линз в группу,
- питание группы от одного источника (параметры группы согласуются с параметрами источника по току и напряжению),

— подключение параллельно каждому элементу канала прецизионного регулятора тока кВт-мощности.

За счет такой организации принципиально уменьшается число неэкономичных источников (мотор-генераторов) и оптимизируется рабочая точка оставшихся. Известно, что КПД мотор-генератора существенно повышается с его загрузкой и достигает 80 % при работе агрегата на номинальную нагрузку. Тогда как прежний способ организации питания магнитных элементов, осуществляемый по принципу индивидуальный источник — индивидуальная нагрузка, обеспечивал загрузку агрегата на 10–15 % с КПД лишь 15–30 %.

Управление агрегатами, входящими в такой комплекс, осуществляет интеллектуальная система на базе компьютера с разработанными несколькими алгоритмами функционирования всех устройств.

Описываемый способ построения электропитания групповых потребителей ориентирован на управление МВт-мощностью в канале транспортировки пучков с помощью прецизионных регуляторов токов кВт-мощности.

Подобные регуляторы разработаны и экспериментально проверены на ускорительном комплексе ЛЕРТА [1]. Они позволяют отбирать избыточную энергию с магнитного элемента, преобразовывать ее для рекуперации и накопления в аккумуляторной батарее (АБ), имеющейся на ускорителе. Регулятор реверсивный, т. е. энергия может передаваться не только от потребителя к накопителю, в нашем случае АБ, но и обратно — от АБ к магнитному элементу. Энергия, накопленная в АБ, используется другими токовыми регуляторами для добавки тока в подключенный к ним элемент.

На фазотроне реализована программа управления режимами работы четырех электромагнитных линз на канале медицинского пучка от одного источника питания с рациональным распределением потребления электроэнергии посредством использования экспериментальных регуляторов-преобразователей и аккумуляторной батареи. Разработанные устройства повысили эксплуатационные и технические свойства системы энергопитания на восьмом тракте ускорительного комплекса фазотрона и обеспечили точность регулирования токов не хуже 0,1 %, а стабильность токов потребителей в установившихся режимах системы не хуже 0,01 %.

СХЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Реализация интеллектуальной системы управления осуществляется на восьмом тракте ускорительного комплекса фазотрона для четырех линз с небольшими разбросами токов в их обмотках (таблица).

Линзы восьмого тракта, приведенные в таблице, подключены к одному мотор-генератору с параметрами 654 А/220 В. Схема подключения приведена на рис. 1. Напря-

Параметры источников питания, токов и напряжений в линзах восьмого тракта пучка

Элемент тракта	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Параметры источника питания, А/В
I-2	250	42	10500	1130/115
I-3	250	45	11250	1130/115
VIII-4	220	41	9020	654/220
VIII-5	270	43	11610	1130/115

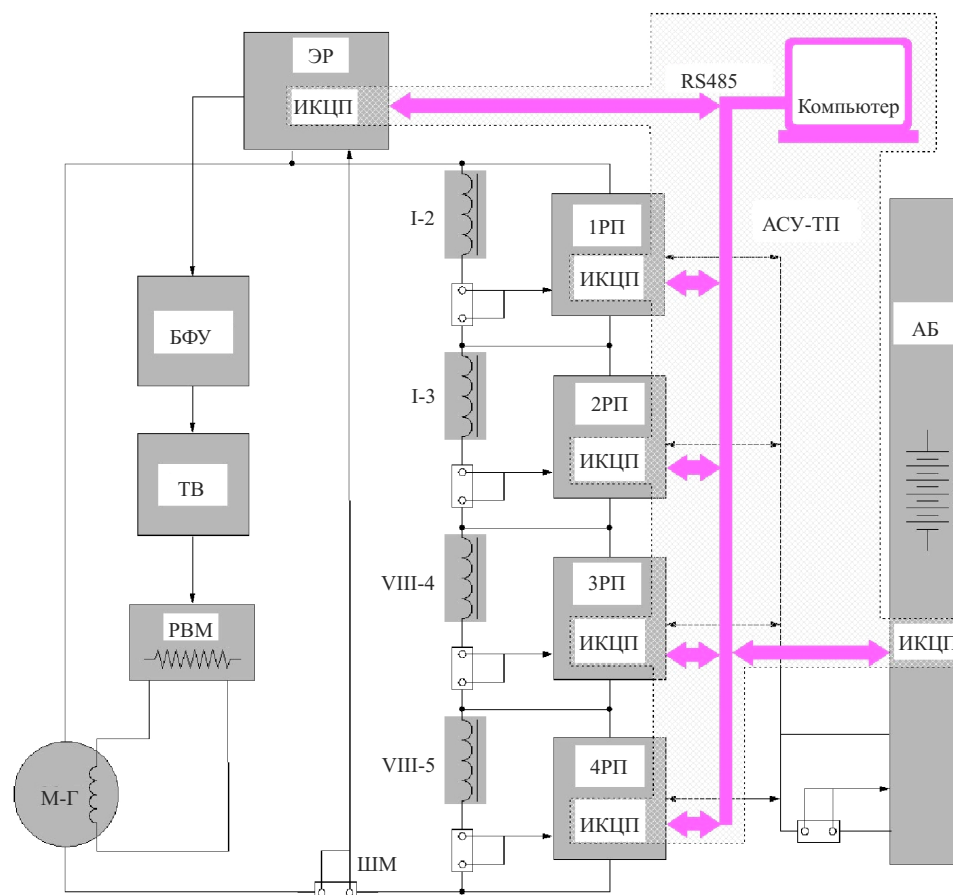


Рис. 1. Блок-схема группового питания четырех линз тракта 8: М-Г — мотор-генератор; РВМ — регулятор возбуждения; ТВ — тиристорный выпрямитель; БФУ — блок фазового управления; ЭР — электронный регулятор; ШМ — шунт масляный; I-2, I-3, VIII-4, VIII-5 — электромагнитные линзы; 1РП–4РП — прецизионные регуляторы тока; 1ДТ–5ДТ — датчики тока; АБ — аккумуляторная батарея; АСУ-ТП — автоматизированная система управления трактами проводки пучков

жение источника питания выше суммы падений напряжений на нагрузках, а его максимальный ток не превышает максимальный ток нагрузки. Прецизионный регулятор-преобразователь тока включается параллельно каждому элементу канала и обеспечивает ток, равный разнице тока источника питания и тока элемента канала. Регуляторы в зависимости от требуемого тока или подпитывают соответствующую нагрузку дополнительным током, или отбирают от нагрузки «лишний» ток, осуществляя энергообмен DC–DC по цепи потребитель 1 — АБ — потребитель 2. АБ при таком преобразовании выполняет роль буфера. Как видно из таблицы, в самом «нагруженном» случае мощность регулятора-преобразователя составляет около 1,5 кВт, максимальный ток регулятора не превышает 30 А. Регуляторы разработаны в соответствии с [3].

При работе источника питания на группу элементов из-за дисбаланса мощностей источника питания и мощностей, потребляемых элементами канала, разница энергий идет

или на подзарядку аккумуляторной батареи или на ее разряд. Поэтому контролировать и поддерживать режим нормальной эксплуатации АБ, стабилизируя ее напряжение, — еще одна функция системы автоматического регулирования. Для ее осуществления АБ, как и все агрегаты системы, оснащена датчиками тока, напряжения, платой индивидуального канала цифрового преобразования (ИКЦП) (см. рис. 1). Номинальное напряжение заряженной АБ должно соответствовать току АБ, близкому к нулю. Такой режим работы в течение длительного времени можно поддерживать только с помощью АСУ.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизированная система управления обеспечивает установку и поддержание стабильных токов в элементах канала, оптимальный режим работы основного источника питания, поддерживает напряжение на аккумуляторной батарее в допустимых пределах.

При электропитании нескольких электромагнитных линз от одного источника используется программа для управления токами в элементах с помощью автоматизированной системы управления (АСУ) ТП [4]. На первом этапе вводятся следующие данные: параметры источника питания; рабочие токи в каждой линзе; ожидаемые напряжения в линзах; пониженные токи в линзах, которые поддерживаются в паузах работы ускорителя; допустимый разброс токов в каждой линзе; максимально допустимый ток в каждой линзе; допустимый диапазон напряжений аккумуляторной батареи; предварительно ток источника питания выбирается в промежутке между максимальными и минимальными токами линз.

В АСУ ТП с датчиков тока снимаются показания токов в каждой линзе и источнике питания, с датчиков напряжения — показания напряжений на линзах, источнике питания и на аккумуляторной батарее. Снимаются также показания токов с датчиков, установленных между аккумуляторной батареей и выходами регуляторов тока (см. рис. 1), а также величина напряжения аккумуляторной батареи.

Порядок включения системы в работу и поддержание заданного режима заключается в следующем. На основании табличных данных режима работы элементов тракта и выбора режима работы регуляторов АСУ ТП рассчитываются токи источника питания и токи регуляторов. Значения токов передаются в блоки управления регуляторами. Включаются источник питания и регуляторы тока, в которых автоматически устанавливаются заданные токи. После входа в режим стабилизации токов всех регуляторов в память заносятся токи и начальные напряжения на линзах. Управление режимом работы передается на пульт управления, с которого производится включение-отключение фазотрона и при необходимости перевод питания линз на пониженный режим работы при отключенном фазотроне. Рабочий ток в линзах устанавливается только на время включения ускорителя. В процессе работы производится циклический опрос всех датчиков тока и напряжения. По результатам опроса определяется соответствие рабочих токов в линзах заданным. В случаях их отклонения свыше допустимых величин вносятся коррективы в блоки управления регуляторами. Если через 10 с коррекции токов не происходит, то подается аварийный сигнал.

Стабилизация токов в линзах производится непрерывно регуляторами тока, однако возможны отклонения токов в них свыше заданных величин. В этих случаях от АСУ ТП на регулятор тока поступает сигнал на соответствующую корректировку значений тока.

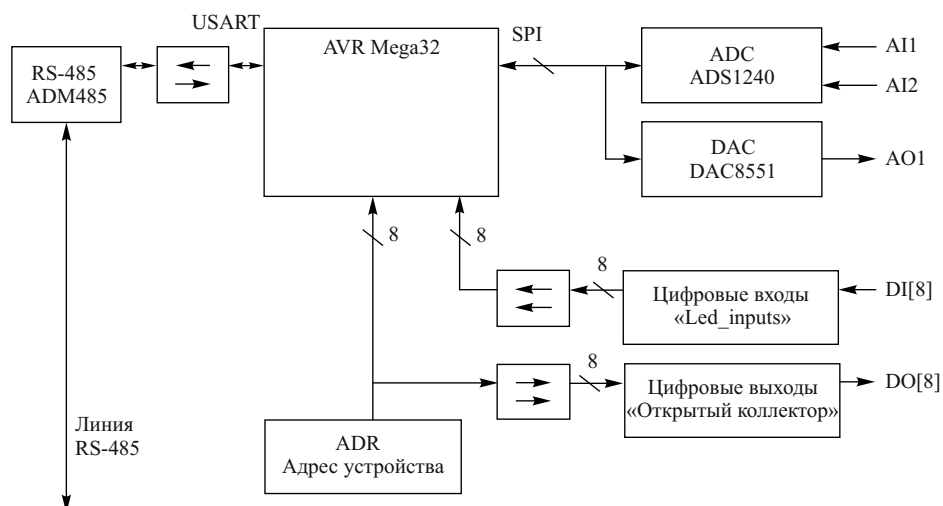


Рис. 2. Структурная схема устройства ИКЦП

Программное обеспечение предназначено для управления элементами тракта проводки пучков фазотрона с целью достижения сбалансированной работы последовательно соединенных нагрузок, питающихся от одного источника питания.

Для контроля за работой и управлением силового оборудования устанавливаются универсальные многофункциональные платы ввода-вывода (ПВВ), одинаковые для всех типов оборудования, индивидуальные платы сопряжения (ПС) агрегатов с ПВВ. Для подключения к компьютеру используется преобразователь интерфейсов RS485/USB.

Аналоговые входы и выходы осуществляют установку тока и мониторинг напряжения и тока. Каждый такой модуль использует децентрализованный метод управления по линии передачи данных RS-485 по принципу «запрос–ответ». Посылка запросов и прием ответных посылок производится управляющей программой через персональный компьютер.

Для управляющей системы использованы блоки распределенного управления фирмы IPCDAS — модуль цифрового ввода-вывода I-7055D, модуль аналогового вывода I-7021P и модуль восьмиканального аналогового ввода I-7017. Функционально эти три модуля соответствуют разработанной плате управления энергосистемой «Индивидуальный канал цифрового преобразования» (ИКЦП) (рис. 2). Для управления модулями IPCDAS применяется протокол DCON, основанный на передаче по витой паре команд в виде символов ASCII определенного формата. Промышленная сеть на базе стандарта RS485 управляется от компьютера через любой из преобразователей интерфейса — RS232/RS485, USB/RS485, PCI/RS485, Ethernet/485. Для того чтобы модули можно было использовать в составе системы управления, они должны быть правильным образом сконфигурированы. При этом задается скорость передачи, номер модуля в сети RS485, выбираются рабочие каналы и устанавливаются некоторые дополнительные параметры, уникальные для каждого модуля.

Для настройки регуляторов системы электропитания установки на базе имеющихся модулей было разработано программное обеспечение, позволяющее контролировать восемь цифровых входных каналов, управлять восемью цифровыми выходами, а также за-

давать опорный сигнал по напряжению для регуляторов и измерять напряжение в восьми точках. При необходимости реализуется осциллографический режим, при котором измеренные с частотой 1 Гц напряжения отображаются в виде графика.

Структура программы представляет собой два параллельных цикла. В одном из циклов происходит непрерывное чтение цифровых и аналоговых входов, а во втором цикле происходит управление модулем ЦАП. Поскольку используется один виртуальный последовательный порт, необходимо применять меры для синхронизации работы этих циклов. В данной версии реализован механизм так называемых семафоров, который позволяет разделить общий ресурс — последовательный порт.

Для увеличения быстродействия автоматизированной системы управления в качестве системы модулей ввода/вывода данных разработано устройство ИКЦП, предназначенное для удаленного управления силовыми элементами энергетической системы. Устройство ИКЦП состоит из цифровой и силовой плат. Цифровая плата включает в себя управляющий микроконтроллер AVR Mega32, 24-разрядный АЦП с 4-канальным 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.

Управляющая программа предназначена для работы с устройствами ИКЦП, электрически расположенными на линии передачи данных RS-485. Она позволяет контролировать на линии передачи данных до 250 устройств ИКЦП. Скорость передачи данных по линии RS-485 определяется устройствами ИКЦП и является для них фиксированной величиной (19200 бит/с). При необходимости использования других устройств в узлах управления программа позволяет настраивать скорость передачи данных по линии (от 110 до 256000 бит/с).

Подпрограмма цикла опроса устройств вызывается прерыванием от программного таймера каждые 50 мс. Подпрограмма опроса поочередно опрашивает входные параметры устройства, адрес которых содержится во фреймах управляющей программы. Для каждого адреса устройства происходит опрос за три цикла подпрограммы. При этом управляющая программа получает значения цифровых и аналоговых входов устройства. После приема информации от устройства о состоянии на входах управляющая программа меняет эти данные в соответствующем устройству фрейме. По завершении опроса всех устройств управляющая программа начинает опрашивать устройства заново до тех пор, пока не будет остановлен цикл опроса. Если во время опроса устройств произошла смена приоритета с опроса на установку значений, в следующих двух циклах подпрограмма вместо опроса отправит пакеты данных на изменение значений аналогового и цифровых выходов устройства, а затем продолжит опрос.

Подпрограмма интеллектуального управления системой вызывается по завершении цикла опроса устройств, когда все устройства, указанные во фреймах управляющей программы, опрошены. Интеллектуальное управление системой заключается в анализе управляющей программой полученных данных и реагировании на состояние системы.

При управлении энергоснабжением не разрешается выполнение любой команды, которая может привести к аварийным ситуациям. В случае выключения компьютера или

обрыва сетевого кабеля оборудованием системы электроснабжения можно управлять и осуществлять контроль в режиме ручного управления.

На компьютере устанавливается драйвер для преобразователя интерфейсов, позволяющий имитировать работу последовательного СОМ-порта. Данные, отвечающие за работу системы управления питанием магнитно-оптических элементов трактов проводки пучков, накопленные за время сеанса, сохраняются в виде файла на жестком диске. Режимы настройки, определяемые оператором, не протоколируются, а только отображаются на экране монитора. После команды начала протоколирования данные начинают накапливаться в буфер и затем в автоматическом режиме записываться в файл. Временные метки берутся с управляющего ПК. Оператор взаимодействует с системой посредством выбора необходимых управляющих окон, кнопок, вводя данные в виде чисел в соответствующие поля программы. Основное управляющее окно содержит информацию о состоянии основных и аварийных сигналов. Протоколы данных, накапливаемые в виде набора файлов, периодически копируются с управляющего компьютера на другие носители. При необходимости данные, сохраняемые в файлах, могут быть представлены в виде осциллограмм. В результате обеспечивается управление всеми агрегатами системы управления питанием магнитно-оптических элементов трактов проводки пучков. При отсутствии разрешающих работу агрегата сигналов система не имеет права разрешать прохождение управляющих сигналов. Цикл периодического опроса всех агрегатов не более одного опроса за секунду. Скорость передачи в сети RS485 должна быть 116200 бод. Запуск и проверка системы проводится в несколько этапов. На первом этапе проверяется работоспособность и управляемость отдельных агрегатов. Отдельно испытывается поведение системы при включении и выключении. Отдельно проверяется поведение программного обеспечения при появлении сигнала аварии. На втором этапе осуществляется комплексная проверка всего программного обеспечения при одновременном управлении всеми агрегатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированное управление работой группы элементов трактов проводки пучков на медицинские кабины уменьшает затраты на постоянно дорожающую электроэнергию, улучшает систему контроля и управления токами магнитных линз и уменьшает время подстройки канала в процессе проведения медицинских сеансов. Это позволит как увеличить пропускную способность пациентов на медицинском пучке, так и уменьшить время работы фазотрона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госконтракта 16.516.11.6118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплин В. И. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 3. С. 489–494.
2. Фазотрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и его пучки. Дубна: ОИЯИ, 1996.
3. Семенов Ю. Б. Силовая электроника. Профессиональные решения. М.: СОЛОН-ПРЕСС, ДМК Пресс, 2011.
4. Федоров Ю. Н. Основы построения АСУ ТП. СИНТЕГ, 2006.

Получено 15 мая 2012 г.