

УДК 621.3.038.616; 681.518.3; 681.518.5

**А. А. Дербенев, С. Е. Карнаев, А. В. Макеев, П. Б. Чеблаков**

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

*aaderbenev@gmail.com; karnaev@inp.nsk.su  
alexander.v.makeev@gmail.com; P.B.Cheblakov@inp.nsk.su*

### **БАЗОВОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА NSLS-II**

Для управления магнитной системой бустерного синхротрона NSLS-II были разработаны специализированное контрольно-измерительное оборудование и набор управляющих программ. В статье дается описание системы и принципов ее функционирования. Предложена схема управления, реализовано программное обеспечение на базе EPICS, позволяющие цифровым образом прецизионно управлять работой источников питания и измерять их параметры на каждом ускоряющем цикле синхротрона с частотой 1 или 2 Гц.

*Ключевые слова:* система управления, источник питания, синхротрон, бустер, EPICS.

#### **Введение**

Значение использования пучков заряженных частиц, ускоренных до высоких энергий (несколько ГэВ и выше), в развитии многих направлений науки и технологии становится все выше. В настоящее время в мире построены и продолжают активно строиться крупные ускорительные комплексы для генерации синхротронного излучения (СИ), которое востребовано для исследований практически во всех областях науки. Для обеспечения высокой производительности и стабильности эти комплексы включают собственный специализированный инжектор – бустерный синхротрон (бустер) с малым временем ускорения частиц, обеспечивающий инжекцию пучков электронов в основную установку на полной энергии.

В данной статье рассматривается система управления магнитной структурой ускорителя, которая разработана для бустерного синхротрона источника СИ NSLS-II [1; 2] и

введена эксплуатацию в Брукхейвенской национальной лаборатории (Нью-Йорк, США) летом 2014 г. Система управления обеспечивает управление источниками питания магнитов бустера при ускорении электронных пучков в синхротроне от энергии 200 МэВ до 3 ГэВ за 300 мс с частотой повторения 1 или 2 Гц. В процессе ускорения работа источников питания контролируется с частотой 10 кГц, с этой же частотой делаются измерения различных параметров устройств, что обеспечивает надежное и эффективное управление синхротроном.

#### **Задачи управления**

Бустерный синхротрон источника СИ NSLS-II предназначен для ускорения электронного пучка, получаемого из линейного ускорителя (линака), до энергии перепуска в основное накопительное кольцо. Бустер размещается внутри основного кольца NSLS-II, периметр синхротрона равен 158,4 м и составляет ровно одну пятую часть основ-

*Дербенев А. А., Карнаев С. Е., Макеев А. В., Чеблаков П. Б.* Базовое программное обеспечение для управления магнитной системой бустерного синхротрона NSLS-II // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 3. С. 88–98.

ного кольца. Схема комплекса NSLS-II показана на рис. 1.

Управление аналогичными синхротронами на источниках СИ, построенных в недавнее время [3; 4], осуществляется при помощи цифровой регулировки уровня тока магнитных элементов в процессе ускорения пучка. Использование цифрового способа регулировки выходного тока свело множество проблем нестабильности резонансного способа управления, использовавшегося ранее для управления источниками питания синхротронов, к единственному вопросу качества аналого-цифрового/цифро-аналогового преобразования, что на базе современных электронных комплектующих выполняется с очень хорошей точностью. Вместе с тем сама по себе цифровая регулировка не решает ряд проблем, связанных с передачей и обработкой массивов данных большого размера в контроллерах источников питания, вычислительная мощность которых невелика. Задание формы тока в контроллеры источников питания выполняется заранее и занимает значительное время, в течение которого источник питания, как правило, пребывает в нерабочем состоянии. Короткое время рабочего цикла с пучком (несколько сотен миллисекунд) не позволяет в режиме on-line с нужной точностью контролировать основные параметры источников питания: ток, напряжение на нагрузке, сигнал ошибки тока. Соответственно эти функции либо отсутствуют в системах управления синхротронами, либо возлагаются на сам контроллер источника питания, а на операторском уровне от некоторых источников питания магнитной системы (например, источников питания дипольных магнитов), требуется высокая относительная точность отработки:  $\sim 10^{-4}$  (см. обоснование требований ниже). Следовательно, для контроля работы источников питания требуется соответствующая точность измерения их основных параметров: тока, напряжения на нагрузке, сигнала ошибки тока. Существующие системы управления источниками питания действующих синхротронов не позволяют организовать передачу точных синхронных измерений, выполняемых в течение цикла ускорения пучка, длящегося несколько сотен миллисекунд, в управляющий компьютер с целью выполнения мониторинга отработки источника питания. Поэтому функции непрерывного мониторинга всех значимых сигналов

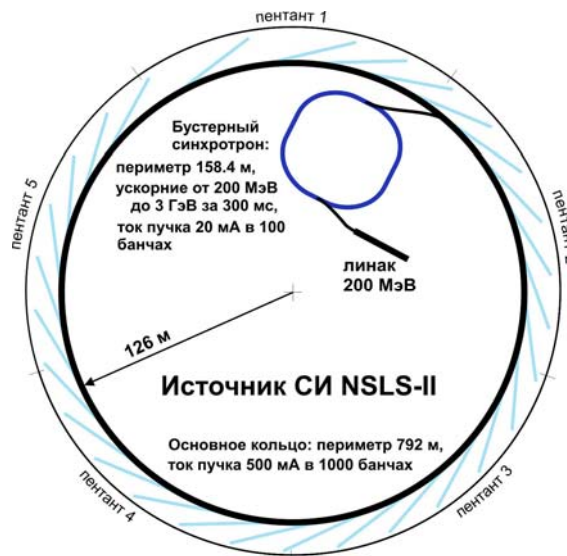


Рис. 1. Схема источника СИ NSLS-II

либо вообще отсутствуют в системах управления синхротронами, либо в упрощенном виде реализуются в контроллерах источников питания, а на операторский уровень текущая информация предоставляется лишь в виде результирующих статусных сигналов. Недостаток детальной информации о работе источников питания вызывает затруднения при поиске и анализе неисправностей, делает невозможным мониторинг стабильности работы установки. Эти проблемы приводят к тому, что запуск синхротрона, последующие настройки режимов работы или поиск неисправностей занимают существенное время и требуют привлечения усилий многих специалистов. В результате анализа опыта запуска и эксплуатации многих бустерных синхротронов, введенных в строй в последние годы, был сформирован список расширенных требований к управлению магнитной системой бустера NSLS-II:

- обеспечение оперативной записи формы отрабатываемого тока в управляющие контроллеры без остановки отработки и со сглаженным переходом от отрабатываемой формы к новой;
- непрерывное измерение параметров источников питания в процессе выполнения цикла;
- онлайн мониторинг правильности работы источников питания.

Магнитная структура, обеспечивающая циклическое движение частиц в вакуумной камере синхротрона, состоит из 60 диполь-

ных магнитов с функцией фокусировки, разбитых по питанию на три семейства, 24 квадрупольных линз, также разбитых по питанию на три семейства, 16 секступольных линз, 20 корректоров по горизонтали и 16 корректоров по вертикали, запитанных от индивидуальных источников питания. Для впуска и выпуска частиц используются импульсные магниты: на впуске – один септум-магнит и четыре отклоняющих магнитика-кикера, запитанных от индивидуальных источников питания, на выпуске – один септум-магнит, четыре магнита-кикера, запитанных попарно от двух источников питания, и четыре корректора, отклоняющих орбиту пучка перед выпуском, подключенных последовательно к одному источнику питания. Всего ускорение пучка обеспечивается 58 источниками питания, а впуск / выпуск частиц – 9 импульсными источниками питания.

Для питания элементов основной магнитной структуры (диполей и квадрупольных линз) используются шесть источников питания. Ошибки и рассогласования в управлении этими магнитными элементами приводят к губительным для пучка эффектам, например к искажению замкнутой орбиты, сдвигам бетатронных частот, биению бета-функции и т. п. Расчетные требования на точность этих источников питания выдвигаются следующие:

- для обеспечения стабильного выпуска частиц относительное отклонение тока от заданного значения в период подготовки и выпуска частиц для диполей не должно превышать  $10^{-4}$ ;
- для обеспечения правильной траектории и удержания пучка в пределах рабочей зоны бетатронных колебаний в процессе ускорения относительное отклонение для диполей не должно превышать  $10^{-3}$ ;
- для удержания пучка в пределах рабочей зоны бетатронных колебаний в процессе ускорения относительное отклонение для квадрупольных линз не должно превышать  $2 \times 10^{-3}$ .

Для обеспечения соответствующего управления источниками питания точность отработки контрольно-измерительной электроники должна быть на порядок лучше указанных величин. Относительное рассогласование в управлении между отдельными источниками также не должно превышать указанные выше значения. Для минимизации относительного отклонения задания

опорных значений, определяющих форму тока в магнитах, все ЦАП должны быть строго синхронизированы. Рассогласование синхронизации не должно превышать  $10^{-3}$  от полного времени ускорения, т. е. не должно быть больше 0,3 мс.

Требования на управление источниками питания для секступольных и корректирующих магнитов значительно мягче, чем для диполей и квадрупольных:

- для обеспечения правильной коррекции хроматизма в процессе ускорения относительное отклонение тока от заданного значения в источниках питания секступольных линз не должно превышать  $10^{-2}$ ;
- для обеспечения правильной коррекции замкнутой орбиты в процессе впуска, ускорения и выпуска пучка относительное отклонение тока от заданного значения в источниках питания корректирующих магнитов также не должно превышать  $10^{-2}$ .

Особенность управления импульсными источниками питания в случае бустера NSLS-II связана с тем, что в однопольном режиме работы для увеличения захваченного тока пучка предусматривается двойная инжекция в синхротрон из линака с интервалом в 100 мс. Эта особенность порождает два требования.

Первое требование заключается в том, что для обеспечения эффективного впуска второго пучка в течение времени 100 мс между двумя инжекциями требуется изменить значение напряжения у двух источников питания быстрых отклоняющих магнитов-кикеров. Второе требование связано с тем, что за время между двумя последовательными инжекциями конденсаторная батарея инжекционного септума не успевает зарядиться до требуемого уровня. Для ускорения процесса заряда до нужного уровня напряжения необходимо на короткое время увеличить, а затем вернуть в исходное значение опорного напряжения. Оба эти требования должны быть реализованы в строгой привязке к циклу работы установки.

### Структура системы управления

*Общая концепция.* После инжекции пучка из линака бустер переходит в фазу подъема энергии, и, как только энергия достигнет заданной величины и параметры пучка стабилизируются, происходит выпуск пучка в канал транспортировки в основное кольцо.

Схематично фазы работы установки в режиме 1 Гц с двойной инжекцией представлены на рис. 2, где сплошной линией показана энергия пучка, пропорциональная току в дипольных магнитах, в зависимости от времени.

Значения тока в различных элементах магнитной системы циклически изменяются по разным сложным зависимостям. На рис. 2 приведены примеры изменения тока в дипольных магнитах и в корректоре орбиты пучка. Благодаря специально разработанной управляющей электронике и методу управления, описанному в данной статье, стало возможным корректировать или полностью менять закон изменения тока в магнитах от цикла к циклу. Это радикально упрощает настройку источников питания и ускорителя в целом как во время монтажа и запуска, так и при дальнейшей эксплуатации, позволяя максимально эффективно использовать имеющееся оборудование для получения пучка с нужными параметрами.

На входы источников питания нужно подавать опорное напряжение, которое должно с высокой относительной точностью ( $\sim 10^{-4}$ ) в каждый определенный момент выполнения цикла соответствовать заданной величине. Для тех же моментов времени нужно иметь измерения всех параметров, необходимых для выявления неисправно-

стей, сделанные с точностью, которая соответствует требованиям управления. Для решения этой задачи была разработана схема управления, состоящая из двух взаимосвязанных частей: аппаратного и программного обеспечения.

Аппаратное обеспечение осуществляет генерацию управляющего опорного напряжения при помощи прецизионного ЦАП по заданному закону.

Программное обеспечение построено на базе пакета программ EPICS [5; 6], что было обусловлено общей концепцией управления комплексом NSLS-II, а именно: все подсистемы комплекса в целях унификации должны быть автоматизированы при помощи EPICS. Принцип унификации касается и аппаратного обеспечения, что позволяет уменьшить номенклатуру устройств, упростить их поддержку на уровне программного обеспечения и снизить стоимость эксплуатации.

*Аппаратная база: PSC, PSI.* Для управления источниками питания комплекса NSLS-II в Брукхейвенской лаборатории была разработана электроника, основными компонентами которой являются PSC (Power Supply Controller) и PSI (Power Supply Interface) [7; 8]. Важно отметить, что в силу циклического характера работы источников питания бустера, режим работы

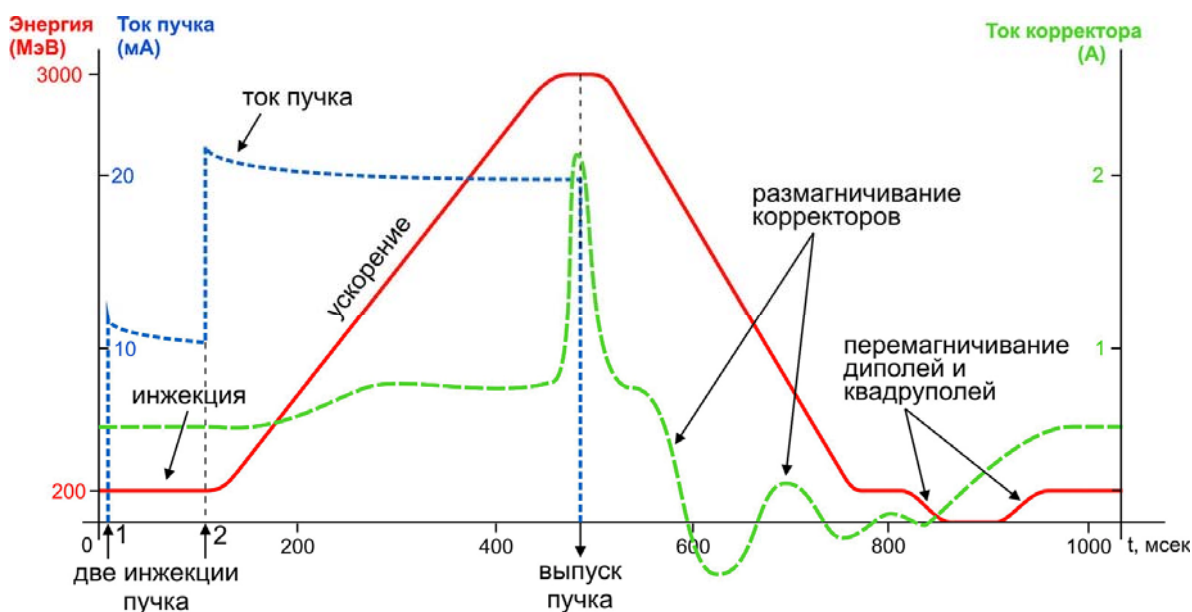


Рис. 2. Схема цикла бустера и примеры формы изменения тока в диполях и корректоре орбиты пучка

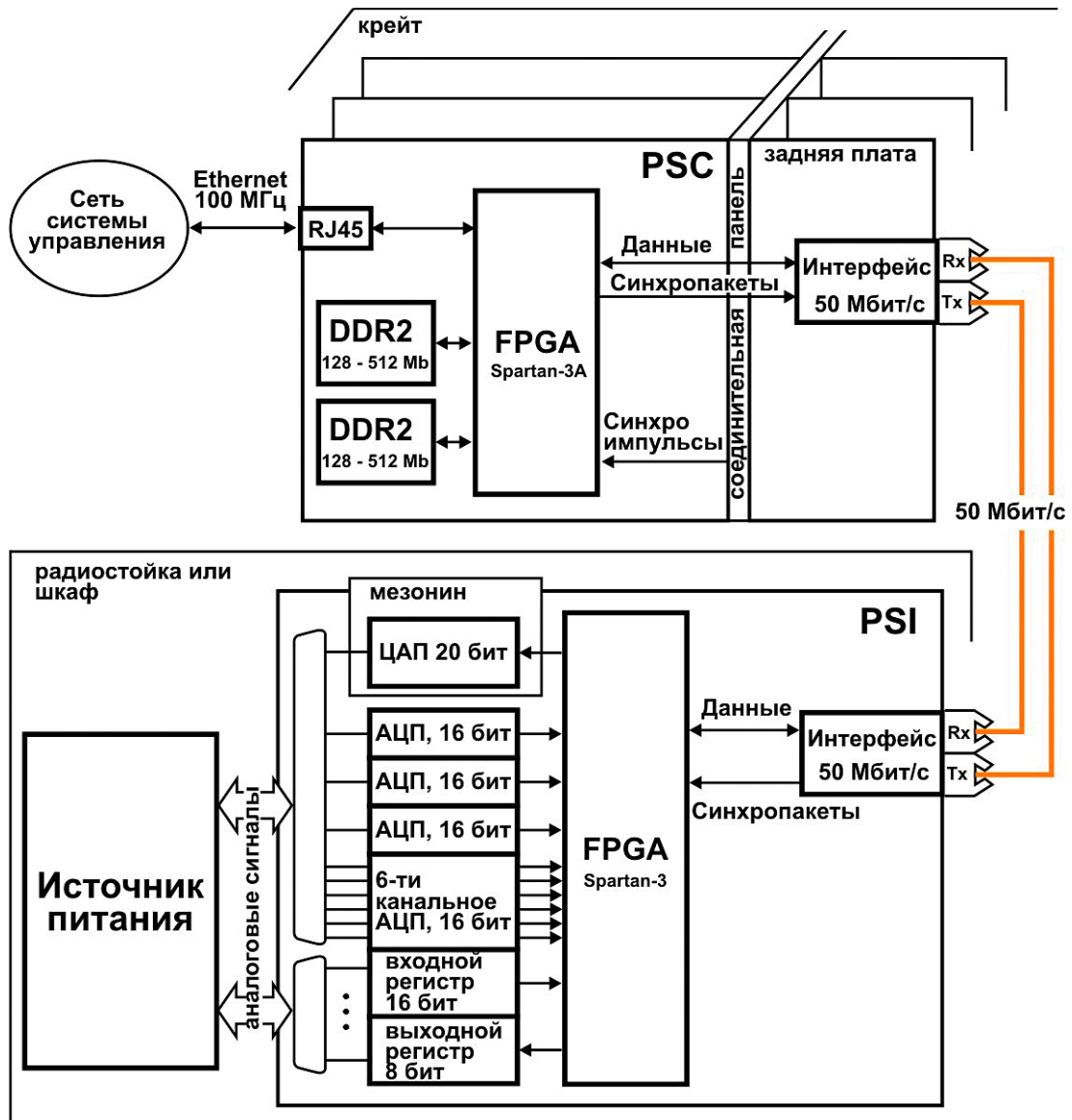


Рис. 3. Структурная схема PSC и PSI

PSC на бустере, определяемый прошивкой, существенно отличается от режима работы контроллеров на накопительном кольце и транспортных линиях. В данной статье приведено описание работы версии прошивки контроллера, специально разработанной для бустера.

Основным узлом PSC является FPGA Spartan-3A [9], управляющая работой всех остальных компонентов PSC и осуществляющая взаимодействие со всеми устройствами ввода / вывода, находящимися в PSI. В FPGA также реализован SoftCPU MicroBlaze [10], на котором исполняется программа, реализующая протокол обмена дан-

ными с программным обеспечением системы управления и осуществляющая передачу данных из / в SDRAM. Контроллер PSC был спроектирован в BNL в 2006–2009 гг. для управления источниками питания основного кольца комплекса NSLS-II. С началом разработки бустера в конце 2010 г. стало очевидно, что заложенная схема работы PSC неприменима для управления его источниками питания из-за цикличности их работы. Был предложен иной алгоритм работы контроллера, который удалось реализовать в FPGA Spartan-3A. В результате для управления бустером используются те же PSC, что и для основного кольца, но с другой

версией прошивки в FPGA. В данной статье приведено описание работы системы управления с использованием версии прошивки контроллера, разработанной специально для бустера. На рис. 3 показана структурная схема устройства и взаимодействия PSC и PSI.

Внутренняя логика PSC осуществляет управление ЦАП, АЦП, цифровыми входами и выходами, отвечает за внутреннюю и внешнюю синхронизацию, а также за взаимодействие с верхним программным уровнем системы управления. При этом устройств ввода-вывода PSC не имеет, все они расположены в PSI. PSC и PSI взаимодействуют по волоконно-оптической связи на скорости 50 Мбит/с как ведущий и ведомый следующим образом: PSC с тактовой частотой 10 кГц формирует и отправляет на исполнение в PSI уставки для ЦАП и биты выходного регистра PSI, а также синхронизирует измерения АЦП, а в ответ от PSI получает результаты измерения АЦП и состояния входного регистра PSI. Использование цифровой волоконно-оптической связи позволяет размещать PSI в непосредственной близости от источника питания, что минимизирует длину аналоговых трасс, а также снижает в PSC уровень возможных помех от мощных высокочастотных преобразователей источников питания.

Основными функциями PSC являются предоставление интерфейса для верхнего уровня системы управления и управление циклической работой всех устройств ввода / вывода. Уставки напряжений (команды) и измерения (статусы) передаются по 100 Мбит Ethernet в программное обеспечение, работающее в управляющем компьютере. На плате PSC располагается до 1 Гб DDR-II SDRAM памяти. Эта память используется для хранения массивов значений ЦАП, измерений АЦП и различной диагностической и статусной информации.

Основным узлом PSC является FPGA Spartan-3A [9], в которой реализован Soft-CPU MicroBlaze [10], а также осуществляется взаимодействие со всеми устройствами ввода / вывода, находящимися в PSI. На этом процессоре исполняется программа, реализующая протокол обмена данными с программным обеспечением системы управления и осуществляющая передачу данных из / в SDRAM.

Для организации цикла работы бустера используется массив из 10 150 значений,

записанных в SDRAM, которые с частотой 10 кГц последовательно выслаются в PSI и поступают на вход ЦАП (таким образом, точная длительность цикла бустера в 1 Гц равна 1,015 с). В памяти PSC отведено место под два таких массива для реализации двойной буферизации. Один из массивов является активным, а другой – пассивным. Значения из активного массива в течение цикла поступают на вход ЦАП, а в пассивный массив значения могут быть записаны из программного обеспечения системы управления. Время загрузки массива в PSC составляет порядка 20 мс. После того, как новые значения записаны в пассивный массив, указатели на активный и пассивный массивы меняются местами, и при выполнении следующего цикла бустера на вход ЦАП будут поступать новые загруженные значения. Таким образом обеспечивается непрерывная работа источников питания в случае смены массива значений. Так как время загрузки массива в PSC составляет порядка 20 мс, то смена может происходить каждый цикл, что позволяет в реальном времени производить настройку работы усилителя.

Для мощных источников питания, управление которыми требует соблюдения определенных требований безопасной эксплуатации, в PSC предусмотрен специальный механизм для смены массива. В случае несовпадения значения в конце текущего массива со значением в начале нового массива, контроллер однократно отработает так называемый *переходный цикл*, плавно переводящий источник питания в новое начальное состояние. Массив значений для переходного цикла формируется в управляющем программном обеспечении и специальным способом загружается из управляющего компьютера перед загрузкой нового рабочего массива.

В PSI на мезонинных платах размещаются один или два 20-битных ЦАП, т. е. PSI может быть выполнен в одно- или двухканальном варианте. Для осуществления аналоговых измерений в одноканальном PSI имеется три прецизионных АЦП AD677KR разрядностью 16 бит и один 6-канальный АЦП AD7656-1Y разрядностью 16 бит. Для получения статусной информации (состояние блокировок и подсистем источника питания) PSI имеет 16-битный входной регистр. Для включения / выключения источника пи-

тания, сброса блокировок и других аналогичных задач используется 8-битный выходной регистр. В случае двухканального PSI число ЦАП и АЦП в устройстве удваивается.

Подключение контроллеров к системе управления реализуется с применением топологии звезда при помощи Ethernet-коммутатора. PSC выполнены в форм-факторе 3U евромеханики, крейт вмещает до 21 PSC. Все PSC магнитной подсистемы бустера размещены в трех крейтах, где сгруппированы по типам источников питания.

*Синхронизация устройств.* Система синхронизации координирует работу всех систем комплекса NSLS-II. Для управления магнитной системой формируется два основных сигнала, контролирующих цикл работы бустера, а также синхронизирующих работу всех источников питания. Эти сигналы через специальный разветвитель поступают в каждый из крейтов с PSC, где через

коммутационную панель крейта подаются в каждый контроллер.

Первый сигнал – это сигнал старта цикла бустера, который означает начало обработки активного массива. Сигналы следуют с частотой 1 или 2 Гц в зависимости от режима работы бустера.

Второй сигнал – это импульсы с частотой 10 кГц, которые тактируют ЦАП и АЦП, расположенные во всех PSI. Таким образом, достигается точная синхронизация всех ЦАП и АЦП в системе.

*Программное обеспечение* системы управления бустером построено по классической трехуровневой схеме с использованием программного комплекса EPICS. Аналогичным образом организовано программное обеспечение для автоматизации магнитной системы (рис. 4). Нижний уровень представлен драйверами и программным кодом в контрольно-измерительных электронных устройствах – PSC и PSI. Средний (серверный)

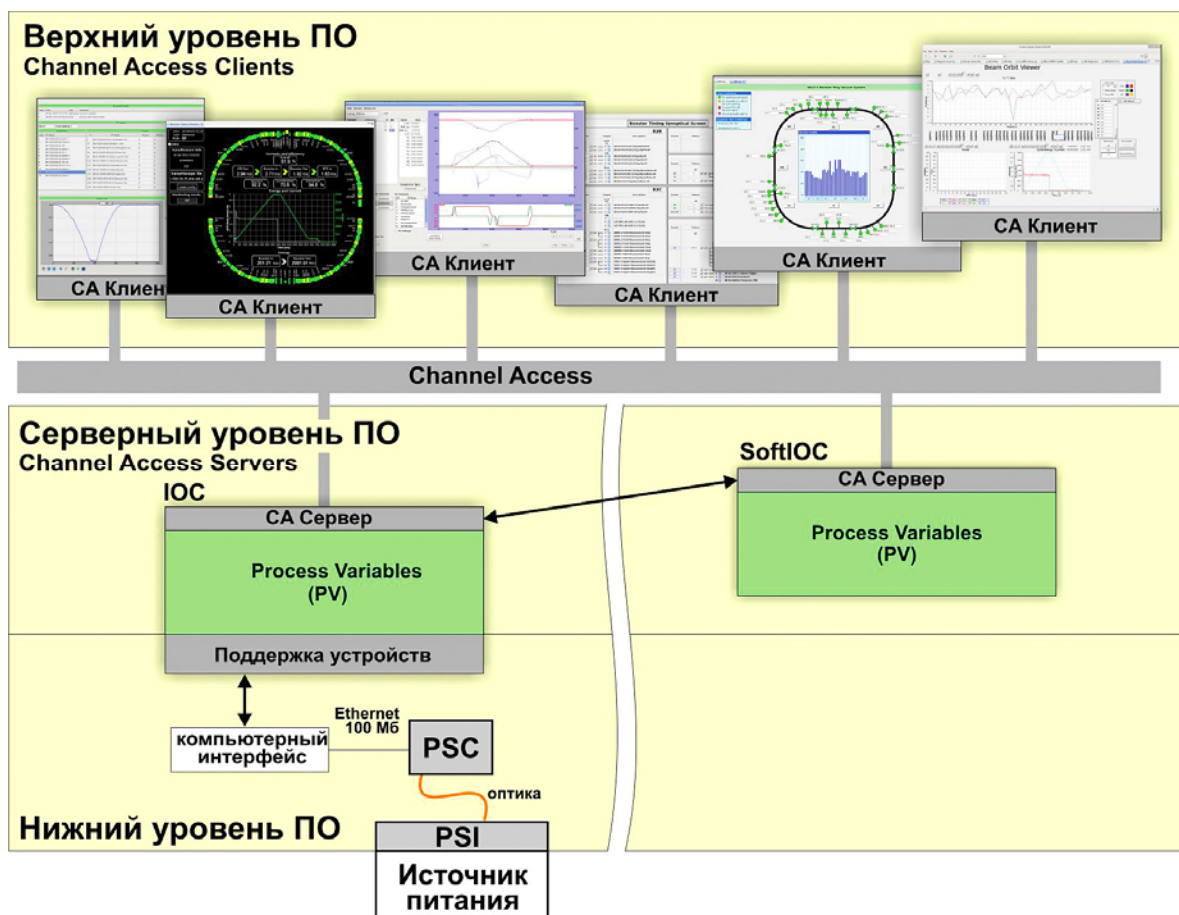


Рис. 4. Структура программного обеспечения на базе EPICS

уровень представляет собой набор специально разработанных программных контроллеров ИОС (*Input-Output Controller*), идентичных по устройству, но различных по настройкам.

ИОС – это программный компонент системы EPICS, осуществляющий взаимодействие с электронным оборудованием и формирующий фрагмент распределенной базы данных EPICS. В данном случае каждый ИОС отвечает за управление источниками питания одного типа. Такое разделение выбрано из соображений удобства настройки и эксплуатации.

ИОС взаимодействует с PSC при помощи специализированного протокола, построенного поверх TCP/IP. Данный протокол обеспечивает синхронную передачу команд и уставок в PSC и асинхронный прием измерений и статусов из PSC по мере их готовности. В результате достигается высокое быстродействие, и данные, соответствующие выполненному циклу бустера, оказываются доступны в ИОС через несколько миллисекунд после его завершения.

Другой функцией ИОС является обеспечение безопасной работы источников питания. Это необходимо в силу двух причин. Во-первых, источники питания, особенно мощные, не допускают слишком быстрых изменений, или, что еще хуже, скачков опорного напряжения. Иначе говоря, *функция управления*, дискретизированная в виде массива уставок длиной 10 150 значений, должна быть не только ограничена по амплитуде, но и быть достаточно гладкой и пологой в установленных пределах для каждого типа источников питания. Во-вторых, поскольку бустер имеет циклический характер работы, то в момент завершения очередного цикла и начала следующего должны выполняться те же самые правила, что и внутри цикла: не допускается разрыв в стыковке конца и начала массивов уставок, и должна быть ограничена крутизна перехода. Для решения этой задачи все ИОС снабжены необходимыми защитными механизмами, обеспечивающими проверку загружаемого массива уставок на корректность. Проверяются следующие параметры загружаемого массива:

- ограничение величин величин первой и второй производных;
- гладкость стыковки границ цикла;
- максимальное значение.

В случае, когда начальный уровень тока у загружаемой функции управления отличается от конечного уровня обрабатываемой функции, ИОС обеспечивает плавный переход между ними. В связи с этим реализована концепция *переходной функции*, которая заключается в замещении у обрабатываемой функции конечного интервала, когда электронный пучок уже выпущен, на переходную кривую, плавно соединяющую соответствующие значения обрабатываемой и новой функций управления. В ИОС делается автоматический расчет соединяющей кривой в форме полинома 5-го порядка, а полученная переходная функция загружается в PSC с пометкой, которая строго гарантирует однократное ее исполнение между выполнением обрабатываемой и новой функции. Данная процедура проиллюстрирована на рис. 5, где представлен фрагмент операторского экрана с графиками обрабатываемой и новой функций управления. Переходная функция получается путем встраивания в обрабатываемую функцию соединяющей кривой (на графике с 700 мс и до конца цикла). Так как выпуск ускоренного пучка происходит примерно на 400 мс цикла, то такая модификация функции управления на процесс ускорения не влияет.

### Конфигурация программного обеспечения

Под конфигурацией программного обеспечения в данной статье понимается набор настроек программных компонентов. Программное обеспечение для управления магнитной системой бустера NSLS-II обеспечивает функционирование 67 источников питания 6 разных типов и имеет весьма объемную и сложную конфигурационную информацию. *Концепция иерархии PV*. Основными компонентами, требующими конфигурации, являются ИОС, которые помимо обеспечения доступа к оборудованию реализуют распределенную базу данных EPICS. База данных содержит переменные (*Process Variables – PV*), представляющие значения различных параметров установки, доступные по сети для чтения и записи с помощью протокола Channel Access [11]. В зависимости от логики работы каждая PV получает свое значение либо из оборудования, либо из значения другой PV, либо из управляющей программы. Таким образом, PV является ячейкой



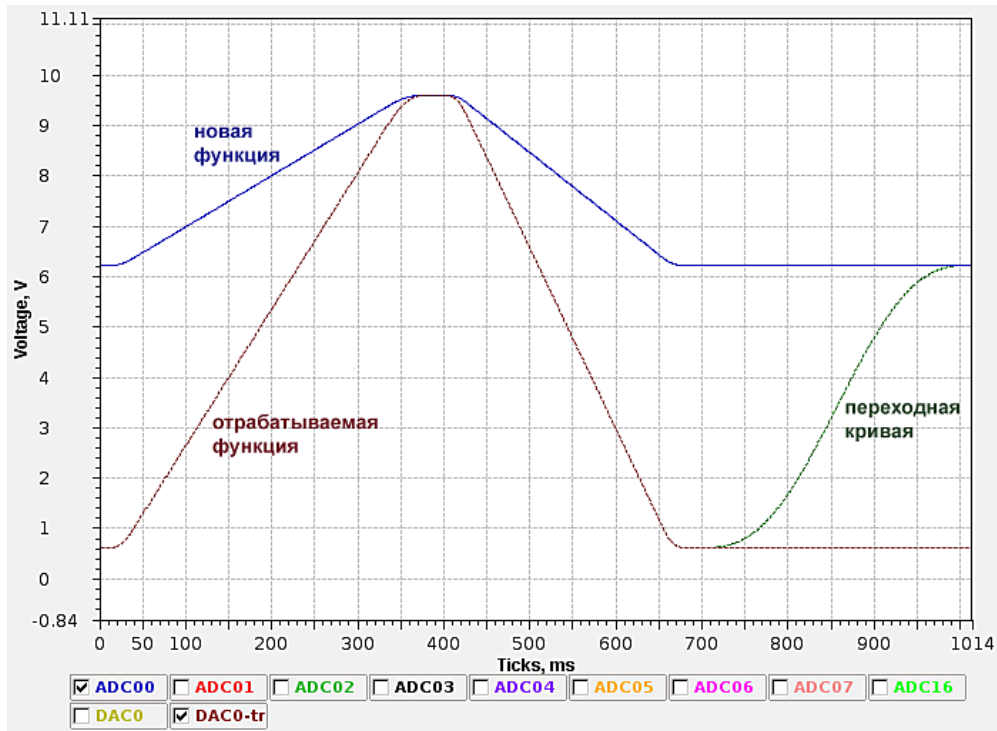


Рис. 5. Графики управляющих функций для дипольного источника



Рис. 6. Организация PV в системе управления

хранения данных в распределенной базе данных EPICS. Любая PV создается и конфигурируется текстовой записью (рекордом) определенного типа. Тип рекорда – это описание элемента распределенной базы данных, содержащее набор полей (параметров рекорда) и связанное с ним поведение.

Задачи управления установкой можно разбить на три уровня: работа с электронной управлением, работа с источниками питания, работа с параметрами ускорителя (величина магнитного поля, энергия, бетатронные частоты, угол отклонения пучка и т. п.)

Для каждого из этих уровней посредством PV экспериментальная установка представляется в виде, удобном для соответствующего круга пользователей, и предоставляется нужный программный интерфейс. Например, инженер, обслуживающий контрольно-измерительную электронику, работает с соответствующими PV через интерфейс, реализованный на уровне электронных устройств. А персонал, занимающийся настройкой и обслуживанием источников питания, проводит диагностику оборудования, используя более высокоуровневый интерфейс, скрывающий особенности и детали электроники, управляющей источниками питания. Физикам и операторам, обеспечивающим работу всего ускорителя, важна величина поля в магните или сила тока, протекающего через его обмотку. Для решения их задач предоставляется интерфейс, использующий PV, которые содержат значения параметров установки. Эти три уровня PV образуют иерархию, показанную на рис. 6, где соседние уровни связаны предоставлением данных, которые сами по себе также имеют практическую значимость.

*Описание схемы конфигурирования.* В связи с обширностью и разнородностью номенклатуры электронного оборудования и источников питания для нужд магнитной подсистемы бустера была применена специально разработанная автоматизированная система конфигурирования ИОС.

Процесс создания конфигурации можно разбить на два этапа: проектирование иерархии PV и последующее отображение ее в стандартных стартовых скриптах программных контроллеров ввода-вывода (ИОС).

Для обоих этапов применена специальная конфигурационная база данных РuСDB [12]. Сначала в ней были отражены все устройства: электронные блоки управления и источники питания. Затем были установлены связи (способы соединения контрольно-измерительных каналов) между источниками питания и электроникой (PSI). Иначе говоря, в терминах EPICS каждому PV, отражающему какой-либо параметр источника питания, был назначен рекорд определенного типа. В заключение был создан скрипт, автоматически экспортирующий данные из БД в формат стартового скрипта ИОС.

Разработанная система конфигурации избавляет от ручного редактирования стартовых скриптов ИОС, которые в случае управ-

ления магнитной системой бустера имеют значительный размер и сложную структуру. К тому же применение РuСDB значительно упрощает процесс перекоммутации оборудования, что часто требуется в процессе монтажа ускорителя и последующей его отладки.

## Заключение

Разработана схема цифрового управления источниками питания для бустерного синхротрона NSLS-II. Впервые было создано программное обеспечение, позволяющее непрерывно контролировать функцию тока в магнитах в течение всего цикла установки, получая при этом исчерпывающие данные о работе источников питания. Разработанное программное обеспечение автоматически осуществляет проверку и обработку загружаемой управляющей функции и, тем самым, обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к качеству управления источниками питания различного типа.

Разработанная схема управления и реализованное на ее основе программное обеспечение было внедрено на бустерном синхротроне источника СИ NSLS-II. Запуск ускорителя с получением проектных параметров электронного пучка и последующая эксплуатация установки показали высокую надежность разработанной системы, а ее функциональные особенности позволяют прецизионно настроить и оперативно корректировать режимы работы.

## Литература

1. Gurov S., Erokhin A., Karnaeв S., Kiselev V., Levichev E., Polyansky A., Semenov A., Shiyankov S., Sinyatkin S., Smaluk V., Hseuh H.-C., Shaftan T. Status of NSLS-II Booster // Proc. of IPAC. Shanghai, 2013.
2. Гуров С. М., Акимов А. В., Анчугов О. В., Батраков А. М., Беликов О. В., Бехтенов Е. А., Буренков Д. Б., Чеблаков П. Б., Черепанов В. П., Чернякин А. Д., Ческидов В. Г., Чуркин И. Н., Элкауер А., Ерохин А. И., Флийер Р., Горчаков К. М., Гуров Д. С., Ганетис Д., Ксё Х., Карнаев С. Е., Карпов Г. В., Киселев В. А., Кобец В. В., Константинов В. М., Колмогоров В. В., Корепанов А. А., Купер Э. А., Кузьминых В. С., Левичев Е. Б., Де Лонг Ж., Мамкин В. Р., Медведко А. С., Мешков О. И., Нефедов Н. Б., Нейфельд В. В., Окунев И. Н.,

Петров В. В., Петриченко М. В., Филиченко А. В., Полянский А. В., Пурескин Д. Н., Рахимов А. Р., Рувинский С. И., Щеголев Л. М., Семенов А. М., Сеньков Д. В., Середняков С. С., Шафтан Т. В., Шарма С., Шичков Д. С., Синх О., Шиянков С. В., Шведов Д. А., Снятков С. В., Смалюк В. В., Суханов А. В., Тиан Ю., Уткин А. В., Виллеке Ф., Яминов К. Р., Йонг Х. Состояние работ по бустеру для NSLS-II // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования». 2012. № 4. С. 3–6.

3. *Luedeke A.* Application of Digital Regulated Power Supplies for Magnet Control at the Swiss Light Source // Proc. of ICALEPCS. San Jose, 2001.

4. *Gros P., Bobault S., Loulergue A.* The 3Hz Power Supplies of the Soleil Booster // Proc. of EPAC. Edinburgh, 2006.

5. *Dalesio L., Kraimer M., Kozubal A.* EPICS Architecture // Proc. of ICALEPCS. Tsukuba, 1991.

6. Experimental Physics and Industrial Control System. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/>. (дата обращения 21.08.2014).

7. *Louie W., Dalesio L., Ganetis G., Tian Y.* NSLS-II Power Supply Controller // Proc. of PAC. N. Y., 2011.

8. *Tian Y., Louie W., Ricciardelli J., Dalesio L., Ganetis G.* Power Supply Control System of NSLS-II // Proc. of ICALEPCS. Kobe, 2009.

9. XILINX Spartan-3A FPGA Family: Data Sheet. URL: [http://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds529.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds529.pdf). (дата обращения 21.08.2014).

10. XILINX MicroBlaze Processor Reference Guide. URL: [http://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals/xilinx14\\_7/mb\\_ref\\_guide.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx14_7/mb_ref_guide.pdf). (дата обращения 21.08.2014).

11. *Hill J. O., Lange R.* EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>. (дата обращения 21.08.2014).

12. *Makeev A., Cheblakov P., Atuchin N., Bolkhovityanov D., Karnev S.* Centralized Software and Hardware Configuration Tool for Large and Small Experimental Physics Facilities // Proc. of ICALEPCS. San Francisco, 2013.

*Материал поступил в редколлегию 26.08.2014*

**P. B. Cheblakov, A. A. Derbenev, S. E. Karnev, A. V. Makeev**

#### **BASIC SOFTWARE FOR NSLS-II BOOSTER SYNCHROTRON MAGNETIC SYSTEM CONTROL**

NSLS-II booster synchrotron magnetic system requires a specific control hardware and software. This article describes the control system as a whole and its concepts of operation. Principles of control were proposed and EPICS-based software was developed, permitting individual independent digital control of each power supply. This design provides precise alteration of power supplies operation in each synchrotron cycle with frequency of 1 or 2 Hz.

*Keywords:* control system, power supply, synchrotron, booster, EPICS.