

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.384.63, 681.518.3, 681.518.5

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ ВСТРЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПУЧКОВ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-2000

Д. Е. Беркаев^{1,2}, П. Ю. Шатунов¹, Д. Б. Шварц^{1,2},
Ю. А. Роговский^{1,2}, А. И. Сенченко¹, И. М. Землянский¹,
А. С. Касаев¹, А. Л. Романов¹, А. Н. Кирпотин¹, А. П. Лысенко¹,
Е. А. Переведенцев^{1,2}, И. А. Кооп^{1,2,3}, В. Р. Козак¹, К. В. Горчаков¹,
В. Ф. Веремеенко¹, О. В. Беликов^{1,2}, Ю. М. Шатунов^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: D.E.Berkaev@inp.nsk.su

На примере одной из основных операций по достижению проектных параметров физической установки — изменение энергии накопленных и сталкивающихся пучков — рассматриваются вопросы автоматизации управления электрон-позитронным комплексом ВЭПП-2000 (создан в Институте ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск) — новой большой физической установкой, построенной и запущенной в эксплуатацию в России в XXI веке. Предложен подход к разработке системы автоматизации большой физической установки, описываются особенности, а также приводятся ключевые моменты, связанные с построением архитектуры такой системы в целом и отдельных её подсистем.

Ключевые слова: коллайдер, автоматизация, система управления, ускорительный комплекс, энергия, круглые пучки.

Введение. В 2001 г. остановлен электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М, плодотворно работавший с 1974 г. в области энергий 180–700 МэВ в одном пучке. На этой машине с пиковой светимостью $3 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с несколькими поколениями детекторов был набран суммарный интеграл светимости $\sim 100 \text{ пбн}^{-1}$ [1–3]. В то же время в области энергий от 0,7 до 1 ГэВ в пучке за всю историю работали только два коллайдера: ADONE (г. Фраскати, Италия) [4] и DCI (г. Орсе, Франция) [5], имевшие очень низкую по современным представлениям светимость около $3 \cdot 10^{29} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и набравшие в сумме лишь 6 пбн⁻¹ интегральной светимости. Прецизионное измерение сечения аннигиляции e^+e^- в адроны в данном диапазоне энергий является одной из важных задач в области экспериментальной физики. Не менее интересен процесс рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар вблизи порога. Для решения этих и ряда других физических задач на базе ускорительного комплекса ВЭПП-2М был построен новый электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 на энергию до 1 ГэВ в пучке со светимостью до $1 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [6].

Целью данной работы являлось создание архитектуры и программных алгоритмов системы автоматизации комплекса ВЭПП-2000 для оптимального управления энергией встречных электрон-позитронных пучков.

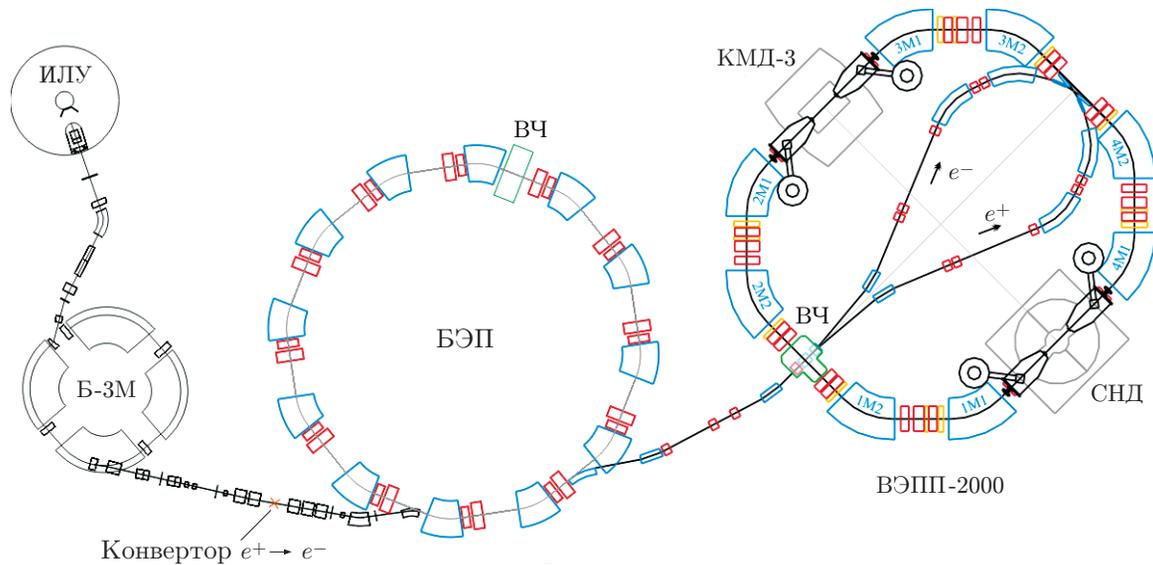


Рис. 1

Проект ВЭПП-2000. Ускорительный комплекс ВЭПП-2000 использует инжекционную инфраструктуру коллайдера ВЭПП-2М, кроме построенных заново каналов транспортировки пучков непосредственно в кольцо ВЭПП-2000 [7, 8]. Общая схема комплекса представлена на рис. 1 (КМД — криогенный магнитный детектор, СНД — сферический нейтральный детектор, ВЧ — резонатор высокой частоты).

Пучок электронов ускоряется импульсным линейным ускорителем (ИЛУ) до энергии 2 МэВ, инжектируется в импульсный слабофокусирующий синхробетатрон Б-3М, где ускоряется сначала в бетатронном, а затем в синхротронном режиме до энергии 250 МэВ, выпускается и фокусируется литиевыми линзами на конвертор. Полученные позитроны с коэффициентом конверсии $\sim 10^{-4}$ накапливаются в бустерном синхротроне БЭП (бустер электрон-позитронный) на энергии 125 МэВ. Частота следования импульсов 0,7 Гц. Производительность конверсионной системы составляет 60 мкА за выстрел, что соответствует $2 \cdot 10^7 e^+/с$. Затем пучок накопленных частиц ускоряется в БЭП и по каналам транспортировки инжектируется в коллайдер ВЭПП-2000. При работе в режиме накопления электронов пучок ускоряется в Б-3М до энергии 125 МэВ и инжектируется в БЭП, минуя вольфрамовую мишень конвертора, где после накопления необходимого для эксперимента количества электронов также ускоряется и инжектируется в ВЭПП-2000 в противоположном позитронам направлении. После этого процесс повторяется.

Накопительное кольцо БЭП изначально проектировалось на энергию 900 МэВ [9], в то время как эксперименты на коллайдере ВЭПП-2000 предполагают энергию до 1 ГэВ. Таким образом, для успешной работы всего ускорительного комплекса необходимо уметь изменять энергию как электронного, так и позитронного пучков от 125 до 900 МэВ в бустерном кольце БЭП и далее до 1 ГэВ уже непосредственно в кольце коллайдера ВЭПП-2000.

Разработанная в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН система управления ускорительным комплексом ВЭПП-2000 базируется на нескольких компьютерах класса PC под управлением операционной системы Linux, объединённых в единую вычислительную сеть [10, 11]. Эти компьютеры в зависимости от аппаратной комплектации и назначения могут выполнять различные функции: управление аппаратным обеспечением источников питания магнитных элементов ускорительного комплекса, сбор данных системы измерения параметров пучков, поддержка инфраструктуры сети и сервис (СУБД, хранение файлов и т. д.). Для успешной эксплуатации ускорительного комплекса оператору предоставляется удобный графический интерфейс, который составляют многомониторные машины под управлением той же операционной системы.

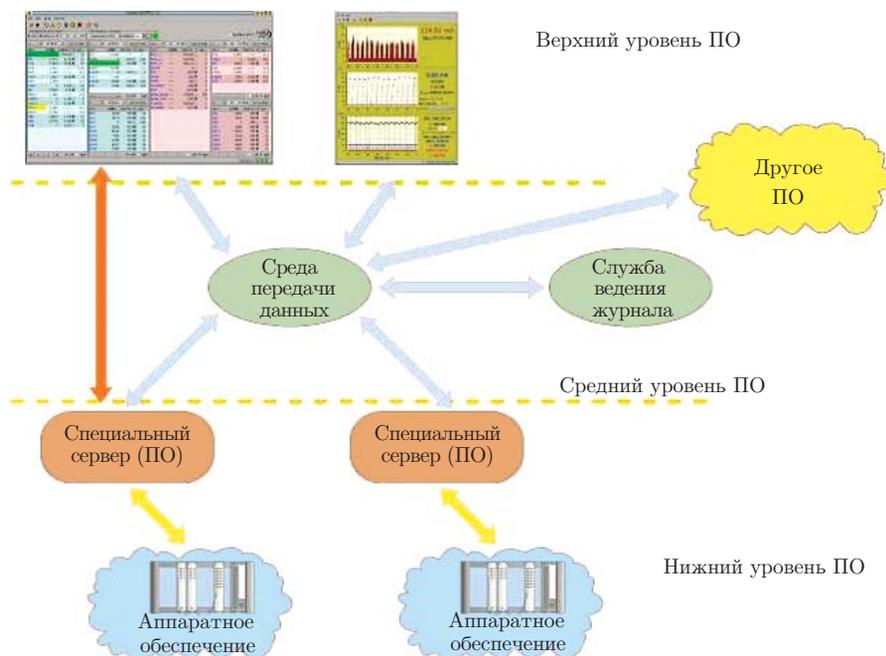


Рис. 2

Архитектура системы управления основана на широко применяемой для автоматизации больших физических установок трёхуровневой структуре программного обеспечения. Верхний уровень — это графический интерфейс программ управления, с которыми непосредственно взаимодействует оператор ускорительного комплекса. Нижний уровень — это программы, предоставляющие доступ к различным аппаратным контроллерам: ЦАП, АЦП и т. д. Средний уровень — это набор программ и библиотек для удобного взаимодействия верхнего и нижнего уровней. Сюда вынесена вся логика работы: пересчёт кодов аппаратуры в физические величины, разнообразные алгоритмы защиты, последовательности команд и действий по управлению аппаратурой и др. Все три уровня имеют доступ к общим базам данных для конфигурирования и возможность обмениваться данными напрямую друг с другом (рис. 2).

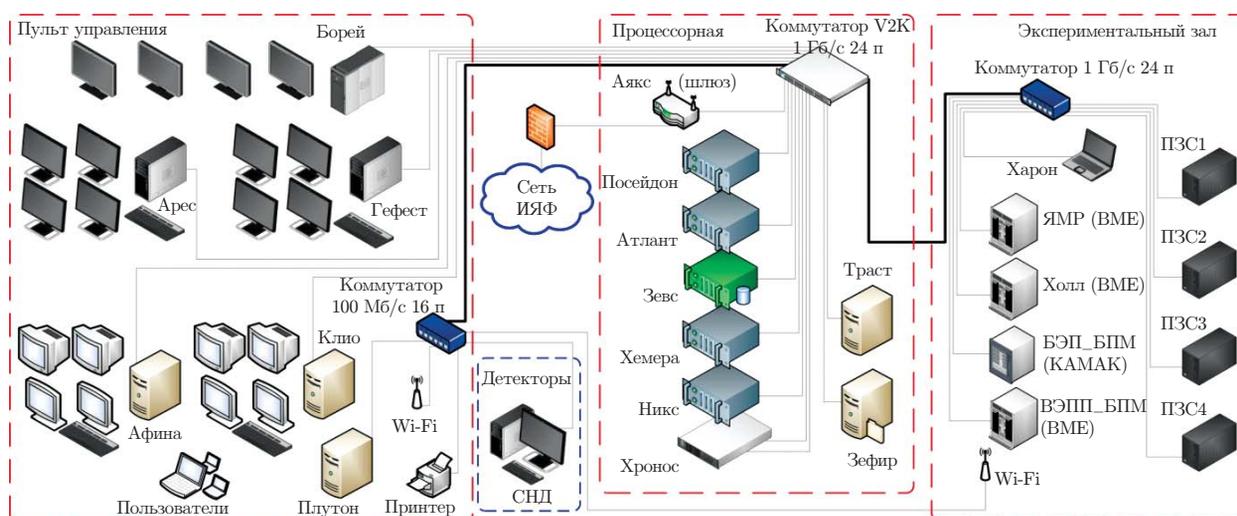


Рис. 3

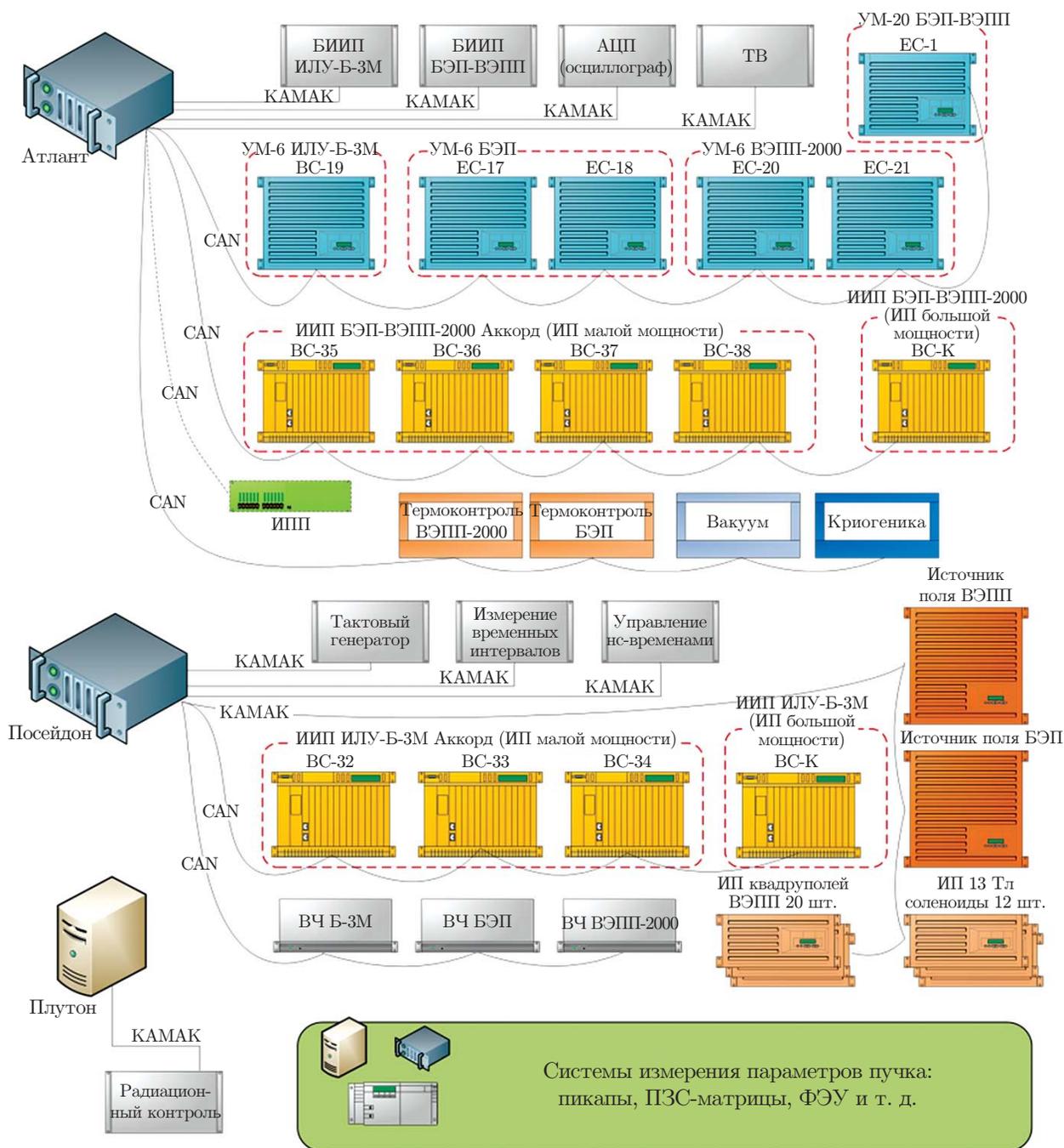


Рис. 4

С другой стороны, система управления ВЭПП-2000 структурно разделена на несколько подсистем: сильноточные источники, источники питания магнитных коррекций, импульсные элементы, управление инфлекторами, различные системы наблюдения за пучком, контроль температуры, радиационный контроль и т. д. — всего около 15 подсистем.

Предложенная архитектура построения системы управления даёт целый ряд преимуществ. Разделение на функциональные подсистемы позволяет легко их модернизировать без влияния на «соседей», а также относительно просто создавать и вводить в эксплуатацию новые. Последнее особенно важно для разработки систем гибкого и удобного наблюдения за пучком и измерения его параметров. Кроме того, многоуровневый подход даёт возможность скрыть особенности работы с аппаратным обеспечением как от разра-

ботчика высокоуровневых графических приложений, так и от оператора ускорительного комплекса, что, в свою очередь, унифицирует интерфейсы и позволяет сосредоточиться на развитии функциональности системы управления ускорительного комплекса даже начинающим разработчикам и операторам.

Схема вычислительной сети комплекса ВЭПП-2000 представлена на рис. 3, схема аппаратного обеспечения системы управления — на рис. 4 (БИИП — блок измерения импульсных параметров, ИИП — импульсный источник питания, ИПП — измеритель положения пучка).

Управление энергией на ускорительном комплексе ВЭПП-2000. Как уже было отмечено, для успешной работы комплекса требуется управление энергией двух входящих в него колец: БЭП и ВЭПП-2000. Изменение энергии любого из этих колец с сохранением накопленных пучков предполагает синхронное изменение (увеличение или уменьшение) магнитных полей во всех элементах, составляющих структуру данного кольца, пропорционально энергии. Это означает необходимость одновременного изменения токов во всех задействованных в таком переходе источниках питания магнитных элементов по заранее определённым законам (таблицам перехода). Таблицы должны учитывать как общие свойства структуры ускорителя (текущая и финальная энергии, бетатронные частоты, дисперсии и пр.), так и физические свойства отдельных магнитных элементов: основных магнитов, фокусирующих линз, различных коррекций (кривая намагничивания, ограничения на скорость изменения тока в элементах, например в высокоиндуктивных нагрузках).

В качестве аппаратного обеспечения в системе управления ВЭПП-2000 в основном применяются разработанные в ИЯФ СО РАН специализированные электронные блоки, использующие унифицированный протокол промышленной связи CANBus [12, 13]. Общее количество таких блоков (контроллеров) и каналов управления представлено в таблице. Как видно из таблицы, источники питания магнитных элементов обоих колец имеют чёткое разделение на слаботочные многоканальные коррекции — до 6 А (один контроллер управляет несколькими источниками тока) и сильноточные одноканальные — от 300 А и выше (один контроллер управляет одним источником). Для мощных источников тока, питающих основные поворотные магниты, в систему введены добавочные контроллеры, необходимые для измерения дополнительных параметров этих источников, но принцип «один ЦАП — один источник тока» для них по-прежнему сохраняется.

Структура блоков и каналов управления колец БЭП и ВЭПП-2000

Магнитный элемент	Тип контроллера	Количество контроллеров	Количество каналов	Максимальный ток
Поворотные магниты и квадруполи БЭП	CEDAC20	9	1	10 кА
Коррекции БЭП	CANDAC16/CANADC40	6/6	66	6 А
Поворотные магниты ВЭПП-2000	CEDAC20	3	1	10 кА
Квадруполи ВЭПП-2000	CDAC20	20	20	300 А
Сверхпроводящие соленоиды ВЭПП-2000	CEAC51	12	12	400 А
Коррекции ВЭПП-2000	CANDAC16/CANADC40	6/6	72	6 А

Исходя из логики разбиения аппаратного обеспечения на подсистемы по однотипности методов управления и выполнения задач управление источниками питания колец БЭП и ВЭПП-2000 разделено на две подсистемы: слаботочные многоканальные источники и сильноточные элементы. Поэтому потребовалась разработка независимых серверных программ среднего уровня для обеих подсистем, каждая из которых учитывает все особенности работы своей подсистемы: максимально допустимый ток и максимальную скорость его изменения, много- и одноканальность, параметры подключённых нагрузок, режимы защит и блокировок и т. д.

Таким образом, программа верхнего уровня, «желающая» по команде оператора или по иному общесистемному событию, например при смене режима работы, изменить энергию одного из ускорительных колец, обязана задать в оба сервера среднего уровня таблицы перехода для каждого из элементов выбранного кольца. На этом этапе происходит проверка допустимости задаваемых значений в смысле различных ограничений каждой из подсистем. После проверки она должна получить от них подтверждения о том, что данные таблицы переданы во внутреннюю память контроллеров (в связи с особенностями протокола CANBus и его применения на ВЭПП-2000 это может занимать до 1 с и даже более) и контроллеры готовы к синхронному старту. Далее программа управления максимально короткими командами даёт одновременный старт всем заданным ранее источникам и в некоторых случаях индицирует и отслеживает исполнение процесса перехода. Сложный переход от одной энергии к другой иногда может состоять из нескольких более простых этапов. Возможная рассинхронизация стартов различных подсистем по одной команде связана с реализацией протокола TCP/IP, по которому осуществляется межпрограммное взаимодействие, и на практике не превышает 1–2 мс, что несущественно для переходов между энергиями, продолжающихся до 30 с и даже более с учётом всех возможностей аппаратуры комплекса ВЭПП-2000.

Управление сверхпроводящими соленоидами на ВЭПП-2000. В электронно-оптической структуре коллайдера ВЭПП-2000 для фокусировки сталкивающихся пучков в два места встречи используются четыре многосекционных сверхпроводящих соленоидов, питаемых тремя источниками каждый [8]. Такой соленоид может развивать поле до 13 Тл и имеет сложную систему криогенных защит, направленных на предотвращение выхода сверхпроводящих обмоток соленоида из строя в случае срыва сверхпроводимости. В частности, для отвода запасённой в соленоиде мощности в случае срыва каждая катушка защищена параллельным сопротивлением R . Схема подключения обмотки соленоида приведена на рис. 5 ($U(t)$ — управляемый источник тока, r — сопротивление подводящих проводов, L — индуктивность катушки соленоида).

Ток в сверхпроводящей катушке (её сопротивление строго равно нулю) совпадает со стационарным током источника ($I_R = 0$). Однако в ситуации, когда ток источника необходимо менять в процессе изменения энергии кольца, его часть вследствие большой

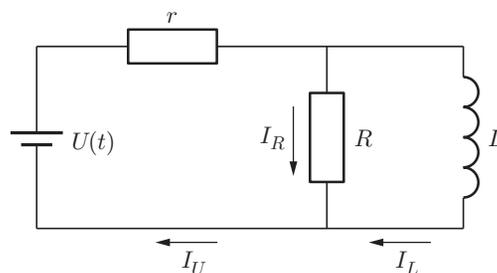


Рис. 5

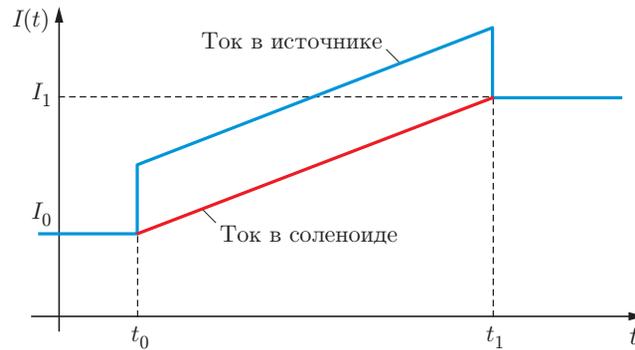


Рис. 6

индуктивности катушки (до 6 Гн) начинает замыкаться через защитные сопротивления R . Таким образом, в отличие от случая с чисто резистивной нагрузкой ток в соленоиде, создающий магнитное поле, не совпадает с током, задаваемым источником. Тем не менее для успешного ускорения без потери пучка важно добиться условия пропорциональности энергии (задаётся током основных магнитов) и поля соленоидов. Это достигается заданием специального закона изменения тока в источниках, питающих такие соленоиды (рис. 6).

Данный метод был предложен, реализован и опробован экспериментально на комплексе ВЭПП-2000 и позволил в значительной мере ускорить изменение энергии коллайдера без потери пучков [8].

Заключение. В представленной работе рассмотрены вопросы автоматизации введённого в эксплуатацию в ИЯФ СО РАН нового коллайдера ВЭПП-2000, который базируется на современных принципах и технологиях построения систем управления установками такого масштаба.

Основное внимание уделено вопросам изменения энергии, как одной из главных задач в работе ускорительного комплекса. Предложено решение для изменения полей сверхпроводящих соленоидов с высокой индуктивностью пропорционально изменению ведущего поля, а следовательно, и энергии коллайдера.

Благодаря созданному в ИЯФ СО РАН программно-аппаратному обеспечению для управления работой ускорительной установки были получены рекордные значения параметра встречного пучка, достигнута проектная энергия 1 ГэВ и рекордный уровень светимости $1,2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на энергии рождения φ -мезона [14, 15].

Рассмотренный подход к автоматизации имеет трёхуровневую структуру программного обеспечения и чёткое разделение на подсистемы и может быть предложен для применения в новых ускорительных и других проектах больших физических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dolinsky S. I., Druzhinin V. P., Dubrovin M. S. et al. Summary of experiments with the neutral detector at the e^+e^- storage ring VEPP-2M // Phys. Rep. 1991. **202**, N 3. P. 99–170.
2. Achasov M. N., Aulchenko V. M., Beloborodov K. I. et al. Review of experimental results from SND detector // Proc. AIP Conf. 2002. Vol. 619. P. 30–39.
3. Sibidanov A. L., CMD-2 Collaboration. Precise measurement of hadronic cross sections with CMD-2 detector // Proc. AIP Conf. 2005. Vol. 814. P. 478–485. URL: <http://inspirehep.net/record/714679?ln=ru> (дата обращения: 27.09.2013).
4. Adone Group. Status report on the electron-positron storage ring Adone // Proc. PAC 1971. Chicago, USA. P. 217–220.

5. **Orsay Storage Ring Group.** Status report on D.C.I. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. **NS-26**, N 3. P. 3559–3561.
6. **Shatunov Yu. M., Evstigneev A. V., Ganyushin D. I. et al.** Project of a new electron-positron collider VEPP-2000 // Proc. of EPAC 2000. Vienna, Austria. P. 439–441.
7. **Беркаев Д. Е.** Инжекция электронов и позитронов в коллайдер ВЭПП-2000: Дисс. . . . канд. физ.-мат. наук /ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2010. 76 с.
8. **Шатунов П. Ю.** Магнитная система накопителя с электрон-позитронными встречными пучками ВЭПП-2000: Дисс. . . . канд. физ.-мат. наук /ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2011. 76 с.
9. **Анашин В. В., Вассерман И. Б., Вещеревич В. Г. и др.** Рабочие материалы: накопительное кольцо БЭП. Новосибирск, 1983. (Препр. /ИЯФ СО АН СССР; 83-98).
10. **Berkaev D. E., Belikov O. V., Cheblakov P. V. et al.** Control system for injection channels of VEPP-2000 collider // Proc. of ICALEPCS'09. Kobe, Japan, 10–17 Oct., 2009. P. 721–723.
11. **Senchenko A. I., Berkaev D. E., Gorbatenko O. et al.** VEPP-2000 collider control system // Proc. PСaPAC'12. Kolkata, India, 2012. P. 263–267.
12. **Козак В. Р.** Распределенные системы управления и контроля ускорительными комплексами ИЯФ СО РАН: Дисс. . . . д-ра техн. наук /ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2012. 218 с.
13. **Беликов О. В., Веремеенко В. Ф., Козак В. Р. и др.** Семейство контроллеров СЕАС для управления источниками питания ускорительно-накопительных комплексов // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2012. **7**, вып. 4. С. 43–48.
14. **Беркаев Д. Е., Шварц Д. Б., Шатунов П. Ю. и др.** Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000. Первые эксперименты // ЖЭТФ. 2011. **140**, вып. 2. С. 247–255.
15. **Berkaev D., Kirpotin A., Koop I. et al.** VEPP-2000 operation with round beams in the energy range from 1 to 2-GeV // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2012. **225–227**. P. 303–308.

Поступила в редакцию 27 сентября 2013 г.
