

Частотные характеристики разомкнутой цепи обратной связи по пучку показаны на рис. 4. В рабочем диапазоне частот квадрупольных колебаний ≤ 4 кГц отклонение фазы сигнала от оптимальной величины, равной -90° , не превышает 45° .

Экспериментальные результаты. На рис. 5 приведены осциллограммы работы цепи обратной связи при влете первого сгустка протонов на плато ввода У-70 и в районе критической энергии. На каждой осциллограмме верхний луч показывает сигнал пиковой плотности пучка, нижний — сигнал модулирующего напряжения на выходе блока аналоговой обработки. В центре дан увеличенный фрагмент начальных участков этих двух сигналов. Обратная связь по пучку разомкнута на рис. 5, а, в и замкнута на рис. 5, б, г.

На рис. 5 легко заметить фазовый сдвиг 90° между сигналами пучка и коррекцией амплитуды ускоряющего поля. При росте пиковой плотности пучка амплитуда ВЧ-напряжения уменьшается и наоборот. В результате происходит параметрическое подавление колебаний плотности сгустка. Система работает в насыщенном режиме. Постоянная времени демпфирования составляет примерно два периода синхротронных колебаний.

Высокочастотная помеха на сигналах рис. 5 вызвана составляющей сигнала на частоте обращения пучка (около 200 кГц), не полностью отфильтрованной при обработке.

Опыт эксплуатации макета цепи амплитудной обратной связи по пучку в нескольких сеансах работы ускорителя У-70 показал состоятельность предложенных схемотехнических решений и высокую надежность аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов С.В., Лебедев О.П. Анализ устойчивости комплекса обратных связей ВЧ-системы синхротрона У-70: Препринт ИФВЭ 2001-46, 2001.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1983.

УДК 621.3.038.624

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СИНХРОТРОНА ФИАНА НА ЭНЕРГИЮ 1,3 ГэВ КАК ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ

*Алексеев В.М., Бусыгин В.П., Кольцов А.В., Куракин В.Г., Субботин Г.Г., Тамм Е.И.
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН),*

Куракин П.В. (Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН)

Электронный синхротрон Физического института им. П.Н. Лебедева РАН на максимальную энергию 1,3 ГэВ, расположенный на площадке в Троицке, с момента пуска в середине 70-х годов используется для проведения экспериментов в области ядерной физики и физики элементарных частиц на пучках тормозного излучения и выведенного электронного пучка. Из исследований, выполненных в последние годы, наиболее впечатляющими представляются работы по поиску и обнаружению η -ядер.

В 80-е годы предпринималась попытка реализовать компьютерную систему мониторинга и управления, однако она не увенчалась успехом. Работы по автоматизации синхротрона возобновились около 2 лет назад. В основу проекта была положена концепция настраиваемого пользовательского интерфейса, относительно слабо связанная с конкретным объектом управления и по этой причине применимая к широкому классу физических установок.

Электронный синхротрон. Схема электронного синхротрона приведена на рисунке. Магнитная система ускорителя образована четырьмя 90-градусными сегментами, разделенными прямолинейными промежутками. В прямолинейных промежутках расположены ускоряющий резонатор, септумные магниты системы инжекции и медленного вывода, а также электростатические датчики тока для диагностических целей. Специальные обмотки, предназначенные для коррекции магнитного поля на этапе инжекции и возбуждения нелинейного резонанса перед выводом электронов, расположены на поверхности полюсов магнитов. Выведенный из синхротрона электронный пучок с помощью тракта транспортировки переводится в экспериментальный зал № 1 к установке меченых фотонов. Для формирования пучка тормозного излучения используется внутренняя вольфрамовая мишень. Система юстировки мишени обеспечивает попадание пучка тормозного излучения на экспериментальные установки, расположенные в зале № 2.

В качестве укоряющего элемента в синхротроне используется медный цилиндрический резонатор с дополнительным цилиндрическим электродом, установленным на изолирующих штангах между торцевыми поверхностями. Частота резонатора составляет 55 МГц (кратность ускорения равна 6). Подстройка резонатора осуществляется внутренней петлей с электродвигателем. Резонатор возбуждается петлей в цилиндрической поверхности, к которой подсоединен жесткий коаксиальный фидер от высокочастотного усилителя мощности. Вакуум в резонаторе отделен от атмосферы фидера керамическим окном. Резонатор помещен в жесткий кожух из нержавеющей стали для создания вакуумных условий. Для согласования выходного каскада высокочастотного усилителя с резонатором в фидере применяется трехшлейфовый трансформатор.

Возбуждение резонатора осуществляется от промышленного передатчика «Пингвин». Напряжение на резонаторе изменяется от ~10 кВ после инжекции до 100 кВ и более при максимально достижимой энергии электронов в конце цикла. Форсирующий импульс в начале модуляционной кривой предназначен для уменьшения времени нарастания напряжения на резонаторе. Если для экспериментов используется тормозное излучение электронов на внутренней мишени синхротрона,

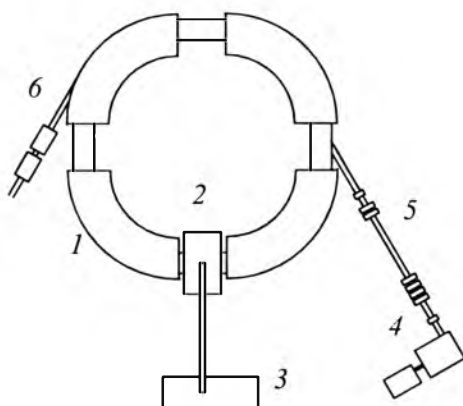


Схема электронного синхротрона: 1 — электромагнит; 2 — ускоряющий резонатор; 3 — система ВЧ-питания; 4 — микро-инжектор; 5 — тракт инжекции; 6 — тракт транспортировки выведенного электронного пучка

модулирующее напряжение падает по определенному закону до нуля для равномерного сброса электронов на мишень в течение примерно 3 мс.

Классический микротрон с энергией электронов на выходе 7 МэВ используется в качестве инжектора в синхротрон. Резонатор микротрона возбуждается от импульсного магнетронного автогенератора максимальной мощностью 2 МВт, ВЧ-развязка генератора и резонатора достигается с помощью ферритового вентиля, установленного в волноводном тракте. Параметры микротрона и резонатора обеспечивают получение тока ускоренных электронов до 50 мА в импульсе до 4 мкс. Для формирования высоковольтного импульса возбуждения магнетрона используется тетродный генератор с частичным разрядом накопительной емкости.

Основные параметры синхротрона следующие:

Максимальная энергия электронов (проектная), ГэВ . . .	1,3
Частота повторения циклов ускорения . . .	50
Структура магнитной системы . . .	ФО
Тип фокусировки . . .	Слабая
Показатель спада магнитного поля . . .	0,55
Число периодов . . .	4
Радиус кривизны орбиты, м . . .	4
Длина прямолинейного промежутка, м . . .	1,9
Тип ускорителя-инжектора . . .	Микротрон
Энергия инжекции, МэВ . . .	7
Длительность импульса тока инжекции, мкс . . .	4
Максимальный ток инжектора, мА . . .	50
Частота ускоряющей системы, МГц . . .	55
Кратность ускорения . . .	6
Максимальная мощность ВЧ-усилителя, кВт . . .	60
Диапазон изменения ускоряющего напряжения, кВ . . .	5—150

Концепция компьютерного мониторинга и управления. В качестве ключевой принята концепция гибкого программного интерфейса, позволяющая формировать необходимые схемы приема, обработки, представления и передачи данных на этапе настройки, а не написания кода. В отличие от широко известных программных продуктов (LabView фирмы National Instruments (США), например), формирующих интерфейс виртуальных приборов на экране монитора, мы используем современные концепции визуального объектно-ориентированного программирования фирмы Borland (США), основанные на изменении свойств на уровне исполняемого кода и позволяющие обходиться без перекомпиляции кода после внесения изменений в интерфейс. Путем расширения стандартного C++ и реализации модели РМЕ (properties, methods, events — модель свойств, методов и событий) удалось не только добиться быстрого создания приложений методом визуального проектирования, но и продвинуть многие упомянутые качества на уровень исполняемого файла.

Не вдаваясь в детали [1], опишем кратко функционирование программы, которая предусматривает два основных режима — рабочий и конструирования интерфейса. Каждому реальному физическому прибору, способу представления, обработки и сохранения данных соответствует определенный компонент. Начинается конструирование с выбора и конфигурирования конкретного прибора: в редакторе

свойств указывается, например, номер станции КАМАК, в которой установлен прибор, используемые каналы, калибровочные коэффициенты для них и др. При использовании нескольких приборов определяется способ их совместного функционирования. Для визуального наблюдения данных используется несколько способов — обычный цифровой индикатор, осциллограф, спектр, гистограмма. Оформление представления (сетка на осциллограмме, цветовая палитра, оси, текстовое оформление) мало чем уступает современным графическим программным пакетам. Настройка элементов управления (напряжением, частотой и др.) предусматривает настройку вида и функциональные свойства (шаг и диапазон перестройки, основные константы — опорные напряжения, частота). Данные перед отображением или передачей обрабатываются с помощью встроенного интерпретатора-компилятора. Исходный текст может быть взят из файла или отредактирован в собственном редакторе. Исходный текст программы проверяется, как в обычном компиляторе, на соответствие синтаксису языка, затем компилируется и загружается в память. Существенным представляется наличие сетевого компонента, который обеспечивает передачу данных на другой компьютер, включенный в локальную сеть, и прием данных с любого другого компьютера. При этом во многих отношениях сетевой компонент функционирует как обычный, соответствующий реальному прибору. Следует отметить, что тщательная унификация внутреннего интерфейса программы существенно облегчает пользователю (инженеру-оператору, физику-экспериментатору) пользование программой.

Приборную основу компьютерного мониторинга образуют базовые блоки, обеспечивающие интерфейс между физическими датчиками и системами управления и компьютером. Нами выбран стандарт КАМАК как наиболее доступный и распространенный в России. Несмотря на то, что он уступает во многом современным интерфейсам [2] и прежде всего в скорости передачи данных его ограничения не препятствуют решению поставленной задачи автоматизации синхротрона. Кроме того, использование в качестве дополнительного интерфейса ISA позволяет преодолеть скоростные ограничения в критических случаях.

Среди разработанных базовых блоков — 6-канальный регистратор формы сигнала (кодировщик), 16-канальный преобразователь заряд—код 16QDC, 8-канальный цифро-аналоговый преобразователь, совмещенный с 8-канальным мультиплексируемым прецизионным аналого-цифровым преобразователем 8ЦАП-8МАЦП, 8-канальный таймер (генератор временных меток), генератор сигналов произвольной формы, базовый синтезатор частоты, основанный на методе прямого цифрового синтеза (DDS — direct digital synthesis). Последний из упомянутых приборов может служить как перестраиваемый возбудитель кварцевой стабильности для высокочастотных усилителей ускорителей и функционально более сложных высокочастотных систем. Объем публикации не позволяет подробно описать разработанные приборы. Здесь же отметим, что функциональность разработанных приборов обеспечивает проведение измерений импульсных сигналов в широком диапазоне напряжения и длительности. Так, с помощью 6-канального регистратора формы импульса можно фиксировать сигналы от микросекундной длительности до десятков миллисекунд. Генератор сигналов произвольной формы позволяет формировать периодические импульсы в том же временном интервале, при этом форма

импульса может легко меняться с помощью удобного интерфейса либо загружаться из файла. Базовый синтезатор частоты допускает ее перестройку в диапазоне 0—70 МГц и обеспечивает амплитудную, частотную и фазовую модуляции.

В качестве основной платформы выбрана операционная система Windows NT4 и 2000. В перспективе предусмотрено также использование Linux. В ближайшее время мы будем широко применять эти системы, которые уже сейчас не столько конкурируют, сколько дополняют одна другую.

Заключение. Принятая концепция (подход) к автоматизации управления и мониторинга ускорителя позволяет разделить этапы разработки приборов и программного обеспечения и собственно этапа автоматизации ускорителя, что в условиях ограничения ресурсов всех видов позволяет реализовать проект в короткие сроки. Описанный подход представляется перспективным для автоматизации больших систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurakin V.G., Koltsov A.V., Kurakin P.V. Flexible user interface for computer measurements and control. — In: Proc. PAC-2001, p. 1192—1194.
2. Эрлис К.Э. Интерфейсы открытых систем. М, 2000. 256 с.

УДК 539.14.143.43

ФОРМА СИГНАЛА ЯМР ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Вагин А.И., Макаров Б.А., Рыжов В.Г.

(ФГУП «Московский радиотехнический институт РАН»)

Форма сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР) зависит от структуры и динамики процессов в исследуемом веществе, а также условий наблюдения [1—3]. Поведение двухкомпонентной системы в однородном поле изучалось в работе [4—6].

В настоящей работе исследована релаксация бинарной системы ядерных магнитных моментов в неоднородном магнитном поле.

Рассмотрим систему одноименных ядерных спинов, которая состоит из двух не взаимодействующих компонентов a и b , причем резонансные частоты ядер в компонентах $\omega = \omega_a = \omega_b$. В этом случае сигнал поперечной намагниченности по оси x от элемента объема в неоднородном поляризирующем поле H есть аддитивная сумма сигналов отдельных компонентов:

$$M_x(t, \alpha) = M_{xa}(0)\exp(-t/T_{2a})\cos(\gamma B_0 + \Delta\omega)t + M_{xb}(0)\exp(-t/T_{2b})\cos(\gamma B_0 + \Delta\omega)t = \\ = M_x(0)[P_a\exp(-t/T_a) + P_b\exp(-t/T_b)]\cos(\gamma B_0 + \Delta\omega)t = M_x(0)\sum_{i=1}^2 P_i\exp(-t/T_i)\cos(\omega_0 + \alpha)t,$$