

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

И.И. Авербух, Ю.М. Глуховченко,
В.В. Петров, В.Г. Ческидов

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА
СИНХРОТРОНА Б-4

ИЯФ 2011-7

Новосибирск
2011

Ускоряющая система синхротрона Б-4

И.И. Авербух, Ю.М. Глуховченко, В.В. Петров, В.Г. Ческидов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

В работе рассмотрена ускоряющая система синхротрона Б-4 [1, 2]. Со времени её разработки и начала эксплуатации прошло более 25 лет. В течение всего времени устройство обеспечивает надёжную работу ускорительного комплекса ВЭПП 3.

За столь длительный период работы сменилось поколение людей, работавших по обслуживанию устройства. Поэтому представляется целесообразным освежить некоторые принципиальные решения и эксплуатационные особенности ускоряющей системы и описать установку более подробно, чем это сделано было в первоначальном описании.

За время работы накоплен значительный опыт эксплуатации устройства. Приведены некоторые характерные неисправности, а также реальное время наработки устройства в часах, что может служить показателем надёжности принятых решений, некоторые из которых, возможно, полезно учитывать в каких-то будущих разработках.

© *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

В работающем ныне на комплексе ВЭПП-4 позитронном инжекторе позитроны получают путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 50 МэВ, с последующим ускорением позитронов в синхротроне Б-4 до энергии 350 МэВ, и в накопителе ВЭПП-3, работающем в бустерном режиме – до 1.8 ГэВ.

Блок-схема всей установки, включая синхротрон Б-4, линейный ускоритель (ЛУ), импульсный гирокон, ускоритель ЭЛИТ-3А и все остальные элементы, необходимые для получения и транспортировки пучков, приведена на Рис. 1.

Электроны с энергией 100 кэВ в течение 27 нс (1 оборот в синхротроне) инжектируются пушкой (4) и ускоряются в двух секциях ЛУ (3А, 3В) до энергии 50 МэВ. В блоке конверсии (5) электроны фокусируются на вольфрамовый конвертор толщиной 3,5 мм (1 радиационная единица), а полученные позитроны при энергии 7 МэВ (максимум спектра) направляются системой транспортировки (6) в синхротрон Б-4 (7), где ускоряются до энергии 350 МэВ в синхротронном режиме. Для улучшения синхротронного захвата применено доускорение частиц до энергии 13 МэВ с помощью бетатронного сердечника (9). При энергии 350 МэВ частицы из Б4 переводятся через электронно-оптический канал (10) в накопитель ВЭПП-3, который является бустером накопителя ВЭПП-4. Возбуждение ЛУ производится от импульсного гирокона (2), преобразующего энергию электронного пучка ускорителя ЭЛИТ-3 (1) в энергию электромагнитных колебаний. Получение электронов с энергией 7 МэВ для последующего ускорения в синхротроне производится смещением времени запуска электронной пушки на передний или задний фронт ускоряющего напряжения ЛУ. Конвертор при этом выводится из области прохождения пучка, а в системах транспортировки и синхротрона изменяется направление управляющих и ускоряющих полей.

Конструктивно ускоряющая система и питающий усилитель мощности (Рис. 2) выполнены в виде единого узла и смонтированы непосредственно на ускорителе. Это позволило существенно упростить конструкцию, отказавшись от традиционных шкафов, не создавая кажущихся неудобств в эксплуатации. В радиостойке смонтированы только блоки питания и управления, и в отдельном шкафу выполнен импульсный источник анодного питания.

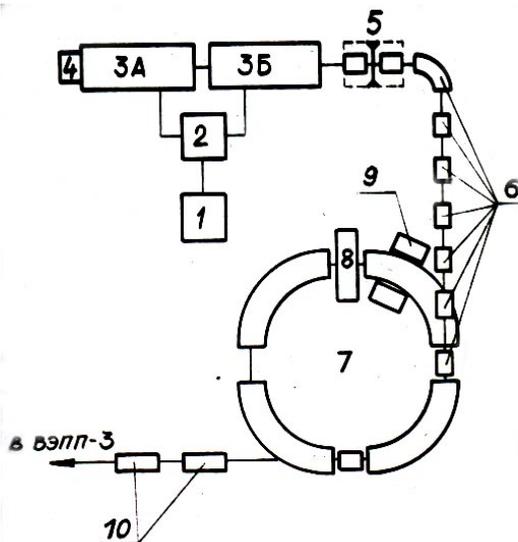


Рис. 1. Блок-схема позитронного источника.

1 – источник релятивистских электронов ЭЛИТ-3А, 2 – гирокон, 3А и 3Б – секции ЛУ, 4 – электронная пушка, 5 – конверсионная система, 6 – система транспортировки частиц ЛУ – Б-4, 7 – синхротрон Б-4, 8 – ускоряющий в.ч. резонатор, 9 – бетатронный сердечник, 10 – элементы системы электронно-оптического канала Б4–ВЭПП-3.

В первоначальном варианте синхротрона Б-4, созданном в 1969 году, ускорение частиц производилось на второй гармонике частоты обращения (75 МГц). При однооборотном выпуске из синхротрона часть ускоренных частиц терялась из-за конечной длительности фронта дефлектора. Для уменьшения этих потерь было принято решение перевести режим ускорения на первую гармонику частоты ускорения и тем самым уменьшить влияние длительности фронта импульса дефлектора. Такая модернизация должна была привести к увеличению скорости накопления частиц в накопителе ВЭПП-3. Одновременно это давало возможность увеличить число циклов ускорения в секунду до 1,5 – 2.

Из-за ограниченного размера промежутка, отведенного для размещения ускоряющей системы, новую, работающую на первой гармонике, выполнить по старому принципу не представлялось возможным. Реальные размеры промежутка составляли всего 265 мм. Поэтому, с целью уменьшения размеров ускоряющей системы, было принято решение использовать в резонаторе ферриты.



Рис. 2. Общий вид ускоряющей системы и питающего усилителя мощности.

Ускоряющая система

Основные проектные параметры ускоряющей системы приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Ускоряющее напряжение, кВ	Частота, МГц	Число циклов в секунду
22 – 24	37,42	1,5 – 2

Ускоряющая система представляет собой последовательно установленные четыре резонаторные секции, электрически соединенные в две группы. Группы установлены навстречу друг другу и питаются противофазными высокочастотными напряжениями. Выравнивание частот резонаторных групп производится с помощью полуволнового коаксиального кабеля, настроенного на рабочую частоту и подключенного параллельно обеим резонаторным группам. Такая связь позволяет настраивать обе резонаторные группы одним подмагничивающим устройством.

Конструктивная схема ускоряющей системы приведена на Рис. 3.

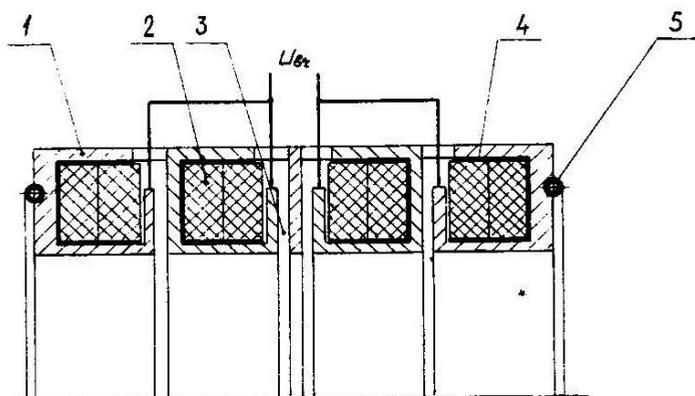


Рис. 3. Конструктивная схема ускоряющей системы. 1 – резонаторная секция, 2 – ферриты, 3 – ускоряющий зазор, 4 – "Эластосил", 5 – охлаждающая трубка.

Каждая секция представляет собой коаксиальную четвертьволновую линию, содержащую индуктивную часть с ферритовыми сердечниками и конструктивную емкость, которая образует ускоряющий промежуток. Таким образом, ускоряющая система имеет четыре ускоряющих промежутка, что позволяет получать высокое ускоряющее напряжение за один пролёт частиц при сравнительно низких напряжениях на элементах устройства. Резонаторные секции заполнены кольцевыми ферритовыми сердечниками из материала 60 НН с размерами $250 \times 180 \times 32$ мм. Высокочастотная индукция в ферритах при максимальном ускоряющем напряжении – 0,025 Тл. Средняя мощность, выделяющаяся в каждой секции, $150 \div 200$ Вт. Добротность ферритов в указанном режиме – 50.

Ускоряющая система размещается в общей вакуумной камере ускорителя. Это приводило к определённым трудностям со снятием тепла с ферритов. Для решения этой задачи была использована идея охлаждения ферритов, ранее реализованная в ускоряющей системе синхротрона Б-5, суть которой состоит в следующем. Температурный режим ферритов обеспечивается системой водяного охлаждения корпуса резонатора. Ферритовые сердечники предварительно обрабатываются по внутреннему и наружному радиусам и по плоскости до определенных размеров, после чего устанавливаются в секции со строго выдержанными зазорами не более 0,5 – 0,7 мм между корпусом и ферритами. Зазоры заполняются теплопроводным клеем "Эластосил" марки 137–182. "Эластосил" представляет собой однокомпонентный материал холодной

вулканизации на основе низкомолекулярных полиорганосилоксановых каучуков со специальными добавками. Вулканизуется "Эластосил" в слоях толщиной до 10 мм за счёт контакта с влагой воздуха после извлечения из упаковки.

К наружным поверхностям медного корпуса секций припаяны медные трубки, которые подсоединяются к системе водяного охлаждения и выводятся наружу из вакуумной камеры.

Общая продольная длина ускоряющей системы 237 мм.

Настройка частоты резонаторных секций осуществляется в электромагнитном подмагничивающем устройстве, показанном на Рис. 4.

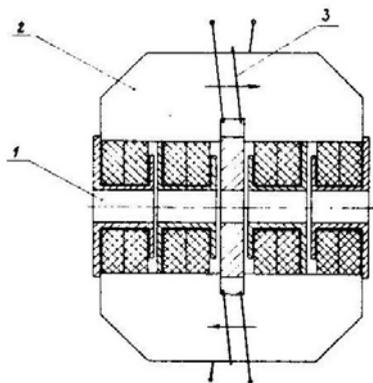


Рис. 4. Электромагнитная подмагничивающая система. 1 – ускоряющий резонатор, 2 – электромагнит, 3 – обмотка подмагничивания.

Электромагнитное подмагничивающее устройство состоит из шихтованного ярма из электротехнической стали марки Э310 и четырех обмоток. Обмотки располагаются на каждом полюсе электромагнита и содержат по 250 витков, выполненных проводом ПЭВ-2 1,26/1,36. Сопротивление одной обмотки 1,5 Ома. Обмотки выполнены по методу "Монолит" на медном каркасе, с помощью которого обеспечивается охлаждение. С этой целью медный каркас приклеивается теплопроводным клеем "Эластосил" к корпусу охлаждаемых секций и механически закрепляется на них. Все обмотки соединены между собой последовательно.

Как известно, в таких системах часть подмагничивающего потока проникает в канал синхротрона и может исказить орбиту частиц. Для уменьшения влияния проникающего потока ускоряющую систему выполняют, по крайней мере, из двух резонаторов (в нашем случае из двух одинаковых групп), у которых ферриты подмагничиваются равными и противоположно направленными полями. В рассматриваемой

ускоряющей системе это достигается с помощью общего электромагнита, пере-страивающего обе группы секций. Направление подмагничивающего потока в магнитопроводе и секциях указано стрелками на Рис. 4.

Многолетний опыт эксплуатации устройства показал, что в течение всего времени эксплуатации не было ни одного случая перегрева резонаторов и выхода из строя из-за системы охлаждения. "Эластосил" показал надёжную работу в условиях вакуума и не теряет свои свойства даже, когда расположенные рядом медные детали секций нагревались под действием излучений.

Усилитель мощности

Ускоряющая система питается от усилителя мощности. Основные выходные характеристики усилителя мощности приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Рабочая частота, МГц	Наибольшее выходное напряжение, В	Наибольшая выходная мощность, кВт	Длительность рабочего цикла, мсек
37.5	5000–6000	40	4

Блок-схема усилителя мощности приведена на Рис.5.

Усилители (1), (12) выполнены в одном отдельном блоке регулирования амплитуды (БРА).

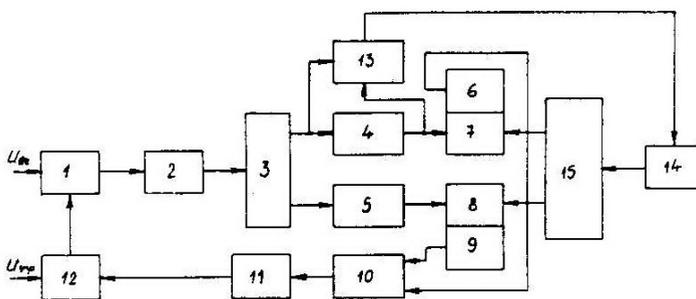


Рис.5. Блок-схема усилителя мощности.

1 – усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, 2, 3 – первый и второй резонансные каскады усилителя мощности, 4, 5 – оконечные каскады усилителя мощности, 6, 7, 8, 9 – резонаторные секции, 10 – суммирующий трансформатор, 11 – амплитудный детектор, 12 – усилитель сигнала ошибки, 13 – фазовый детектор, 14 – усилитель подмагничивания, 15 – подмагничивающий электромагнит.

Высокочастотный сигнал $U_{вх}$ с частотой 37,5 МГц и амплитудой 10÷20 мВ подается на вход усилителя (1) с регулируемым коэффициентом

усиления. С выхода этого усилителя сигнал поступает в широкополосный усилитель, расположенный в том же блоке, который обеспечивает выходное напряжение 0,8 В на нагрузке 50 Ом.

С выхода широкополосного усилителя высокочастотное напряжение передается по согласованному кабелю на вход усилителя мощности, который располагается непосредственно на ускоряющей системе. Усилитель мощности состоит из трёх резонансных каскадов. Первые два, (2) и (3), являются предварительными и служат для усиления сигнала, достаточного для раскочки следующих оконечных каскадов.

Оконечные каскады (4) и (5) представляют собой два одинаковых резонансных усилителя мощности, работающих в противофазе независимо друг от друга и нагружены на спаренные резонансные секции (6, 7 и 8, 9). Резонансная настройка выходных каскадов осуществляется помощью системы автоматической настройкой частоты.

Поддержание амплитуды и закона изменения ускоряющего напряжения обеспечивается системой автоматического регулирования усиления, которая, кроме резонансного усилителя, включает в себя суммирующий трансформатор, амплитудный детектор и усилитель сигнала ошибки. Усилитель сигнала ошибки управляет схемой с регулируемым коэффициентом усиления в соответствии с требуемым законом изменения ускоряющего напряжения.

Принципиальная электрическая схема усилителя мощности приведена на Рис. 6.

Высокочастотный сигнал из блока регулирования амплитуды (БРА) поступает по кабелю на первый каскад резонансного усилителя, который выполнен на двух лампах 6Ж52П. Лампы включены в параллель. Для снижения мощности, лампы работают в импульсном режиме. Длительность работы определяется длительностью ускорения. Управление длительностью осуществляется по управляющей сетке.

Рабочий режим ламп указан в Таблице 3.

Таблица 3

Анодное напряжение, В	Напряжение экранной сетки (C2), В	Напряжение управляющей сетки (C1), В	
		Рабочий режим	Режим молчания
300	150	- 1,5	- 4

В анодную цепь 6Ж52П включён резонансный контур, индуктивность которого выполнена по трансформаторной схеме с использованием ферритового сердечника К32*20*6 с магнитной проницаемостью 20. Коэффициент усиления каскада 80. Амплитуда высокочастотного

напряжения на контуре контролируется с помощью двух детекторов на лампах 6Д13Д. Детектор Ua1 к с коэффициентом передачи 10:1 позволяет

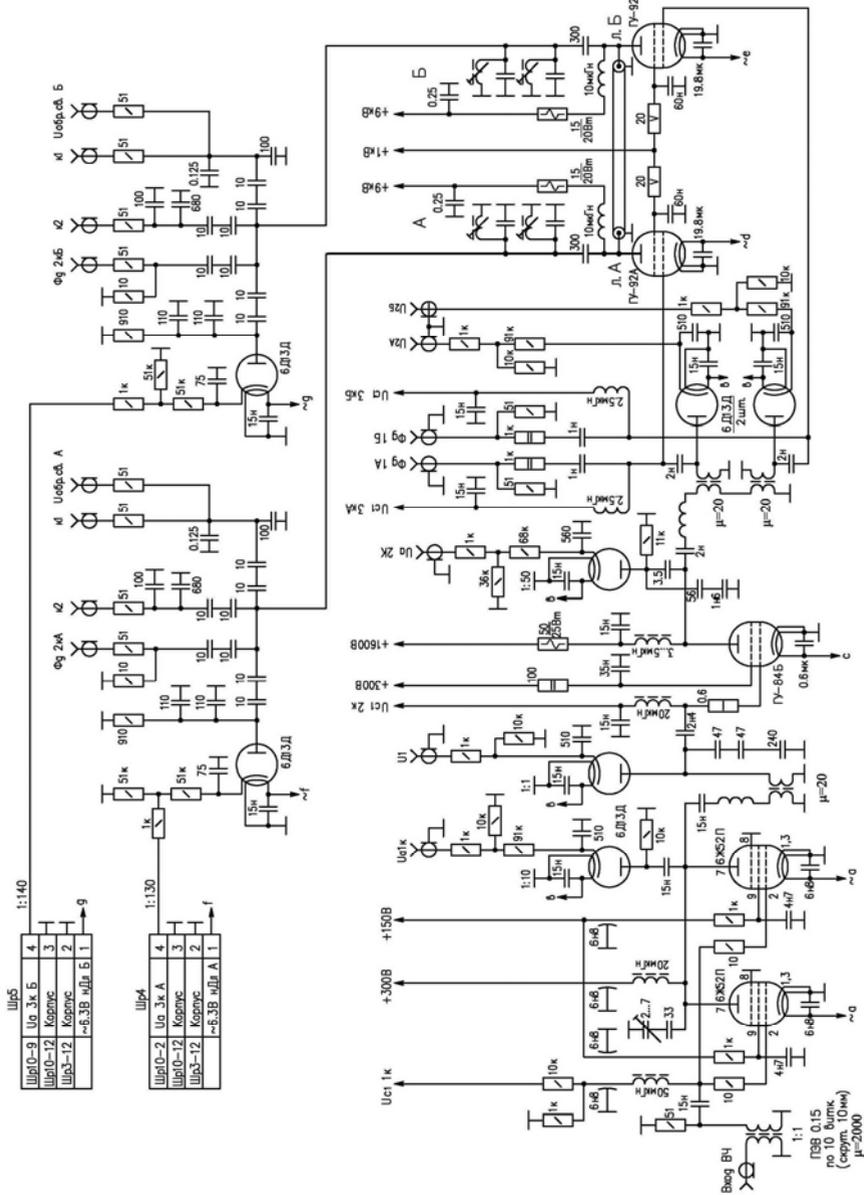


Рис. 6. Усилитель мощности.

контролировать напряжение непосредственно на аноде 6Ж52П, а другой, U_1 , с коэффициентом 1:1 – высокочастотное напряжение, которое подаётся непосредственно на управляющую сетку 2 каскада.

Высокочастотное напряжение с выхода первого резонансного усилителя обеспечивает раскачку второго резонансного усилителя на лампе ГУ-84Б.

Рабочий режим лампы ГУ-84Б приведен в Таблице 4.

Таблица 4

Анодное напряжение, В	Напряжение экранной сетки (C2), В	Напряжение управляющей сетки (C1), В	
		Рабочий режим	Режим молчания
1700	300	- 20	- 75

В анодную цепь ГУ-84Б также включен резонансный контур. Индуктивность контура выполнена по трансформаторной схеме с применением ферритов с проницаемостью 20. Коэффициент трансформации 8:1. На контуре 2-го каскада создаются два противофазных напряжения для раскачки двух выходных каскадов. Ёмкость контура формируется входными цепями двух оконечных ламп, выходной ёмкостью лампы второго каскада и ёмкостью схемы.

Высокочастотное напряжение на резонансном контуре U_{a2k} контролируется детектором на лампе 6Д13Д с коэффициентом передачи 50:1. Выходные напряжения, поступающие непосредственно на управляющие сетки ламп ГУ-92А – U_{2A} и U_{2B} , контролируются двумя детекторами на лампах 6Д13Д с коэффициентами передачи 20:1.

Оконечный резонансный усилитель состоит из двух одинаковых каскадов на лампах ГУ-92А. Каскады обеспечивают на выходе противофазные высокочастотные напряжения для питания двух групп ускоряющих секций резонатора. Для идентификации каскадов в дальнейшем они обозначаются буквами А и Б. Непосредственно на установке лампа А расположена слева, а Б соответственно справа, если смотреть со стороны предусилителя.

Выходные напряжения каждой лампы $U_{3"A}$ и $U_{3"B}$, измеряются непосредственно на ускоряющих зазорах резонаторов и контролируются с помощью детекторов на лампах 6Д13Д. Коэффициент передачи детекторов соответственно 130:1 и 140:1.

В выходном каскаде предусмотрены ёмкостные делители для осуществления настройки резонатора по частоте и для управления амплитудой ускоряющего напряжения. Для частотной настройки, если она осуществляется от оконечного каскада А, сигналы снимаются с выходных гнезд "фд1А" и "фд2кА". Если подстройка частоты осуществляется от оконечного каскада Б, то следует воспользоваться ёмкостными делителями с выходов "фд1Б" и "фд2кБ".

Ёмкостные делители для управления амплитудой выведены на гнезда $U_{\text{обр.св.А}}$ и $U_{\text{обр.св.Б}}$. Кроме этого, в схеме предусмотрены высокочастотные гнезда К1 и К2 для контроля формы высокочастотного сигнала.

Рабочий режим ламп ГУ-92А приведен в Таблице 5.

Как указывалось, усилитель мощности работает в импульсном режиме. Режимы питания ламп первого и второго резонансных каскадов осуществляются от источников постоянного напряжения. В режиме молчания лампы работают в режиме малых анодных токов. Импульсный режим работы осуществляется управлением по управляющим сеткам.

Таблица 5

Максимальное анодное импульсное напряжение, В	Анодное постоянное напряжение, В	Напряжение экранной сетки (С2), В	Напряжение управляющей сетки (С1), В		Напряжение раскачки, В
			Рабочий режим	Режим молчания	
9000	1600	1000	- 25	- 180	100 – 110

Режим питания анода оконечных каскадов – комбинированный. В режиме молчания аноды ламп ГУ-92А питаются от маломощного источника напряжением 1600 В. В рабочем режиме лампы открываются по управляющим сеткам, одновременно на анод подаётся импульсное напряжение от импульсного генератора ГИМН. Величина этого напряжения регулируется и устанавливается оператором. Установившееся импульсное напряжение обычно не превышает 7000 В.

Для снятия тепла, выделяющегося в усилителе мощности, предусмотрены воздушная и водяная системы охлаждения. Воздушная система охлаждает накальные цепи всех ламп, анод второго каскада, а также управляющую и экранную сетки третьих каскадов. Система водяного охлаждения снимает тепло с анодов ламп ГУ-92А и ускоряющих секций.

Фазовая автоматическая настройка частоты

Для стабилизации частотной настройки ускоряющей системы резонаторные секции и оконечные каскады охвачены системой фазовой автоматической настройки частоты, которая включает в себя фазовый детектор, усилитель подмагничивания и подмагничивающий электромагнит.

Блок-схема автоматической настройки резонатора приведена на Рис. 7.

В ускоряющих резонаторах, настроенных на постоянную частоту, ферриты целесообразно подмагничивать постоянным током, так как при таком подмагничивании они имеют наибольшую добротность [3]. Несмотря на импульсный режим работы синхротронов и ускоряющих устройств, настройка резонаторов на постоянную частоту может производиться

постоянным током. В то же время импульсный режим не позволяет в "чистом виде" осуществить постоянное подмагничивание. Объясняется это тем, что для компенсации расстроек и стабилизации частоты, ускоряющие резонаторы с ферритами должны работать с системой автоматической подстройки частоты. Частотная расстройка резонаторов вызвана зависимостью магнитной проницаемости ферритов от величины высокочастотной индукции и, соответственно, амплитуды ускоряющего напряжения, которые могут меняться в течение ускорительного цикла, а также зависимостью проницаемости от температуры. Если первые две расстройки носят импульсный характер, то температурная – ещё и постоянный. Другой причиной расстроек является воздействие на ферриты рассеянных магнитных полей от близко расположенных импульсных устройств ускорителя. Такое влияние наблюдается, например, в синхротроне Б-4 со стороны магнитов вертикальной коррекции орбиты, которые расположены вплотную к резонатору. В результате на ферриты одновременно воздействуют основное постоянное подмагничивающее поле и импульсные поля автоподстройки и внешних магнитных помех.

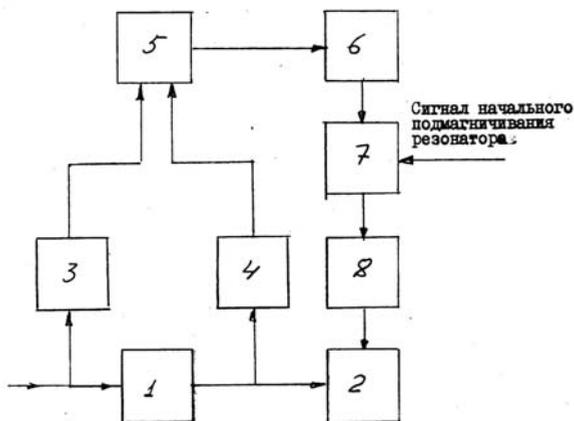


Рис. 7. Блок-схема автоматической настройки резонатора.

1 – резонансный усилитель; 2 – резонансные секции с подмагничивающим электромагнитом; 3, 4 – ёмкостные делители; 5 – фазовый детектор; 6 – корректирующий усилитель; 7 – суммирующий усилитель; 8 – усилитель подмагничивания.

Учитывая эту особенность, подмагничивающее устройство должно обрабатывать как постоянные температурные изменения частоты, так и расстройки во время импульса.

Сигнал автоподстройки имеет импульсный характер и вырабатывается только во время рабочего цикла, когда на резонатор подается высокочастотное напряжение.

Фазовый детектор

Электрическая принципиальная схема широкополосного фазового детектора с корректирующим и суммирующим усилителями изображена на Рис. 8.

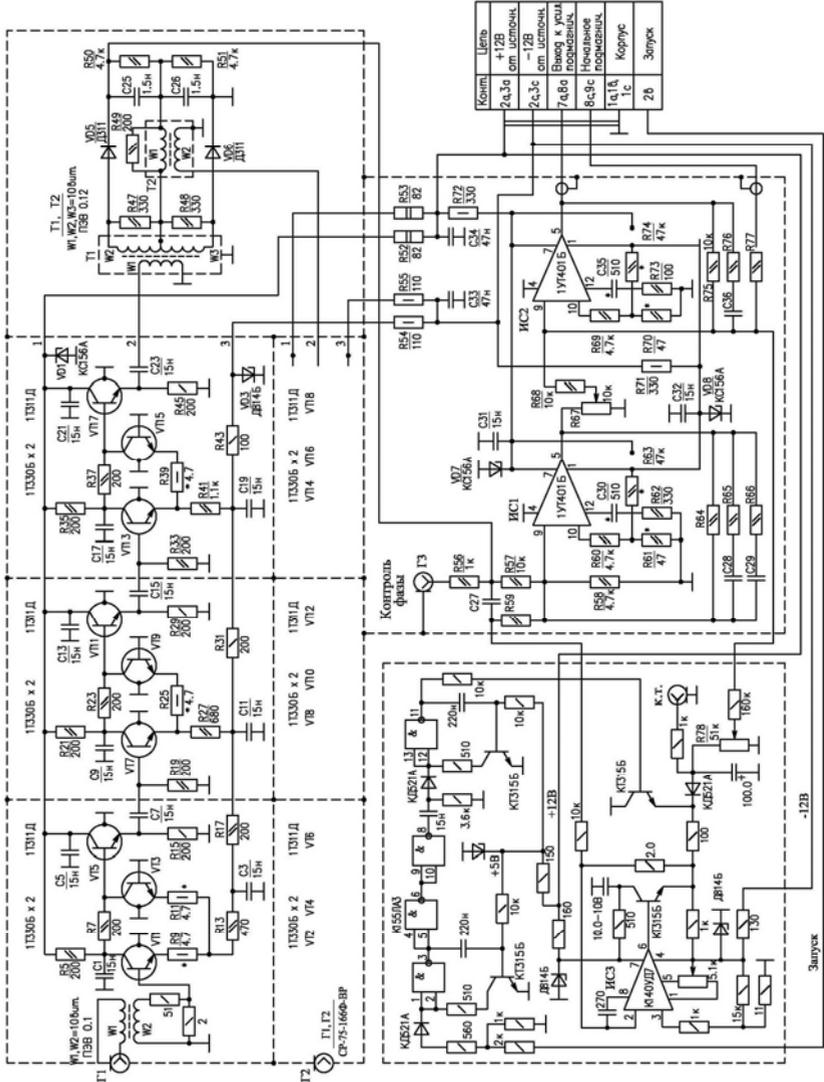


Рис. 8. Фазовый детектор.

Фазовый детектор состоит из двух одинаковых усилителей-ограничителей, которые выполняют задачу усиления и стабилизации сигналов, меняющихся по амплитуде, с одновременным обеспечением фазовой стабильности.

Усилители-ограничители содержат по три каскада дифференциальных усилителей-ограничителей по схеме ОК-ОБ. Особенностью таких схем является ограничение сигнала за счет отсечки токов первого и второго транзисторов. Транзисторы не входят в насыщение, что обеспечивает фазовую стабильность.

Дифференциальные каскады выполнены на транзисторах 1Т330Б и имеют коэффициент усиления 7 – 8. Дифференциальные пары соединяются между собой через эмиттерные повторители на транзисторах 1Т311Д. Амплитуда сигнала на выходе каждого каскада 0.6 В. Общий коэффициент усиления усилителя 350÷450.

Балансный фазовый детектор выполнен по классической схеме с трансформаторами. Широкополосные трансформаторы Тр1 и Тр2 изготовлены на ферритовых сердечниках К7×4×2 мм с магнитной проницаемостью 2000. Обмотки содержат по 15 витков провода ПЭВ 0,12. Индуктивность обмотки 100 мкГн. Индуктивность рассеяния 0.02 мкГн. Емкость между обмотками 5 пФ.

На выходе балансного детектора стоят два усилителя ИС1 и ИС2. Первый служит для коррекции системы обратной связи, а второй усилитель – для сложения сигналов начального подмагничивания и сигналов медленной и быстрой подстроек резонатора.

Сигнал быстрой подстройки формируется фазовым детектором во время ускорительного цикла и воздействует только в это время.

Уровень сигнала быстрой подстройки регулируется потенциометром R67.

Сигнал медленной автоподстройки компенсирует медленные уходы частоты резонатора за счёт изменения температуры, как самого резонатора, так и охлаждающей воды. Это сигнал формируется из сигнала быстрой подстройки и подстраивает резонатор в рабочем режиме и в режиме молчания. Уровень сигнала медленной подстройки формируется на транзисторах КТ315Б, микросхемах 155ЛА3, усилителем ИС3 и ключом на транзисторе КТ315Б. Интегрированный сигнал автоподстройки подаётся на вход суммирующего усилителя ИС2.

Настройка автоматической системы производится следующим образом.

Сигнал на выходе фазового детектора контролируется в точке Г3 – "контроль фазы". Потенциометр R67 устанавливается в нулевое положение. Предварительная подстройка резонатора осуществляется начальной установкой тока подмагничивания. При установленном токе электромагнита потенциометром R78 осуществляется настройка медленной системы

автоподстройки по минимальному значению сигнала в точке Г3. После этого потенциометром R67 вводится быстрая обратная связь, при этом он не обязательно должен быть введён полностью. Высоочастотный разъем Г3 и потенциометры R67 и R78 выведены на лицевую внешнюю часть блока фазового детектора.

Конструктивно фазовый детектор выполнен в специальном корпусе, обеспечивающем высокую экранировку широкополосных усилителей-ограничителей друг от друга и от внешних помех.

Усилитель подмагничивания

Принципиальная схема усилителя подмагничивания приведена на Рис.9. В выходном каскаде используются высоковольтные транзисторы типа КТ838А, установленные со значительным запасом по току, для обеспечения надёжной работы.

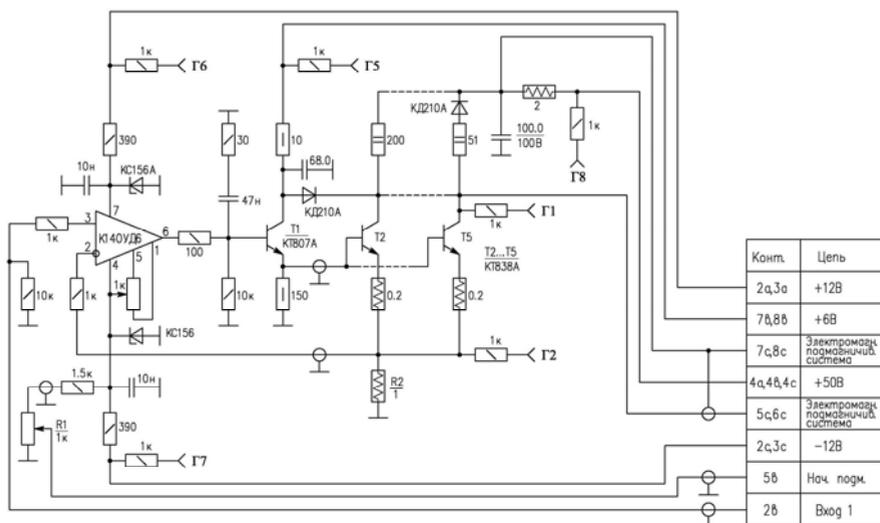


Рис. 9. Усилитель подмагничивания.

Сигнал подмагничивания поступает на вход блока («Вход 1») с выхода фазового детектора.

Входная цепь усилителя выполнена на микросхеме К140УД6 и на транзисторе Т1 – КТ807А.

Начальная установка тока подмагничивания резонатора производится с помощью потенциометра R1 1 кОм, выведенного под шлиц на лицевую сторону блока.

Ток подмагничивания контролируется по падению напряжения на активном сопротивлении R2 1 Ом, сигнал с которого выведен на

лицевую сторону блока (гнездо Г2). На лицевой стороне блока предусмотрены гнезда 1–8 для контроля напряжения в разных точках усилителя подмагничивания.

Питание усилителя подмагничивания осуществляется от комбинированного источника, с которого на коллекторы выходных транзисторов подаётся постоянное напряжение, а в момент рабочего цикла ещё и импульсное, чтобы обеспечить необходимую скорость подстройки. Рабочий ток усилителя подмагничивания около 2А.

Система регулирования амплитуды ускоряющего напряжения

Блок-схема устройства регулирования ускоряющего напряжения приведена на Рис. 10.

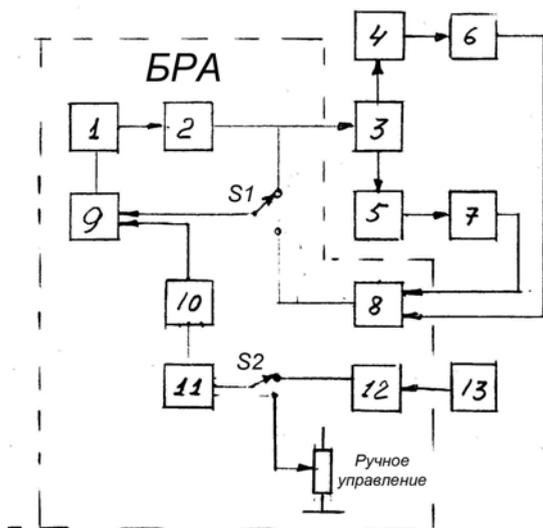


Рис. 10. Блок-схема регулирования амплитуды ускоряющего напряжения.

1 – усилитель с регулируемым коэффициентом усиления; 2 – широкополосный усилитель; 3 – резонансные усилители мощности; 4, 5 – резонаторы; 6, 7 – ёмкостные делители; 8 – суммирующий трансформатор и усилитель; 9 – усилитель сигнала ошибки; 10 – функциональный преобразователь; 11 – регулируемый делитель; 12 – ПКС; 13 – ЭВМ.

Схема включает в себя блок регулирования амплитуды ускоряющего напряжения (БРА), выделенный на рисунке штриховой линией, трёхкаскадный резонансный усилитель мощности с резонаторами и ёмкостными делителями, а также схему управления.

На вход усилителя с регулируемым коэффициентом усиления (1) подается сигнал амплитудой 0,8 В от задающего генератора 37,5 МГц. Напряжение с выхода усилителя поступает на широкополосный усилитель (2) и далее в трёхкаскадный резонансный усилитель мощности (3). Высокочастотные сигналы с каждого резонатора (4, 5) через ёмкостные делители (6, 7) поступают на суммирующий трансформатор и усилитель (8). Напряжение с выхода суммирующего усилителя сравнивается с опорным сигналом с помощью усилителя сигнала ошибки (9). Разностный сигнал управляет коэффициентом усиления регулятора. В качестве источника опорного напряжения используется внутренний функциональный преобразователь. Переключатель S1 служит для переключения с внутренней стабилизации на внешнюю. Внутренняя стабилизация выходного напряжения используется для настроечных работ. Обычный режим работы – работа с внешней стабилизацией, когда система обратной связи охватывает весь усилитель мощности.

Переключатель S2 служит для переключения с ручного управления амплитудой ускоряющего напряжения на управление от компьютера.

Принципиальная электрическая схема блока регулирования амплитуды ускоряющего напряжения приведена на рис. 11.

Регулируемый широкополосный усилитель выполнен на микросхеме 2УС282, транзисторах КТ640А, КТ610Б и КП905А. С выхода усилителя сигнал подаётся на трёхкаскадный усилитель мощности. Наличие выходного сигнала контролируется по детектору в гнезде "3" на контрольной панели, размещенной на лицевой стороне блока.

Высокочастотные сигналы обратной связи для стабилизации и управления ускоряющим напряжением поступают с ёмкостных делителей, расположенных на резонаторе, на два одинаковых входа, обозначенных, как л.А и л.Б2. Затем они детектируются, поворачиваются по фазе и поступают на вход "4" схемы сравнения на микросхеме К140УД8А.

Опорный сигнал формируется формирователем на микросхемах К155ЛА3, К155ТМ2, регулируется транзистором КП103А и после усиления и поворота по фазе усилителем на микросхеме К140УД1Б поступает на вход "3" схемы сравнения. На затвор регулирующего полевого транзистора КП103А может подаваться как сигнал внешнего управления от компьютера через преобразователь цифрового сигнала в аналоговый на микросхемах К155ЛА7 и К140УД6, так и от внутреннего потенциометра R1, выведенного на лицевую панель блока. Переключение управления осуществляется переключателем S2, размещённым на лицевой стороне блока с обозначением «Управление ЭВМ – Ручное». Кроме этого на лицевой стороне блока расположен переключатель стабилизации ускоряющего напряжения S1. Блок имеет свой внутренний автономный генератор, работающий на частоте 37,4 МГц, который может использоваться для

наладки ускоряющей системы. Генератор выполнен на двух транзисторах КТ640А.

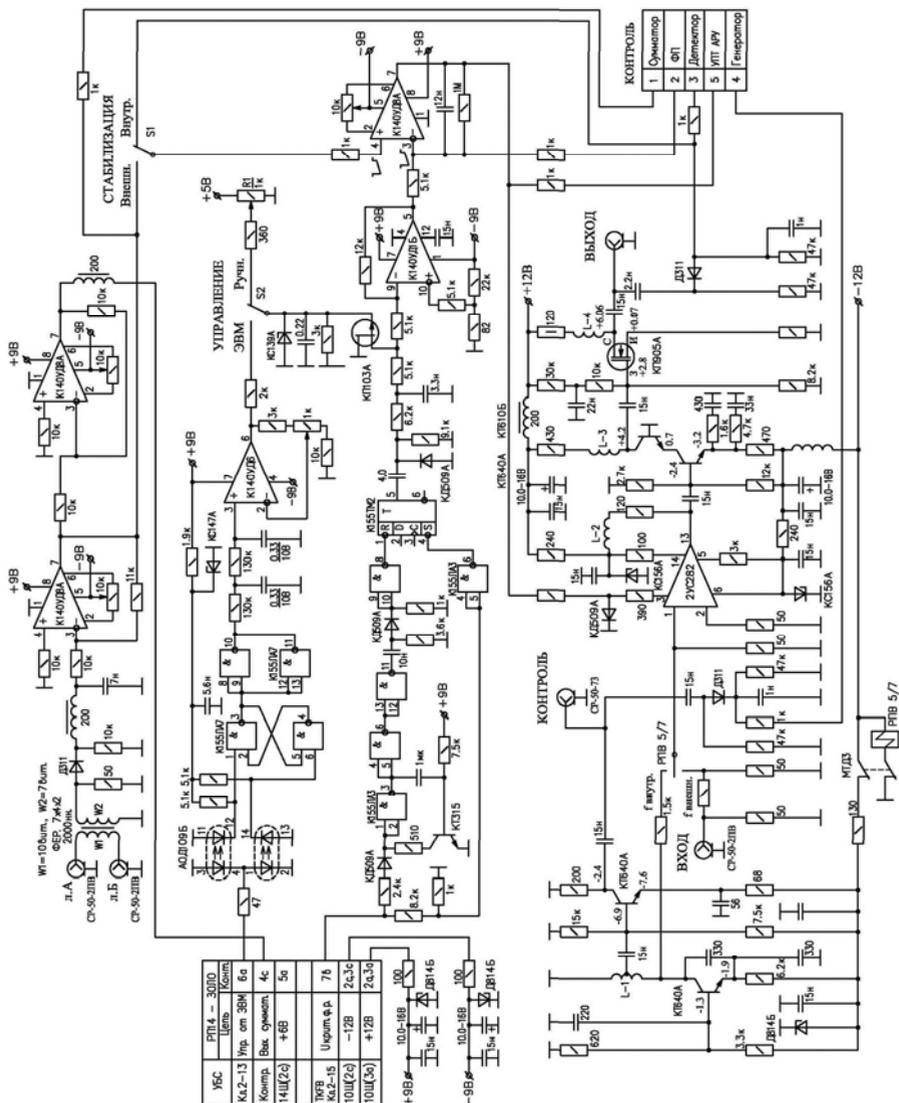


Рис. 11. Блок регулирования амплитуды

Заключение

Со времени разработки и начала эксплуатации ускоряющей системы прошло более 25 лет. Начиная с 2000 года, на установке ведётся учёт фактического времени её работы. На основе этих данных установлено, что в среднем в каждом году, в соответствии с режимом комплекса ВЭПП4, синхротрон Б-4 работает 59% календарного времени, что составляет за год около 5 тысяч часов. Если исходить из предположения, что такая же интенсивность работы была и в предыдущие годы, то общая наработка за 25 лет составляет ~125 тысяч часов непрерывной работы.

Систематический учёт неисправностей в ускоряющей системе Б-4 ведётся с 1993 года. В Таблице 6 (см. Приложение) приводится подробный перечень всех зафиксированных неисправностей.

Как следует из представленной таблицы, за 18 лет непрерывной работы, начиная с 1993 года, в ускоряющей системе 11 раз заменялись лампы ГУ-92А, что составляет средний срок жизни одной лампы ~ 8 тысяч часов. Лампы второго каскада ГУ-84Б заменялись всего 4 раза. Соответственно средний срок службы составляет около 20 тысяч часов. Лампы 6Ж52П в первом каскаде заменялись всего один раз в 2006 году. К этому времени они проработали (с момента учёта) 13 лет. Оценочный срок службы составляет порядка 60 тысяч часов.

За время работы отмечена одна существенная неисправность, связанная с конструктивной недоработкой, а именно, короткое замыкание в проводах, коммутирующих обмотки подмагничивания электромагнита, находящихся непосредственно у резонатора.

Четыре раза выходили из строя электродвигатели охлаждающих вентиляторов, а также три раза выходил из строя накальный трансформатор в оконечных лампах усилителя мощности.

Приведенные сведения и их анализ позволяют оптимизировать и скорректировать необходимый запас радиотехнических элементов и устройств для обеспечения дальнейшей непрерывной работы.

Приложение

Таблица 6. Основные причины выхода из строя элементов системы ВЧ Б-4.

Дата	Неисправность	Комментарии
14.01.93	Поставлены новые лампы А и Б (<i>ГУ 92А</i>)	Начало истории ...
17.01.94	Ремонт вентилятора	
16.05.94	Замена лампы 2-го каскада	
01.11.94	Замена мотора на вентиляторе	
09.02.97	Замена лампы Б 3-го каскада	
10.02.97	Замена пускателя в радиостойке-10	
09.10.97	Замена лампы А 3-го каскада + лампы 2-го каскада	
17.11.97	Сгорел трансформатор накала	
19.10.99	Замена лампы А 3-го каскада	
24.04.00	Разрыв полиэтиленового шланга водяного охлаждения	Переборка системы ВЧ (до третьих каскадов)
15-19.02.01	Лампа 2-го каскада и лампа Б 3-го каскада	
18.06.01	Замена лампы А 3-го каскада	
11.10.01	Перегрев обмотки накального тр-ра	
15 – 17.10.01	Длительная профилактика ВЧ Б4	
09 – 10.01.02	Пробой в резонаторе или в лампе ВЧ Б4	
09.03.02	Сгорел накальный тр-р лампы А	Заменяли на резервный
09.03.02	Закоротка подвода питания к вентилятору ВЧ Б4	Восстановление сгоревшего
12.05.03	Блок сеточных напряжений	Горят предохранители
19.05.04	Откл. ВЧ Б4	
19.11.04	Откл. ВЧ Б4	
23.06.05	Сгорел двигатель вентилятора охлаждения ВЧ Б4	Заменяли двигатель
10.10.05	Почернел накальный трансформатор	Заменяли
10.10.05	Сгорел двигатель вентилятора охлаждения ВЧ Б4	Купили новый и заменили

31.01.06	Замена ламп в первом каскаде	
14.02.06	Замена лампы А 3-го каскада	
14.12.06	Замена лампы Б 3-го каскада	
03.03.08	Замена лампы 2-го каскада	Часто горел предохранитель на блоке анодного 2каскада
16.04.08	Замена лампы А 3-го каскада	В блоке (УЭЗк) горел предохранитель, разрушился конденсатор в цепи сетки
22.04.08	Замена лампы Б 3-го каскада	Перегорел накал лампы в результате неправильного включения вентилятора охлаждения ламп (перепутали фазы и двигатель вращался в противоположную сторону)
12.12.08	Отвалился конец кабеля от УМ к лампе Б	Ещё нашли 2 разъёма с плохо закрученными (земляными) гайками
20.01.10	Закоротка питания обмотки подмагничивания ферритов	Ремонт с извлечением ВЧ системы из синхротрона. Потрачено двое суток

Следует отметить, что в некоторых случаях, судя по комментариям, лампы иногда заменялись не по причине их выхода из строя, а в поиске неисправности или их выхода из строя из-за ошибок при включении других систем.

Литература

- [1] *С.Б. Вассерман, В.Г. Вещеревич, Б.И. Гришанов и др.* Запуск позитрон-электронного источника для ВЭПП-4. // Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 11-13 октября 1978 г., том 1, стр.128-131.
- [2] *И.И. Авербух, М.М. Карлинер, В.В. Петров, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филипченко, В.Г. Ческидов.* Ускоряющая система синхротрона Б-4. // Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 25-27 октября 1988, Дубна. - Том 1, стр.323-324.
- [3] *И.И. Авербух, М.М. Карлинер.* Некоторые особенности работы ферритов в ускоряющих резонаторах электронных синхротронов. // Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 25-27 октября 1988, Дубна. - Том 1, стр.220-222.

И.И. Авербух, Ю.М. Глуховченко, В.В. Петров, В.Г. Ческидов

Ускоряющая система синхротрона Б-4

I.I. Averbukh, Yu.M. Glukhovchenko, V.V. Petrov, V.G. Cheskidov

Synchrotron B-4 accelerating system

ИЯФ 2011-7

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 5.04. 2011 г.

Сдано в набор 6.04. 2011 г.

Подписано в печать 6.04. 2011 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1,5 печ.л., 1,2 уч.-изд.л.

Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11