

# Система сбора данных для измерения медленных сдвигов грунта в туннелях накопителей заряженных частиц

Б.А.Баклаков, А.И.Ерохин, М.Н.Кондауров, А.С.Медведко, В.В.Пархомчук,  
Ш.Р.Сингатулин, А.Г.Чупыра

*Институт ядерной физики им.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

В.Д.Шильцев

*Национальная ускорительная лаборатория им.Ферми (FNAL), США*

В настоящее время во многих странах мира проектируются или строятся ускорительные установки с высокой светимостью, что достигается за счет уменьшения поперечных размеров пучков заряженных частиц до нескольких микрометров и менее. Поэтому в данной ситуации большое внимание уделяется внешним воздействиям на элементы ускорителя, в частности вибрациям и смещениям грунта. В Институте ядерной физики СО РАН в течение более чем 10 лет ведутся работы по исследованию воздействия этих факторов на поведение пучков заряженных частиц и созданию специальной аппаратуры для таких исследований. В последние несколько лет эти работы ведутся в сотрудничестве с Национальной ускорительной лабораторией им. Ферми (Фермилаб), США. В рамках этого сотрудничества в Институте в 1999 году была разработана система сбора данных для измерения медленных сдвигов грунта, которая с сентября 1999 года используется в измерениях на территории Фермилаба.

## 1. Описание системы сбора данных

В состав системы сбора данных входят: гидростатические датчики уровня (HLS датчики) производства французской фирмы Fogale Nanotech, 2 АЦП модуля, плата интерфейса последовательного канала связи (плата ПК), смеситель, стандартный источник постоянного тока, персональный компьютер и программное обеспечение. Блок-схема системы сбора данных представлена на рис. 1.

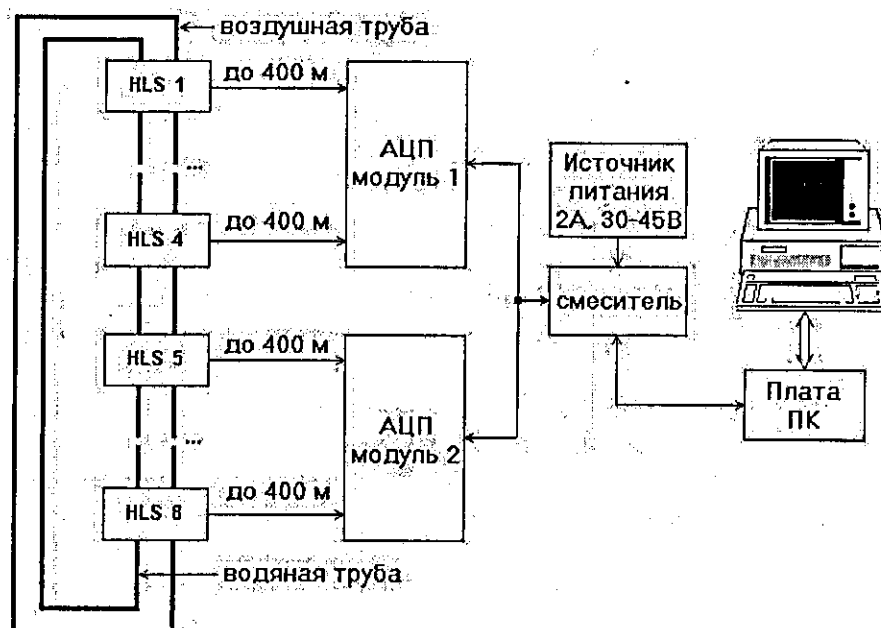


Рис. 1: Блок-схема системы сбора данных.

Гидростатический датчик уровня состоит из цилиндрического сосуда с 4 фланцами для подключения труб водяной и воздушной систем и блока с электродом и электроникой. Схематичный вид конструкции датчика уровня изображен на рис. 2.

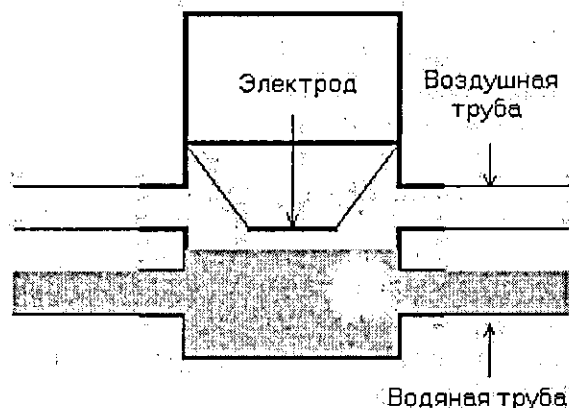


Рис. 2: Конструкция датчика уровня.

В датчике измеряется емкость, образуемая электродом и поверхностью воды в сосуде, и таким образом определяется уровень воды в последнем. Измеряемый диапазон изменения уровня воды в сосуде 2,5 мм, точность измерения  $\pm 1$  мкм. Все гидростатические датчики с помощью труб объединяются в одну гидросистему. В результате получается система сообщающихся сосудов, которая позволяет измерять относительные сдвиги грунта в точках расположения датчиков. Воздушная труба служит для выравнивания давления в системе. Каждый гидростатический датчик имеет собственный терморезистивный датчик для измерения температуры воды в сосуде в диапазоне  $0 \div 50$  °C с точностью  $\pm 0,1$  °C.

АЦП модуль предназначен для регистрации сигналов от 4 HLS датчиков. Сигналы датчиков подвергаются предварительной аналоговой обработке, т.е. масштабированию и фильтрации, затем оцифровываются и передаются по каналу последовательной связи в удаленную ЭВМ для последующей программной обработки. Электронная схема АЦП модуля имеет 8 аналоговых входных каналов (4 канала используются для измерения уровня и 4 — для измерения температуры), АЦП, 8-канальный мультиплексор, микроконтроллер, интерфейс канала последовательной связи с управляющим компьютером и импульсный источник питания.

Схема аналогового канала состоит из инструментального дифференциального усилителя с переключаемым коэффициентом усиления и активного фильтра 4-го порядка с переключаемой частотой среза. В аналоговый канал входит также релейный коммутатор, управляемый микроконтроллером, с помощью которого на электронную схему HLS датчика, подключенного к каналу, подается напряжение питания. Мультиплексор служит для коммутации выхода одного из 8 аналоговых каналов на вход АЦП.

АЦП выполнен на однокристальном 16-разрядном АЦП последовательного типа и позволяет оцифровывать аналоговые сигналы в диапазоне  $\pm 10$  В с разрешением примерно 300 мкВ, что дает разрешение 0,1 мкм для измерения уровня в используемых HLS датчиках. Оцифрованные данные с выхода АЦП поступают в сдвиговый регистр, откуда считываются микроконтроллером, а затем передаются в управляющий компьютер. Микроконтроллер выполнен на базе однокристального микропроцессора Intel80C152 и управляет работой АЦП модуля в соответствии с командами, поступающими из управляющего компьютера через канал последовательной связи.

Канал последовательной связи организуется с помощью микроконтроллера, интерфейса канала связи и двухпроводной магистрали. Сигналы в магистрали передаются в коде Манчестер-2 (уравновешенный код). Физическая среда магистрали соответствует стандарту МИЛ-STD-1533Б. Скорость передачи в канале связи может программно изменяться от 460 кБод до 1,4 МБод. Выбор частоты обмена зависит от длины магистрали, которая может достигать 500 метров. Интерфейс канала последовательной связи служит для усиления передаваемого сигнала с помощью буферного усилителя, для улучшения крутизны фронтов принимаемого сигнала с помощью специального приемника, а также для гальванической развязки электронной схемы АЦП модуля от канала связи. Импульсный источник питания преобразует

входное постоянное напряжение  $30 \div 45$  В в постоянные напряжения  $+5$  и  $\pm 15$  В, которые используются для питания электронной схемы АЦП модуля.

АЦП модуль конструктивно выполнен в виде водонепроницаемой коробки, на передней панели которой расположены разъемы для подключения HLS датчиков и связанного коаксиального кабеля. Связной коаксиальный кабель используется также для подачи напряжения питания в АЦП модули. Питающее напряжение смешивается с информационным сигналом с помощью специального смесителя, расположенного рядом с сетевым источником питания и компьютером.

Плата ПК предназначена для организации связи по последовательному каналу между персональной ЭВМ типа IBM PC и удаленными АЦП модулями. Конструктивно плата ПК выполнена в стандарте IBM PC с ISA шиной и устанавливается в один из ISA слотов компьютера. На передней панели плата имеет разъем для подключения коаксиального кабеля, с помощью которого осуществляется связь с удаленными АЦП модулями. Электронная схема платы ПК имеет в своем составе однокристалльный микроконтроллер Intel80C152, два буфера памяти по 32 кбайта, интерфейс ISA шины и интерфейс канала связи. Плата ПК по последовательному каналу связи посылает команды инициализации в удаленные АЦП модули, стробирует измерение сигналов датчиков уровня в АЦП модулях, принимает оцифрованные данные и накапливает их в одном из буферов памяти. При заполнении этого буфера плата ПК выработывает прерывание на шине IBM PC, по которому компьютерная программа организует считывание данных из буфера памяти в память компьютера для их последующей программной обработки и визуализации. Данные, поступающие в это время из АЦП модулей, записываются в другой буфер памяти, что позволяет проводить измерения непрерывно и без потери данных.

Программное обеспечение служит для компьютерного управления работой АЦП модулей и платы ПК, а также для их тестирования и настройки, для сохранения измеренных сырых данных на твердом диске, для их дальнейшей обработки и для графической визуализации измеренных сигналов и результатов их обработки. Программное обеспечение представляет из себя основную программу и набор подпрограмм, которые написаны на языке СИ с использованием пакета LabWindows CVI и предназначены для работы на персональном компьютере под операционной средой Windows95. По желанию оператора одновременно с накоплением сырых данных может производиться их дополнительная обработка: усреднение за заданное время, быстрое преобразование Фурье, вычисление спектральной плотности, вычисление корреляционных функций, вычисление отношения сигналов. Результаты вычислений при этом также сохраняются на твердый диск.

## 2. Конфигурация системы, установленной в Фермилабе

В сентябре 1999 года система сбора данных была установлена на территории Фермилаба в PW6 – PW7 beam line. В туннеле PW6 – PW7 были размещены два АЦП модуля и шесть HLS датчиков, расположенных в линию с интервалами 30 – 30 – 60 – 30 – 30 метров и объединенных трубами водяной и воздушной систем. Управляющий компьютер и сетевой источник питания были установлены наверху в здании PW7 и соединялись с АЦП модулями коаксиальным кабелем длиной около 300 метров. Основной целью измерений было исследование медленных сдвигов грунта в области частот ниже 0.1 Гц. Измерения проводились до февраля 2000 года.

На рис. 3 представлен график, показывающий изменение разности уровней двух HLS датчиков в течение двух недель. Расстояние между датчиками 150 метров. По оси X отложено время в сутках, по оси Y — разница уровней в микрометрах. На графике хорошо видны колебания с периодом около 0.5 суток, обусловленные движением Луны. Амплитуды этих колебаний изменяются от 5 до 10 мкм.

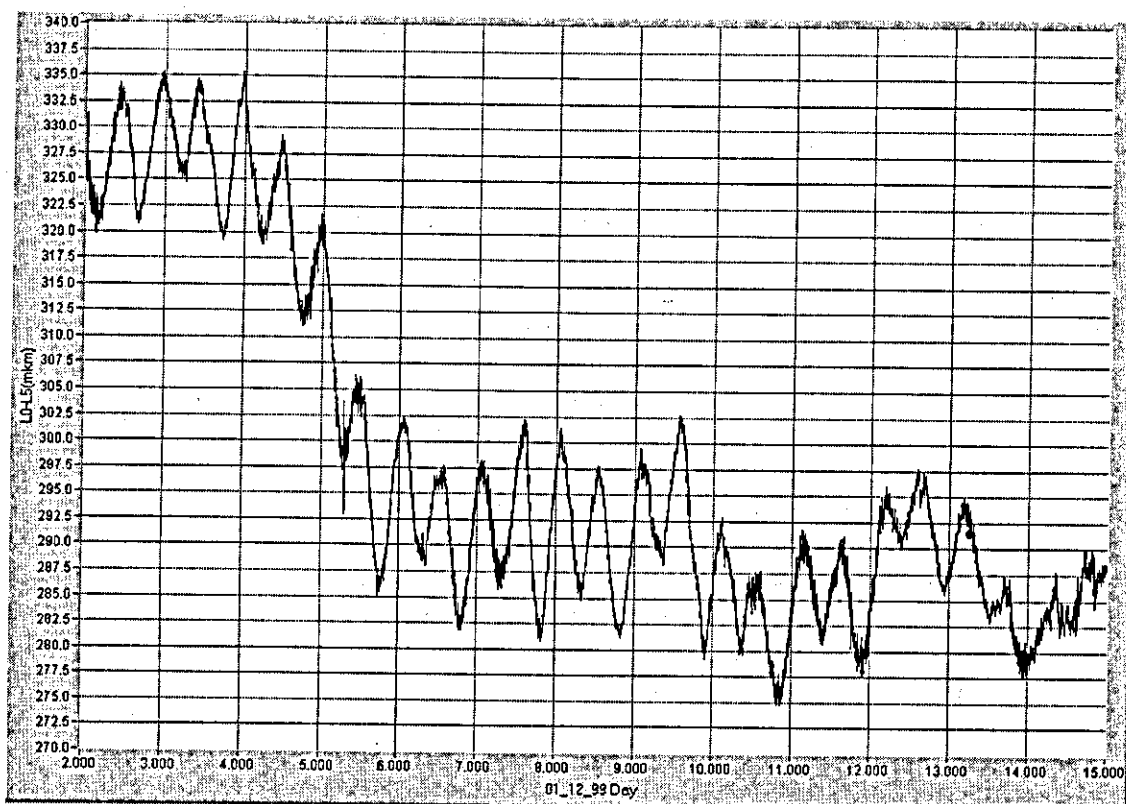


Рис. 3: Разница уровней 2 HLS датчиков.

## Заключение

Созданная система сбора данных позволяет в режиме реального времени отслеживать относительные перемещения грунта в туннелях накопителей заряженных частиц с точностью  $\pm 1$  мкм и может быть использована как для обследования предполагаемого места строительства ускорительной установки, так и для оперативного мониторинга движения грунта и элементов конструкции на действующей установке. Быстродействие системы сбора данных позволяет вести оцифровку 16 аналоговых сигналов с частотой 500 Гц в режиме реального времени.

Принцип построения и быстродействие созданной системы сбора данных дают возможность наращивать количество АЦП модулей и, соответственно, число датчиков уровня в случае необходимости.

# Испытание резонатора накопителя-охладителя ВЭПП-5

Д.Ю. Болховитянов, Н.П. Запяткин, И.В. Кушцов, Г.Я. Куркин, И.Г. Макаров,  
Л.А. Мироненко, А.А. Никифоров, Г.Н. Острейко, В.В. Пархомчук, В.М. Петров,  
Г.В. Сердобинцев, И.К. Седляров, В.В. Тарнецкий, А.Р. Штейнке  
*ИЯФ им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

ВЧ-система накопителя-охладителя ВЭПП-5 состоит из источника ВЧ-мощности, циркулятора, волноводного тракта и резонатора на 700 МГц. Приводится описание основных узлов резонатора: волноводно-коаксиальных переходов, ввода мощности, подстройки частоты. Обсуждаются результаты измерений их параметров. Представлены результаты измерений спектра высших мод в резонаторе. Приводятся результаты испытаний резонатора.

## Введение

Накопитель-охладитель предназначен для накопления и охлаждения на энергии 510 МэВ электронных и позитронных сгустков с числом частиц  $2 \cdot 10^{10}$  [1,2]. Параметры ВЧ-системы определяются требованиями получения коротких сгустков в накопителе-охладителе. Это достигается применением высокой гармоники ВЧ и большой амплитуды ускоряющего напряжения. Рабочая частота 700 МГц соответствует 64 гармонике частоты обращения частиц в накопителе.

ВЧ-система состоит из ВЧ-генератора, Y-циркулятора, волноводного тракта и резонатора. Результаты испытаний ВЧ-системы на активную нагрузку при мощности 60 кВт описаны ранее [3]. Для подавления когерентных взаимодействий пучка с высшими модами (ВМ) резонатора их добротность искусственно понижается до величин порядка 700. Это достигается подсоединением трех коаксиальных поглощающих нагрузок через волноводно-коаксиальные переходы и запердельные для основной частоты волноводы к обечайке резонатора в месте максимального ВЧ-магнитного поля для большинства ВМ. Связь с полем осуществляется через щели в резонаторе. Они имеют размеры примерно равные внутренним размерам волноводов. Частота среза и длина волновода выбирается исходя из условий максимального подавления низших паразитных мод и минимального уменьшения добротности основной моды ( $TM_{010}$ ).

Определение основных размеров и параметров резонатора осуществлялось с использованием программы SuperLans [4]. Расчетные параметры резонатора приведены в табл.1.

Таблица 1: Параметры резонатора

Рабочая частота	МГц	700
Шунтовое сопротивление	МОм	4.24
Добротность		20000
Пролетный фактор		0.748
Ускоряющее напряжение	кВ	200
Перестройка частоты	МГц	$\pm 0.8$

## 1. Конструкция резонатора

Резонатор изготовлен из меди марки М1 в мастерских экспериментального производства ИЯФ. Схематический чертеж резонатора представлен на рис.1.

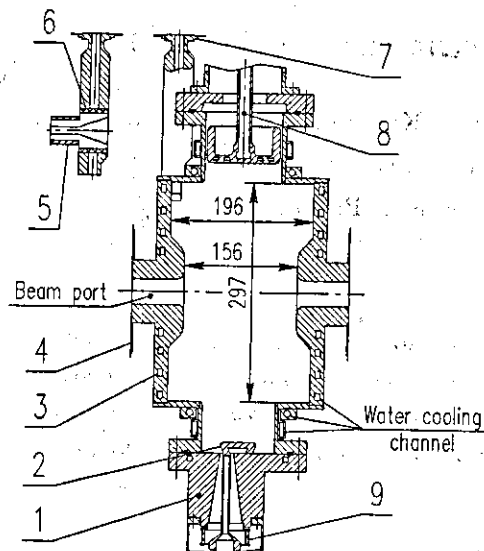


Рис. 1: Схематический чертеж резонатора: 1 - ввод мощности; 2 - петля ввода мощности; 3 - каналы охлаждения торцевой стенки резонатора; 4 - фланец шибера; 5 - волноводно-коаксиальный переход; 6 - керамический изолятор перехода; 7 - волновод  $165 \times 12.5 \text{ мм}^2$ ; 8 - узел подстройки частоты; 9 - керамический изолятор ввода.

При изготовлении резонатора использовалась технология соединения деталей пайкой в три этапа (step by step). Моделирования резонатора не проводилось, поэтому перед пайкой обечайки и дисков проводились измерения резонансной частоты и корректировался внутренний диаметр резонатора. Для уплотнения навесных узлов и подсоединения к шиберам вакуумной камеры ускорителя в конструкции резонатора используются два типа фланцев. Ввод мощности, узел подстройки частоты и измерительная петля уплотняются медными прокладками между фланцами из нержавеющей стали (стандартная конструкция при уплотнении зуб на зуб). Три волноводно-коаксиальных перехода, магнито-разрядный насос и два шибера уплотняются аргоно-дуговой сваркой тонких фланцев из нержавеющей стали.

Для охлаждения резонатора к обечайке и патрубкам фланцев припаяны шины  $20 \times 20 \text{ мм}^2$  с отверстием диаметром 8 мм, а в торцевых стенках резонатора сделаны каналы 3 (рис.1) сечением  $10 \times 7 \text{ мм}^2$ . Общий расход воды 100 л/мин обеспечивается при давлении  $4 \text{ кг/см}^2$ .

Конструкция ввода мощности практически аналогична конструкции ввода резонатора комплекса ВЭПП-4. Во вводе используется цилиндрическое окно из керамики 22ХС. Для получения минимального КСВН связь с ВЧ-магнитным полем резонатора регулируется поворотом петли.

Перестройка частоты резонатора производится плунжером  $\varnothing 104 \text{ мм}$ . Ход плунжера  $\pm 15 \text{ мм}$  обеспечивает изменение частоты на  $\pm 1.45 \text{ МГц}$ . Плунжер имеет каналы для охлаждения. Части ввода мощности и плунжера, смотрящие в вакуум, покрыты нитридом титана (TiN) для предотвращения ВЧ-разряда.

## 2. Демпфирование высших мод

Ускоряющий резонатор имеет плохую азимутальную симметрию, и каждая несимметричная мода расщепляется на два ортогональных колебания с разными частотами, а их положение по азимуту определяется положением эквивалентной неоднородности. Для шунтирования, например, дипольных мод должно быть не меньше двух волноводов, расположенных ортогонально. Три равномерно распределенных по азимуту волновода всегда имеют значительную связь с расщепленными несимметричными модами и сильную связь с симметричными. Связь с полем осуществляется через отверстия в резонаторе, имеющие размеры примерно равные внутренним размерам волноводов.

Энергия высших мод распространяется вдоль волновода на основном виде  $TE_{10}$  и должна быть поглощена в согласованной нагрузке, таким образом уменьшается время затухания паразитных колебаний. Известно, что режим согласования можно обеспечить двумя способами:

поместив в волновод (т.е. в нашем случае в вакуум) абсорбер и, в другом случае — применяя трансформатор типа волны  $TE_{10}$  в ТЕМ (волноводно-коаксиальный переход — ВКП) и рассеивая мощность ВМ в коаксиальной нагрузке. Оба способа имеют свои недостатки; в первом случае возникают затруднения с его охлаждением и наблюдается значительное газоотделение, во втором — широкополосность ВКП обычной конструкции не превышает октаву. Выбор варианта волноводно-коаксиального перехода определяется конкретными параметрами резонатора и ускорителя. Выбрана традиционная конструкция ВКП с цилиндрическим керамическим окном из 22ХС. Передаваемая через ВКП в нагрузку мощность ограничивается допустимой мощностью коаксиального кабеля ( $>1.5$  кВт). Внешний вид ВКП показан на рис.1, зависимость КСВН от частоты — на рис.2.

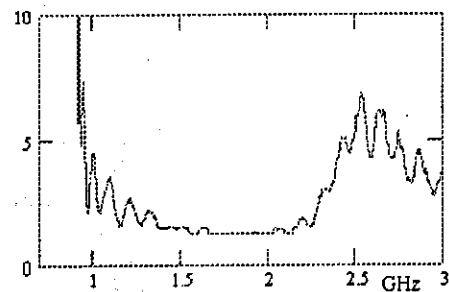


Рис. 2: КСВН перехода в зависимости от частоты.

Измеренная полоса частот при КСВН  $<2$  — около октавы. Эффективность подавления ВМ измерялась методом S-параметров ( $S_{21}$ ), используя панорамный измеритель Р2-83 и слабосвязанные антенны. На рис.3 представлены результаты измерений параметра  $S_{21}$  в диапазоне частот.

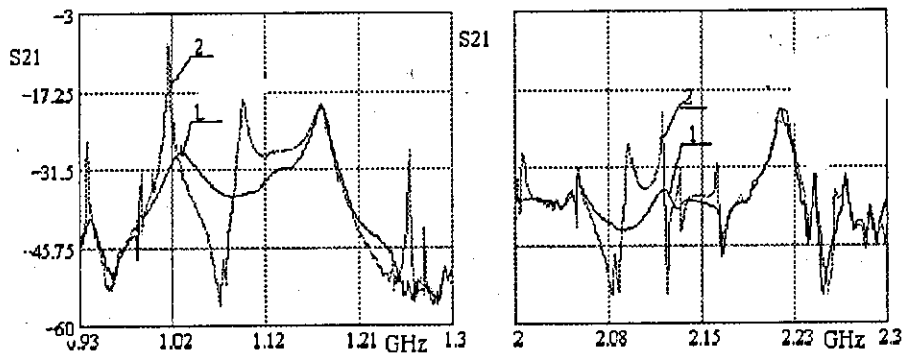


Рис. 3: Зависимость  $S_{21}$  от частоты: 1 — нагрузки подключены к ВКП; 2 — нагрузки не подключены к ВКП.

Добротность ВМ в диапазоне 0.9–2.2 ГГц (т.е. в диапазоне частот, где находятся ВМ с большими  $R/Q$ ) у большинства мод не превосходит 100. Уменьшение добротности основной моды ( $E_{110}$ ) при подключении нагрузок к ВКП составляет 7.5%.

### 3. Испытания резонатора

После сборки резонатор был прогрет на стенде в течение 24 часов при температуре  $150^\circ\text{C}$ , поставлен в кольцо накопителя-охлаждителя, подключен к системам ВЧ-питания, водяного охлаждения и контроля. Магниторазрядный насос производительностью 160 л/с без ВЧ обеспечивал вакуум  $10^{-9}$  Торр. Процесс тренировки начинался в импульсном режиме. Тренировка в импульсном режиме препятствует запоминанию пути пробоя, ограничивает энергию в разряде и позволяет путем изменения скважности поддерживать давление на нужном уровне ( $10^{-7}$  Торр.). После тренировки в течение 2 часов в резонаторе было получено номинальное напряжение 300 кВ в непрерывном режиме. Давление равнялось  $10^{-8}$  Торр, коэффициент отражения в питающем резонатор фидере соответствовал измеренному на малом уровне мощности. Наибольший нагрев наблюдался в месте подсоединения волноводов. Уход частоты при 20 кВт рассеиваемой мощности равнялся -150 кГц. Общий вид резонатора показан на рис.4.

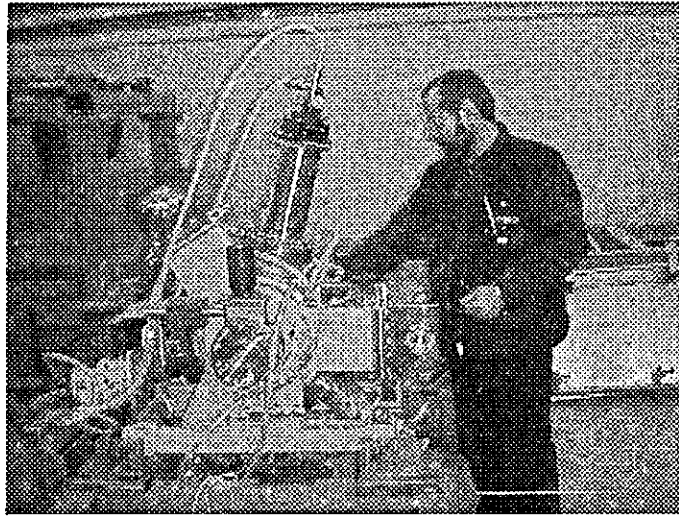


Рис. 4: Общий вид резонатора.

#### Список литературы

- [1] N.S. Dikansky et al. – In: Proc. of EPAC'94, Jule 1, 1994, London, pp.482-484.
- [2] V.V. Parkhomchuk et al. Status of the injector complex for  $c/\tau$  factory at Novosibirsk. – In: Proc. APAC'98, March 23-27, Tsukuba, Japan, 1998.
- [3] A. Alinovsky et al. RF system for VEPP-5 damping ring. PAC'98, 22–28 June, 1998, Stockholm.
- [4] D. Myakishev and V. Yakovlev. – In: Proc. PAC'91, May 6–9, San-Francisko, p.3002.



# Проект 2856 МГц 80 МВт импульсного магнотрона — эффективного ВЧ-источника для линейных ускорителей

И.А.Запрыгаев, Е.В.Козырев, Г.И.Кузнецов, А.А.Никифоров, Г.Н.Острейко,

Б.З.Персов, Г.В.Сердобинцев, В.В.Тарнецкий, М.А.Тиунов

*ИЯФ им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия*

О.А.Невеженко, В.П.Яковлев

*Омега-II, Нью Хевен, Коннектикут, США*

Рассматривается проект альтернативного источника ВЧ-мощности для электрон-позитронного инжектора комплекса ВЭПП-5. Магнотрон, работая на второй гармонике входной частоты, должен обеспечивать: до 80 МВт выходной мощности в импульсе 5 мксек при электронном КПД более 50% и коэффициенте усиления ~50 дБ.

## Введение

ВЧ система создаваемого в ИЯФ СО РАН форинжектора ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-5 [1,2] базируется на четырех клистронах 10-см диапазона 5045 (производства SLAC, США). Выбор этого клистрона определялся высокой импульсной мощностью — до 67 МВт, КПД — до 47%, большим сроком жизни — до 40 тыс. часов и отсутствием отечественного аналога. В качестве альтернативного усилителя СВЧ-мощности было решено разработать импульсный 2856 МГц магнотрон. Предварительные оценки показали, что этот магнотрон может обеспечивать импульсную мощность до 80 МВт в импульсе 5 мкс при КПД выше 50%, усилении не менее 50 дБ и частоте повторения импульсов 50 Гц. Такой прибор был разработан на основе опыта создания в ИЯФ 915 МГц магнотрона-усилителя [3] и 7 ГГц магнотрона, работающего на второй гармонике входной частоты [4,5].

## 1. 2856 МГц Магнотрон

Конструктивная схема прибора изображена на рис.1. Магнотрон состоит из диодной электронной пушки, соленоида, высокочастотной системы и коллектора. Электронный пучок, сформированный электронной пушкой, инжектируется в высокочастотную систему.

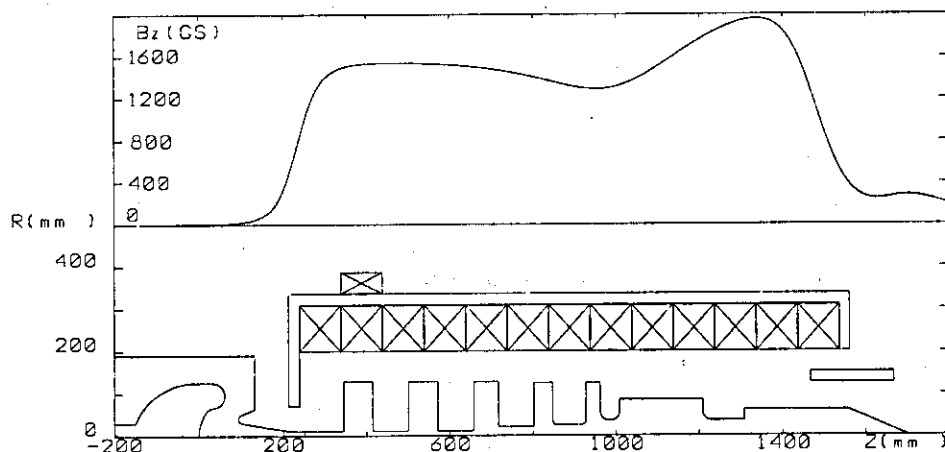


Рис. 1: Общий вид 2856 МГц магнотрона.

Высокочастотная система содержит 5 цилиндрических модулирующих резонаторов и один выходной. Модуляция электронного пучка путем отклонения его от оси и круговой развертки осуществляется входным и четырьмя пассивными резонаторами, настроенными на частоту 1428 МГц. Так же, как и 7 ГГц усилитель [5], 2856 МГц магнискон работает на второй гармонике входной частоты. Передача энергии пучка высокочастотным колебаниям происходит в выходном резонаторе, настроенном на частоту 2856 МГц. В модулирующих резонаторах возбуждаются вращающиеся по азимуту колебания  $TM_{110}$ , а в выходном резонаторе —  $TM_{210}$ . Все резонаторы помещены в продольное статическое магнитное поле сопровождения, создаваемое соленоидом. Подбором токов в катушках соленоида создаются необходимые для эффективной работы прибора величина и распределение магнитного поля (рис.1).

### 1.1. Диодная электронная пушка

При разработке источника электронов использовалась концепция формирования мощных электронных пучков с высокой плотностью тока, разработанная в нашем Институте [6]. Электронная пушка включает 120 мм сферический оксидный катод, изолятор, фокусирующий электрод и анод. Ток пушки при анодном напряжении 470 кВ составляет 312 А. Конструкция пушки обеспечивает равномерную эмиссию с поверхности катода, причем максимальная плотность тока не превосходит  $3 \text{ А/см}^2$ .

Накопленный в Институте опыт работы с такими оксидными катодами позволяет рассчитывать на длительный срок эксплуатации прибора при указанной плотности тока. Напряженность электрического поля максимальна на поверхности анода и не превышает  $190 \text{ кВ/см}$ . Напряженность же электрического поля на поверхности фокусирующего электрода менее  $140 \text{ кВ/см}$ . Геометрия пушки обеспечивает электростатическую компрессию 300:1 и диаметр электронного пучка на входе в соленоид 7 мм (95% тока заключены внутри диаметра 6.4 мм). Результаты расчета электронной пушки приведены на рис.2а.

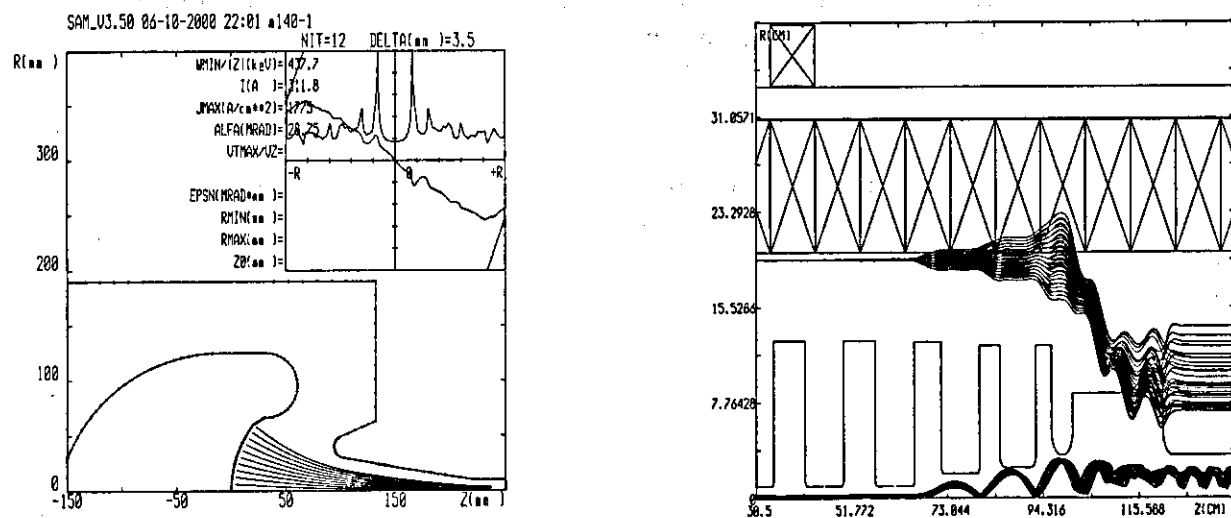


Рис. 2: Диодная пушка и динамика пучка в магнисконе.

### 1.2. Высокочастотная система

ВЧ-система включает 6 резонаторов (рис.1): один входной, один пассивный, три так называемых "penultimate" резонатора и один выходной резонатор. Все модулирующие резонаторы (1-5) имеют диаметры 25 см. Продольный размер первых двух резонаторов составляет 7 см. Высоты же последних трех ("penultimate") резонаторов постепенно уменьшаются для сохране-

ния угла пролета электронов, который меняется по мере возрастания угла отклонения пучка. Отличительной особенностью данного магнিকона является то, что последние три пассивных резонатора увеличивают отклонение пучка на одинаковый угол  $\sim 17$  градусов (режим сложения углов отклонения на отдельных резонаторах [7]). Такой режим работы позволяет существенно снизить (приблизительно в три раза) максимальную напряженность электромагнитных полей в последнем модулирующем резонаторе и повысить устойчивость работы всего прибора [5]. Ранее режим сложения углов, но только на двух отдельных резонаторах, был использован в конструкциях 11 ГГц [8] и 34 ГГц импульсных магниконов [9].

Выходной резонатор имеет диаметр 16.5 см, продольный размер 20 см и снабжен двумя волноводными выводами высокочастотной мощности. Оптимальная величина нагруженной добротности выходного резонатора составляет 185. Компенсация продольной и азимутальной неоднородности ВЧ полей в выходном резонаторе осуществляется аналогично 7 ГГц магнিকону [5].

### 1.3. Магнитная система

Конструктивно магнитная система магнিকона аналогична примененной нами в 7 ГГц магниконе [6]. Соленоид магнитной системы содержит 12 одинаковых катушек, создающих основное поле, и одну катушку для компенсации магнитного поля на катоде. Длина соленоида 135 см, внешний диаметр — 68 см, внутренний — 39 см. Толщина магнитного экрана 2.5 см. Индукция в железе не превосходит 7 кГс. Катушки основного поля выполнены в виде отдельных кольцевых галет высотой 10.8 см со своим магнитным экраном. В области промежутка между последним модулирующим и выходным резонаторами расположена точно такая же галета, но без катушки. Соленоид обеспечивает осевое магнитное поле 1.5 кГс в области модулирующих и 1.95 кГс в выходном резонаторах (рис.1). Для питания соленоида могут быть использованы два источника тока мощностью до 7 кВт.

### 1.4. Динамика электронного пучка и результаты расчетов

Расчет и оптимизация динамики электронного пучка конечного размера проводились с учетом реальных магнитостатических и электрических полей в пушке и соленоиде, а также реальных высокочастотных полей в резонаторах магнিকона. Для этого использовались специальные программы, разработанные в Институте [10,11]. Программы позволяют исследовать устойчивость работы прибора как в переходном, так и в установившемся режимах. Для достижения необходимого угла отклонения пучка и устойчивой работы модулирующих резонаторов статическое магнитное поле должно быть такое, чтобы  $\Omega/\omega \sim 1.45$  ( $\Omega$  — циклотронная частота, а  $\omega$  — частота входного сигнала). Для эффективного же взаимодействия электронов пучка в выходном резонаторе продольное магнитное поле должно быть таким, чтобы  $\Omega/2\omega \sim 1.85$ .

Рис.2в иллюстрирует аксиальную динамику пучка в высокочастотной системе (установившийся режим), а также изменение энергии вдоль оси. Основные результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1: Основные расчетные параметры 2856 МГц магнিকона

Рабочая частота, МГц	2856	Напряжение пучка, кВ	470
Входная частота, МГц	1428	Ток пучка, А	312
Выходная мощность, МВт	79.7	Микропервеанс электронной пушки	0.96
Входная мощность, Вт	170	$E_{\max}$ в 5-ом резонаторе, кВ/см	115
Длительность импульса, мксек	5	$E_{\max}$ в выходном резонаторе, кВ/см	137
Частота повторения, Гц	50	$P_{\text{ср. в ст.}}$ в 5-ом резонаторе, Вт	56
КПД, %	54.3	$P_{\text{ср. в ст.}}$ в выходном резонаторе, Вт	120
Усиление, дБ	56.7		

## 2. Заключение

Разработанный магникон не уступает по параметрам лучшему зарубежному аналогу (клинотрону 5045 производства SLAC, США) и вполне может рассматриваться в качестве альтернативного высокочастотного источника питания для современных линейных ускорителей. Опыт создания в Институте магниконов на частоту 915 МГц и 7 ГГц также свидетельствует о реальности практической реализации данного проекта.

## Список литературы

- [1] N.S.Dikansky et al. Status of the VEPP-5 Complex. – Proc. of 1994 Fourth European Part. Acc. Conf. London, June, 27, p. 482.
- [2] М.С.Авилов и др. Форинжектор комплекса ВЭПП-5. Состояние работ. // Вопросы атомной науки и техники, выпуск 2,3(29,30), Харьков, 1997, т.2, с.36.
- [3] M.M.Karliner et al. The Magnicon — an Advanced Version of the Girocon. // NIM-A, 1988, vol. A269, No 3, p.459.
- [4] E.V.Kozyrev et al. Performance of the High Power 7 GHz Magnicon Amplifier. // Particle Accelerators, 1996, vol. 55, p.55.
- [5] E.V.Kozyrev et al. 7 GHz 55 MW Pulsed Magnicon. – Proc. of the International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, 2–9 August 1999, Nizhny Novgorod, 2000, v.2, pp. 740–746.
- [6] Yu.Baryshev et al. A 100 MW Electron Source With Extremely High Beam Area Compression. // NIM-A, A-340, 1994, p.241.
- [7] O.A.Nezhevenko, V.P.Yakovlev. IEEE Trans. of Plasma Sci., 8-th Special Issue on High Power Microwave Generation (to be published).
- [8] O.A.Nezhevenko et al. X-Band Magnicon Amplifier. – Proc. of the Particle Acc. Conference PAC'99 (to be published).
- [9] O.A.Nezhevenko et al. Status of 34 GHz Pulsed Magnicon Project. – Proc. of 7th European Particle Acc. Conference (to be published).
- [10] B.Fomel et al. Computer-Aided Electron Gun Design. – Proc. XIII Int. Conf. On High-Energy Accel., 1996, vol 1, p. 353.
- [11] V. Yakovlev et al. Numerical simulation of magnicon amplifier. – Proc. of 1995 Part. Acc. Conf. and International Conference on High Energy Accelerators, Dallas, 1995, p.1569.