

ДИАГНОСТИКА ПУЧКА НА КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-4

Е.Н. Дементьев, Н.И. Зиневич, А.С. Калинин, А.С. Медведко,
С.И. Мишнев, И.Я. Протопопов, А.Б. Темных, Е.И. Шубин
Институт ядерной физики СО АН СССР
Новосибирск, 630090

Приводится описание части диагностической аппаратуры, имеющейся на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-4 (2×5.5 ГэВ) и его бустере ВЭПП-3. Эта аппаратура позволяет измерять основные параметры накопленных пучков—равновесную орбиту пучка, его ток, частоты бетатронных колебаний, а также характеристики пучков, выпускаемых в накопитель.

Равновесная орбита

Измерение равновесной орбиты (РО) в накопителе ВЭПП-4¹ проводится в 54 сечениях вакуумной камеры накопителя по радиусу и вертикали. Это соответствует 6 точкам измерения на длину волны свободных бетатронных колебаний. В качестве датчиков в системе использованы электростатические пикап-электроды. По-

ЭВМ блок «АЦП-ОРБИТА». В системе восемь блоков. Один блок обслуживает 8 пикап-станций.

Станция, содержащая 4 пикап-электрода, включает в себя также 4 ФНЧ, высокочастотные ключи КП, К1—К4, КИ и согласующий усилитель. Ключ КП подключает пикап-станцию к блоку «АЦП-ОРБИТА», К1—К4 осуществляют подключение пикап-электродов ко входу согласующего усилителя, КИ используется при калибровке пикап-станции.

Блок «АЦП-ОРБИТА» содержит приемник, настроенный на удвоенную частоту обращения пучка (1,6 МГц), и два синхронных детектора (СД), опорные напряжения которых взаимно ортогональны. Кроме того, блок включает в себя аналого-цифровой преобразователь (АЦП), измеряющий сигналы с детекто-

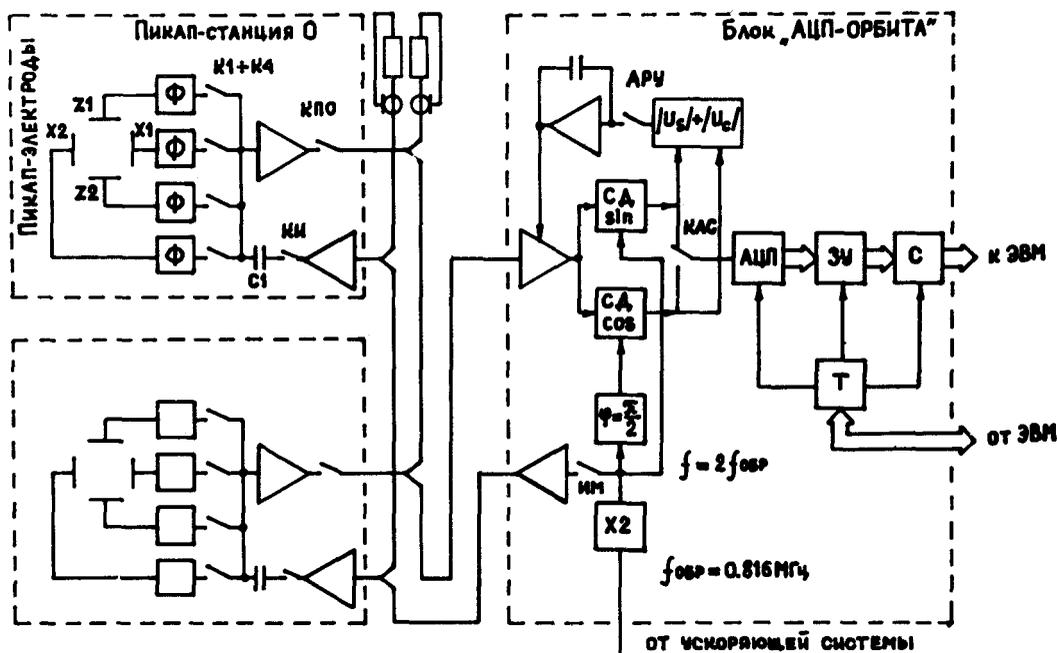


Рис. 1. Схема системы измерения равновесной орбиты:
Ф—фильтр низких частот; К1—К4, КП, КИ, ИМ—высокочастотные ключи; АРУ, КАС—аналоговые ключи; СД—синхронный детектор; АЦП—аналого-цифровой преобразователь; ЗУ—запоминающее устройство; Ст—станция связи с ЭВМ; Т—таймер.

скольку короткий пучок возбуждает в них паразитные высокочастотные колебания, электроды оснащены фильтрами нижних частот (ФНЧ), которые устраняют вредное влияние колебаний на электронные схемы. ФНЧ выполнены в виде несогласованных LC-фильтров, которые нагружены на высокоомный вход усилителя. Для уменьшения неравномерности коэффициента передачи в полосе прозрачности в индуктивные ветви введены дополнительные омические потери.

Система измерения РО организована следующим образом (рис. 1).

Автономным узлом системы является связанный с

ров, запоминающее устройство (ЗУ) на 128 двенадцатиразрядных двоичных слов (один разряд знаковый), таймер (Т).

В качестве опорного напряжения детекторов используется сигнал от ускоряющей системы накопителя. Это позволяет получить на выходе детектора наилучшее отношение сигнал/шум. Использование взаимно ортогональных опорных напряжений синхронных детекторов позволяет определить амплитуду синусоидального сигнала независимо от его фазы.

Выходные напряжения детекторов — будем называть их синусным и косинусным — благодаря работе ключей К1—К4 образуют временную последователь-

ность. Время, отводимое на одно состояние ключей, равно 20 мс, период работы системы равен 1.28 с. Обозначим через X_1, X_2, Z_1, Z_2 сигналы, полученные с каждого пикап-электрода, а $\Sigma Z, \Sigma X$ —сигналы, соответствующие одновременно подключенным двум вертикальным или двум радиальным электродам; N —состояния, соответствующие отключенным электродам.

Вычисление смещения пучка по результатам измерений ведется в ЭВМ по формуле

$$X = X_{\max} \frac{M_x \sqrt{(X_{1s} - N_s)^2 + (X_{1c} - N_c)^2} - \sqrt{(X_{2s} - N_s)^2 + (X_{2c} - N_c)^2}}{M_x \sqrt{(X_{1s} - N_s)^2 + (X_{1c} - N_c)^2} + \sqrt{(X_{2s} - N_s)^2 + (X_{2c} - N_c)^2}},$$

где индексы s, c соответствуют косинусной и синусной составляющим сигналов; X_{\max} —радиальная полуапертура датчика, в первом приближении совпадающая с

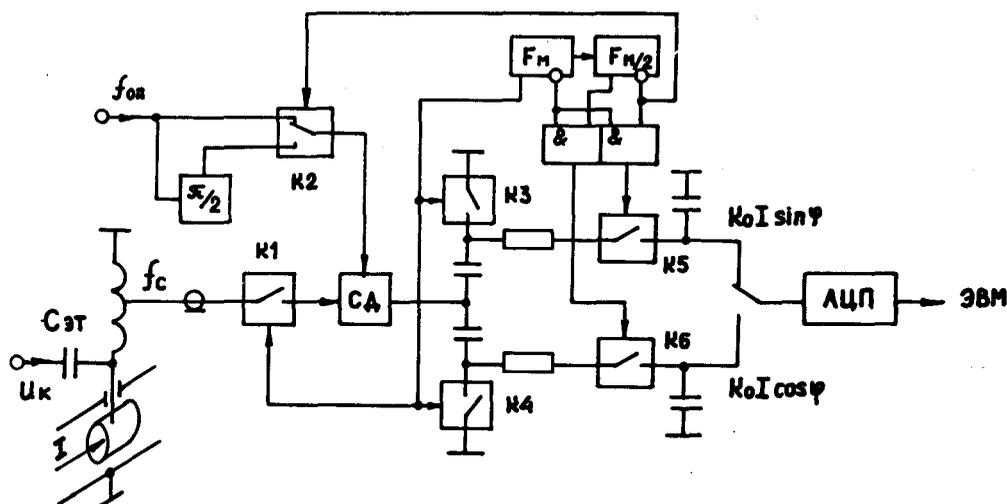


Рис. 2. Измеритель тока пучка: Д—датчик; К1—ключ модулятора; К2—ключ фазовращателя; К3—К6—ключи демодулятора выходных сигналов; СД—синхронный детектор.

геометрической; M_x —калибровочный коэффициент, равный отношению емкостей электродов (с учетом емкостей фильтров). Вертикальное смещение пучка (Z) вычисляется аналогично. Коэффициенты M_x, M_z и величины X_{\max} и Z_{\max} хранятся в памяти ЭВМ.

Отметим, что оснащение системы преобразователем частоты позволяет использовать ее на других установках, частота обращения пучка в которых лежит в пределах полосы прозрачности ФНЧ. Именно такой системой оснащен накопитель ВЭПП-3.

Для сжатия динамического диапазона детектируемых сигналов применена схема автоматической регулировки усиления приемника, работающая в импульсном режиме от суммы модулей синусного и косинусного сигналов ΣZ и ΣX с последующим запоминанием регулирующего напряжения.

Описанная система введена в работу летом 1977 года при запуске ВЭПП-4. Диапазон токов пучка при работе составляет $0,025 \div 10$ мА. Среднеквадратичная погрешность измерений при числе частиц на орбите $4 \cdot 10^9$ (500 мкА) составила 0,15 мм. Эта же точность при меньших токах достигается усреднением результатов в ЭВМ.

Ток пучка

Измерение тока пучка основано на определении амплитуды одной из гармоник сигнала, наводимого пучком на интегральный электростатический датчик. Для выделения нужной гармоники используется резонанс-

ный контур, емкостью которого служит емкость датчика. Для обработки сигнала применено синхронное детектирование. Опорное напряжение на синхронный детектор подается от ВЧ-системы накопителя.

Для расширения динамического диапазона измерений в измерительной системе применен принцип МДМ (модуляция—демодуляция). Сигнал выбранной гармоники модулируется с частотой $F_m \approx 1$ кГц по амплитуде ключом К1 (рис. 2), детектируется синхронным детектором СД и демодулируется ключами К3—К6. Для измерения двух взаимно ортогональных составляющих входного сигнала с использованием одного СД фаза опорного напряжения периодически с частотой $F_m/2$ меняется на $\pi/2$. При этом напряжение на входе демодулятора представляет собой суперпозицию двух последовательностей, амплитуды импульсов в которых

пропорциональны, соответственно, синусной и косинусной составляющим входного сигнала. В демодуляторе происходит разделение этих последовательностей на две и их демодуляция. Напряжения с выходов демодулятора измеряются интегрирующим АЦП, и далее, в ЭВМ, вычисляется модуль входного сигнала.

Калибровка системы проводится подачей гармонического сигнала на контур датчика через эталонную емкость, величина которой выбирается из условия: $C_x \ll C_d/Q$, где Q —добротность входного контура.

Описанная система имеет динамический диапазон измерений более 100 дБ и измеряет ток пучка на накопителе ВЭПП-3 в пределах 1 мкА—100 мА. Система работает на 2 гармонике частоты обращения пучка (8,06 МГц), азимутальная протяженность пучка не превышает 50 см.

Частоты бетатронных колебаний

Метод измерения основан на получении амплитудно-частотной характеристики поперечных колебаний частиц пучка². Сигнал от управляемого через ЭВМ синтезатора частот (рис. 3) через усилитель мощности подается на кикер, возбуждающий поперечное колебательное движение частиц. Наблюдение за этим движением осуществляют датчики вертикального и горизонтального положения пучка. Амплитудно-частотный анализ сигналов с датчиков выполняется вблизи одной из гармоник частоты обращения анализаторами спектров соответствующих каналов. Гетеродинное напряжение для анализаторов подается от синтезатора частот, что позволяет частоту анализа изменять синхронно с час-

тотой возбуждения, подаваемой на кикер. Синхронно с изменением частоты аналого-цифровой преобразователь (АЦП) измеряет предварительно просуммированные сигналы с анализаторов спектров. ЭВМ обрабатывает поступающую из АЦП информацию и результат выводит на графический дисплей. В качестве кикера применяется катушка, магнитное поле которой направлено под углом 45° к плоскости орбиты накопителя. Это позволяет за одно сканирование возбудить и вертикальные, и горизонтальные колебания частиц пучка и, тем самым, свести к минимуму время измерения.

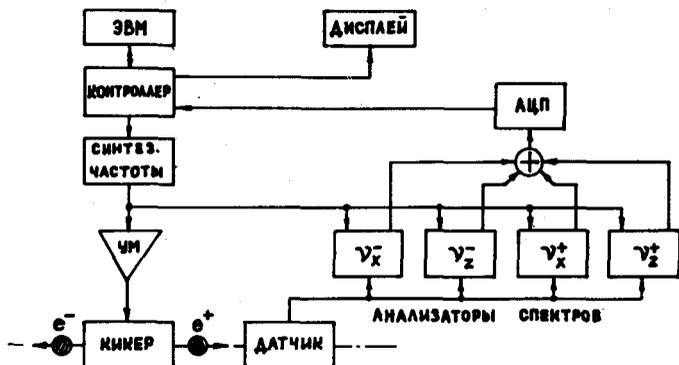


Рис. 3. Структурная схема системы измерения бетатронных частот.

На накопителе ВЭПП-4, работающем в режиме встречных электронных и позитронных пучков, система наблюдения состоит из четырех одинаковых каналов, осуществляющих наблюдение за вертикальными и горизонтальными колебаниями отдельно электронного и позитронного пучков. На накопителе ВЭПП-3, работающем с пучком либо электронов, либо позитронов поочередно, система включает два одинаковых канала слежения за вертикальными и горизонтальными колебаниями. Структурная схема измерительного канала одинакова для обоих накопителей и представлена на рис. 4.

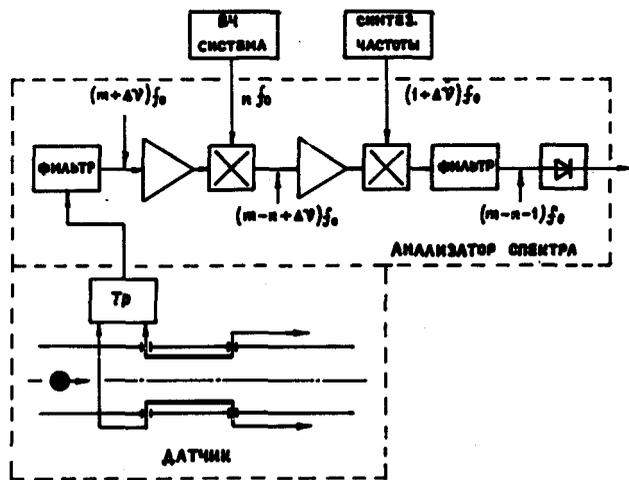


Рис. 4. Блок-схема системы наблюдения.

Датчик бетатронных колебаний представляет собой четыре полосковые 50-омные линии. Сигналы с противоположных линий подаются на вычитающий трансформатор, имеющий входное сопротивление, равное волновому сопротивлению линии. Применение согласованных полосковых линий в качестве датчика позволяет разделить сигналы электронных и позитронных сгустков, которые снимаются с противоположных концов линий. Ослабление сигнала бетатронных колеба-

ний электронов в позитронном канале и наоборот определяется неидеальностью согласования линий (отражение от вакуумных вводов и трансформатора) и составляет 26 дБ для датчика на накопителе ВЭПП-4. На ВЭПП-3, где нет задачи разделения пучков, соответствующие концы линий нагружены на свое волновое сопротивление.

Анализатор спектра сигналов позволяет исследовать сигнал датчика вблизи m -й гармоники частоты обращения ($m=216$ для ВЭПП-4, $m=4$ для ВЭПП-3), которая выбирается из условий, с одной стороны, получения максимальной чувствительности канала и, с другой, возможности изготовления входных фильтров с необходимым подавлением посторонних частот. Он представляет собой селективный приемник с двойным преобразованием частоты (рис. 4), гетеродинная частота первого преобразования постоянна ($nf_0=221f_0$ для ВЭПП-4, $nf_0=4f_0$ для ВЭПП-3, f_0 —частота обращения пучка), а перестройка частоты анализа осуществляется изменением гетеродинной частоты второго преобразования. Входная часть анализатора содержит предварительный усилитель с избирательным фильтром на входе, пропускающим лишь одну боковую составляющую бетатронных частот $(m+\Delta\nu_{x,z})f_0$. З м

Сигнал промежуточной частоты, усиленный полосковым усилителем, поступает на второй преобразователь частоты, гетеродинным напряжением для которого является сигнал с синтезатора частот, служащий также для раскачки пучка. Весь диапазон сканирования проводится дискретно за 250 шагов. На каждом шаге АЦП измеряет и запоминает просуммированный сигнал со всех каналов наблюдения; диапазон АЦП по чувствительности выбирается автоматически в зависимости от величины тока пучка в накопителе.

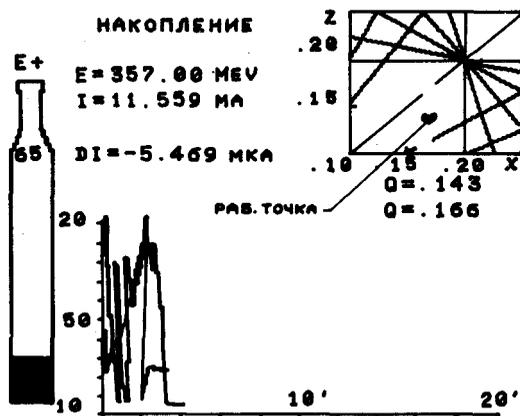


Рис. 5. ВЭПП-3. Положение рабочей точки в сетке частот бетатронных колебаний.

Обработка цифровой информации осуществляется программируемым контроллером. Сначала производится сглаживание амплитудно-частотной характеристики путем усреднения по нескольким точкам измерения и вычитание шума. Затем производится разделение резонансных кривых, определяются центры тяжести каждой из них. Значения центров тяжести и являются величинами бетатронных частот. Метод позволяет получить информацию о разбросе частот поперечных колебаний пучка.

На графический дисплей выводятся амплитуд-

но-частотная характеристика и сетка частот бетатронных колебаний, на которой отмечено измеренное положение рабочей точки (рис. 5). Точность измерения частот $10^{-3}f_0$; амплитуда вынужденных колебаний в пучке при рабочих токах накопителей ($5 \div 10$ мА — ВЭПП-4, $5 \div 100$ мА — ВЭПП-3) составляет доли геометрических размеров сгустков; время измерения ≈ 1 с; минимальные токи пучков, при которых возможны измерения, ~ 50 мкА, при этом амплитуда колебаний пучка порядка учетверенного поперечного размера по отношению к сдвигу пучка по радиусу.

Параметры впускаемого пучка

Для контроля параметров впускаемого, а также стационарно циркулирующего пучков в накопителе ВЭПП-4 используется система, в которой на каждом обороте, начиная с первого, регистрируются координаты пучка в некотором сечении накопителя³. Координаты представляют собой выборки из бетатронных и/или синхротронных колебаний, совершаемых пучком около равновесного положения.

Параметры колебаний определяются путем дискретного спектрального анализа совокупности выборок. Измерение амплитуды и фазы для впускаемого пучка позволяет настраивать угол и координаты пучка в месте впуска в накопитель, а также энергию и фазу впуска в сепаратрису.

Выделение импульсного сигнала нужного пучка — электронного или позитронного или пучка в данной сепаратресе — производится стробированием. Система оснащена устройством импульсного воздействия на пучок для измерения бетатронных частот стационарно циркулирующего пучка. Управление системой, спектральный анализ выборок с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье, индикация результатов проводится с помощью ЭВМ.

В системе используются электростатические датчики и фильтры, аналогичные примененным в системе измерения равновесной орбиты. Система имеет три ка-

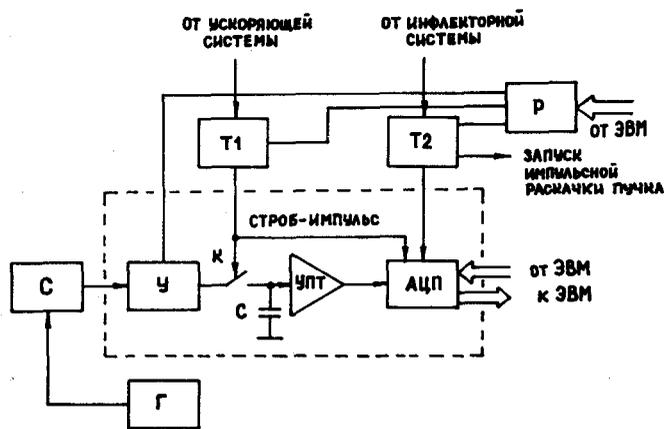


Рис. 6. Система многооборотного контроля пучков: С—станция, У—усилитель; Кл—ключ; УПТ—усилитель постоянного тока; АЦП—аналого-цифровой преобразователь; Т1 и Т2—таймеры; Р—регистр.

нала—для измерения тока и вертикальной и горизонтальной координат. Устройство системы показано на рис. 6. Изображен один канал, обведенный рамкой. Сигнал от станции С, установленной на накопителе, поступает на усилитель У и затем на стробирующее устройство, состоящее из ключа Кл, емкости С, буферного усилителя УПТ, аналого-цифрового преоб-

разователя АЦП и таймера Т1. Старт преобразователя производится таймером Т2. Измерения идут до заполнения запоминающего устройства преобразователя, после чего информация передается в ЭВМ. Преобразователь имеет быстродействие 1 отсчет/мкс, емкость запоминающего устройства 4096 слов.

На рис. 7 представлена картина тока и положения впускаемого пучка на экране дисплея. Пучок впускается в сепаратрису, где уже имеется циркулирующий ток. Большое деление по горизонтали соответствует

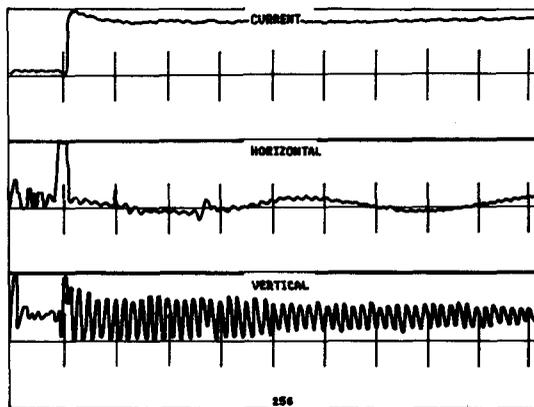


Рис. 7. Картина тока и положения впускаемого пучка. Большое деление по горизонтали соответствует двадцати пяти оборотам пучка. Вертикальный размер рамок равен 1/3 апертуры датчика.

двадцати пяти оборотам. Средний ток пучка 400 мкА. Видны потери частиц на первых двадцати оборотах, синхротронные и бетатронные колебания, обусловленные неидеальностью условий впуска. Чувствительность системы составляет 15 мкА.

Кроме наблюдения динамики захвата пучка в синхротронный режим ускорения, настройки режима впуска и измерения частот колебаний, система использовалась для измерения связи вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний, регистрации влияния на пучок «хвостов» поля впускного магнита и измерения β -функций путем вариации градиента поля в квадрупольной линзе.

Предстоящая модернизация накопителя ВЭПП-4 предполагает, в частности, развитие системы с целью более полного измерения β -функций. Измерения будут проводиться в совокупности точек азимута накопителя путем регистрации амплитуды колебаний пучка, возбужденных импульсным воздействием. Эта же система будет использоваться для измерения равновесной орбиты пучка.

Литература

1. Дементьев Е.Н. и др. Измерение равновесной орбиты в электрон-позитронном накопителе ВЭПП-4. — Труды VI Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Тула; Я, 1979, т.1, с.322.
2. Зиневич Н.И., Мишнев С.И., Темных А.Б., Шубин Е.И. Автоматизированные системы измерения частот бетатронных колебаний на накопителях ВЭПП-3, ВЭПП-4. — Препринт ИЯФ 84-66.- Новосибирск, 1984.
3. Батраков А.М. и др. Диагностика впускаемого и циркулирующего пучков с помощью пикап-электродов в накопителе ВЭПП-4. — Труды VII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна; ОИЯИ, 1981, т.2, с.136.