

УДК 53.087.4, 53.088.3, 621.386, 681.5.07

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПУЧКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

М. Г. Федотов^{1,2}, А. Н. Алешаев¹, С. И. Мишнев¹,
А. Ф. Ровенских^{1,2}, А. Н. Селиванов¹, П. А. Селиванов¹

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

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: mihailru@mail.ru

Разработаны и испытаны основные узлы новой системы стабилизации положения пучков синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3. Эта система обеспечит измерение положения и стабилизацию пучка не только по вертикальным, но и по горизонтальным углу и координате. При этом она также сможет применяться параллельно ранее разработанной системе стабилизации, фиксирующей только вертикальные составляющие.

Ключевые слова: синхротронное излучение, рентгеновское излучение, стабилизация, система сбора данных.

Введение. При проведении экспериментов на пучках синхротронного излучения (СИ) жёсткие требования предъявляются к стабильности пространственного и углового положений пучка, изменяющихся, например, из-за прогрева элементов ускорителя.

Поскольку пучок СИ источника накопителя ВЭПП-3, созданного в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН [1, 2], имеет малую вертикальную расходимость ($\sim 10^{-4}$ рад) при большой горизонтальной (~ 1 рад), разработанная более полутора десятков лет назад и эксплуатируемая до настоящего времени система стабилизации [3, 4] обеспечивает стабилизацию пучка по углу и координате только в вертикальной плоскости. Этого достаточно для большинства выполняемых экспериментов, но практика показала, что при проведении наиболее точных измерений необходима и горизонтальная стабилизация.

Целью предлагаемой работы является создание системы, стабилизирующей положение пучка СИ сразу в обеих плоскостях. Кроме того, новая система должна работать параллельно существующей, что обеспечит их взаимный контроль и гарантирует сохранение вертикальной стабилизации при отказе одной из этих систем.

Источник синхротронного излучения ускорителя-накопителя ВЭПП-3 — трёхполюсный вигглер (шифтер) с полем главного полюса 2 Т, чему соответствует критическая энергия излучения 5,3 кэВ при энергии электронного пучка в режиме СИ 2 ГэВ. Ток электронного пучка накопителя при этом приблизительно 150 мА (два банча).

Из создаваемого вигглером горизонтального веера синхротронного излучения поглотителем-формирователем (специальной маской с вертикальными щелями) вырезается набор пучков. Далее эти пучки по вакуумированным каналам поступают на экспериментальные станции (находящиеся в 10–20 м от источника за биозащитой ускорителя).

Детектор системы стабилизации размещён в 15 м от источника на отдельном канале, особенностью которого является выведение сразу двух пучков СИ как от вигглера, так и из поворотного магнита. Поскольку между этими источниками находится магнитная линза, переводящая координатное смещение пучка электронов в угловое, то поддержание постоянства координат обоих пучков СИ на детекторе обеспечивает постоянство траектории электронов в источнике и таким образом стабилизирует пространственное и угловое положения всех пучков СИ.

Действующая система стабилизации. В детекторе действующей системы (рис. 1) пучки СИ (вигглера и поворотного магнита) проходят через индивидуальные фильтры-ослабители (уменьшающие и выравнивающие интенсивности пучков), после чего преобразуются в свет на люминесцентном экране — 45-градусной алюминиевой призме с покрытием $Ga_2S_2O:Tb$. Фильтры-ослабители и экран установлены в вакуумном объеме детектора, отделённом от вакуума канала бериллиевой фольгой.

Поскольку большая часть пучка вигглера детектором не используется, в его вакуумном объеме размещён рентгеновский затвор (на рисунке не показан) на основе поворотного соленоида. При открывании этого затвора оставшаяся часть пучка выводится наружу через заднее бериллиевое окно и дополнительный внешний затвор и может быть использована в эксперименте.

Оптическое излучение люминесцентного экрана выводится через окно из радиационно-стойкого стекла на объектив, создающий изображения пучков на двух линейных фотоприёмниках (приборах с зарядовой связью (ПЗС) типа ILX554 фирмы "Sony", содержащих по 2000 ячеек высотой 56 мкм с шагом размещения 14 мкм).

Для уменьшения фона рассеянного излучения внутри вакуумного объема использованы покрытия из специально разработанной краски на основе суспензии PbS, а между оптическим окном и объективом помещена пластина свинцового стекла.

Электроника детектора размещена в одном крейте КАМАК и работает под управлением 24-разрядной микроЭВМ. Вся электроника, включая микроЭВМ, а также её программное обеспечение (в том числе операционная система) разработаны в ИЯФ СО РАН.

При включении системы стабилизации микроЭВМ вычисляет координаты центров тяжести регистрируемых линейными ПЗС изображений обоих пучков и передаёт усреднённые по 10 измерениям результаты в управляющую ЭВМ ускорительного комплекса. Там измеренные положения пучков сравниваются с заданными и при наличии расхождения вычисляются и вводятся поправки в корректор магнитной системы ВЭПП-3, уменьшающие ошибку. За несколько повторений данной процедуры (длительность одного цикла

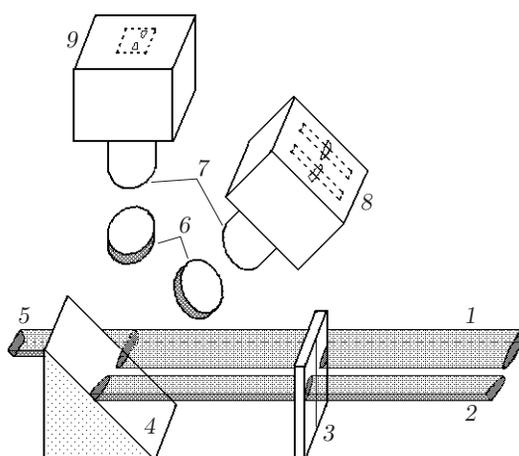


Рис. 1. Условная схема детектора системы стабилизации: 1 — пучок СИ вигглера, 2 — пучок поворотного магнита, 3 — рентгеновские фильтры-ослабители, 4 — сцинтилляционный экран (алюминиевая призма с покрытием $Gd_2S_2O:Tb$), 5 — неиспользуемая часть пучка вигглера, 6 — оптические окна вакуумного объема с накладками из свинцового стекла, 7 — объективы, 8 — камера с двумя линейными ПЗС (старая система стабилизации), 9 — выносная головка камеры с матричным ПЗС (новая система стабилизации)

около 5 с) пучки приводятся к необходимому положению. Измеренные среднеквадратичные ошибки по вертикальной координате пучка вигглера в зоне детектора составляют ~ 6 мкм, по углу — меньше 1 мкрад.

Новая система стабилизации. В новой системе стабилизации используется разработанная ранее в ИЯФ СО РАН цифровая телевизионная камера с интерфейсом 100-baseT Ethernet [5], блок-схема которой приведена на рис. 2.

Чувствительный элемент камеры — чёрно-белый матричный ПЗС с прогрессивной развёрткой и строчно-кадровой организацией ICX424AL (фирма "Sony"), содержащий 494 строки по 659 элементов размером $7,4 \times 7,4$ мкм. Уровень собственного шума элемента около 30 носителей, заряд насыщения около 40000 носителей, квантовая эффективность (в максимуме чувствительности) ~ 55 %. Для увеличения чувствительности в данных ПЗС применена технология микролинз.

Алгоритмы управления ПЗС, а также протокол канала Ethernet нижнего уровня реализованы в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) EP1K30TC фирмы "Altera". Конфигурация ПЛИС загружается из микросхемы EPROM микропроцессором. Причём содержимое EPROM может быть изменено или проверено с помощью компьютера через порт RS-232 без демонтажа камеры (непосредственно на установке).

Для синхронизации с исследуемыми процессами камера имеет оптически развязанные входные и выходные линии (вход «Внешний старт» и выход «Сигнал синхронизации»).

Время накопления изображения может устанавливаться в пределах от 100 мкс примерно до 10 с (неохлаждаемый ПЗС); время считывания кадра 80 мс и определяется пропускной способностью канала 100-baseT Ethernet. Причём передача данных в ЭВМ может осуществляться как в реальном времени (сразу по появлении кода на выходе АЦП), так и с хранением оцифрованного изображения в ЗУ камеры.

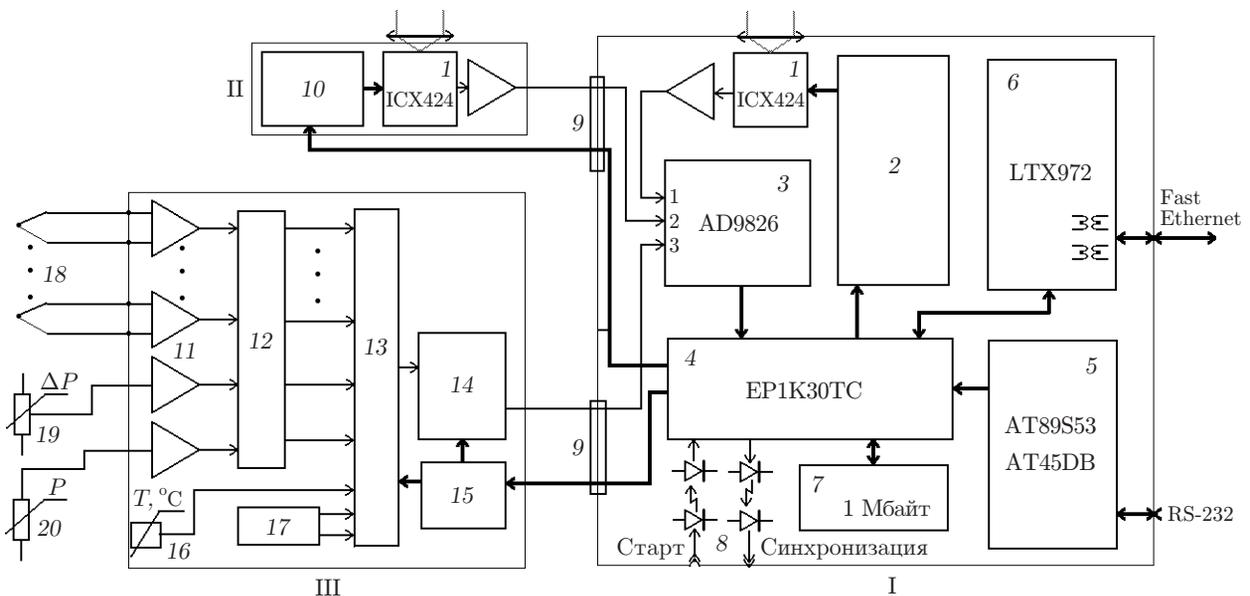


Рис. 2. Блок-схема системы регистрации: I — ПЗС-камера; II — выносная головка; III — блок сбора данных. Обозначения: 1 — ПЗС, 2 — ключи-формирователи, стабилизаторы и DC-DC-конвертер, 3 — АЦП, 4 — ПЛИС, 5 — схема загрузки, 6 — приёмопередатчик Ethernet, 7 — ЗУ, 8 — внешняя синхронизация, 9 — разъёмы, 10 — ключи-формирователи, 11 — предусилители, 12 — пассивные фильтры, 13 — коммутатор, 14 — модулятор, 15 — контроллер, 16 — термодатчик, 17 — опорные источники, 18 — термопары, 19 — дифференциальный манометр, 20 — вакуумметр

В качестве АЦП применена микросхема AD9826 (фирмы "Analog Devices") — 16-битный трёхканальный аналоговый сигнальный процессор для линейных ПЗС высококачественных цветных сканеров. Микросхема обеспечивает в каждом канале двойную коррелированную выборку выходного сигнала ПЗС, а также управление смещением и коэффициентом усиления.

Наличие трёх входов микросхемы AD9826 позволяет использовать с камерой до трёх ПЗС: один штатный (размещённый в камере) и два в выносных головках.

В новой системе стабилизации регистрация пучков осуществляется одной из выносных головок, размещённой над люминесцентным экраном за верхним оптическим окном вакуумного объёма (см. рис. 1). Изображение переносится с уменьшением в 10 раз объективом с фокусным расстоянием 20 мм и относительным отверстием 1/2; между объективом и оптическим окном находится пластина свинцового стекла, предотвращающая воздействие радиации на объектив и ПЗС.

Собственный ПЗС камеры в новой системе стабилизации не используется, а вместо второй чувствительной головки подключается 12-канальный блок сбора данных.

Вычисление координат пучков. В ранее разработанной системе за вертикальную координату Z пучка принимается вычисленное положение центра тяжести вертикального сечения его изображения. Аналогичный алгоритм используется для определения этой координаты и в новой системе:

$$Z = \left(\sum_i z_i N_i A_i \right) / \left(\sum_i N_i A_i \right), \quad (1)$$

где N_i — регистрируемый заряд (число носителей) i -й ячейки ПЗС; z_i — вертикальная координата этой ячейки; A_i — функция окна, единичная на большей части изображения и плавно спадающая до нуля на его краях (обеспечивает подавление шумового вклада ячеек с малым сигналом). Суммирование проводится по вертикальной полосе из изображения соответствующего пучка.

В случае если среднеквадратичный шумовой заряд i -й ячейки δN_i , а корреляция шумов ячеек отсутствует, то дисперсия определения центра тяжести

$$\sigma_Z^2 = \left(\sum_i (A_i \delta N_i)^2 (z_i - Z)^2 \right) / \left(\sum_i A_i N_i \right)^2. \quad (2)$$

В качестве критерия горизонтального положения принимаются координаты Y краёв тени от поглотителя-формирователя пучков синхротронного излучения. Эти координаты вычисляются как центр тяжести пространственной производной одномерного горизонтального распределения интенсивности.

Центр тяжести производной одномерного изображения, состоящего из $p+1$ элементов с шагом размещения Δ , может быть определён как

$$Y = \left(\sum_{i=0}^{p-1} y_i (N_{i+1} - N_i) \right) / \left(\sum_{i=0}^{p-1} (N_{i+1} - N_i) \right) = y_0 + \frac{\Delta}{N_p - N_0} \left(p N_p - \sum_{i=1}^p N_i \right). \quad (3)$$

В этом случае для некоррелированных шумов ячеек дисперсия определения центра тяжести производной

$$\sigma_Y^2 = \left(\frac{\Delta}{N_p - N_0} \right)^2 \left[\left(\frac{Y}{\Delta} + \frac{p}{2} \right)^2 (\delta N_0)^2 + \left(\frac{Y}{\Delta} - \frac{p}{2} \right)^2 (\delta N_p)^2 + \sum_{i=1}^{p-1} (\delta N_i)^2 \right]. \quad (4)$$

Выполненные на пучке тесты новой системы стабилизации показали, что полная ширина на половине высоты вертикальных распределений интенсивности регистрируемых изображений составляет 50–55 ячеек ПЗС; горизонтальный размер изображений (по уровню 0,1) 190–200 ячеек.

Для используемого в камере ПЗС шум элемента оптического изображения выражается как $(\delta N_i)^2 = n^2 + N_i$ — сумма шума считывания n ($n \approx 30$ –40 носителей) и квантового шума. В рассматриваемом случае это приближение может быть применено из-за низкой эффективности сбора света объективом.

Обусловленная шумом изображения среднеквадратичная ошибка определения вертикального положения оценивается по (2) в $\sigma_Z \approx 0,007\Delta$ (при 100 %-ном заполнении ячеек в максимуме изображения и суммировании по вертикальной полосе в 50 ячеек). Это соответствует ошибке определения вертикального положения пучка СИ около 0,5 мкм.

Среднеквадратичная ошибка определения горизонтальной координаты, полученная из (4) с учётом усреднения по полосе шириной в 50 ячеек при 100 %-ном заполнении центральных ячеек, $\sigma_Y \approx 0,1\Delta$. Это соответствует ошибке определения горизонтального положения пучка СИ около 7 мкм. Считается, что такие ошибки в определении положения пучков являются допустимыми. Однако, поскольку за время одного цикла коррекции (5 с) камера позволяет зарегистрировать до 60 изображений, точность за счёт усреднения может быть увеличена ещё примерно в 7 раз.

К сожалению, точности измерения, следующие из (2) и (4), для разрабатываемой системы являются предельными и могут быть реализованы только в отсутствие других источников ошибок. В частности, к увеличению ошибки приводит «быстрое дрожание» электронного пучка, вызываемое пульсациями токов магнитных систем. В разрабатываемой системе стабилизации подавление влияния пульсаций с частотой силовой сети 50 Гц и на кратных частотах обеспечивается соответствующей синхронизацией камеры. При наличии пульсации, не связанной с силовой сетью, её влияние может быть ослаблено как установкой кратного периода этой пульсации времени интегрирования изображения, так и просто усреднением по большему набору изображений.

Блок сбора данных. Влияние на положение пучков СИ в зоне экспериментальных станций могут оказывать такие факторы, как температура и давление. В частности, при работе системы стабилизации наблюдается изменение температуры элементов её детектора (приблизительно до 10 °С на корпусе вакуумного объёма). Оно связано с изменением мощности пучка СИ из-за изменения тока электронного пучка накопителя и может приводить к смещению стабилизируемого положения. Кроме того, при проведении мониторинга на опорах станции EXAFS отмечены колебания температуры до 4 °С, что предположительно вызвано периодичностью в работе кондиционеров. Такие колебания могут приводить к смещению вертикального положения станций со стальными опорами до 45 мкм. Поэтому для системы стабилизации был разработан 12-канальный блок сбора данных.

Блок подключается к цифровой камере вместо второй чувствительной головки и позволяет контролировать как температуру элементов системы стабилизации и наиболее критичных экспериментальных станций, так и давление (атмосферное и в вакуумном объёме).

Структурная схема блока сбора данных приведена на рис. 2 и включает 12 сменных предварительных усилителей (установленных на разъёмах) с подключёнными к их выходам пассивными фильтрами, внутренний датчик температуры, источники опорного напряжения, 16-канальный коммутатор, модулятор, схему управления.

В основном варианте в блок устанавливается 10 предварительных усилителей для работы с термодарами, один — для подключения дифференциального манометра и ещё

один — для вакуумметра. С блоком стандартно используются термопары хромель—копель, температура опорных спаев которых контролируется внутренним датчиком блока.

Усилители построены на базе микромощных инструментальных усилителей INA118 фирмы "Texas Instruments", дополненных входными цепями защиты и подавления ВЧ-помех. К выходам усилителей подключены пассивные RC -фильтры (двойные Т-образные и интегрирующие), обеспечивающие ослабление помехи 50 Гц и её гармоник.

При проведении измерений камера переводится в режим работы со второй выносной головкой. С начала кадра коммутатор блока переключает с частотой строк камеры источник сигнала: предварительные усилители, внутренний термодатчик, два опорных уровня и реперный сигнал.

Далее модулятор приводит сигналы к виду, аналогичному выходному сигналу ПЗС. Высокая точность преобразования поддерживается за счёт использования в модуляторе быстродействующих ключей FSA66 фирмы "Fairchild".

Модулированный сигнал по кабелю передаётся в камеру и поступает на вход АЦП (AD9826), узел двойной коррелированной выборки которого восстанавливает постоянную составляющую и обеспечивает подавление межземельных помех. Затем информация с выхода АЦП передаётся в ЭВМ системы стабилизации в формате, полностью аналогичном кадру изображения. Соответственно в ЭВМ формируется двумерный массив данных, строки которого представляют многократно повторяющиеся измерения сигналов опрашиваемых источников.

Точность измерения и подавление помех улучшается как за счёт пассивных фильтров и алгоритма двойной коррелированной выборки, так и последующей обработкой данных в ЭВМ с учётом значений опорных сигналов и с усреднением по выборке из массива. При использовании термопар абсолютная точность измерения температур составляет $\pm 0,5$ °С с разрешением не хуже 0,1 °С; улучшение точности возможно при применении прецизионных полупроводниковых термодатчиков либо платиновых терморезисторов.

Поскольку изменение давления в холле размещения экспериментальных станций (вызываемое изменением состояния атмосферы или работой вентиляционных установок), в принципе, может приводить к смещению пучка вследствие деформации вакуумного корпуса системы стабилизации, к блоку сбора данных подключён дифференциальный датчик давления для регистрации разности давлений снаружи и внутри вакуумного объёма системы.

Из-за возможности нарушения работы детектора системы стабилизации под действием агрессивных веществ, образующихся при радиационном преобразовании воздуха (озон, окислы азота, азотная кислота), в вакуумном объёме детектора размещены геттеры и поддерживается давление 10–100 Па (форвакуум). Для его контроля используется подключённый к блоку сбора данных тепловой вакуумметр на основе манометрического преобразователя ПМТ-6-3 с тонкой платиновой нитью.

При работе вакуумметра обратная связь поддерживает состояние баланса резистивного моста, в плечо которого включён преобразователь, тем самым стабилизируя сопротивление и температуру последнего. В стандартном включении выходным сигналом такого преобразователя является напряжение на нити, зависящее от рассеиваемой мощности и соответственно от давления окружающего газа. Однако при этом поддержание постоянства температуры нити вызывает нестабильность показаний, обусловленную нестабильностью температуры среды (приводящую к изменению теплового потока). В разработанном устройстве для уменьшения этого эффекта введена термокомпенсация, а в качестве выходного сигнала преобразователя используется его ток.

Заключение. Все узлы новой системы к настоящему времени изготовлены и их работа проверена на станции стабилизации.

В частности, с применением детектора новой системы получены двумерные профили пучков СИ вигглера и поворотного магнита. Определено, что уровням сигнала, необходимым для высокого качества стабилизации, соответствуют времена интегрирования 80–240 мс (при работе совместно со старой системой). В то же время чувствительность камеры оказалась достаточной для получения изображений приемлемого качества при временах интегрирования вплоть до 1 мс, что в перспективе позволит наблюдать в стробоскопическом режиме низкочастотные (10–300 Гц) колебания пучка.

Основным препятствием к введению новой системы стабилизации в эксплуатацию является незавершённость необходимого программного обеспечения, связанная, прежде всего, со сложностью работы с ПЗС-камерой в режиме реального времени.

Предполагается, что запуск новой системы будет производиться поэтапно по мере наращивания функций программ. На первом этапе новая система будет использоваться только для контроля качества работы старой системы стабилизации; на следующем этапе новая система будет опробована в контуре стабилизации горизонтального положения пучков.

При успешном завершении этих этапов новая система может быть задействована как основная. Это позволит начать замену электроники и программного обеспечения старой системы для существенного увеличения её быстродействия (до 500 измерений в секунду) в целях динамической стабилизации пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chernov V. A., Kondratev V. I., Korchuganov V. N. et al.** Synchrotron radiation and free electron laser activities at SSRC // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 1998. **405**, N 2–3. P. 179–190.
2. **Алешаев А. Н., Анашин В. В., Анчугов О. В. и др.** Ускорительный комплекс ВЭПП-4. Новосибирск, 2011. 136 с. (Препр. /ИЯФ СО РАН; 2011-20).
3. **Aleshaev S. A., Fedotov M. G., Gavrilov N. G. et al.** Stabilization system of synchrotron radiation beams at the VEPP-3 storage ring // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2001. **470**, N 1–2. P. 94–100.
4. **Станция** стабилизации положения пучка СИ // Центр коллективного пользования «Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцового Излучения». URL: <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/stations/passport/7/> (дата обращения: 7.10.2014).
5. **Fedotov M. G., Selivanov A. N., Pischenuk S. M.** Progressive-scan digital television camera for the particle beam monitoring // Proc. of the Intern. Conf. RuPAC-2006. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/r06/PAPERS/MODP03.PDF> (дата обращения: 7.10.2014).

Поступила в редакцию 7 октября 2014 г.