

В. В. Орешонок, Д. П. Суханов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Ак. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: vladimir.oreshonok@gmail.com;
D.P.Sukhanov@inp.nsk.su

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5

Форинжектор является источником интенсивных электронных и позитронных пучков с энергией 510 МэВ и предназначен для обеспечения работы экспериментальных установок, входящих в состав ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-5. В целях поддержания максимальной энергии ускоряемых частиц необходим прецизионный мониторинг и манипулирование параметрами высокочастотных сигналов на входах умножителей мощности, ускоряющих секций и других устройств форинжектора. Для выполнения поставленных задач создается система амплитудно-фазовых измерений и управления фазой. В работе приведены структура, параметры и результаты исследований системы, а также архитектура устройств, разрабатываемых в рамках ее усовершенствования.

Ключевые слова: диагностика ВЧ-сигналов; ускорители электронов; амплитудно-фазовый детектор; управляемый фазовращатель.

Основу форинжектора составляют два линейных ускорителя на 300 и 510 МэВ, конверсионная система, СВЧ-система и ВЧ-фотопушка (рис. 1). Линейные ускорители состоят из набора ускоряющих модулей. Основными элементами модуля являются: клистрон 5045 производства лаборатории SLAC (США), устройства, обеспечивающие его работу, а также система умножения мощности и 3–4 ускоряющие секции на бегущей волне (рис. 2).

С выхода блока задающего генератора ВЧ-сигнал с частотой 1 428 МГц поступает в каналы возбуждения клистронов. Через управляемый аттенюатор мощность подается на вход блока управления фазой. В задачу данного устройства входит манипуляция фазой ВЧ-сигналов, что необходимо для работы системы умножения мощности, и управление фазой ВЧ-мощности на выходе клистронов. От быстродействия фазовращателей и точности установления фазы зависит энергия пучка, набранная в ускорительной секции. Удвоение частоты сигнала до рабочей частоты форинжектора (2 856 МГц), формирование импульса длиной 5 нс и повышение уровня мощности до необходимых

для возбуждения клистронов значений происходит в блоке ВЧ-усилителя. С выхода каждого клистронов высокочастотные импульсы поступают на вход систем умножения мощности типа SLED. Данная система позволяет увеличить импульсную мощность и получить требуемые темпы ускорения за счет накопления энергии в ВЧ-резонаторах с последующим ее переизлучением при перевороте фазы подводимого сигнала на 180° [1]. Контроль амплитуды и фазы ВЧ-мощности на входе ускоряющих секций обеспечивает система амплитудно-фазовых измерений. Кроме этого, для проверки работы блока управления фазой в тестовых целях на входе клистронов через направленный ответвитель установлен дополнительный амплитудно-фазовый детектор (АФД). Информация об амплитуде и разности фаз между опорным сигналом и каналом ускоряющей мощности в цифровом виде поступает в компьютер для последующей обработки и визуализации.

Важным параметром работы форинжектора ВЭПП-5 является требование на допустимый энергетический разброс пучка от импульса к импульсу на выходе секции в 1%. Это ограничение определяет точность, с которой необ-

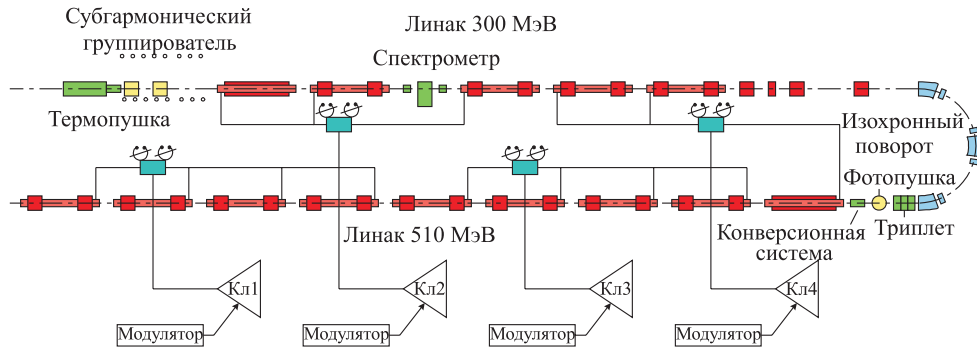


Рис. 1. Общий вид форинжектора

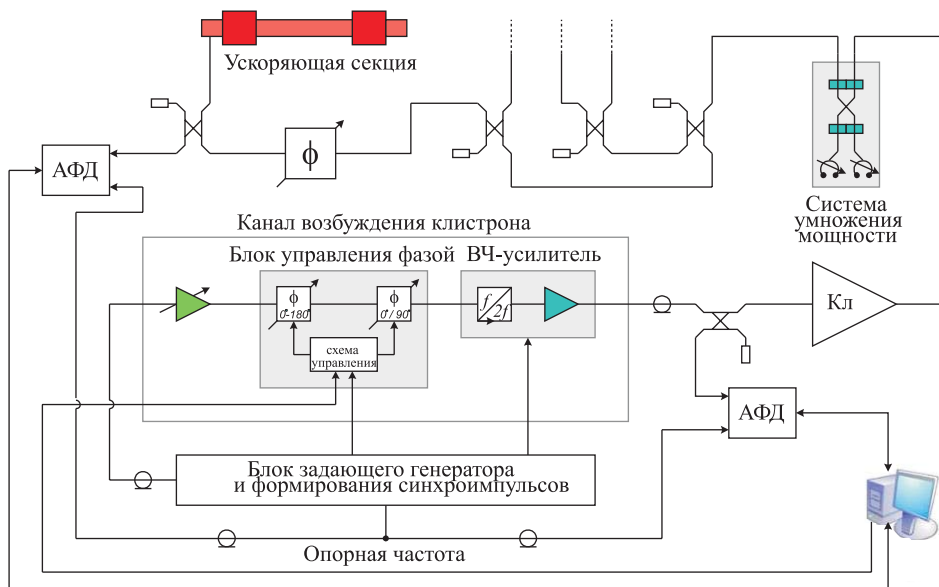


Рис. 2. Структура ускоряющего модуля

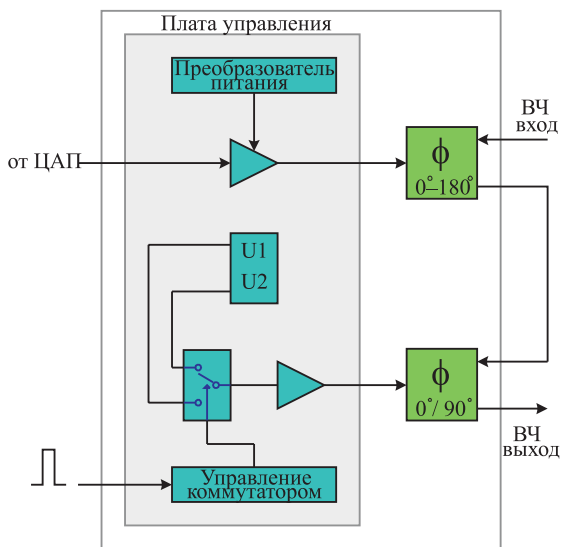


Рис. 3. Блок-схема одного канала блока управления фазой

ходимо контролировать параметры ВЧ-мощности, поступающей на ускоряющие секции. В одночастичном одноволновом приближении энергия, набираемая частицей в ускоряющей секции, описывается соотношением

$$\varepsilon = e \cdot E_0 \cdot \int_0^L \cos\left(\left(\frac{\omega}{c} \cdot \frac{1}{\beta_e} - \beta\right) \cdot z + \varphi_0\right) dz,$$

где $\beta_e = \frac{v_e}{c}$ – относительная скорость частицы; φ_0 – начальная фаза влета частицы в секцию; L – длина ускоряющей секции. Используя это выражение для фазовой протяженности сгустка $2\varphi \approx 20^\circ$ и равенства фазовой скорости гармоники и скорости частиц, можно оценить необходимую точность системы амплитудно-фазового контроля форинжектора ВЭПП-5 в 1% для амплитуды и 1° для фазы. Полоса измерительного тракта сис-

темы 50 МГц, что позволяет определять параметры ВЧ-сигналов с фронтами 10–20 нс.

Система управления фазой ВЧ-мощности в каналах возбуждения клистронов работает на частоте 1 428 МГц и представляет собой набор двухканальных устройств, выполненных в модуле 2М стандарта КАМАК. Каждый канал (рис. 3) обеспечивает работу одного клистрона и включает в себя:

- двухпозиционный фазовращатель 0/90°, осуществляющий переворот фазы ВЧ-сигнала, необходимый для работы системы умножения мощности;
- регулируемый аналоговым сигналом в диапазоне 0–180° фазовращатель, участвующий в фазовой подстройке ВЧ-мощности для питания ускоряющих секций форинжектора;
- плату управления фазовращателями.

Фазовращатели выполнены по микрополосковой технологии и состоят из трехдцатилетнего квадратурного моста, нагруженного симметрично на два варикапных модуля, подключенных к плате управления через высокочастотную развязку. Затухание, вносимое фазовращателями в рабочем режиме, составляет 0,6±0,8 дБ. Регулируемый фазовращатель управляется напряжением от цифро-аналогового преобразователя с последующим усилением. Схема управления ступенчатым фазовращателем с приходом внешнего синхроимпульса формирует двухуровневый сигнал управления с фронтом менее 20 нс. Аналоговое управление регулирующими фазовращателями системы производится одним 16-канальным блоком ЦАП 16 × 16 с разрядностью 16 бит, что позволяет с необходимой точностью подстраивать фазу ВЧ.

Система амплитудно-фазовых измерений (рис. 4.) предназначена для прецизионного контроля амплитуды и относительной фазы ВЧ-мощности на частоте 2 856 МГц – основной рабочей частоте форинжектора. В состав системы, также выполненной в конструктиве КАМАК, входят:

- двухканальный блок амплитудно-фазового детектора со схемой управления;
- 16-канальный 16-разрядный ЦАП 16 × 16 с временем установления 32 мс;
- двухканальный 8-разрядный АЦП с частотой дискретизации 100 МГц на канал;
- двухканальный коммутатор 4 в 1 с полосой пропускания 300 МГц;
- делитель мощности и детектор опорной ВЧ-мощности.

Измеряемый сигнал поступает на сигнальный вход АФД, где разделяется на амплитудный и фазовый каналы. С выхода амплитудного детектора (АД) информация об амплитуде ВЧ-мощности поступает на коммутатор и далее в АЦП. В фазовом канале измеряемый сигнал смешивается с сигналом опорной частоты. Регулируемый фазовращатель на входе канала предназначен для повышения точности фазовых измерений и расширения диапазона измеряемых фаз. Выходной сигнал фазового детектора (ФД) со-

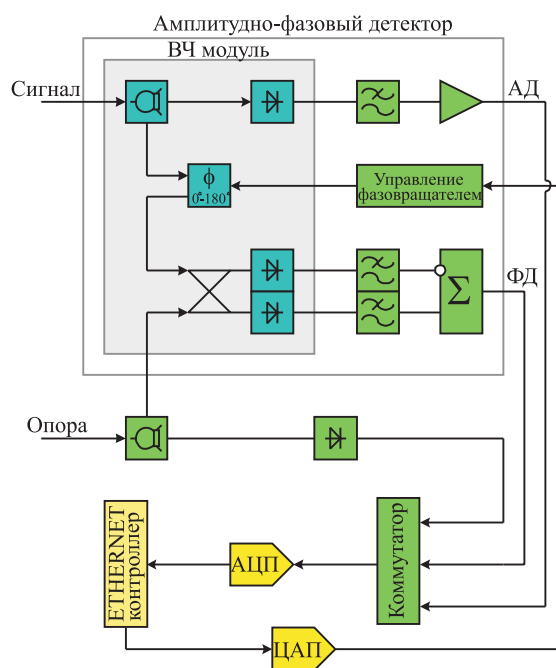


Рис. 4. Блок-схема системы амплитудно-фазовых измерений с одним АФД

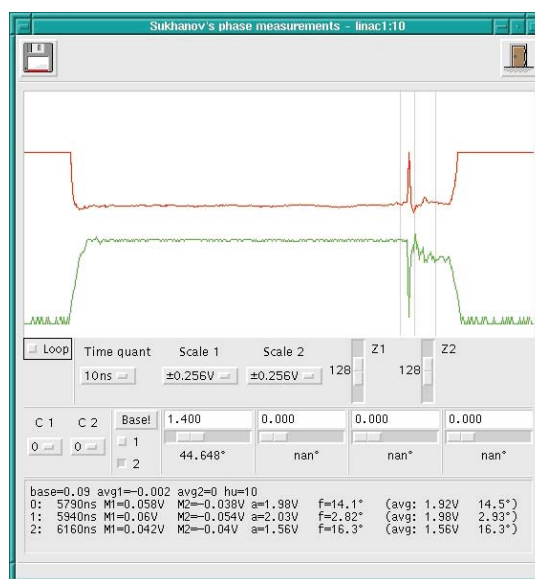


Рис. 5. Амплитуда и фаза ВЧ-мощности на входе клистронов

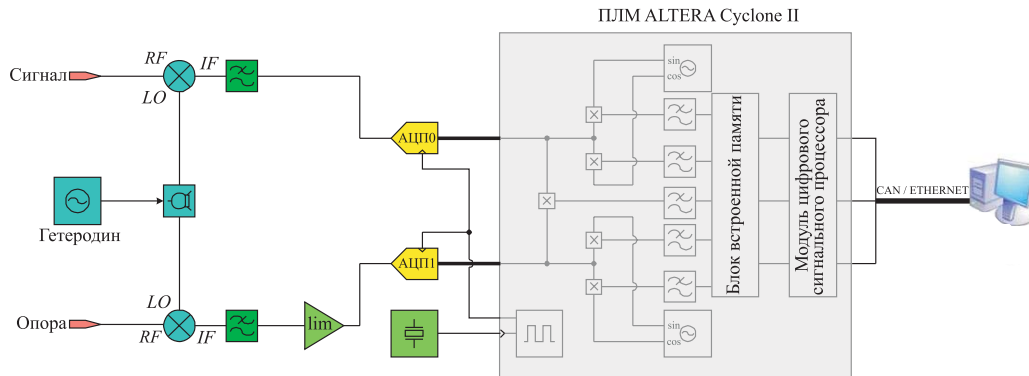


Рис. 6. Блок-схема цифрового АФД

держит информацию о разности фаз между линией опорной частоты и измеряемым ВЧ-импульсом. Для контроля опорной амплитуды используется дополнительный амплитудный детектор. Измеренные данные после оцифровки поступают в персональный компьютер для обработки и визуализации. Передача цифровой информации на комплексе осуществляется посредством протокола Ethernet. Пример визуализации параметров ВЧ-мощности в канале возбуждения одного из клистронов представлен на рис. 5.

В настоящее время система контроля амплитуды и фазы высокочастотных сигналов находится на этапе запуска. С введением в строй все большего числа ускоряющих секций форинжектора возникает потребность в использовании дополнительных узлов системы. На сегодняшний день в полном объеме введена в эксплуатацию система управления фазой – с помощью двух блоков обеспечивается работа четырех клистронов комплекса. Кроме этого успешно прошли испытания амплитудно-фазового детектора: с его помощью проводился мониторинг параметров ВЧ в каналах возбуждения клистронов. Было, однако, выяснено, что в условиях повышающихся требований к точности измерений, настройка и калибровка детектора представляет собой достаточно трудоемкую процедуру. С учетом большого количества таких устройств, необходимых для работы форинжектора, запуск системы амплитудно-фазовых измерений в целом сопряжен с определенными сложностями.

В связи с этим, в рамках усовершенствования системы было решено приступить к разработке новой модели амплитудно-фазового детектора, основным преимуществом которого стала бы гибкость в работе и высокая точность при незначительных затратах

на калибровку. Активное развитие методик обработки данных позволяет реализовать механизм амплитудных и фазовых вычислений на основе цифровых программируемых устройств. Блок-схема амплитудно-фазового детектора с цифровой обработкой данных на базе программируемой логической матрицы (ПЛМ) приведена на рис. 6.

Используемая ПЛМ семейства Cyclone II фирмы «Altera» способна обрабатывать информацию с частотой до 250 МГц и имеет в своем составе 18-разрядные умножители, блоки встроенной памяти, а также ядро цифрового сигнального процессора для реализации сложных алгоритмов [2]. Таким образом, ВЧ-сигналы после аналоговых преобразований с целью понижения частоты, оцифровываются и поступают в ПЛМ, а затем в персональный компьютер для вычислений и визуализации.

На данный момент, разрабатываемый детектор прошел этап моделирования, задачей которого была оценка точности проводимых вычислений. По результатам моделирования выявлен ряд проблем и намечены пути их решения. В дальнейшем планируется сборка и тестирование первых опытных образцов данной модели детектора, а также рассматриваются возможности усовершенствования системы управления фазой.

Список литературы

1. Авилон М. С., Акимов А. В., Антошин А. В. и др. Инжекционный комплекс ВЭПП-5, состояние работ // Тр. XIX российской ускорительной конференции RuPAC 2004. Дубна, 2005. С. 45–47.
2. Cyclone II device handbook. San Jose: Altera Corporation, 2007. 460 p.