

СИНХРОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ И ПУЧКОВ НА УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ СКИФ

*Е. А. Бехтенов^а, Г. В. Карпов^а, П. Б. Чеблаков^а,
А. В. Герасев^{а,б}, С. Е. Карнаев^{б,1}, Д. А. Липовый^{а,б}*

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

^б Центр коллективного пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

Описывается подход, позволяющий осуществлять непрерывный мониторинг всех устройств установок ускорительно-накопительного комплекса ЦКП «СКИФ» синхронно с измерениями параметров пучка. Мониторинг работы устройств выполняется в распределенных контроллерах с частотой 10 кГц. При выявлении в процессе работы устройства отклонений от заданных параметров, превышающих допуск, контроллер, управляющий этим устройством, выставляет соответствующий сигнал. В случае наблюдения нештатного поведения пучка с целью обнаружения устройства, работа которого послужила причиной такого поведения, выполняется сравнительный анализ синхронных данных, полученных от распределенных контроллеров и от электроники диагностики пучка.

An approach that allows continuous synchronous monitoring of all devices and parameters of the beam on the SRF SKIF accelerator complex is described. The operation of the devices is monitored in distributed controllers with a frequency of 10 kHz. If deviations from preset values exceeding tolerance are detected in the process of device operation, a device controller sets a corresponding signal. In a case of observing an abnormal behavior of the beam in order to detect the device, the operation of which caused this behavior, a comparative analysis of synchronous data obtained from distributed controllers and from the beam diagnostics electronics is performed.

PACS: 07.05.Dz; 07.05.Hd; 07.05.Kf

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительно-накопительный комплекс (УНК) ЦКП «СКИФ» представляет собой источник синхротронного излучения (СИ) поколения 4+. Комплекс состоит из инжекционной части, включающей линейный ускоритель (лиinak) на 200 МэВ, бустерный синхротрон (бустер), ускоряющий частицы от 200 МэВ до 3 ГэВ, и каналы транспортировки пучка из линака в бустер и из бустера в накопитель, а также накопителя на энергию электронов 3 ГэВ, на котором размещаются устройства для генерации СИ.

¹E-mail: s.e.karnaev@inp.nsk.su

Для обеспечения циркуляции пучков частиц с требуемыми параметрами в кольцах бустера и накопителя, ускорения в линаке, а также проводки пучков по каналам транспортировки от одного ускорителя к другому требуется с высокой точностью и стабильностью осуществлять питание элементов магнитной системы: в диапазоне от 1000 ppm (корректоры линака и каналов транспортировки) до нескольких ppm (квадруполи и диполи накопителя).

В случае отклонения обрабатываемых значений токов, питающих магнитные элементы, от задания на некоторую определенную величину не происходит гибели пучка либо недопустимого изменения его параметров. Эта величина, называемая допустимым отклонением (ДО), определяется расчетным образом и уточняется при отладке работы с пучком. Значение ДО используется для мониторинга работы всех источников питания элементов магнитной системы, а также параметров ВЧ-систем.

Мониторинг подразумевает сравнение разницы измеренного и заданного значений с величиной допустимого отклонения. Существуют разные типы устройств магнитной системы: устройства постоянного питания, импульсного питания, с управляемым изменением возбуждающего тока (рэмп). В зависимости от типа устройства мониторинг выполняется либо непрерывно, либо во время присутствия пучка. При выявлении у управляемых элементов существенных отклонений выставляется сигнал и выполняется автоматическое архивирование измеренных значений. Для характеристики величины отклонения параметров устройств используется несколько уровней:

1) отклонение меньше значения ДО, архивирование измеренного значения не требуется;

2) отклонение в пределах нескольких значений ДО, например, трех, при этом ситуация не привела к существенным изменениям параметров пучка и его орбиты (траектории), архивируются измерения, отличающиеся более чем на величину ДО от предыдущего;

3) отклонение в пределах нескольких значений ДО, например, десяти, при этом произошли существенные изменения параметров пучка, и работу устройства требуется корректировать, измеренное значение архивируется, как в случае 2);

4) отклонение за пределами десяти значений ДО, работа с пучком невозможна, измеренное значение архивируется, как в случае 2).

Измерение параметров всех устройств выполняется синхронно с частотой 10 кГц, что достаточно для того, чтобы выявлять все возможные неисправности в отработке источников питания, включая как отклонения от задания, так и пульсации выходного тока. Одновременно синхронно с частотой 10 кГц выполняются измерения параметров пучков в накопителе и бустере: тока циркулирующего пучка и замкнутой орбиты. В линаке и каналах транспортировки параметры пучков измеряются, соответственно, в момент их пролета, но эти измерения также привязаны к синхронным измерениям параметров устройств. Сравнение измерений параметров устройств и пучков позволяет выявлять устройства, неправильная работа которых является причиной неправильного поведения пучков.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для синхронизации работы всех установок и устройств, входящих в состав УНК, установлен цикл инъекции продолжительностью 1 с, который привязан к задающей

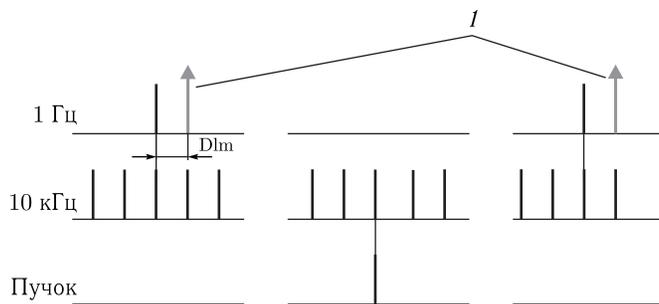


Рис. 1. Диаграмма следования импульсов для синхронизации измерений. 1 — момент передачи измеренных данных в систему управления

частоте ускоряющих ВЧ-систем 357 МГц, в течение которого выполняется сценарий инжекции пучка в накопитель: работа пушки, ускорение в линаке и перепуск в бустер, ускорение в бустере и перепуск в накопитель. Для взаимной синхронизации устройств используются частоты 10 кГц и 1 Гц, получаемые целночисленным делением задающей частоты ВЧ. Частота 1 Гц используется для старта цикла инжекции, частота 10 кГц — для синхронизации измерений. Импульсы 1 Гц и 10 кГц распространяются на контроллеры всех устройств комплекса, требующие синхронизации отработки или измерений. Система синхронизации УНК СКИФ описана в [1]. Диаграмма следования импульсов синхронизации показана на рис. 1.

Импульсы 1 Гц в контроллерах устройств задают начало отсчета массива (вэйвформы), в который складываются измерения, выполняемые по приходу импульсов 10 кГц. Частота следования и взаимная синхронизация импульсов 1 Гц, 10 кГц и привязка к ним появления пучка задаются системой синхронизации [1].

Контроллеры источников питания магнитной системы [2, 3] обрабатывают измерения и выполняют мониторинг параметров источников питания. По приходу импульса 1 Гц готовые результаты в виде вэйвформ измерений размером 10 000 значений передаются в систему управления (событие 1 на рис. 1), где обрабатываются программой, выполняющей анализ данных, полученных от контроллеров источников питания и от электроники диагностики пучка. В связи с тем, что на УНК СКИФ насчитывается около 2500 контроллеров источников питания, которые подключены к локальной сети Ethernet системы управления, с целью разгрузки сети для каждого контроллера предусмотрена индивидуальная настройка задержки отправки данных в компьютер (Dlm) после прихода импульса 1 Гц.

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ ЛИНАКА, КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА И СИСТЕМ ВПУСКА/ВЫПУСКА

Магнитные системы линака и каналов транспортировки состоят из магнитов, запитываемых постоянным током. Система мониторинга непрерывно отслеживает величину токов и напряжения на выходе источников питания с частотой 10 кГц. Электронный пучок появляется в заданное время синхронно с одним из импульсов 10 кГц, что позволяет получать измерения параметров источников питания точно в момент

пролета пучка. Программа, анализирующая параметры пучка и источников питания магнитной системы, использует эти измерения для выявления причин отклонения траектории пучка в линаке и каналах транспортировки. При сравнении используются значение, заданное в устройстве для отработки, и величина ДО.

Импульсные устройства, обеспечивающие генерацию пучка в пушке линака, питание резонаторов и ускоряющих секций линака, выпуск пучка в бустер и перепуск ускоренного пучка из бустера в накопитель в соответствии со сценарием инжекции раз в секунду запускаются от индивидуальных импульсов запуска, поступающих от системы синхронизации [1]. Устройства работают в течение сравнительно коротких интервалов времени: от 1 нс (формирование сгустка в пушке) до 1 мс (магниты радиальной коррекции для выпуска пучка из бустера). Соответственно, параметры импульсных устройств, влияющие на параметры пучка, не могут быть измерены с помощью методики использования тактовых импульсов 10 кГц. Параметры этих устройств измеряются более быстрыми АЦП осциллографического или интегрирующего типа и также используются при анализе поведения пучка. При этом использование измерений, выполняемых с частотой 10 кГц, позволяет отслеживать процесс работы импульсных устройств в течение всего секундного цикла инжекции: контролировать процесс зарядки конденсаторных батарей и формирующих линий, напряжение накалов тиратронов и т. п.

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ БУСТЕРА

Магнитная система бустера включает три семейства дипольных магнитов, имеющих квадрупольную компоненту поля, и три семейства квадрупольей. В каждом семействе магниты включены последовательно. Кроме основных магнитов в состав магнитной системы входят 16 секступольных и 36 дипольных корректирующих магнитов. Корректирующие магниты запитаны от индивидуальных источников питания. Источники питания бустера работают в режиме так называемого рэмпа, когда ток возбуждения магнитов сравнительно быстро (за доли секунды) плавно изменяется по заранее заданной зависимости от времени. Бустер непрерывно работает в циклическом режиме, задаваемом импульсами 1 Гц, и ускоряет электроны от энергии 200 МэВ до 3 ГэВ за время порядка 400 мс. Диаграмма работы основных и корректирующих дипольей бустера показана на рис. 2.

Во время ускорения для обеспечения циркуляции в кольце бустера частиц, у которых с каждым оборотом возрастает энергия, синхронно изменяются токи, питающие элементы магнитной системы и напряжение на ВЧ-резонаторах. Отрабатываемая зависимость заранее, до начала выполнения цикла инжекции, записывается в контроллеры в виде эйвформ, содержащих 10 000 значений, которые во время выполнения цикла синхронно задаются во все устройства с частотой 10 кГц. Процесс мониторинга параметров источников питания выполняется в течение всего цикла.

В разные моменты выполнения процесса ускорения к точности отработки источников питания предъявляются разные требования. Например, во время равномерного возрастания энергии частиц для источников питания основных дипольей допускается отклонение 1000 ppm, а в конце ускорения, во время подготовки к выпуску, значение ДО составляет всего 100 ppm. При этом из-за большой индуктивности магнитов на разных скоростях изменения тока источник питания не может обеспечивать одинаково-

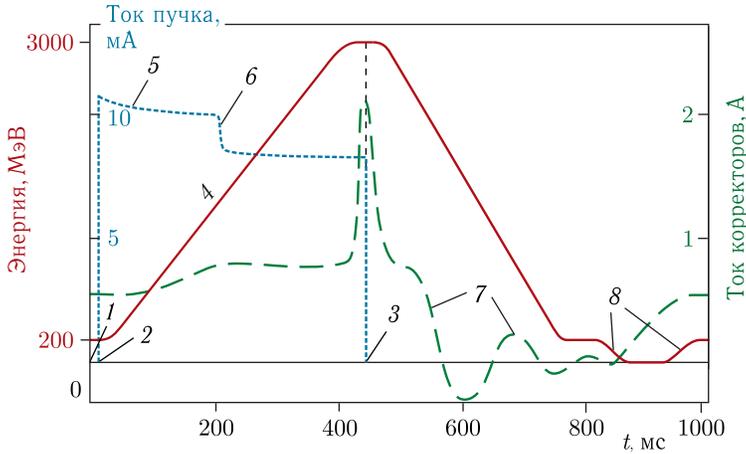


Рис. 2. Диаграмма отработки элементов бустера во время цикла инжекции: 1 — старт цикла инжекции; 2 — впуск пучка в бустер; 3 — выпуск ускоренного пучка; 4 — ускорение; 5 — график тока пучка; 6 — частичная потеря тока пучка; 7 — размагничивание магнитов-корректоров; 8 — перемагничивание основных магнитов

вое отклонение значения выходного тока от задания. Поэтому для мониторинга параметров источников питания бустера используются вэйвформы значений ДО размером 10 000 точек, соответствующие вэйвформам заданий на отработку и учитывающие фазу цикла инжекции.

В случае бустера программа, определяющая причины нештатного поведения пучка, получает данные о параметрах пучка в виде вэйвформ со значениями, синхронизированными с отработкой цикла инжекции и также измеренными с частотой 10 кГц. Эти данные поступают от АЦП, измеряющего сигнал с DCST, и от блоков электроники пикапов, измеряющих поперечное положение орбиты пучка. При этом вэйвформы содержат данные, измеренные, соответственно, только во время существования пучка в бустере. Если, например, в процессе произошли потери тока пучка (см. рис. 2), то программа среди элементов, показавших отклонения в своей работе, ищет причину, вызвавшую эти потери.

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ

Магнитная структура накопителя состоит из 16 одинаковых секторов, в каждом из которых установлено по 16 квадрупольных и секступольных линз, а также размещается более 100 корректирующих магнитов и катушек. Все перечисленные элементы запитаны от индивидуальных источников питания, поэтому вопрос организации непрерывного мониторинга правильности работы источников питания и анализ влияния их работы на параметры пучка имеет важнейшее значение. Дипольные магниты накопителя разбиты на три семейства, в каждом из которых магниты включены последовательно и запитаны от своего источника питания.

В случае изменения параметров магнитной системы и медленных коррекций орбиты пучка управление источниками питания магнитной системы накопителя и ВЧ-систем выполняется с помощью вэйвформ, начало отработки которых в контрол-

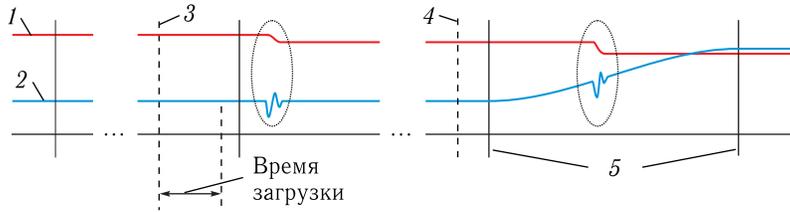


Рис. 3. Графики тока источника питания и тока пучка накопителя: 1 — график тока пучка; 2 — график тока магнита; 3 — момент загрузки вэйвформы 10000 с уставками для перехода в новое значение; 4 — разрешение на обработку; 5 — импульсы 1 Гц

лерах задается приходом очередного импульса 1 Гц. Этим обеспечивается синхронная обработка всех элементов, а также синхронизация мониторинга значений выходных параметров источников питания. Пример обработки источником питания вэйвформы за 1 с приведен на рис.3. Предварительно выполняется загрузка вэйвформы в контроллер и проверка, что вэйвформа может быть обработана. Затем управляющая программа выдает разрешение, и по приходу импульса 1 Гц обработка начинает выполняться с частотой задания 10 кГц. Для обработки длительных (более 1 с) процессов в контроллерах предусмотрен пропуск тактовых импульсов 10 кГц, т.е. процесс обработки вэйвформы из 10000 значений может быть практически неограниченно растянут по времени.

Вэйвформы с измерениями, сделанными за один секундный цикл, во всех контроллерах обрабатываются непрерывно, и в программу, анализирующую поведение пучка, каждую секунду передаются те вэйвформы, в которых были зафиксированы недопустимые отклонения от задания. Такой механизм позволяет обнаружить даже короткое по времени отклонение и сопоставить его с поведением пучка в этом цикле.

На рис.3 показана ситуация, когда случайно возникшая пульсация выходного тока в источнике питания привела к частичной потере тока пучка. В этой ситуации вэйвформа с измерениями выходного тока попадет в программу, где будет сравниваться с измерениями тока пучка, сделанными в том же цикле, и в случае совпадения моментов потери пучка и нештатной работы устройства причина потери тока будет идентифицирована.

Кроме основного способа управления источниками питания с помощью вэйвформ и задания стационарных уставок предусмотрено еще два способа для быстрого управления [2]: запись в контроллер источника питания добавки к уставке выходного тока по сети Ethernet и запись в контроллер добавки через порт RS-485, подключенный к системе быстрой обратной связи для коррекции орбиты пучка. Обработка добавок в обоих случаях происходит немедленно. Эти добавки учитываются при мониторинге обработки заданного значения, и при анализе влияния работы источника питания на поведение пучка рассматривается отклонение измеренного значения от суммарного задания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан способ непрерывного мониторинга, позволяющий выявлять недопустимые отклонения в работе многочисленных устройств УНК СКИФ, архивировать отклонившиеся значения и отслеживать влияние отклонений на поведение пучка. Способ

был предложен и опробован на бустерном синхротроне источника СИ NSLS-II [4, 5]. На СКИФ методика, описанная в данной статье, будет применена для всех установок УНК, что обеспечит полный непрерывный контроль работы всех устройств и предотвратит возможность автоматически выявлять причины нештатного поведения пучка.

Распределенная схема получения и обработки измерений, основывающаяся на использовании контроллера, оснащенного производительным процессором, в который интегрировано ядро программного обеспечения системы управления, открывает широкие возможности по on-line обработке в контроллере данных с целью повышения качества управления.

Контроллер, реализующий данную методику [2, 3], полностью разработан: изготовлены и откалиброваны модули, написано встроенное программное обеспечение. В настоящее время выполняется тестирование системы на стенде линейного ускорителя в ИЯФ СО РАН. Программное обеспечение для анализа поведения пучка находится в стадии разработки, и для каждой установки будет отлаживаться в процессе ее запуска.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проекты FWUR-2022-0001 и FWUR-2023-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герасев А. В., Карнаев С. Е., Карпов Г. В., Липовый Д. А., Чеблаков П. Б.* Система синхронизации ускорительно-накопительного комплекса СКИФ // Тр. 28-й Рос. конф. по ускорителям частиц «RuPAC'23», Новосибирск, Россия, 11–15 сент. 2023 г.
2. *Герасев А. В., Карнаев С. Е., Липовый Д. А., Чеблаков П. Б., Торопов Г. Э.* Встраиваемый контроллер для управления устройствами ускорительно-накопительного комплекса СКИФ // Там же.
3. *Герасев А. В., Карнаев С. Е., Липовый Д. А., Чеблаков П. Б.* Встраиваемый цифровой интерфейс для контроллеров, применяющихся для управления устройствами ускорительно-накопительного комплекса СКИФ // Там же.
4. *Derbenev A., Cheblakov P., Kadyrov R., Karnaeov S., Srednyakov S., Simonov E.* Monitoring and Archiving of NSLS-II Booster Synchrotron Parameters // Proc. of ICALEPCS'13, San-Francisco, USA, Oct. 2013. P. 587–590.
5. *Дербенев А. А., Карнаев С. Е., Симонов Е. А., Чеблаков П. Б.* Методика мониторинга параметров бустера для источника синхротронного излучения NSLS-II // Автометрия. 2015. Т. 51, № 1. С. 106–114.

Получено 15 сентября 2023 г.