



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2012–9

ОУ У-70

Г.М. Антоничев, Л.А. Ким, В.А. Коковин,
В.В. Комаров, В.В. Кузнецов

**Новая система синхронизации быстрого вывода пучка
из протонного синхротрона У-70 ИФВЭ**

Направлено в *«Приборы и системы.
Управление, контроль, диагностика»*

Протвино 2012

Аннотация

Антоничев Г.М. и др. Новая система синхронизации быстрого вывода пучка из протонного синхротрона У-70 ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2012–9. – Протвино, 2012. – 23 с., 9 рис., 3 табл., библиогр.: 10.

В работе обосновывается разработка новой системы синхронизации быстрого вывода (СБВ) с циклом ускорителя и ВЧ-структурой пучка. Предложен и реализован принцип конвейерной отработки заданий в цикле, позволивший создать компактную аппаратуру с расширенными возможностями. Представлена реализация функциональных модулей в виде набора цифровых автоматов с конечным числом внутренних состояний. Сформулировано условие синхронизации поля ударного магнита с ВЧ-структурой пучка. Кратко изложен алгоритм программного обеспечения, в частности обработки исходных данных. Приведены основные результаты работы и дана сравнительная характеристика старой и новой систем СБВ.

Abstract

Antonichev G.M. et al. The New Synchronization System for the Beam Fast Ejection from the IHEP U-70 Proton Synchrotron: IHEP Preprint 2012–9. – Protvino, 2012. – p. 23, figs. 9, tables 3, refs.: 10.

The paper grounds on the development of the new system providing the fast ejection synchronization with the accelerator cycle and the beam RF structure. The principle of conveyor execution of tasks during the cycle is proposed and realized. That allowed creating the compact apparatus with extended possibilities. The functional modules realization is presented as a set of the digital automatic devices with the finite number of the inner states. The condition of the kicker magnet field synchronization with the beam RF structure has been formulated. The software algorithm, in particular, the initial data processing is briefly described. The main results of the work are shown. The comparative characteristics of the old and new fast ejection synchronization system are given.

Введение

Протонный синхротрон У-70 является окончательной ступенью ускорительного комплекса Института Физики Высоких Энергий (ИФВЭ). В состав комплекса входят два линейных ускорителя ЛУ-30 и И-100 (инжекторы), быстроциклический синхротрон (бустер) У-1.5 и протонный синхротрон У-70 на энергию 70 ГэВ.

Созданная в рамках сотрудничества между ИФВЭ и ЦЕРН (Европейский Центр Ядерных Исследований) система быстрого вывода ускоренного пучка из протонного синхротрона У-70 [1] использовалась в программе физических экспериментов ИФВЭ, начиная с 1972 года. Первоначально основное оборудование быстрого вывода включало в себя 10-модульный ударный магнит и подвижный отклоняющий магнит с гидроприводом, а также канал транспортировки пучка «А». В дальнейшем система быстрого вывода была дополнена и модернизирована. Система могла выводить дозированное количество сгустков протонов до 3 раз за цикл в диапазоне энергий (30÷70) ГэВ. Быстрый вывод осуществлялся как на участке ускорения при заданных уровнях поля (энергии протонов), так и на участке циркуляции протонного пучка.

Аппаратура синхронизации быстрого вывода (СБВ) является одним из важнейших компонентов системы, обеспечивая «привязку» процессов в физических установках с необходимой точностью к заданным моментам ускорительного цикла и к высоко-

частотной структуре протонного пучка. От качества работы СБВ зависит, в частности, эффективность быстрого вывода сгруппированного пучка из ускорителя, которая теоретически может достигать 100%.

Прежняя аппаратура СБВ обладала рядом существенных недостатков. Так, оказалось проблематичным обеспечить одновременно точность «привязки» момента вывода к заданному уровню поля (энергии пучка) на участке ускорения, и точность интервалов опережения таймерных импульсов относительно момента вывода. Использование комбинированной 2В + Т серии для синхронизации быстрого вывода с циклом ускорителя явилось паллиативом и обеспечило лишь компромиссное решение задачи по точности. Кроме того, каждый выстрел (срабатывание) быстрого вывода обслуживался отдельной стойкой с аппаратурой, что затрудняло расширение системы СБВ. Наконец, управлять синхронизацией быстрого вывода можно было только вручную с местного пульта управления. При этом на главном пульте ускорителя не было никаких средств контроля, что усложняло работу оперативного персонала.

Цели модернизации СБВ

Выявленные в процессе эксплуатации недостатки в системе синхронизации быстрого вывода, участвовавшие отказы аппаратуры во время сеансов ускорителя и потребность в новых возможностях системы СБВ определили цели ее модернизации:

Во-первых, заменить морально и физически устаревшее оборудование новым, разработанным на основе современных технологий.

Во-вторых, обеспечить дистанционное оперативное управление системой СБВ с любого рабочего места, интегрировав СБВ в систему управления У-70 (СУ У-70) [2, 3].

В-третьих, максимально расширить функциональные возможности СБВ, в частности:

- Обеспечить предельно возможное число срабатываний быстрого вывода за цикл ускорителя (до 6).
- Повысить точность синхронизации быстрого вывода на участке ускорения за счет автоматической привязки момента вывода, заданного уровнем поля, к шкале времени в цикле ускорителя.

- Увеличить число направлений быстрого вывода в каналы транспортировки пучка протонов.
- Расширить набор опережающих и задержанных импульсов для каждого канала транспортировки выведенного пучка.
- Дополнить систему синхронизации быстрого вывода достаточным набором диагностических средств для быстрого поиска и устранения причин сбоев в работе СБВ.

Структура и компоненты СБВ

На рис. 1 показана структурная схема новой системы СБВ, которая включает в себя следующие компоненты:

КО СБВ – контроллер оборудования СБВ, интегрированный в СУ У-70 и выполняющий задания по синхронизации БВ в реальном масштабе времени.

АДОС – аппаратура дополнительной обработки сигналов, которая распределяет, блокирует и усиливает таймерные импульсы, обеспечивая необходимые для оборудования БВ параметры сигналов и, тем самым, облегчая переход от старой к новой системе синхронизации быстрого вывода.

КПК СУ – стандартный компьютер переднего края СУ У-70, управляющий обменом данными с верхним уровнем системы управления по сети Ethernet и с КО СБВ по магистрали MIL1553В.

ГТС СВ – один из трех генераторов таймерных сообщений общей таймерной системы (ОТС) [4], расположенный на пульте систем вывода (СВ) и снабжающий КО СБВ кодированной таймерной информацией по локальной магистрали ЛМ ОТС.

СБ и ДБ – внешние сигналы статической и динамической блокировки с каналов транспортировки пучка, разрешающие или запрещающие быстрый вывод в зависимости от состояния каналов и радиационной обстановки в экспериментальной зоне.

В-серия, Тв- и ВЧ-сигнал – внешние сигналы с Главного Пульта Управления для привязки к энергии и к ВЧ-структуре пучка.

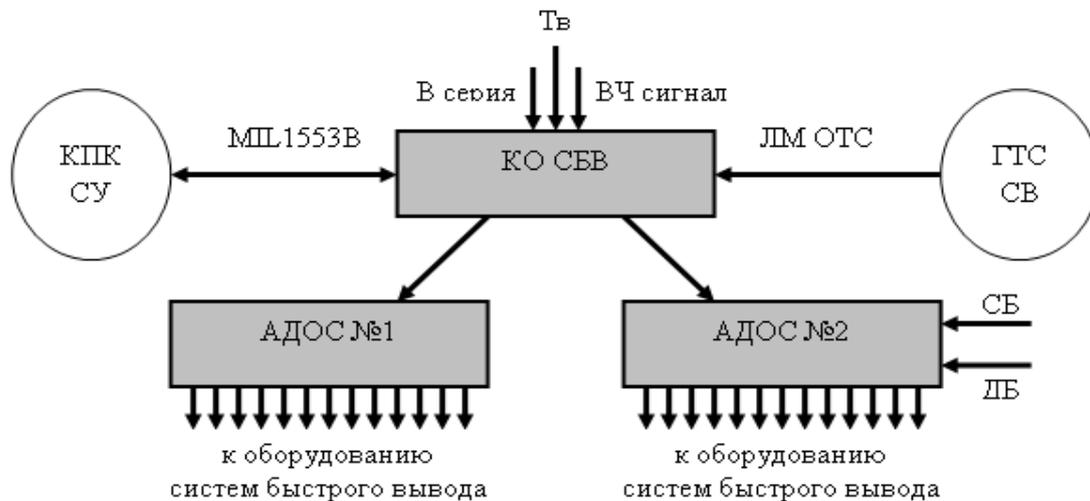


Рис. 1. Упрощенная структурная схема СБВ.

Эпюра магнитного цикла и наборы сигналов, которые связаны с циклом ускорителя и используются, в частности, в системе СБВ, показаны на рис. 2.

- Стол №1 – участок накопления и циркуляции ($dB/dt = 0$) протонных сгустков, инжектируемых в У-70.
- Участок ускорения ($dB/dt > 0$) протонных сгустков за счет энергии ВЧ-поля. На этом участке может производиться быстрый вывод протонных сгустков в диапазоне проектных значений энергии.
- Стол №2 – участок циркуляции ($dB/dt = 0$) протонного пучка. На этом участке может производиться быстрый вывод протонных сгустков и медленный вывод разгруппированного пучка.
- Пауза – спад магнитного поля до уровня стола №1.

Наборы импульсов и сигналов занимают определенное положение на временной шкале цикла и выполняют следующие функции на ускорителе:

- ВЧ-сигнал – синусоидальное напряжение высокой частоты с задающего генератора ускоряющей системы У-70. Включается сигнал в начале цикла и выключается на столе №2 перед медленным выводом разгруппированного пучка.

- Импульсы Тв – до 29 импульсов, которые запускают процесс инжекции протонных сгустков в У-70 на столе №1. Генерируются каждые 3 периода частоты сети 50 Гц (примерно через 60 мс).
- В-серия – последовательность В-импульсов, каждый из которых генерируется при нарастании магнитного поля на 1 Гс [5]. Формируются В-импульсы на участке ускорения, позволяя отсчитывать уровни магнитного поля с помощью счетчика.
- Импульсы КС1 (конец стола №1), НС2 (начало стола №2), КС2 (конец стола №2) и серия Т-импульсов с частотой 10 кГц поступают в КО СБВ последовательно в виде кодов Манчестер-II по двухпроводной магистрали ЛМ ОТС.

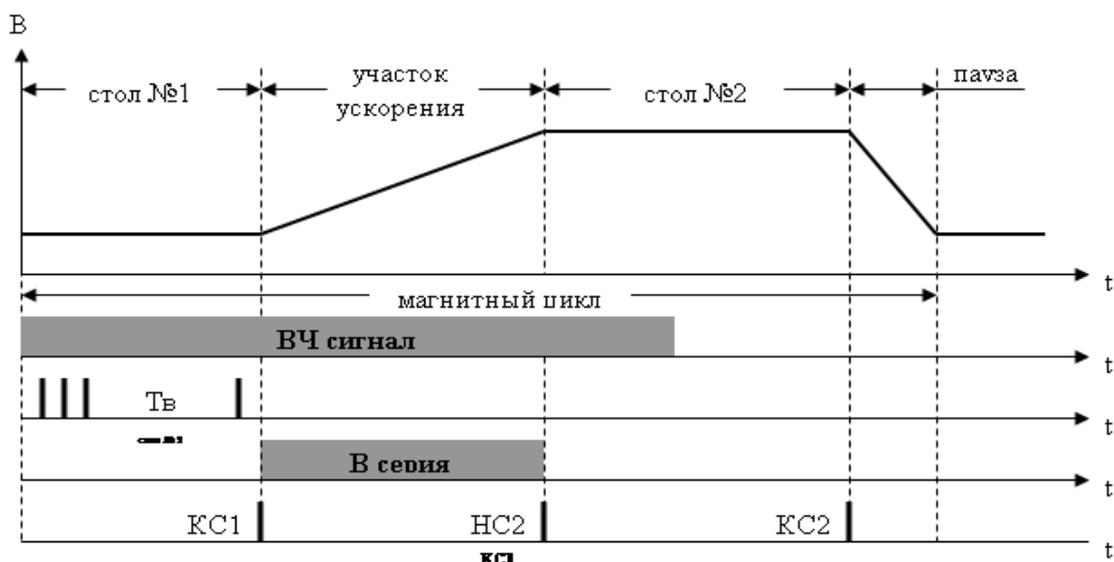


Рис. 2. Цикл ускорителя и технологические сигналы.

Контроллер оборудования СБВ

Состав КО СБВ

Контроллер собирается в каркасе Multibus-I из стандартного набора системных модулей СУ У-70 (каркасный контроллер, одноплатная микроЭВМ и терминал магист-

рали MIL1553), а также из комплекта аппаратуры, в состав которой входят следующие функциональные компоненты:

- модуль В + Т синхронизации (ВТС), обеспечивающий синхронизацию процессов быстрого вывода с циклом ускорителя с дискретностью 0,1 мс;
- модуль ВЧ-синхронизации (ВЧС), обеспечивающий синхронизацию процессов быстрого вывода с ВЧ-структурой пучка с точностью не хуже ± 5 нс;
- модули таймеров (Т16), обеспечивающие таймирование технологических процессов в каналах транспортировки пучка с дискретностью 0,1 мс и 165 нс;
- модуль выходного регистра (Р32), обеспечивающий дистанционное управление цифровыми задержками с дискретностью 2 нс.

В данной статье рассматриваются только специализированные модули ВТС и ВЧС. Модули Т16 и Р32 представляют собой несложные по своей функциональности унифицированные модули в стандарте Multibus-I, которые широко используются в Системе Управления комплексом ускорителей У-70.

Принципы построения КО СБВ

В модернизированной системе СБВ реализован целый ряд новых идей построения аппаратуры синхронизации быстрого вывода, таких как:

1. Конвейерная отработка пакетов заданий при многократном быстром выводе в цикле ускорителя, когда выполнение очередного пакета заданий автоматически завершается его сменой для последующего выстрела.
2. Управление логическими операциями в модулях с помощью синхронных конечных автоматов, которые обеспечивают детерминированную во времени последовательность выполнения функций модулей.
3. Конверсия заданий в уровнях поля (энергии протонов) для выстрелов на участке ускорения в задания моментов вывода на временной шкале цикла ускорителя, что обеспечивает необходимую точность синхронизации технологических процессов, в частности, подготовительных операций по отношению к моменту вывода.
4. Расщепление счетных импульсов на «переключающих» и задержанных «стробирующих», использование которых позволяет исключить влияние метастабильного состояния счетчика на результат компарирования и регистрации его содержания.

5. Управление корреляторами «выстрел-канал» и «канал-выстрел» с помощью стробов направлений быстрого вывода, каждый из которых жестко связан с соответствующим каналом транспортировки выведенного пучка.
6. Унификация печатной платы, на которой монтируются все вновь разработанные модули, что значительно удешевляет изготовление аппаратуры. При этом специфическая функциональность модулей «зашивается» в ПЛИС (например, EP1K50-QC208-3) (рис. 3).

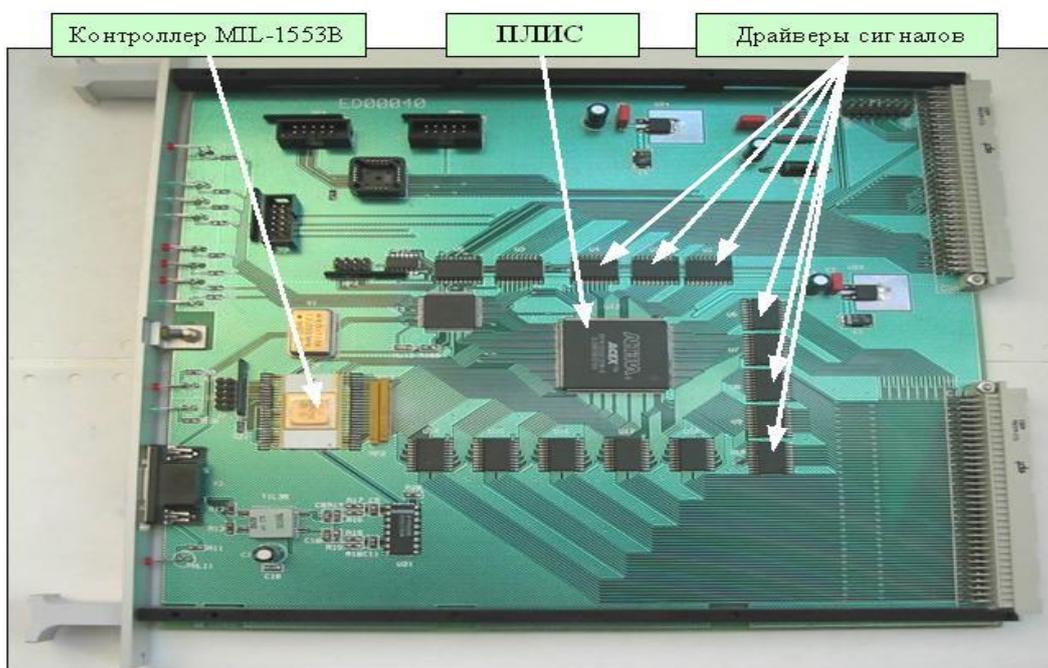


Рис. 3. Вид универсальной печатной платы со стороны компонентов.

Реализация всех перечисленных принципов позволила создать надежную, компактную, энергосберегающую аппаратуру и, в то же время, существенно расширить ее возможности.

Модуль ВТС

Общая блок-схема модуля

На рис. 4 показана упрощенная блок-схема модуля ВТС, составные части которого выполняют следующие функции:

Приемник таймерных сообщений принимает и обрабатывает кодированную информацию, поставляемую общей таймерной системой (ОТС). В результате из кодированных таймерных сообщений (ТС) выделяются реперные импульсы цикла КС1, КС2 и КС2, серия импульсов TS с частотой следования 10 кГц, а также формируются сигналы запроса прерываний (IRQ).

Конвертор «В в Т» представляет собой автоматическое следящее устройство, которое преобразует задание уровня поля в задание момента вывода на единой временной шкале цикла. В результате обеспечивается, во-первых, совпадение момента быстрого вывода с заданной энергией протонного пучка, а, во-вторых, требуемая точность опережения подготовительных операций по отношению к моменту вывода.

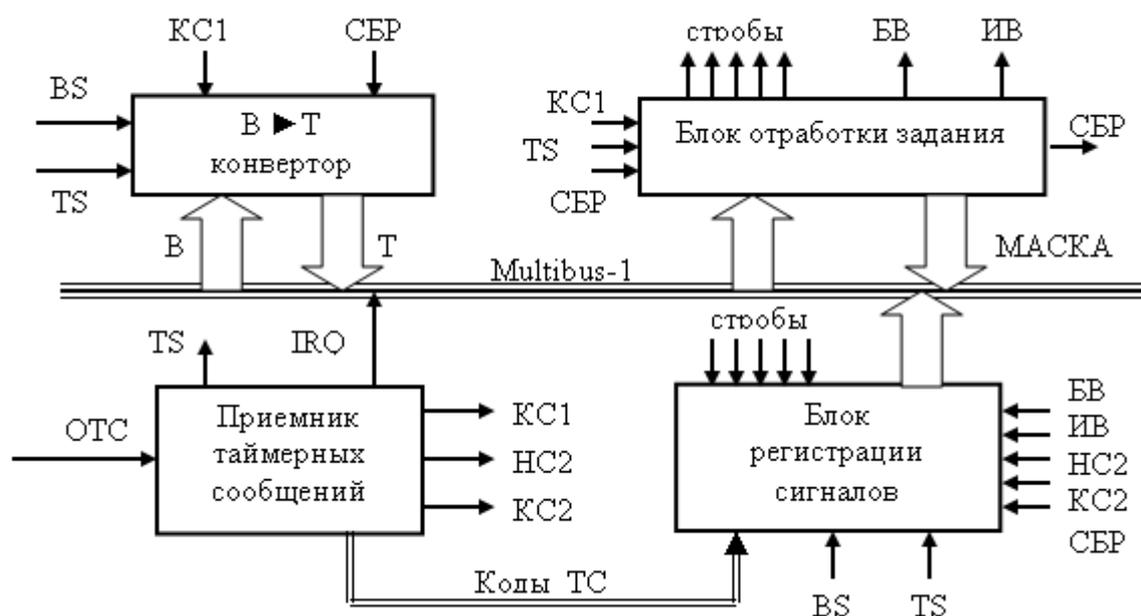


Рис. 4. Упрощенная блок-схема модуля ВТС.

Блок обработки задания последовательно выполняет в цикле ускорителя пакеты заданий для каждого выстрела. В результате генерируются импульсы БВ (быстрый вывод) и ИВ (импульс вывода), а также стробы направлений (служебные сигналы), маска выбора зарядных источников для модулей ударного магнита (УМ), означающая подбор амплитуды магнитного удара, и локальный импульс «сброс» (СБР). Импульс БВ в каждом выстреле инициируют подготовительные технологические процессы,

в частности, старт заряда накопительных линий ударного магнита, а импульс ИВ в каждом выстреле запускает модуль ВЧС, который генерирует импульсы поджига разрядников накопительных линий ударного магнита, Стробы направлений используются для реализации корреляторов «выстрел-канал» и «канал-выстрел».

Блок регистрации сигналов регистрирует во времени коды поступающих таймерных сообщений (ТС), реперные импульсы и стробы направлений вывода, а также измеряет и записывает энергию пучка (уровень поля) в моменты появления реперных импульсов. В результате оператор получает необходимую информацию для диагностики процессов синхронизации быстрого вывода.

Основные функции модуля ВТС исполняют конвертор «В в Т» и блок обработки задания, которые в данной статье рассматриваются более детально.

Функциональная схема конвертора «В в Т»

Конвертор (рис. 5) состоит из собственно конечного автомата (КЛ, ПС, ВЛ) и набора логических устройств (ОЗУ 1 и ОЗУ 2 с общим адресным счетчиком, В-счетчик с компаратором и Т-счетчик).

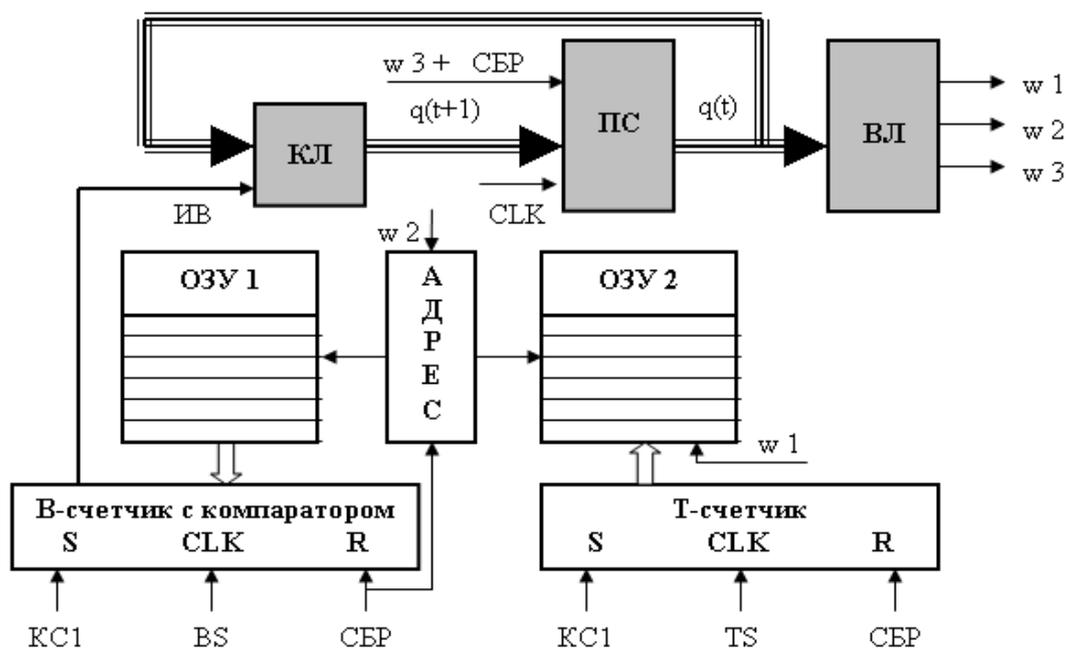


Рис. 5. Функциональная схема блока конвертора «В в Т».

Синхронный конечный автомат можно представить в виде обобщенной модели, построенной на 3-х функциональных элементах [6, 7]:

1. комбинационной логике (КЛ) на входе, которая формирует сигналы возбуждения автомата;
2. памяти внутренних состояний (ПС), фиксируемых в данный момент времени;
3. выходной логике (ВЛ), формирующей набор выходных сигналов.

Конечные автоматы Мура функционируют по законам, которые аналитически можно описать следующими выражениями:

$$q_{t+1} = \varphi(q_t, x_t), \quad w_t = \psi(q_t),$$

где: q_t , x_t – состояние и набор входных сигналов автомата в момент времени t ; φ – функция переходов, которая определяет внутреннее состояние автомата в последующий момент времени $t + 1$; ψ – функция выходов; w_t – набор выходных сигналов. В нашем случае выходные сигналы представляют собой импульсы, управляющие логическими операциями в самих модулях или во внешних устройствах.

Функционирование конвертора инициируется импульсом КС1, который запускает В- и Т-счетчики. Отработав очередное задание, В-счетчик с компаратором выдает импульс ИВ, который возбуждает конечный автомат. Выходная логика (ВЛ) автомата формирует 3 служебных сигнала, которые выполняют следующие операции:

- $w1$ записывает в адресованную ячейку памяти ОЗУ 2 текущее содержание Т-счетчика;
- $w2$ инкрементирует адресный счетчик (подключает очередное задание к В-счетчику);
- $w3$ возвращает конечный автомат в исходное состояние

Функционирование конвертора в течение цикла иллюстрирует таблица 1.

Примечание 1: обязательные условия при формировании заданий на цикл состоят в следующем:

$$1) B1(T1) \neq 0, \quad 2) B_n(T_n) < B_{n+1}(T_{n+1}).$$

Примечание 2: импульсы счетной В-серии (BS) асинхронны по отношению к импульсам счетной Т-серии (TS), поэтому существует вероятность считывания

содержания Т-счетчика, когда он находится в метастабильном состоянии и данные окажутся ложными. Исключение записи ложных данных обеспечило использование в ВТС метода двухфазной синхронизации [8]. В этом случае В- и Т-счетные импульсы синхронизируются с импульсами единой служебной серии (CLK) повышенной частоты 6 МГц, а импульс записи (w1) сдвигается по фазе на полпериода служебной серии и гарантированно минует метастабильную зону Т-счетчика.

Таблица 1.

Адрес (w2)	Данные из ОЗУ 1	Содержимое счетчиков в момент срабатывания компаратора В		Данные в ОЗУ 2 (w1)
		В-счетчик	Т-счетчик	
0	В1	$V_{сч} = В1$	$T_{сч} = Т1$	Т1
1	В2	$V_{сч} = В2$	$T_{сч} = Т2$	Т2
2	0	компаратор не срабатывает	конечный автомат не запускается	0
3	0			0
4	0			0
5	0			0

Функциональная схема блока отработки задания

Блок отработки задания (рис. 6) состоит из собственно конечного автомата (КЛ, ПС, ВЛ), рассмотренного выше, и набора логических устройств (три ОЗУ с пакетами заданий для выстрелов и общим адресным счетчиком, Т-счетчик с компаратором и формирователь стробов и масок). ОЗУ с конечным автоматом реализуют принцип конвейерной отработки заданий.

Функционирование блока отработки задания инициируется импульсом КС1. Выполнив очередное задание из ОЗУ 1, Т-счетчик с компаратором выдает импульс СТАРТ (НСБ – начало строба), который возбуждает конечный автомат, выходная логика которого формирует 4 сигнала со следующими функциями:

- W1 (импульс БВ) генерируется через 0,1 мс после импульса НСБ;
- W2 (импульс ИВ) генерируется через 250 мс после импульса БВ;

- W3 (импульс КСБ – конец строба) завершает формирование строба через 0,9 мс после импульса ИВ;
- W4 инкрементирует адресный счетчик (подключает очередное задание к Т-счетчику) через 2 мкс после импульса КСБ и возвращает конечный автомат в исходное состояние.

Сформированный импульсами НСБ и КСБ строб логически перемножается на сборке из 4 вентилей с позиционным кодом выбранного канала транспортировки выводимого пучка (К) и на соответствующем выходе сборки появляется строб направления. Строб активизирует запуск таймеров выбранного канала, реализуя, таким образом, коррелятор «выстрел – канал». В АДОС данный строб активизирует сигнал блокировки, приходящий от выбранного канала и воздействующий на импульсы СТАРТ (БВ) и ПР данного выстрела. Так реализуется на сборке вентилей коррелятор «канал – выстрел».

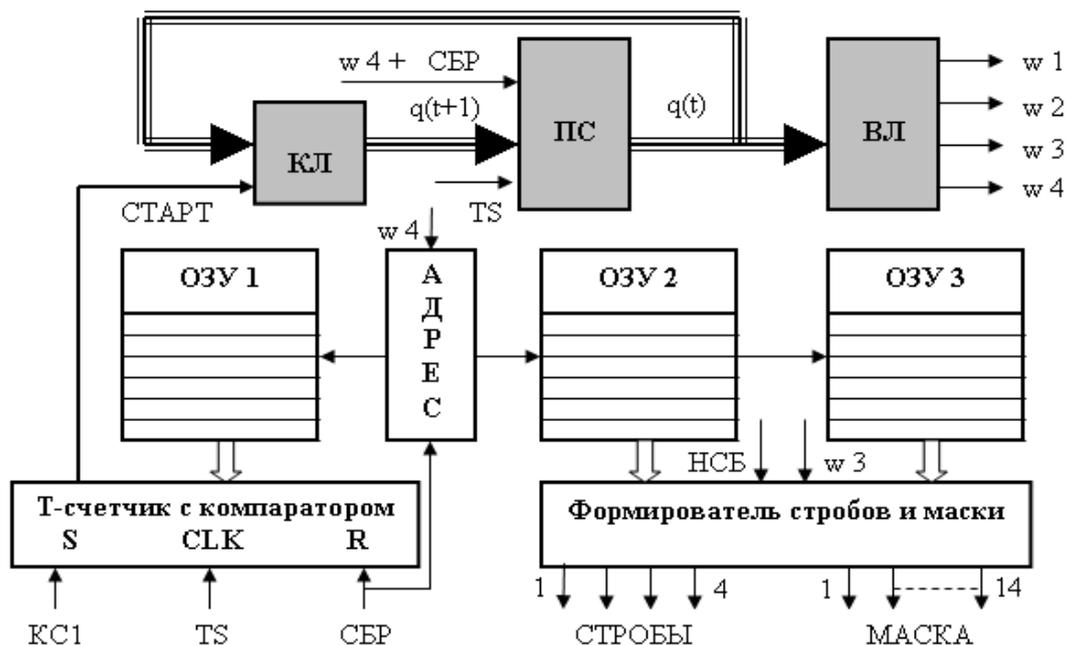


Рис. 6. Функциональная схема блока отработки задания модуля ВТС.

Таблица 2 иллюстрирует функционирование блока в течение цикла, где: М – маска набора модулей ударного магнита, Т – момент формирования импульса ИВ, КА – конечный автомат.

Таблица 2.

адрес (w4)	содержимое памяти			СТАРТ КА (НСБ) мс	выходные импульсы КА (время относительно СТАРТА в мс)			
	ОЗУ1	ОЗУ2	ОЗУ3		w1	w2	w3	w4
0	НСБ1	К1	М1	T1-250,1	+0,1	+250,1	+251	+251,002
1	НСБ2	К2	М2	T2-250,1	+0,1	+250,1	+251	+251,002
2	НСБ3	К3	М3	T3-250,1	+0,1	+250,1	+251	+251,002
3	0	компаратор не срабатывает			конечный автомат не запускается			
4	0							
5	0							

Модуль ВЧС

Общая блок-схема модуля

На рис. 7 показана упрощенная блок-схема модуля ВЧС, составные части которого выполняют следующие функции:

Формирователь ВЧ-серий получает от ВЧ-системы У-70 синусоидальный ВЧ-сигнал и от Бустера импульсы Тв. В результате обработки входных сигналов формируются ВЧ-серия и серия импульсов, синхронных с оборотами пучка, которая получается делением ВЧ-серии на 30 с «привязкой» к первому импульсу Тв.

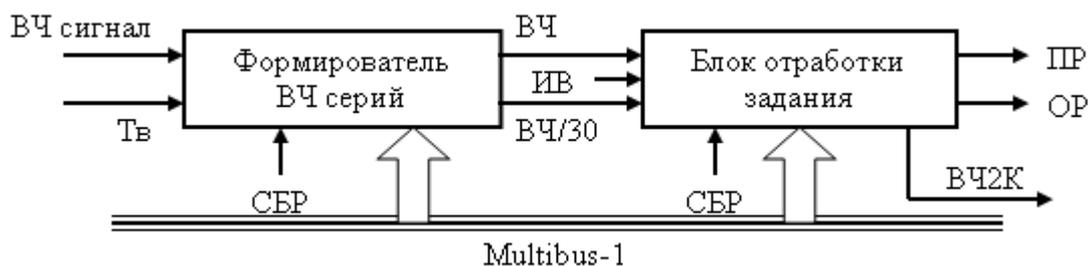


Рис. 7. Упрощенная блок-схема модуля ВЧС.

Блок обработки задания запускается импульсом ИВ и «вырезает» из ВЧ-серии пачку импульсов ВЧ2К (2048 импульсов ВЧ), начало которой синхронно с оборотами пучка (с первым после ИВ импульсом ВЧ/30). Кроме того, блок поочередно выполняет пакеты заданий для каждого «выстрела» в цикле ускорителя. В результате из пачки ВЧ2К выбираются импульсы поджига переднего разрядника (ПР) и обрезающего разрядника (ОР) для формирования импульсного поля УМ.

Более детально в данной работе рассматривается блок обработки задания, выполняющий основные функции модуля ВЧС.

Функциональная схема блока обработки задания

Блок обработки задания (рис. 8) состоит из собственно конечного автомата (КЛ, ПС, ВЛ) и набора логических устройств (два ОЗУ с пакетами заданий для выстрелов и общим адресным счетчиком, логику синхронизации с оборотами пучка (СОП), формирователь пачки импульсов ВЧ2К и ВЧ-счетчик с двумя компараторами)

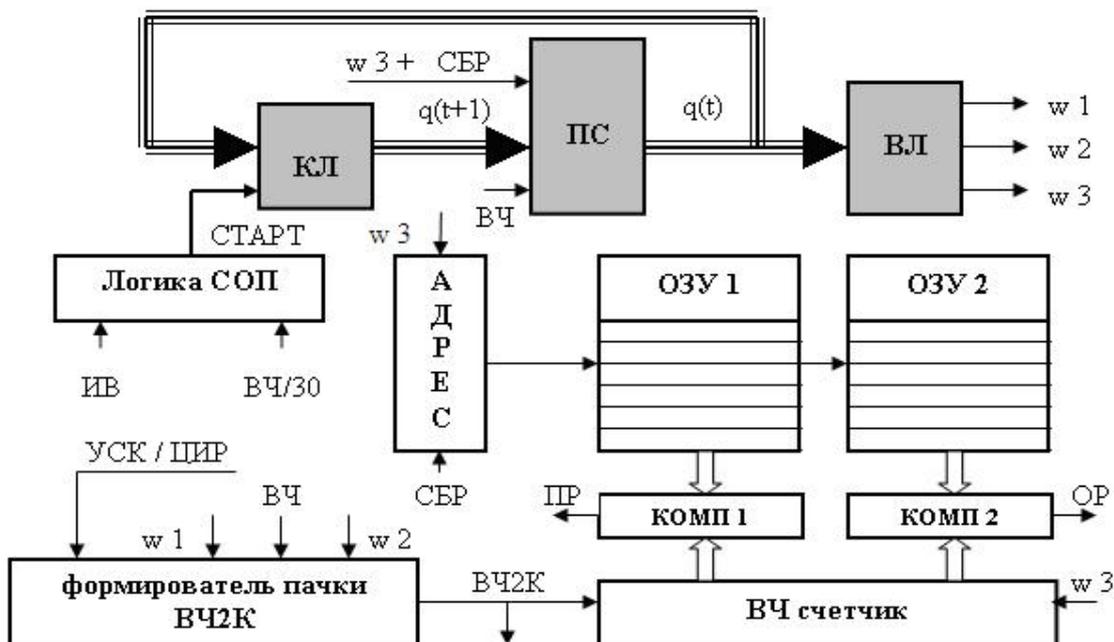


Рис. 8. Функциональная схема блока обработки задания модуля ВЧС.

Функционирование блока отработки задания инициируется импульсом ИВ, который запускает логику СОП и первый после импульса ИВ импульс ВЧ/30 возбуждает конечный автомат. Выходная логика КА формирует 3 служебных сигнала со следующими функциями:

- W1 начинает отсчет 2048 импульсов ВЧ-серии;
- W2 завершает отсчет 2048 импульсов ВЧ-серии;
- W3 инкрементирует адресный счетчик (подключает очередное задание к ВЧ-счетчику) через 0,9 мкс после импульса ИВ, сбрасывает ВЧ-счетчик и возвращает конечный автомат в исходное состояние.

К компараторам ВЧ-счетчика прикладываются уставки для импульсов поджига переднего (ПР) и обрезающего (ОР) разрядников накопительных линий ударного магнита. Сигнал УСК/ЦИР (ускорение или циркуляция) в состоянии ЦИР, задерживая формирование пачки ВЧ2К на ~ 14 нс, компенсирует сдвиг равновесной фазы ускоряющего ВЧ-напряжения, если быстрый вывод осуществляется на столе №2.

Стабильность ВЧ-синхронизации

Процедура ВЧ-синхронизации заключается в согласовании задержки в канале транспортировки ВЧ-сигнала и в канале формирования импульсного поля в зазоре УМ, с одной стороны, и временем пролета выводимых сгустков от ввода в У-70 до зазора УМ, с другой стороны. В результате нарастание и спад поля УМ должны происходить между сгустками протонного пучка. Условие ВЧ-синхронизации можно выразить следующим равенством (балансом задержек):

$$[\Delta L_{orb} + N \cdot L_{orb} - L_{orb} (n + 2^{10}) / 30] / \beta C = T_{каб} + T_{раз} + T_{рег},$$

где:

- ΔL_{orb} – длина участка орбиты от ввода пучка до УМ вывода;
- L_{orb} – полная длина равновесной орбиты;
- N – число оборотов пучка, обеспечивающих «грубый» баланс задержек с дискретностью, равной периоду обращения пучка $T_{обр}$ в кольцевой камере У-70;

- n – число ВЧ-импульсов, определяющее сдвиг начала серии ВЧ2К. Подбором числа « n » в пределах от 0 до 29 обеспечивается баланс задержек с дискретностью, равной периоду ВЧ-сигнала $T_{обр} / 30$;
- 2^{10} – первые 1024 импульса серии ВЧ2К, образующие зону формирования опережающих ВЧ-импульсов («пре» импульсов). Из последующих импульсов формируются импульсы поджига разрядников ПР и ОР (в зоне 1025÷1054), а также формируются задержанные ВЧ-импульсы («пост» импульсы);
- β – отношение скорости обращения пучка в вакуумной камере ускорителя к скорости света (C);
- $T_{каб}$ – время задержки сигнала при транспортировке по кабелям от ускоряющих станций до пульта У-70, от пульта У-70 до пульта СВ, от накопительных линий до модулей УМ;
- $T_{раз}$ – время задержки импульсов в аппаратуре формирования ПР и ОР, в тиратронах схемы поджига разрядников и в самих разрядниках накопительных линий;
- $T_{рег}$ – регулируемая задержка импульсов ПР и ОР в диапазоне 198 нс с дискретностью 2 нс, позволяющая подстраивать баланс задержек с точностью не хуже ± 1 нс.

При практически неизменной длине равновесной орбиты L_{orb} факторами, влияющими на стабильность ВЧ-синхронизации, являются β , $T_{каб}$ и $T_{раз}$. Рассмотрим парциальный вклад каждого из них в общий дисбаланс задержек приведенного равенства.

Период обращения пучка в кольцевой камере У-70, равный $T_{обр} = L_{orb} / \beta C$, зависит от величины β , которая в диапазоне энергий (30÷70) ГэВ монотонно изменяется в каждом цикле ускорителя от 0,99952 до 0,99991 соответственно. Подставив близкие к реальным значения параметров в равенство, получим величину девиации времени пролета сгустков и задержки ВЧ-импульсов на ± 1.5 нс от среднего значения.

Время распространения сигнала в коаксиальном кабеле, равное $T_{каб} = L_{каб} \cdot \epsilon^{1/2} / C$ (где: $L_{каб}$ – длина кабельной трассы; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость заполнения), зависит от окружающей температуры. Однако сравнительно мед-

ленные изменения температуры позволяют компенсировать ее влияние эпизодической подстройкой регулируемых задержек Трег.

Задержка разряда накопительных линий ударных магнитов (Траз) определяются, в основном, двумя факторами: временем срабатывания тиратронов, усиливающих импульсы ПР и ОР, а также временем развития искрового пробоя между электродами разрядников. Первый фактор вносит медленный дрейф в Траз до 30÷40 нс за счет «старения» тиратронов, который можно компенсировать регулируемой задержкой Трег. Второй фактор приводит к случайному разбросу Траз в пределах ± 3 нс при среднем времени развития искры около 30 нс.

Вывод: при последовательной обработке заданий по ВЧ-синхронизации, которая характеризуется общими для всех «выстрелов» каналами формирования синхроимпульсов ПР и ОР, величина нестабильности срабатывания ударного магнита относительно выводимых сгустков пучка находится в следующих пределах:

1. При однократном «выстреле» в цикле ускорителя нестабильность от цикла к циклу ограничивается разбросом времени срабатывания разрядника ± 3 нс.
2. При многократных «выстрелах» в цикле ускорителя добавляется дисбаланс задержек за счет девиации частоты обращения протонов, которая зависит от разницы выбранных энергий вывода и оценивается пределами ± 1.5 нс относительно среднего значения в диапазоне энергий быстрого вывода.

Аппаратура дополнительной обработки сигналов

Аппаратура дополнительной обработки сигналов собрана в конструктиве NIM, который был использован для разработанного в ЦЕРН оборудования быстрого вывода. АДОС занимает два каркаса – АДОС №1 и АДОС №2.

В АДОС №1 размещаются 4 унифицированных усилителя таймерных импульсов (УТИ) и 2 усилителя постоянного тока (УПТ). Каждый модуль УТИ на 16 каналов соединен с соответствующим ВЧ таймером КО СБВ и усиливает входные импульсы ТТЛ уровня до амплитуды +24В на нагрузке 75 Ом для согласования с существующими в системе быстрого вывода параметрами синхроимпульсов.

Каждый модуль УПТ соединен с соответствующим 16-разрядным каналом регистра Р32 и усиливает входной сигнал ТТЛ уровня до напряжения +24В для управления дистанционными реле задержек

В АДОС №2 размещаются 4 модуля УТИ и распределитель-блокиратор импульсов (РБИ). Каждый модуль УТИ соединен с соответствующим Т таймером КО СБВ и усиливает входные импульсы ТТЛ уровня до амплитуды +24В на нагрузке 75 Ом.

Модуль РБИ получает от модуля ВТС из контроллера КО СБВ четыре строба направления, импульс СТАРТ (БВ) и маску. Импульс СТАРТ логически перемножается на первом корреляторе «канал-выстрел» с соответствующим сигналом статической блокировки и прикладывается к сборке из 14 вентилях, которая управляется маской. Таким образом, выходные импульсы СТАРТ зарядных источников ударного магнита являются результатом логического умножения самого импульса на строб направления, на сигнал статической блокировки и маски.

Кроме того, модуль РБИ получает от модуля ВЧС из контроллера КО СБВ импульсы ПР и ОР. Импульс ПР логически перемножается на втором корреляторе «канал-выстрел» с соответствующим сигналом динамической блокировки и соответствующим стробом направления.

Все выходные импульсы усиливаются по амплитуде до +24В на нагрузке 75 Ом.

Программное обеспечение СБВ

ПО синхронизации быстрого вывода структурно и функционально выполнено по стандартным для системы управления комплекса У-70 правилам. В данной работе рассматриваются только некоторые конкретные алгоритмы обработки исходных данных, задаваемых оперативным персоналом. Результатом обработки являются уставки для аппаратуры, которые записываются в соответствующие регистры и ячейки памяти.

Обработка исходных данных

1. Уставки для конвертора «В в Т» вычисляются по формуле [10]:

$$\text{уставка В} = 171,83 \cdot \beta \cdot E_{\text{п}} - 354,$$

где $E_{\text{п}}$ – заданная полная энергия (ГэВ) выводимого пучка.

Эти уставки записываются в ОЗУ 1 конвертора.

2. Уставки НСБ для ОЗУ №1 блока отработки задания ВТС вычисляются по формуле:

$$\text{уставка НСБ} = T_{\text{ИВ}} - 2501,$$

где $T_{\text{ИВ}}$ – заданное время вывода, отсчитанное от импульса КС1 в импульсах Т серии и взятое либо из памяти ОЗУ №2 конвертора, либо из таблицы оператора.

3. Позиционный код канала транспортировки для ОЗУ №2 блока отработки задания ВТС формируется следующим образом: биты кода жестко «привязаны» к определенным каналам и выбор канала сопровождается занесением «1» в соответствующий бит.

4. Уставки ПР и ОР для ОЗУ №1 и ОЗУ №2 (соответственно) блока отработки задания ВТС вычисляются по следующим формулам:

$$\text{уставка ПР} = 1024 + \text{№ первого выводимого сгустка},$$

$$\text{уставка ОР} = \text{уставка ПР} + \text{количество выводимых сгустков},$$

где 1024 – номер импульса серии ВЧ2К, принятый за момент вывода «нулевого» сгустка пучка.

5. Уставки для ВЧ таймеров вычисляются в единицах импульсов ВЧ пачки ВЧ2К по формуле:

$$\text{уставка ВЧ} = 1024 \pm N,$$

где N – число импульсов опережения (-) или запаздывания (+) относительно 1024 импульса серии ВЧ2К.

6. Уставки для Т таймеров вычисляются в единицах импульсов Т серии по формуле:

$$\text{уставка Т} = 2500 \pm T,$$

где 2500 – момент запуска таймера за 2500 Т импульсов до импульса ИВ; T – число импульсов опережения (-) или запаздывания (+) относительно ИВ.

Режим реального времени

В контроллере оборудования СБВ модуль ВТС подключен к локальной магистрали ОТС, откуда получает импульс КС1 в виде кодированного сигнала. Импульс КС1, обозначающий начало ускорения пучка на подъеме поля, инициирует работу аппаратуры СБВ в каждом цикле. В частности, он запускает таймер, который генерирует импульс СБРОС, вызывающий прерывание программы. Программа читает результаты измерений, содержимое памяти регистратора таймерных сообщений и загружает в аппаратуру новые данные на следующий цикл. Эти операции осуществляются в конце каждого цикла после завершения всех запрограммированных выстрелов быстрого вывода.

Заключение

В течение четырех сеансов комплекс аппаратно-программных средств СБВ отработал в реальных условиях быстрого вывода на физический эксперимент в канал 22 и в канал инъекции. За это время не зафиксировано ни одного сбоя в работе новой системы СБВ. С помощью встроенных в аппаратуру диагностических средств проверено качество функционирования блоков В и Т синхронизации.

Измерения показали, что автоматическое следящее устройство («В в Т» конвертор) обеспечивает повторяемость энергии выводимого пучка в пределах ± 10 МэВ от цикла к циклу, при этом интервалы опережения и задержки синхроимпульсов относительно импульса ИВ остаются в точном соответствии с заданием.

В таблице 3 приведены сравнительные характеристики новой и старой системы синхронизации быстрого вывода. Примерно 2/3 общей мощности, потребляемой новой СБВ, затрачивается на дистанционное релейное управление «тонкими» задержками, оставшимися от старой СБВ. Планируемый переход на электронные задержки импульсов ПР и ОР позволит уменьшить потребляемую мощность новой СБВ примерно на 100 Вт.

Таблица 3.

№ п/п	наименование параметра	значение параметра	
		новая система	старая система
1	Предельное число срабатываний быстрого вывода	6	3
2	Автоматическая привязка момента вывода к уровню поля	есть	нет
3	Число направлений быстрого вывода (каналов транспортировки пучка)	4	3
4	Число каналов таймерных импульсов на одно направление	32	12
5	Распределение каналов таймеров между зонами «ПРЕ» и «ПОСТ» (опережающих и задержанных импульсов)	гибкое	жесткое
6	Мониторинг отработки заданий (тип, время, энергия)	есть	нет
7	Дистанционное управление и контроль	есть	нет
8	Объем аппаратуры (стоек)	1	6
9	Потребляемая мощность от сети 220В (Вт)	150	2300

Разработанная аппаратура новой системы СБВ смонтирована в одной стойке. На рис. 9 показана верхняя часть стойки, где расположены каркасы новой системы СБВ с панелью подключения к магистралям MIL1553 и ОТС, а также панель ручной коммутации (ПРК) каналов транспортировки пучка при быстром выводе.

В нижней части стойки расположены (на рисунке не показаны) переходная кабельная панель (ПКП) для подсоединения технологического оборудования к СБВ и два источника питания для АДЭС с напряжениями +5В и +24В.

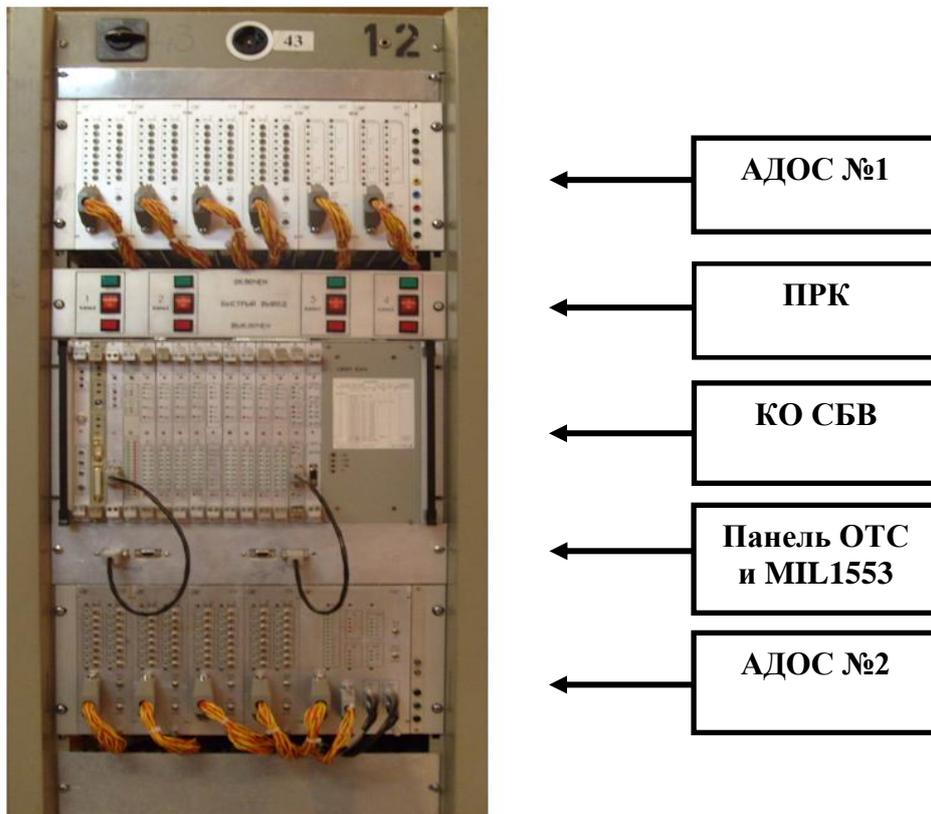


Рис. 9. Верхняя часть стойки новой СБВ.

Авторы выражают свою признательность Ю.С. Федотову и А.В. Минченко за поддержку данного проекта, А.Г. Афонину – за полезные обсуждения оперативных аспектов новой СБВ и участие в подготовке инструкции для пользователей, В.В. Фирсову и О.А. Ершовой – за большой объем и высокое качество монтажных работ, Г.А. Рожкову, И.С. Войнову и С.Ф. Решетникову – за изготовление переходной кабельной панели и панели ручной коммутации каналов транспортировки пучка, В.Ф. Сухомилинову – за адаптацию сигналов блокировки (СБ и ДБ) к новой системе СБВ.

Список литературы

- [1] Асеев А.А. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. 1973, М., Т. 2, с. 160.
- [2] Komarov V. et al. Proceedings of the ICALEPCS'95, Chicago, Illinois, USA, 1995, Vol. 2, p. 138.
- [3] Voevodin V., Komarov V., Milichenko Yu. (ИЯЭ, Протвино, Russia), Perriollat F. (CERN, Geneva, Switzerland). Proceedings of the ICALEPCS'99, Trieste, Italy, 1999, p. 639.
- [4] Комаров В.В. Базовые принципы построения общей таймерной системы ускорительного комплекса У-70. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005, №5, с. 23.
- [5] Вагин А.И., Глухов Ю.С., Колупаев Б.А. Труды Московского Радиотехнического Института. 1980, №35, с. 81.
- [6] Коковин В.А., Комаров В.В. Контроллер таймерной сети общей таймерной системы ускорительного комплекса ИФВЭ. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005, № 6, с. 15.
- [7] Moore E.F. Gedanken-experiments on sequential machines. // In C. Shannon and J.McCarthy editors. Automata Studies Princeton University Press. 1956. P. 129-153.
- [8] Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1988, 320 с.
- [9] Балакин С.И., Воеводин В.П., Клименков Е.В. Организация прикладного программного обеспечения контроллеров оборудования в новой Системе управления комплексом У-70. Труды XVI Всероссийского Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998, Т. 1, с. 176-179.
- [10] Таблицы «Основные соотношения и параметры синхротрона У-70». Справочный материал для инженерно-технического персонала ускорительного комплекса У-70.

Рукопись поступила 9 апреля 2012 г.

Г.М. Антоничев и др.

Новая система синхронизации быстрого вывода пучка из протонного синхротрона У-70 ИФВЭ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 16.04.2012. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,69. Уч.– изд.л. 2,4. Тираж 80. Заказ 42. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2012-9, ИФВЭ, 2012
