

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 681.325

### РЕГИСТРАТОРЫ ОДНОКРАТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ADC824

© 1999 г. Д. В. Моисеев, А. Н. Квашнин, А. Д. Хильченко

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 12.10.98 г.

Описаны две модификации многоканальных регистраторов однократных импульсных сигналов, выполненных на базе восьмиразрядных аналого-цифровых преобразователей параллельного типа AD9058. Приборы перекрывают диапазон частот дискретизации от 25 кГц до 200 МГц при точности  $\pm 0.5\%$  в полосе частот входного сигнала до 10 МГц. Регистраторы выполнены в стандарте КАМАК.

Для построения систем сбора данных на плазменных установках ИЯФ СО РАН широко используются регистраторы формы однократных импульсных сигналов, построенные на основе аналого-цифровых преобразователей (а.ц.п.) различного быстродействия. Наиболее распространенным является преобразователь Ц9107 [1, 2] и его промышленный аналог Ф4226, разработанный более 10 лет назад. В частности, на установке ГОЛ-3 (гофрированная открытая ловушка) на основе этих приборов работает несколько сотен трактов регистрации как инженерных параметров генераторов мощных электронных пучков и магнитной ловушки, так и таких параметров плазмы, как диамагнетизм, плотность, интенсивность рентгеновского излучения в различных участках спектра и т.д.

В связи с тем, что за время эксплуатации указанных регистраторов существенно изменилась элементная база, возникла потребность разработки прибора нового поколения, обладающего улучшенными, по сравнению с его предшественником, характеристиками и возможностью более гибкой адаптации к параметрам измерительных трактов.

Прежде всего речь идет о простоте создания на основе новых приборов многоканальных синхронных систем регистрации данных, о необходимости расширения диапазона частот дискретизации регистратора в более высокочастотную область с целью упрощения процедур последующей интерполяционной обработки информации и о большей длительности фиксируемых процессов, прямо связанной с объемом встроенного в регистратор буферного запоминающего устройства. Указанным требованиям удовлетворяют приборы серии ADC824, описанию базовой схемы построения которых посвящена данная работа.

При разработке приборов серии ADC824 нами был выбран подход, основанный на создании базовой схемы многоканального регистратора, со-

держащей тракты аналого-цифрового преобразования, буферное запоминающее устройство (б.з.у.) с соответствующей схемой управления и интерфейс КАМАК, дополняемой, в зависимости от назначения конкретного диагностического тракта, различными вспомогательными элементами. В качестве последних могут использоваться входные усилители с управляемым коэффициентом передачи, коммутаторы входных сигналов с соответствующими усилителями и аттенюаторами или аналоговая линия задержки с буферными усилительными каскадами и управляемыми делителями. Такое решение позволило на основе практически одной и той же схемы регистратора создать набор приборов, отличающихся числом каналов регистрации (от 8 до 1) и максимальной частотой дискретизации (от 25 до 200 МГц).

#### БАЗОВАЯ СХЕМА РЕГИСТРАТОРОВ ADC824

Базовая схема построения регистратора ADC824 приведена на рис. 1. В ее состав входят: четыре идентичных тракта аналого-цифрового преобразования на б.и.с. сдвоенных 8-разрядных а.ц.п. AD9058KD [3], включающие в себя схемы формирования опорных напряжений и их сдвига в область положительных, знакопеременных или отрицательных значений амплитуды входного сигнала; выходные буферные регистры для каждого а.ц.п., фиксирующие выходной код на время цикла записи в б.з.у.; б.з.у. объемом 32К отсчетов на каждый тракт преобразования; задающий генератор синхроимпульсов с частотой 50 МГц и формирователь сетки частот дискретизации на основе делителя частоты; регистры управления масштабом и сдвигом шкал преобразования а.ц.п., а также общей для всех трактов преобразования временной шкалой; регистр управления регистратором с соответствующими элементами формирования требуемой диаграммы работы б.з.у. в страничном режиме и в режиме с регистрацией

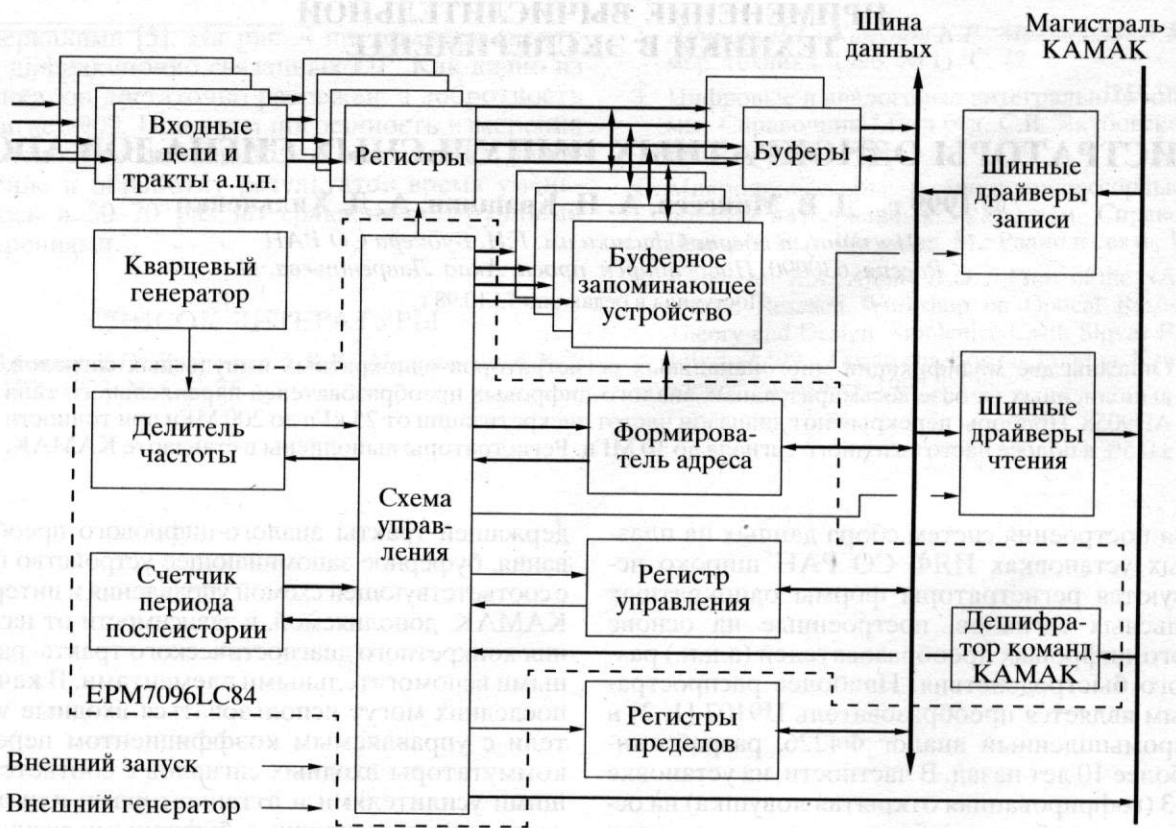


Рис. 1. Общая структура модуля.

предыстории обрабатываемых сигналов; схема управления; дешифратор функций КАМАК с шинными формирователями к магистрали крейта КАМАК.

На этапе регистрации входных сигналов все а.ц.п. работают параллельно и синхронно, т.е. имеют единую временную шкалу. При этом временные координаты точек измерения для всех а.ц.п. одинаковы и могут отличаться друг от друга не более чем на 100 пс. В некоторых задачах диагностики такая синхронность измерений позволяет избавиться от интерполяционных ошибок, например в случае восстановления динамики мощности инжектируемого в плазму пучка заряженных частиц по зарегистрированным осциллограммам тока и ускоряющего напряжения. Амплитудные характеристики каждого тракта регистрации независимы и определяются программно с помощью регистров пределов.

Буферные запоминающие устройства всех каналов в режиме регистрации работают под управлением общих адресного счетчика и схемы синхронизации. Построение схемы адресации б.з.у. определяет способность его работы в двух дополнительных режимах – в страничном и в режиме регистрации с «предысторией».

В страничном режиме запись поступающей от тракта преобразования информации в текущем цикле регистрации ведется не по всему объему б.з.у. (32К слов), а в рамках его части – страницы (4К слов). В следующем цикле регистрации номер страницы инкрементируется. Таким образом, страничный режим дает возможность последовательной регистрации поочередно нескольких входных сигналов.

В режиме регистрации с предысторией запись данных, поступающих по каждому каналу преобразования в б.з.у., осуществляется непрерывно и прекращается спустя фиксированный интервал времени после прихода на схему запуска внешнего синхроимпульса. Благодаря такой организации процедуры записи данных, в буферном запоминающем устройстве после ее прекращения сохраняется информация о характере поведения входных сигналов как до появления внешнего синхроимпульса, так и после него. Данный режим очень удобен в так называемых «сторожевых» системах регистрации, в которых указанный синхроимпульс формируется внешней схемой по какому-либо фронту одного из обрабатываемых сигналов. Он позволяет фиксировать характер поведения сигналов в асинхронных процессах, например динамику распределения токов и напряжений в



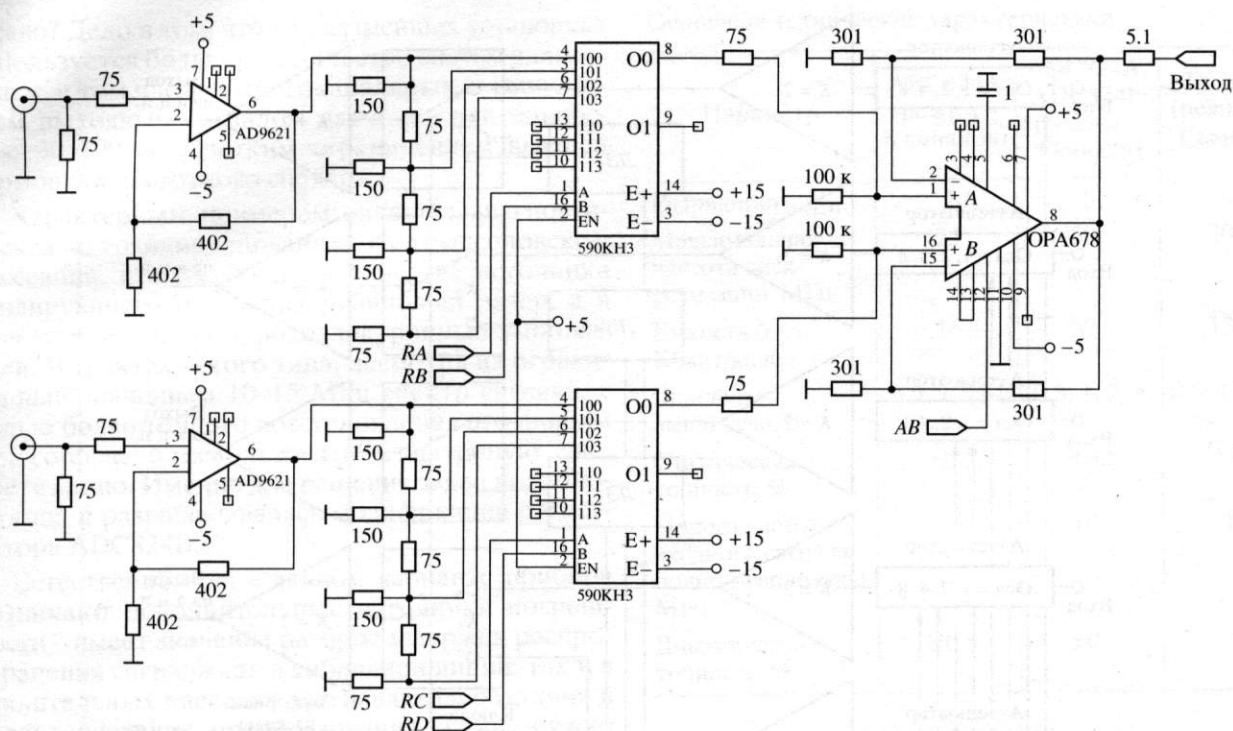


Рис. 2. Входные цепи регистратора ADC824A.

какой-либо высоковольтной системе в случае пробоя.

В регистраторе предусмотрен и “смешанный” режим работы – страничный с предысторией.

Построение интерфейсного узла к магистрали КАМАК рассматриваемого прибора не имеет каких-либо особенностей. Следует лишь отметить, что при работе с б.з.у. вывод данных на магистраль КАМАК (команды  $F0A0$  или  $F0A1$ ) производится одновременно по двум трактам преобразования (1 и 2 или 3 и 4) 16-разрядным словом с автоинкрементом содержимого адресного счетчика, что позволяет вдвое увеличить скорость передачи накопленного массива данных.

Ключевая особенность цифровой части регистраторов серии ADC824 связана с использованием для ее построения программируемой логической матрицы EPM7096LC84 [4]. С помощью системы проектирования MAX + PLUSII [5] и указанной матрицы удалось выполнить практически все основные цифровые узлы регистратора (за исключением генератора, б.з.у. и шинных формирователей) в рамках одной микросхемы. Благодаря тому, что матрица допускает многократное перепрограммирование, в случае необходимости возможна модификация цифровой части прибора без изменений в топологии печатной платы.

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИСТРАТОРОВ ADC824

С точки зрения схемотехники отличительные особенности регистраторов рассматриваемой серии связаны с построением их аналоговых трактов. Базовая восьмиканальная модель регистратора ADC824A содержит четыре идентичных аналоговых тракта, схема построения которых приведена на рис. 2. Каждый тракт состоит из входного широкополосного усилительного каскада (AD9621 [3]), управляемого двоичным кодом аттенюатора на основе делителя  $R-2R$  с аналоговым мультиплексором (590КН3), и коммутатора (ОРА678 [6]), сигнал с которого поступает на вход соответствующего а.ц.п. Усилительные каскады с целью сохранения хороших как статических, так и динамических характеристик имеют коэффициент передачи, равный 2.

В связи с тем, что один из ключей аттенюатора всегда находится в открытом состоянии и связывает высокоомный вход последующего усилительного каскада через свое относительно низкое сопротивление канала с низкоомным резистивным делителем, схема аттенюатора даже при использовании ключей с относительно большими паразитными емкостями обеспечивает достаточно низкие динамические искажения входного сигнала ( $<1\%$  в полосе частот до 20 МГц при выборе наиболее чувствительной шкалы преобразования а.ц.п. по амплитуде).

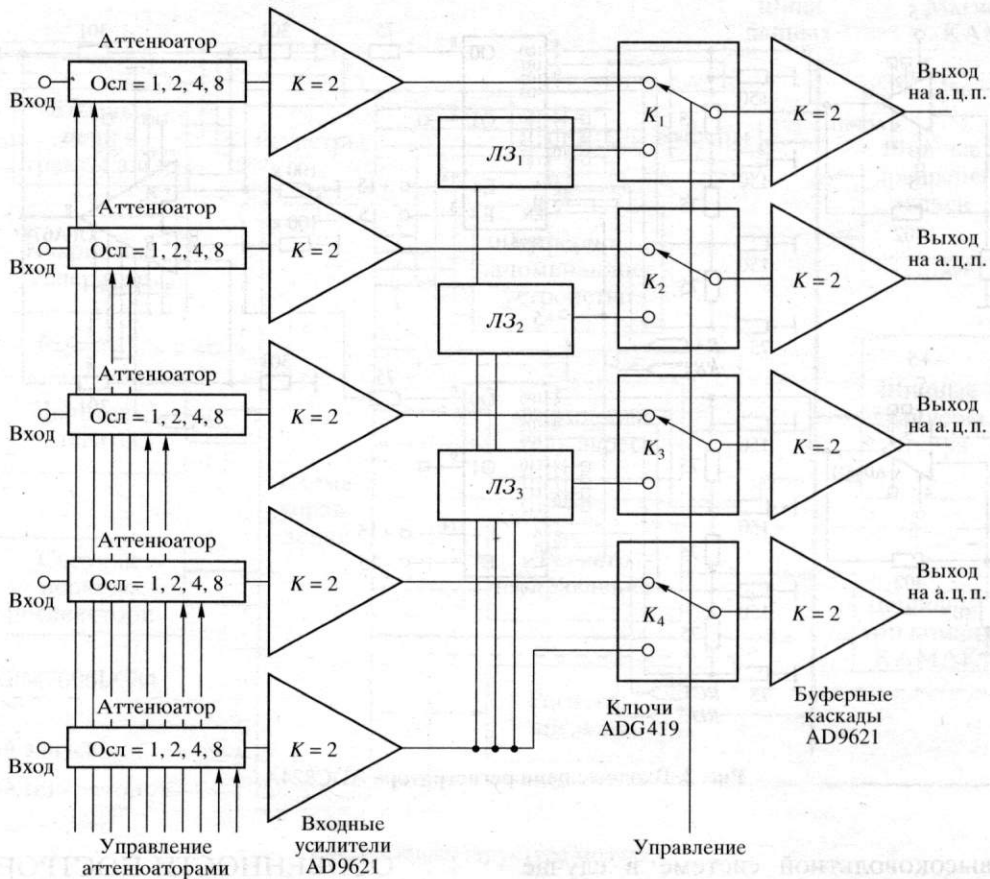


Рис. 3. Входные цепи модификации прибора ADC824В.

Двухканальный коммутатор входных сигналов построен на операционном усилителе с переключаемыми входами ОРА678 [6]. Этот усилитель одновременно выполняет функции буферного каскада для связанного с ним а.ц.п. По сигналу управления коммутацией входов (АВ), жестко связанному с младшим разрядом адресного счетчика б.з.у. регистратора, усилитель поочередно подключает ко входу а.ц.п. каждый источник входных сигналов.

Поскольку временной интервал с момента переключения номера канала до установления усилителя на точность, соответствующую 8-разрядному преобразованию (18 нс), не превышает периода максимальной частоты дискретизации (20 нс), максимальная эквивалентная частота дискретизации по каждому из коммутируемых каналов достигает 25 МГц. Однако погрешность коммутации в этой схеме сильно зависит от ширины частотного спектра входных сигналов, причем характер этой погрешности явно связан с переходными процессами в усилителе ОРА678. По этой причине для получения 8-разрядной точности преобразования скорость нарастания входных сигналов в рассматриваемой схеме не должна превышать 20 В/мкс, что эквивалентно подаче на

вход каждого из коммутируемых каналов сдвинутых по фазе на  $180^\circ$  синусоидальных сигналов полной амплитуды с частотой 3 МГц. Обычно для большинства используемых на плазменных установках диагностических трактов это ограничение не является определяющим.

Регистратор ADC824В имеет две программно переключаемых конфигурации входного аналогового тракта, схема построения которого показана на рис. 3.

В первом случае, которому соответствует приведенное на рисунке состояние ключей  $K_1-K_4$  (ADG419 [3]), прибор представляет собой четырехканальный синхронный регистратор импульсных сигналов. Во втором случае с помощью указанных ключей на входы всех четырех а.ц.п. подается один и тот же сигнал, но с нарастающим сдвигом во времени. Если значения задержек распространения сигнала в отрезках кабельных линий  $ЛЗ_1-ЛЗ_3$  равны соответственно  $3/4$ ,  $1/2$  и  $1/4$  периода частоты дискретизации этих параллельно работающих преобразователей, то эквивалентная частота дискретизации входного сигнала возрастает в 4 раза и в нашем случае составляет 200 МГц. Правда, прибор при этом становится одноканальным. Возникает естественный вопрос — зачем это



нужно? Дело в том, что на плазменных установках используется большое количество систем диагностики, в том числе и многоканальных, и импульсным выходным сигналом датчиков длительностью 30–100 нс с четким ограничением высшей гармоники частотного спектра.

Характерным примером является диагностическая методика, основанная на томпсоновском рассеянии, использующая в качестве источника зондирующего излучения рубиновый лазер, а в качестве датчиков – фотоэлектронные умножители. В трактах такого типа, несмотря на ограниченное значение 10–15 МГц спектр сигнала, с целью более точного восстановления его формы целесообразно использовать избыточную дискретизацию. Именно для решения задач подобного типа и разрабатывалась модификация регистратора ADC824B.

Естественно, что в данном варианте прибора возникают дополнительные источники погрешности – имеет значение разброс задержек распространения сигнала как в кабельной линии, так и в усилительных каскадах, сказываются различия в характеристиках преобразования а.ц.п., нужно обращать внимание на различия в динамике коэффициентов передачи всех аналоговых трактов. Однако, как показали испытания и опыт эксплуатации данной модификации приборов на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка), вносимая указанными источниками случайная составляющая погрешности в полосе частот входного сигнала до 10 МГц не превышает 1%. Погрешности стационарного характера легко устраняются при калибровке.

Основные технические характеристики описанных приборов сведены в таблицу. Эти приборы несколько отличаются друг от друга по разрядности регистров управления пределами, назначению конкретных разрядов этих регистров и по процедурам взаимодействия с буферным запоминающим устройством со стороны магистрали крейта КАМАК. Отличия, касающиеся схемы цифровой части регистраторов, скрыты в кристалле программируемой матрицы и не затрагивают топологии печатной платы. Различия в процедурах обмена с магистралью КАМАК учтены при написании базового пакета подпрограмм, включающего в себя программные модули, определяющие выполнение операций загрузки пределов по амплитуде и по времени, задание режимов работы регистратора, разрешение запуска, чтение данных

## Основные технические характеристики

Параметр	ADC824A (режим – 8 каналов)	ADC824A, ADC824B (режим – 4 канала)	ADC824B (режим – 1 канал)
Разрядность	8	8	8
Максимальная частота дискретизации, МГц	25	50	200
Емкость б.з.у., Кбайт/канал	16	32	128
Шкала по амплитуде, В	0.5, 1, 2, 4	0.5, 1, 2, 4	0.5, 1, 2, 4
Статическая точность, %	±0.5	±0.5	±1
Полоса частот входного сигнала полной амплитуды, МГц	3	10	10
Динамическая точность, %	±0.5	±0.5	±1

по заданному каналу, проверки правильности функционирования различных узлов и т.д.

Опыт эксплуатации регистраторов серии ADC824 в составе различных диагностических трактов установок ГДЛ и ГОЛ-3 подтвердил правильность сформулированных при их разработке принципов построения, показал простоту адаптации этих приборов к аппаратной среде конкретных подсистем регистрации данных при существенно более высоком уровне эксплуатационной надежности по сравнению с регистраторами предыдущего поколения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квашин А. Н., Хильченко А. Д. Препринт ИЯФ СО АН СССР 85-116. Новосибирск, 1985.
2. Хильченко А. Д. // ПТЭ. 1987. № 3. С. 124.
3. 1994 Design-In Reference Manual. Analog Devices Inc., 1994.
4. Altera Data Book. June 1996. Altera Corporation, 1996. P. 193.
5. MAX + PLUSII. Programmable Logic Development System. Getting Started. Altera Corporation, 1995.
6. Burr Brown Integrated Circuits Data Book. Linear Products 1996. Burr Brown Corporation, 1996. Sect. 2. P. 336.

## ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.373.44

### ЛИНЕЙНЫЙ МОДУЛЯТОР МИКРОТРОНА

© 1999 г. Г. М. Казакевич, В. В. Рашенко, Ю. Ф. Токарев

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

Поступила в редакцию 03.09.98 г.

Описан модулятор, формирующий импульсы мощностью до 7.2 МВт при длительности около 8 мкс и частоте повторения до 25 Гц для питания магнетронного генератора микротрона. В модуляторе использован импульсный высокочастотный преобразователь напряжения сети, что в сочетании с быстродействующей системой управления обеспечивает точность установки зарядного напряжения и его стабильность лучше 0.1%, а также компактность и небольшой вес модулятора.

Модулятор предназначен для работы с магнетроном МИ-456, входящим в состав высокочастотной системы 10-см микротрона [1], который используется в настоящее время для создания инфракрасного лазера на свободных электронах. Модулятор обеспечивает получение импульсов тока с амплитудой до 130 А при напряжении до 55 кВ. Длительность импульса по уровню 0.5 составляет 8 мкс. Частота следования импульсов 1–25 Гц.

Одной из особенностей модулятора является применение высокочастотных импульсных преобразователей с быстродействующей системой управления для зарядки емкости фильтра высоковольтного выпрямителя. Это позволило существенно повысить точность установки зарядного напряжения, а также существенно уменьшить габариты и вес модулятора. Энергия от высокочастотного преобразователя передается к модулятору через радиочастотный коаксиальный кабель. Управление модулятором осуществляется от персонального компьютера через систему КАМАК.

Упрощенная схема модулятора приведена на рис. 1. В модуляторе используется резонансный заряд двадцатизвенной искусственной линии  $L_1-L_4$  через отсекающий диод  $D_1$ . Коммутация линии осуществляется тиратроном  $V_1$ .

Зарядный преобразователь построен на основе устройства, описанного в [2]. Упрощенная схема преобразователя представлена на рис. 2. Он представляет собой мостовой инвертор с ключевым стабилизатором тока, преобразующий выпрямленное напряжение сети в переменное напряжение 250 В, 25 кГц с ограничением выходного тока до 8 А. По внешней команде *Старт/Стоп* преобразователь включает/выключает выходной ток. Время включения/выключения не превышает 20 мкс.

Один преобразователь обеспечивает работу модулятора с частотой до 15 Гц. Для увеличения выходной мощности предусмотрена возможность

параллельного соединения выходов нескольких преобразователей. При этом их выходной ток суммируется. Выход преобразователя гальванически изолирован от сети трансформаторами  $Tr2-Tr6$  и нагружен на повышающий трансформатор  $Tr1$  (рис. 1) с выходным напряжением 4 кВ.

Как отмечалось в [2], процессы переключения в преобразователе синхронизируются от внутреннего задающего генератора, работающего на частоте 50 кГц. При параллельном соединении выходов нескольких преобразователей частота и фаза выходного напряжения каждого преобразователя должны быть строго синхронизированы. Поэтому задающий генератор помимо синхросигнала 50 кГц вырабатывает для преобразователей сигнал полярности частотой 25 кГц. Этим сигналом определяется полярность выходного напряжения каждого преобразователя.

Стабилизация напряжения на емкости фильтра высоковольтного выпрямителя  $C_\phi$  осуществляется с помощью блока управления (рис. 1). Это напряжение через высоковольтный (в.в.) делитель, состоящий из прецизионных резисторов типа С5-24, сравнивается с опорным напряжением цифроаналогового преобразователя, управляемого системой КАМАК. В зависимости от результата сравнения вырабатывается команда *Старт/Стоп* для зарядного преобразователя. Процесс зарядки емкости  $C_\phi$  делится на две стадии: вначале зарядка осуществляется максимальным током, а затем, при приближении напряжения на емкости к требуемому значению, дозарядка осуществляется импульсами тока, вырабатываемыми посредством кратковременных включений преобразователя. Минимальная длительность импульса равна одному полупериоду частоты преобразования, т.е. 20 мкс. Процесс измерения напряжения синхронизирован с рабочей частотой и фазой зарядного преобразователя, так как в моменты коммутации силовых транзисторов в измерительных цепях генерируются импульсные помехи,



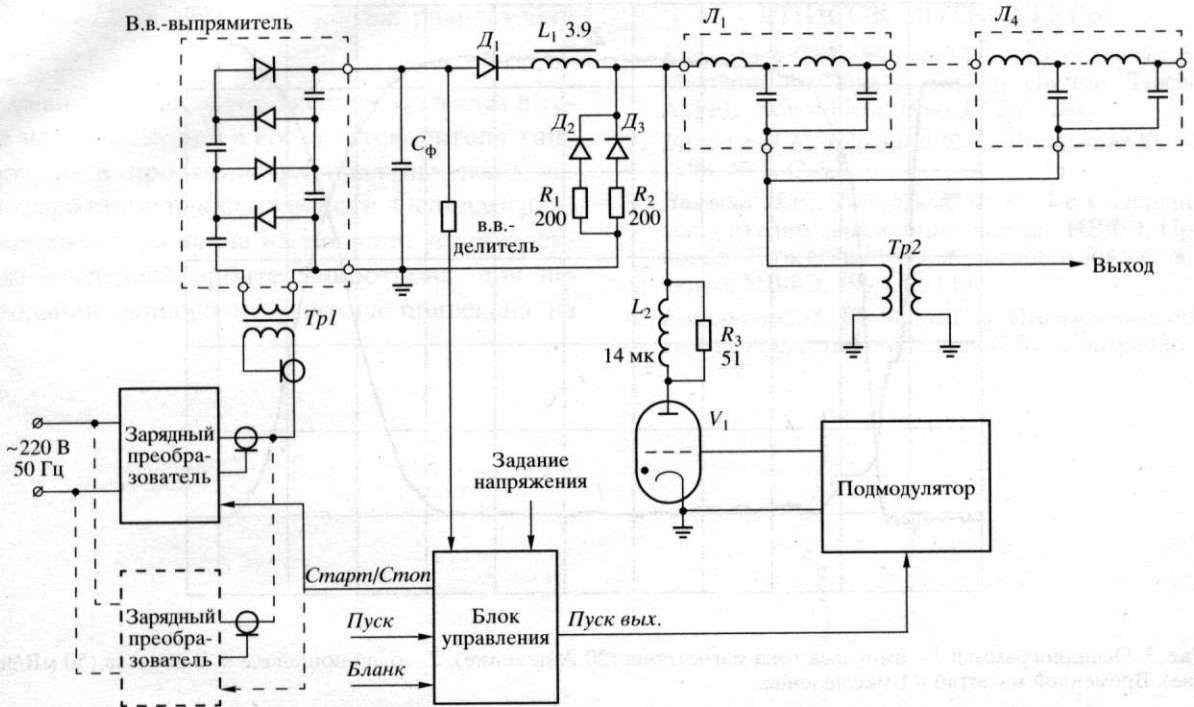


Рис. 1. Упрощенная схема модулятора.  $V_1$  – ТГИ1-1000/25;  $D_1$ – $D_3$  – СДЛ04-800-04;  $L_1$ – $L_4$  – ПЛ-02;  $Tr_1$  – 3 сердечника ПК40 × 18 3000 НМС  $K_{тр} = 22$ ,  $Tr_2$  –  $K_{тр} = 4.75$ ;  $C_Ф$  – 1 мкФ × 16 кВ; резисторы – ТВО-60.

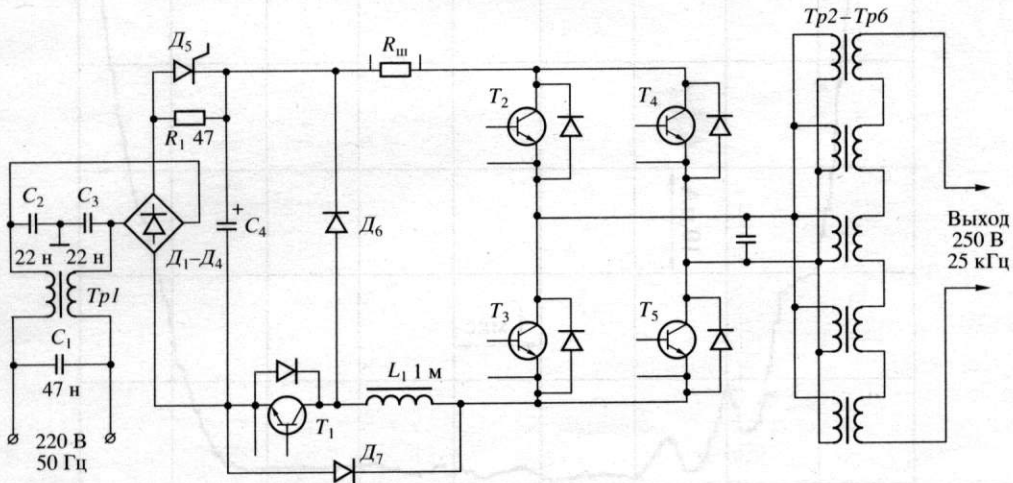


Рис. 2. Упрощенная схема силовой части преобразователя.  $T_1$ – $T_5$  – ТК235-40-4;  $D_1$ – $D_4$  – Д112-10-4,  $D_5$  – Т122-25-4,  $D_6$ ,  $D_7$  – КД213Б;  $Tr_1$  – К40 × 25 × 11 М2000НМ,  $w_1 = w_2 = 20$ ,  $Tr_2$ – $Tr_6$  – 2 × К40 × 25 × 11 М2000НМ,  $w_1 = 95$ ,  $w_2 = 18$ ;  $C_1$ – $C_3$  – К73-17,  $C_4$  – К50-17-500 мкФ × 400 В (6 шт.);  $R_1$  – ПЭВ-25,  $R_{ш}$  – С5-16МВ-1Вт-0.1 Ом (4 шт. параллельно).

ухудшающие точность измерения [3]. Поэтому состояние компаратора в блоке управления фиксируется в моменты времени, когда помехи в измерительных схемах минимальны. В результате данная система позволила достичь точности зарядки  $C_Ф$  не хуже 0.1%.

Для повышения надежности работы всей системы питания предусмотрено принудительное отключение зарядного преобразователя непосредственно перед запуском тиратрона и возобновле-

ние процесса зарядки только через 3 мс после разряда линии. Для этого перед импульсом запуска тиратрона в блок управления приходит импульс *Бланк*, который блокирует систему зарядки на 3 мс.

Запуск тиратрона осуществляется подмодулятором на тиристоре ТЧ-25.

Искусственная линия модулятора состоит из четырех пятизвенных линий ПЛ-02. Емкость

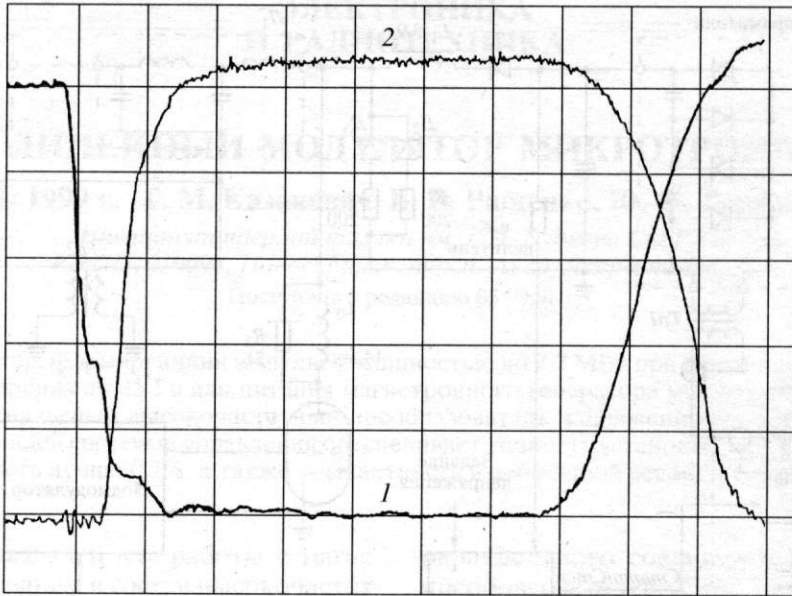


Рис. 3. Осциллограммы: 1 - импульса тока магнетрона (20 А/деление), 2 - огибающей с.в.ч.-импульса (50 мВ/деление). Временной масштаб - 1 мкс/деление.

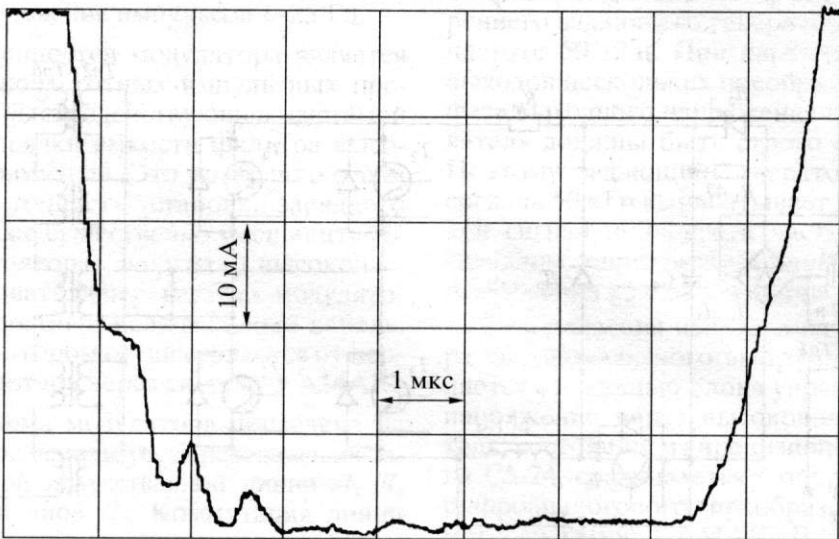


Рис. 4. Осциллограмма импульса тока пучка.

одного звена около 8 нФ, среднее волновое сопротивление линии 25 Ом. Защита модулятора от перенапряжения в линии, возникающего при искрении в магнетроне, осуществляется резистивно-диодными цепями  $R_1$ ,  $D_2$  и  $R_2$ ,  $D_3$ . Цепь  $L_2$ ,  $R_3$  позволяет существенно уменьшить амплитудную модуляцию вершины импульса тока магнетрона [4]. Индуктивности искусственной линии допускают перестройку, позволяющую изменять волновое сопротивление вдоль линии примерно в 1.5 раза.

Благодаря этому удается осуществить компенсацию потерь на намагничивание сердечника импульсного трансформатора и получить скол вершины импульса тока не более 1% при амплитуде около 100 А и длительности импульса тока магнетрона по уровню 0.9 не менее 6.5 мкс. Осциллограммы импульса тока магнетрона и огибающей с.в.ч.-импульса представлены на рис. 3.

Модулятор размещен в шкафу размером 1800 × 600 × 800 мм. Зарядные преобразователи и



блок управления занимают 1 этаж радиостойки "Вишня".

Описанный модулятор эксплуатировался в течение нескольких лет в составе ускорителя типа микротрон и продемонстрировал высокую надежность и стабильность в работе. Осциллограмма импульса тока пучка на мишени, установленной на последней орбите микротрона, при использовании данного модулятора приведена на рис. 4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazakevich G.M., Marusov V.N., Silvestrov G.I. 8 MeV Microtron the Injector for an electron Synchrotron. ASFEL, Novosibirsk, 1996. С. 257–261.
2. Валька И.Е., Раценко В.В., Токарев Ю.Ф. // ПТЭ. 1998. № 6. С. 92.
3. Валька И.Е., Токарев Ю.Ф. // 14-е Собрание по ускорителям заряженных частиц. ИВФЭ, Протвино, 25–27 октября 1994. Аннотации докладов. Протвино: ИВФЭ, 1994. С. 114.
4. Евтянов С.И., Редькин Г.Е. Импульсные модуляторы с искусственной линией. М.: Сов. радио, 1973.