

# Система автоматической подстройки частоты резонаторов линейного ускорителя с ВЧ-фокусировкой

А.Ж. Атачкин, В.П. Голубков, В.А. Кренделев, В.Б. Степанов, В.Н. Федорченко  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

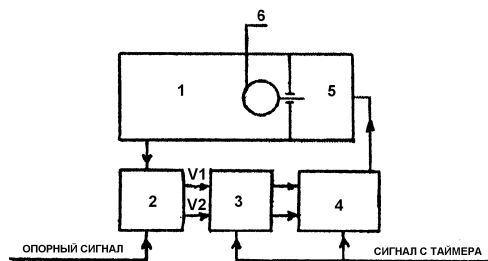
Поддержание собственной частоты резонаторов линейного ускорителя в заданных допусках является необходимым условием успешного функционирования линейного ускорителя и получения заданных параметров пучка.

В ускорителе с ВЧ-фокусировкой, применяемом в качестве инжектора в бустер [1] ускорительного комплекса ИФВЭ, используется система термостатирования для поддержания настройки собственных частот секций ускорителя на рабочую частоту. Как показала длительная эксплуатация такого ускорителя, в ряде случаев одной системы термостатирования недостаточно. Поэтому при разработке нового ускорителя УРАЛ-30М [2] принято решение:

- использовать существующую систему термостатирования для минимизации деформаций от изменений температуры охлаждающей воды внешнего контура и воздуха в зале;
- разработать быстродействующую систему автоматической подстройки частоты (АПЧ) для компенсации влияния на собственную частоту резонатора, параметров и режима работы оконечного каскада системы ВЧ-питания, изменений теплового режима секции и атмосферного давления.

Блок-схема (рис. 1) разработанной системы — это кольцо обратной связи, которое включает в себя секцию линейного ускорителя 1. Изменения температуры секции, атмосферного давления и режима ВЧ-генератора вызывают заметные изменения собственной частоты секции 1, которые преобразуются датчиком собственной частоты 2 в два аналоговых сигнала. На основе этих сигналов в блоке управления 3 вырабатывается сигнал ошибки, который далее преобразуется в сигнал, достаточный для работы блока ручной подстройки частоты 4 с узлом подстройки частоты 5. Последний поворачивает элемент подстройки частоты 6 в нужное положение, чтобы вернуть собственную частоту к исходному значению.

Рис. 1: Блок-схема системы АПЧ. 1 – секции ускорителя; 2 – датчик собственной частоты (ДСЧ); 3 – блок управления подстройки частоты; 4 – блок ручной подстройки; 5 – узел подстройки частоты; 6 – элемент подстройки частоты с вакуумным вводом вращения.



На рис. 2 приведено поперечное сечение секции ускорителя. В контейнере 1 размещены два резонатора 2 с четырьмя электродами вблизи оси секции. Возбуждение магнитного поля осуществляется оконечным каскадом 3 системы ВЧ-питания с помощью анодного контура 4 и его связи с магнитным полем Н. С радиотехнической точки зрения, секция ускорителя — это колебательный контур с высокой (15000) добротностью. Его настройка на рабочую частоту 148 503 кГц должна осуществляться с точностью  $\pm 1,5$  кГц для проектной работы ускорителя. Для настройки используется петля 8, являющаяся частью узла подстройки частоты 7. Для работы узла подстройки частоты в автоматическом режиме сигналы с малых петель связи 5 и 6 поступают в кольцо обратной связи и преобразуются в сигналы управления узлом подстройки частоты для поворота петли 8 на необходимый угол. Если петля 8 расположена в плоскости поперечного сечения секции (как на рис.2), то собственная частота секции максимальна. При повороте на  $90^\circ$  частота секции минимальная.

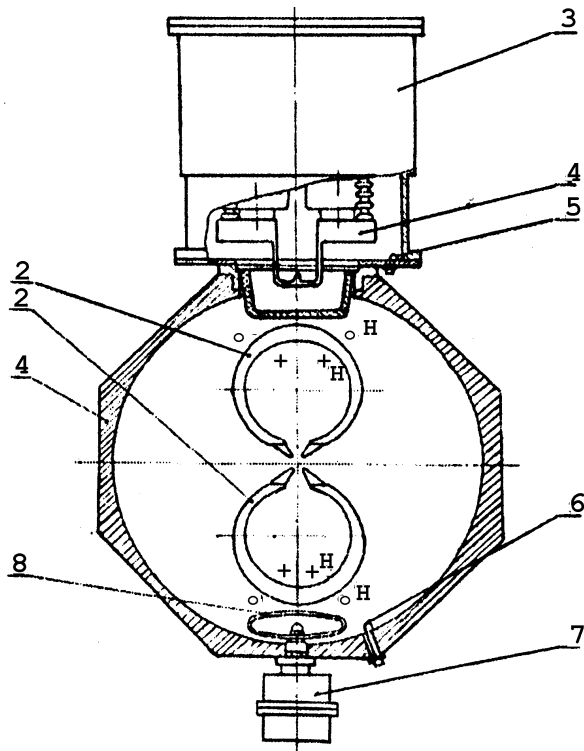


Рис. 2: Поперечное сечение ускорителя. Контейнер – 1; резонаторы с электродами – 2; окончательный каскад системы ВЧ-питания – 3; анодный контур – 4; малые петли связи – 5, 6 для ДСЧ, узел подстройки частоты – 7 с петлей – 8; Н – “хвост” (+) и “острие” (o) векторов магнитного поля.

В системе АПЧ используется фазовый датчик собственной частоты (ДСЧ) мостового типа (рис. 3). Он состоит из фазового моста 1; амплитудных детекторов 2, 3; соединительных кабелей. Разность фаз высокочастотных сигналов с петель П1 и П2, пропорциональная частотной расстройке секции, преобразуется фазовым мостом в разность амплитуд сигналов  $U_c - U_d$ . Вычитание сигналов производится в блоке управления подстройкой частоты (рис.4) после детектирования амплитудными детекторами 2, 3 с коэффициентом передачи, равным 1 [3].

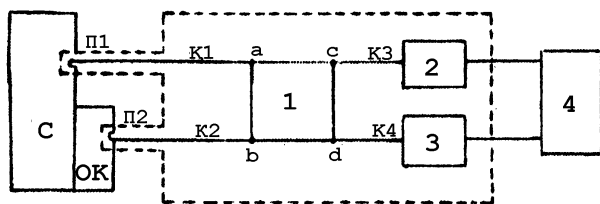


Рис. 3: Датчик собственной частоты (пунктирная линия). П1 и П2 – малые петли связи в секции ускорителя С и окончательном каскаде ОК; 1 – мост фазовый с разъемами а, b, с, d; 2, 3 – амплитудные детекторы; К1, К2, К3, К4 – ВЧ-пятидесятиомные кабели; 4 – блок управления подстройкой частоты.

Схема блока управления приведена на рис. 4, а форма и положение сигналов во времени показаны на рис. 5. В блоке управления происходит сравнение сигналов  $U_c$  и  $U_d$  с ДСЧ и в зависимости от их соотношения в паузах между импульсами ВЧ вырабатывается командный сигнал для блока ручной подстройки частоты на поворот элементов подстройки в ту или иную сторону на 1 шаг. Импульсные сигналы датчика с входа блока поступают на буферные неинвертирующие операционные усилители с коэффициентом усиления равным 1. Далее в схемах КР1100СК2 происходит выборка из входных импульсов и хранение выбранного уровня сигнала на время, достаточное для преобразования в цифровую форму. После преобразования сигналов они сравниваются с помощью цифровых компараторов.

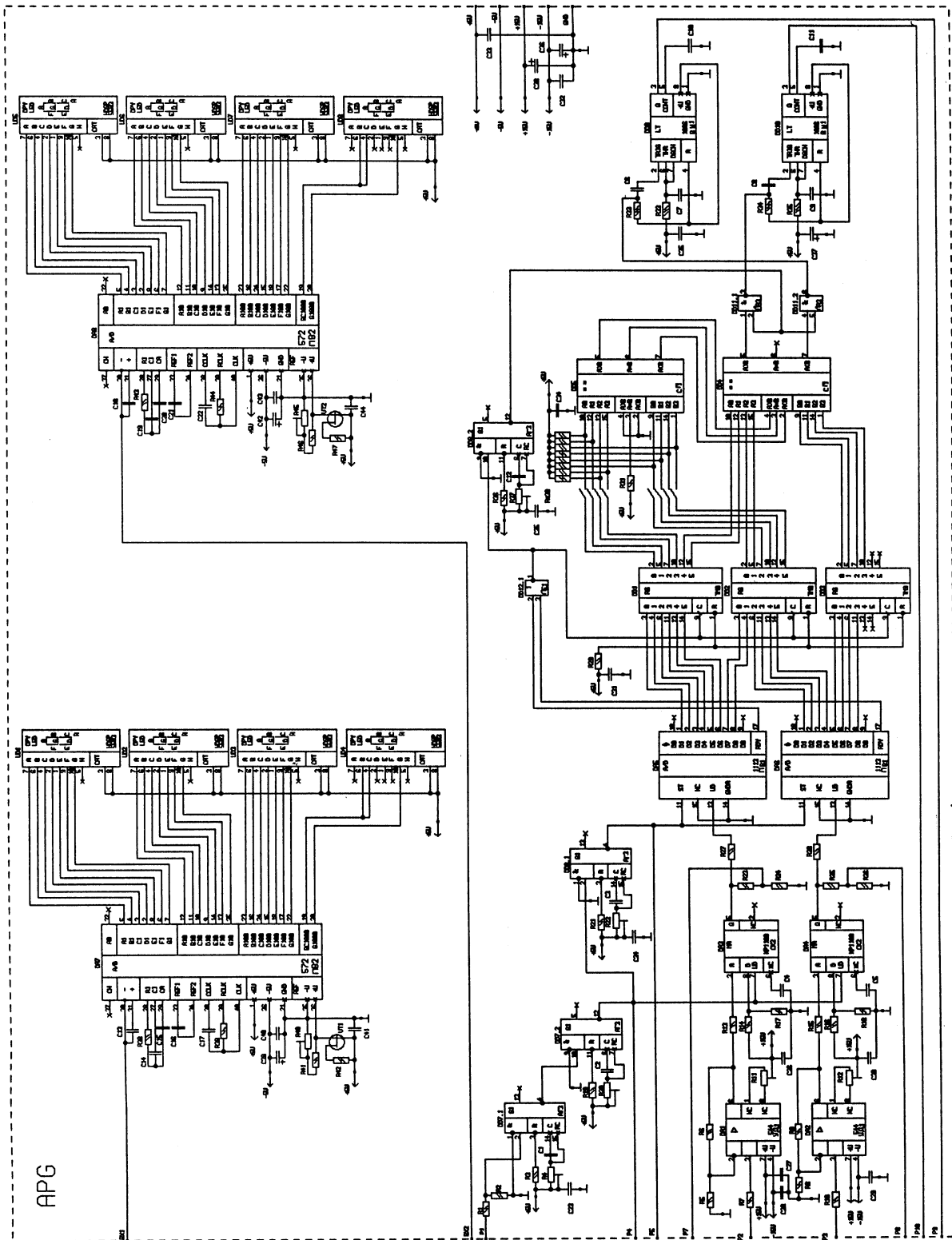


Рис. 4: Принципиальная схема блока управления подстройкой частоты.

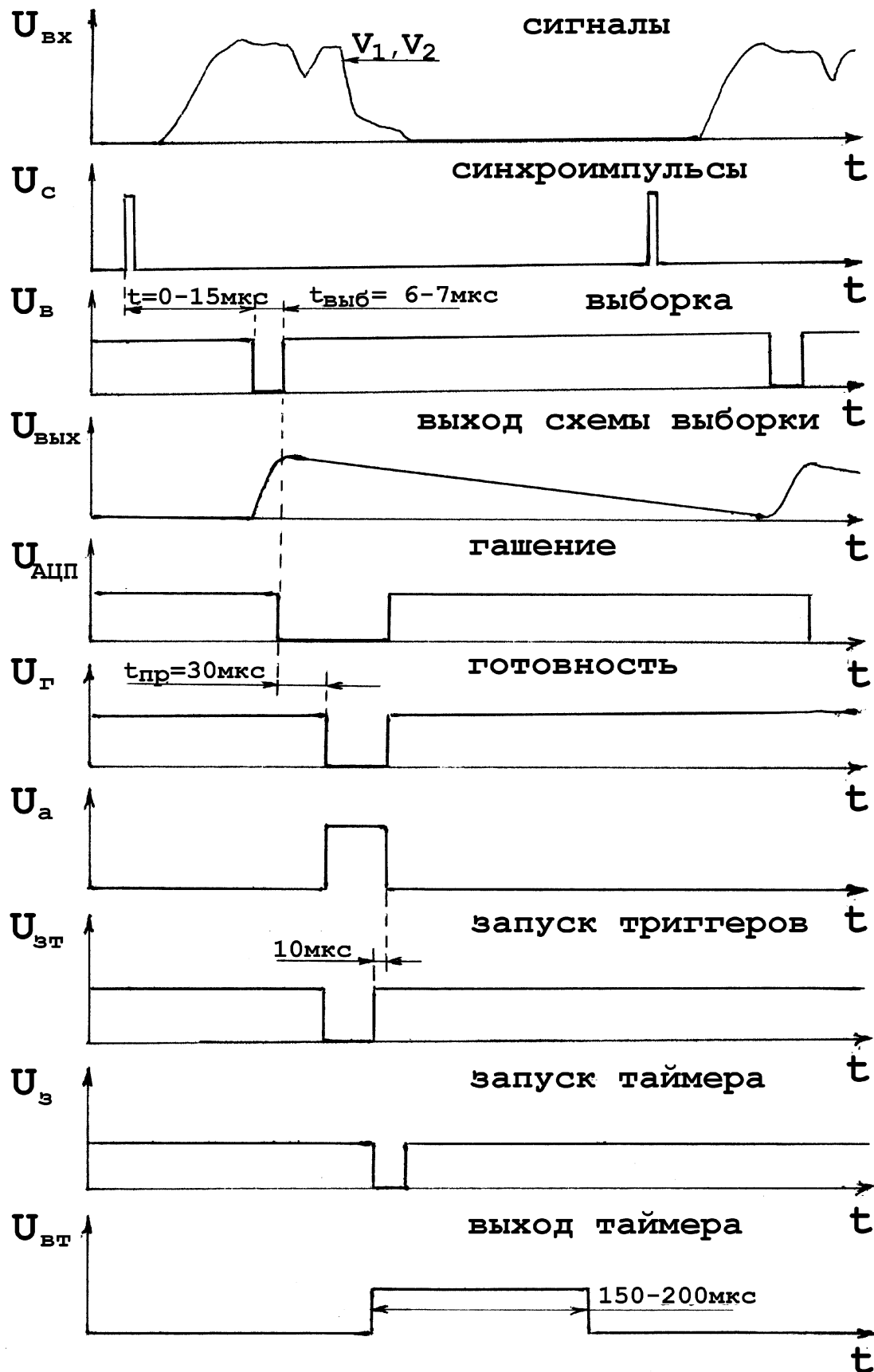


Рис. 5: Осциллограммы со схемы блока управления подстройки частоты.

Сигналы результатов анализа с выходов компараторов через некоторый промежуток времени, определяемый одновибратором ДД8.2, поступают на один из двух таймеров, вырабатывающих сигнал длительностью  $> 200$  мкс. Далее командный сигнал подается на блок ручной подстройки частоты. Синхронизация работы схемы производится внешним строб-импульсом.

Вершина импульса с ДСЧ может иметь значительную неравномерность из-за переходных процессов, свойств генератора, питающего ускоритель, нагрузки пучком ускоренных протонов и т.п. Поэтому для стабильной работы в схему блока введена плавная регулировка синхроимпульсов, управляющих схемой выборки-хранения и АЦП, как по времени, так и по длительности. Это дает возможность измерять амплитуду в наиболее стабильной или заданной части входного импульса (рис. 5).

Блок ручной подстройки частоты предназначен для непосредственного управления узлами подстройки частоты. С помощью этого блока управление может производиться либо вручную нажатием кнопок на блоке, либо сигналами с блока управления подстройкой частоты. Принципиальная схема блока, реализованная в конструктиве стойки «Вишня», представлена на рис. 6. При включении блока на четырех выходах регистра ДДЗ и соответственно на выходах блока устанавливается последовательность напряжений, необходимая для начала работы шаговых двигателей. Далее вращение двигателей и его направление определяются направлением сдвига напряжений в регистре ДДЗ, которое зависит от сигналов на входах выбора режима S0 и S1. Управление входами производится кнопками ПКИ1–3 или внешними сигналами. Синхронизация регистра производится тактовыми импульсами, которые вырабатывает одновибратор ДД12.

При сбое регистра схема контроля автоматически устанавливает на выходе регистра (и блока) напряжения, соответствующие первоначальной установочной последовательности. От усилителя мощности, состоящего из транзисторных ключей, цифровая часть схемы гальванически отделена с помощью оптронных пар. В схему введена индикация крайних положений подстроек и подсчет шагов шаговых двигателей узлов подстройки частоты. Узел подстройки частоты (далее по тексту – узел) предназначен для изменения положения короткозамкнутого витка в магнитном ВЧ-поле резонатора, чтобы вернуть настройку резонатора на рабочую частоту ВЧ-генератора с заданной высокой точностью.

Высокие требования к стабильности и долговременной работе узла без отказов и ремонта определили его конструкцию (рис. 7). Она содержит основные детали: статор двигателя ШДР-711-5; его ротор 6; стакан 12; втулка 13; корпус-9; вал 10; петля 7; контакты-ограничители 1; уголок 4; индий ИН-00-42. Ротор 6 отделен от статора 5 тонкостенным стаканом 12 из нержавеющей стали для передачи вращения вала 10 с петлей 7 в вакууме. Стакан 12 и корпус 9 собраны через уплотнение из индия 42. Через такое же уплотнение соединен корпус 9 с контейнером секции ускорителя. Два контакта 1 ограничивают вращение углом  $90^\circ$  с помощью уголка 4 (петля 7 либо параллельна магнитному полю, либо перпендикулярна ему в крайних положениях) и являются концевыми выключателями. Стакан 12 входит в статор 5 по скользящей посадке. Ротор 6 имеет диаметр несколько меньший, чем диаметр готового изделия, чтобы свободно вращаться в стакане 12. Испытания такого узла на специальном стенде показали, что доработанный двигатель имеет меньший чем исходный момент на валу 10, но достаточный для надежной работы.

При повороте на  $90^\circ$  двигатель ШДР-711 делает 30 шагов. При этом частота секции ускорителя меняется на 750 Гц при каждом шаге, что обеспечивает заданную точность поддержания рабочей частоты 148505–1,5 кГц.

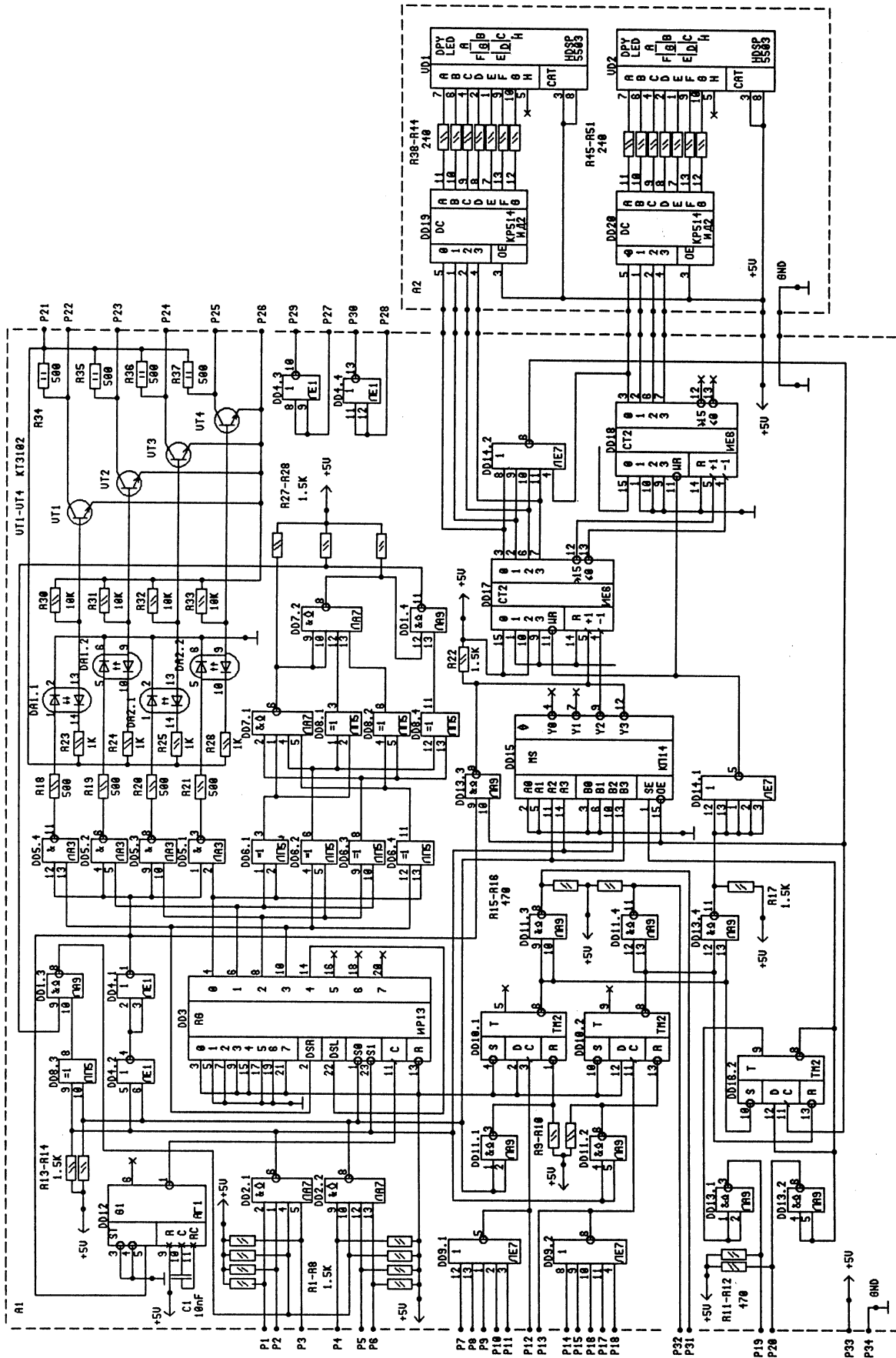
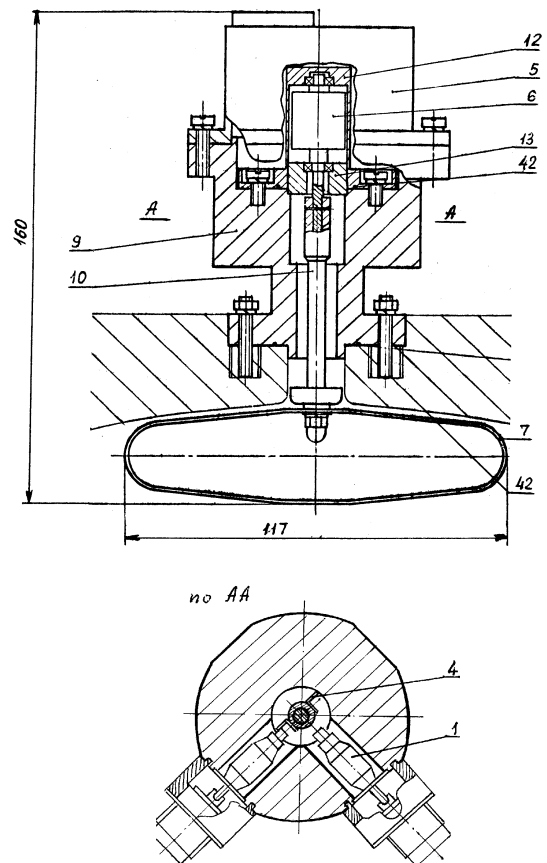


Рис. 6: Принципиальная схема блока ручной подстройки частоты.

Рис. 7: Принятый к разработке вариант узла подстройки частоты. 1 – контакты-ограничители; 4 – уголок; 5 – статор двигателя ШДР-711; 6 – его ротор; 7 – петля (коротко замкнутый виток); 9 – корпус; 10 – вал; 12 – стакан; 42 – прокладка из индия ИН-00.



Первые испытания система АПЧ прошла на секции НЧУ-1,8 ускорителя УРАЛ-30М [2]. К настоящему времени системами АПЧ оснащены две секции упомянутого ускорителя. Основные результаты испытаний таковы:

- диапазон линейности частотной характеристики для НЧУ и С1 оказался одинаковым и равным 20 кГц;
- для расширения диапазона работы системы АПЧ установлены дополнительные узлы подстройки частоты, которые включаются при срабатывании концевого выключателя рабочего узла подстройки частоты и возвращают его в исходное положение;
- экспериментально определено, что паузах между пакетами импульсов частота секции НЧУ изменяется со скоростью 33 Гц/с, а частота секции С1 – 10 Гц/с, что позволяет надеяться на надежную работу системы АПЧ на ускорителе в бустерном режиме;
- система АПЧ позволила провести измерения напряжения в секциях НЧУ и С1 через спектр рентгеновского излучения [4] обеспечивая часовую стабильность напряжения в пределах  $\pm 1\%$ .

## Список литературы

- [1] В.А. Зенин и др. Препринт ИФВЭ 93-147. – Протвино, 1993. V.A. Zenin et al. Proceedings of the 1994 Int.L.C.Tsukuba, Japan 1994, v.1, p.158.
- [2] А.Ж. Атачкин и др. Сборник научных трудов МИФИ. – Москва, 1998, часть 3, с. 161.
- [3] В.А. Слюсарев. Препринт ИФВЭ 89-126. – Серпухов 1989; ПТЭ, 1990, №4, с. 132.
- [4] В.Е. Бородин и др. Оценка межэлектродного напряжения в линейных ускорителях с ВЧК-фокусировкой по спектрам тормозного излучения (доклад на этой конференции).