



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

1

Г.Я.Куркин, В.М.Петров, А.А.Полунин

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМОЙ
НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ВЭПП-2 — ВЭПП-2М

ПРЕПРИНТ 85-81



НОВОСИБИРСК

Г.Я.Куркин, Э.М.Петров, А.А.Полунин

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
СИСТЕМОЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЭП-2 - ВЭП-2М

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассмотрены технические требования, предъявляемые к основным узлам аппаратуры управления ускоряющей высокочастотной системой накопительного комплекса. Предложены и реализованы: схема стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения с автоматическим ограничением уровня тока питающего фидера; детектор амплитуды в.ч. сигнала с нестабильностью коэффициента передачи $\frac{\Delta K}{K} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ град⁻¹, резонансный регулируемый усилитель - ограничитель с большим динамическим диапазоном и высокой линейностью регулирования; схема автоматической перестройки собственной частоты резонатора, работающая в широком диапазоне обобщенных расстройек; схема автоматической фазировки в.ч. напряжений кратных частот ω_0 стробоскопическим преобразованием входных сигналов, работающая в диапазоне 4+400 МГц при уровнях входных амплитуд 1 мВ + 10 В и дискретности дистанционной установки нужных фазовых соотношений, равной 50 пикосекунд.

В В Е Д Е Н И Е

При создании ускоряющих высокочастотных систем электрон-позитронных накопителей высоких энергий можно выделить три задачи по проектированию:

- а) ускоряющей структуры,
- б) генераторов высокочастотной мощности,
- в) аппаратуры управления.

Аппаратура управления должна обеспечивать контроль параметров ускоряющих напряжений и стабилизацию этих параметров с помощью цепей обратной связи.

Ускоряющая система комплекса ВЭШ-2 - ВЭШ-2М объединяет три высокочастотных тракта. Их основные характеристики приведены в таблице:

Накопитель	Частота обращения	Частота ускоряющего напряжения	Максимальная выходная мощность	Максимальное ускоряющее напряжение
ВЭШ-2	25,150 МГц	$f_{уск} = f_0$	10 кВт	50 кВ
		$f_{уск} = 3f_0$	40 кВт	300 кВ
ВЭШ-2М	16,767 МГц	$f_{уск} = 12f_0$	10 кВт	180 кВ

Блоки управления ускоряющей системой комплекса ВЭШ-2 - ВЭШ-2М могут быть отнесены ко второму поколению радиоэлектронной аппаратуры данного типа, которое характеризуется выполнением блоков с выходной мощностью $P \leq 10$ Вт полностью на полупроводниках, а также некоторым уровнем унификации и возможностью внешнего управления от ЭВМ.

I. Стабилизация амплитуды ускоряющего напряжения

В большинстве случаев требования, предъявляемые к стабильности амплитуды ускоряющего напряжения нельзя назвать очень жесткими. Обычно нестабильность на уровне $\frac{\Delta U_m}{U_m} = 0,05 + 0,01$ считается удовлетворительной. Учитывая все факторы, влияющие на нестабильность амплитуды и большой диапазон рабочих напря-

жений, выполнить и такие требования бывает достаточно сложно. В ряде случаев для проведения прецизионных экспериментов оказывается необходимым обеспечить нестабильность среднего уровня амплитуды, не превышающую $\frac{\Delta U_m}{U_m} \approx 10^{-3}$ и менее.

Функциональная схема систем стабилизации амплитуды, работающих на комплексе, изображена на рис.1. Одной из особенностей таких систем является наличие двух контуров обратной связи. Если $\frac{\rho R_{ш}}{\sqrt{1+\xi_0^2}} < \frac{U_{on}}{I_{on}}$, то работает система стабилизации амплитуды тока возбуждения резонатора. Если $\frac{\rho R_{ш}}{\sqrt{1+\xi_0^2}} > \frac{U_{on}}{I_{on}}$, то работает система стабилизации амплитуды напряжения на резонаторе. Здесь $R_{ш}$ - шунтовое сопротивление нагруженного резонатора, ξ_0 - его обобщенная расстройка. Такая схема позволяет защитить от возможной перегрузки питающий фидер и возможные каскады генератора. Работа в режиме стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения позволяет поддерживать уровень напряжения не зависящим от накопленного тока пучка и обходиться без цепей обратной связи, обеспечивающих электромеханическую устойчивость резонатора /4,5,6/.

В качестве высокочастотных датчиков используются петли связи с электромагнитным полем фидера и резонатора и емкостные делители, выполненные из керамических конденсаторов. Схема детектора амплитуды в.ч. приведена на рис.2.

Стабильность входного сопротивления детектора и его коэффициента передачи обеспечивается использованием термосопротивления, второго компенсирующего диода и буферного усилителя постоянного тока. Начальное смещение "нуля" выходного напряжения детектора на величину 50 - 70 мВ позволяет использовать его в диапазоне входных амплитуд $U_{m,вх} = 0,1 + 10$ в. При этом изменение коэффициента передачи детектора вследствие нелинейности в диапазоне 0,1 + 0,5 в не превышает 10%, а в диапазоне 0,5 + 10 в не превышает 5%. Температурная нестабильность выходного напряжения не более 100 мкВ/град, что при уровне входного напряжения 10 в соответствует нестабильности коэффициента передачи $\frac{\Delta K}{K} = 10^{-5}$ град⁻¹.

Регулировка амплитуды ускоряющих напряжений осуществляется на малом уровне мощности. В качестве регулируемых усили-

телей используются резонансные усилители-ограничители с регулировкой общего тока. (рис.3). Такая схема обеспечивает надежное запираение усилителей и регулировку уровня в диапазоне не менее, чем в 100 раз от максимального с практически постоянным коэффициентом передачи

$$K_{рез} = \frac{\Delta U_{т вых}}{\Delta U_{упр}}$$

Последнее обстоятельство очевидно важно для обеспечения с одной стороны устойчивости системы стабилизации, а с другой стороны её широкополосности и динамического диапазона. Коэффициент петлевого усиления на "постоянном" токе, определяющий коэффициент стабилизации $K_{ос} = 50 \div 100$. Граничная частота систем стабилизации, при которой $|K_{ос}| = 1$, лежит в районе $1 \div 3$ кГц, что позволяет существенно уменьшить уровень модуляции амплитуды вследствие пульсаций питающих напряжений мощных генераторов.

2. Перестройка собственной частоты ускоряющих резонаторов

Для ускоряющих резонаторов накопителей характерны высокая собственная добротность $Q = 10^4 \div 10^5$ и рабочий диапазон обобщенных расстройк $\xi_o = 2\delta Q = 0 \div 100$.

При больших уровнях используемых мощностей естественны. Значительные уходы собственной частоты резонаторов в следствие нагрева. Эти детекторы определяют необходимость использования систем автоматической подстройки собственной частоты резонатора. На комплексе ВЭШ-2М возможны три режима работы систем автоподстройки. Для поддержания дальних расстройк резонатора, работающего в пассивном режиме, пользуются потенциометрические датчики. Такой режим применяется для настройки резонатора третьей гармоники при накоплении пучков в накопитель ВЭШ-2. Для поддержания дальних расстройк в активном режиме используются датчики амплитуды напряжения на резонаторе и тока возбуждения. По одному из них работает система АРУ, управляющая мощностью генератора, а по второму система автоподстройки собственной частоты резонатора. При работе вблизи резонанса для подстройки резонатора используются фазометры (рис.4).

Такая комбинированная система автоподстройки снижает требования к динамическому диапазону фазометров и равномерности фазо-частотной характеристики между высокочастотными датчиками тока возбуждения и ускоряющего напряжения. Она позволяет ра-

ботать с расстройками резонатора $\xi_o = 0 \div 10$ и более и эффективно использовать резонатор для подавления фазовых колебаний пучка при инъекции больших порций тока и достижения максимальной светимости накопителя.

3. Фазовые измерения

Помимо фазометров, которые используются в системах автоподстройки собственной частоты ускоряющих резонаторов, аппаратура управления включает в себя несколько систем синхронизации кратных частот. Автоматическая фазировка напряжений кратных частот является весьма важной составной частью любой многочастотной ускоряющей системы. На комплексе ВЭШ-2М она применяется для следующих целей:

1. Обеспечивает такое включение ускоряющего напряжения третьей гармоники, которое не приводит к потерям пучка в накопителе ВЭШ-2 при подъеме энергии.

2. Обеспечивает стабильную инъекцию пучка в нужную сепаратрису в накопитель ВЭШ-2М.

3. Обеспечивает нормальную работу оптических систем наблюдения за фазовым размером пучков и распределением пучков по сепаратрисам.

4. Обеспечивает синхронизацию с пучком регистрирующей аппаратуры при проведении большинства физических экспериментов.

При построении систем фазировок на комплексе была выбрана блок-схема, включающая управляемые фазовращатели, умножители частоты, фазовые дискриминаторы и опорные линии задержки (рис.5). Данная схема позволяет поддерживать нужные фазовые соотношения между высокочастотными напряжениями $f_1 = n f_o$ и $f_2 = m f_o$, где n и m - любые целые числа, f_o - исходная частота, на периоде которой надо исключить неоднозначность фазовых соотношений между f_1 и f_2 . Неоднозначность характеризуется произведением $n \cdot m$. Например, на комплексе ВЭШ-2 - ВЭШ-2М отношение частот обращения $\frac{f_{o1}}{f_{o2}} = \frac{3}{2}$, отношение частот ускоряющих напряжений $\frac{f_1}{f_2} = \frac{9}{24}$ Максимальная

возможная частота инъекции $f_o = \frac{f_{o1}}{3} = \frac{f_{o2}}{2} = 8,382$ МГц

... периоде этой частоты неоднозначность фазовых соотношений

между ускоряющими напряжениями характеризуется числом $N = 9 \cdot 24 = 216$. Для исключения неоднозначности в схеме содержатся системы фазировок между f_0 и $n f_0$, а также между f_0 и $m f_0$. Синхронизаторе осуществляется грубое сравнение по фазе между напряжениями частоты f_0 и точное между $n f_0$ и $m f_0$. Отметим, что описанная блок-схема достаточно универсальна и может быть применена при любых соотношениях частот f_1 и f_2 .

Второй особенностью систем синхронизации является использование стробоскопического способа преобразования временного масштаба, который значительно облегчает построение фазовых дискриминаторов, работающих при большом диапазоне амплитуд, а также создание дистанционно переключающихся опорных линий задержки (рис.6). Для этой цели используется гетеродин, работающий на частоте $f_r = f_0 + \Delta f$. Преобразование частот происходит в двухканальных импульсных смесителях. В них из напряжения

формируются короткие импульсы, спектр которых имеет полосу примерно 600 МГц. При смешивании таких импульсов с напряжениями частот $n f_0$ и $m f_0$ образуются частоты $n \Delta f$ и $m \Delta f$, которые выделяются фильтром низких частот. Коэффициент преобразования временного масштаба равен $K_t = \frac{f_0}{\Delta f}$. В нашем случае $K_t = 200$. Таким образом, измерение фазовых соотношений переносится из наносекундного диапазона в микросекундный. Синхронизаторы, работающие на комплексе, позволяют устанавливать и поддерживать фазовые соотношения между ускоряющими напряжениями с точностью $50 + 100$ пикосекунд. Чувствительность фазовых дискриминаторов практически не изменяется при изменении амплитуд напряжений в 200 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации аппаратуры управления для ускоряющей высокочастотной системы комплекса ВЭШ-2 ВЭШ-2М был использован опыт разработки и последующих модернизаций подобных систем для накопителей ВЭШ-2 и ВЭШ-3. Перечислим основные результаты данной работы.

1. Для стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения реализована схема с автоматическим ограничением уровня тока фидера.

2. Разработаны детектор амплитуды в.ч. сигнала, работа-

ющий в диапазоне входных амплитуд $0,1 + 10$ в и имеющий нестабильность коэффициента передачи на уровне $\frac{\Delta K}{K} = 10^{-3} + 10^{-4}$, и регулируемый резонансный усилитель-ограничитель с высокой линейностью регулирования и надежным запирающим в.ч. напряжением, применяемые в системах стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения.

3. Предложена и реализована схема автоматической перестройки собственной частоты ускоряющего резонатора по амплитуде тока питающего фидера с одновременной стабилизацией амплитуды ускоряющего напряжения, позволяющая работать в большом диапазоне обобщенных расстроек резонатора.

4. Предложена и реализована схема автоматической фазировки высокочастотных напряжений кратных частот.

5. Использовано стробоскопическое преобразование временного масштаба сигналов с помощью импульсных смесителей и гетеродина, сдвинутого по частоте по отношению к частоте обращения. Учитывая, что вся работа накопительного комплекса связана с частотами обращения, такой метод может оказаться удобным не только для фазовых измерений высокочастотных сигналов, но и в аппаратуре, контролирующей параметры пучка - размеры, положение, разделение по сепаратрисам.

В данной работе приведены статические характеристики основных элементов аппаратуры управления ускоряющей высокочастотной системой. Вопросы, связанные с устойчивостью работы подобных систем при наличии различных обратных связей, рассмотрены в [6], [7], [8].

Авторы благодарят Егоричева М.Н., Глухова В.Д., Артемова П.Н. и других сотрудников, принимавших участие в работе.

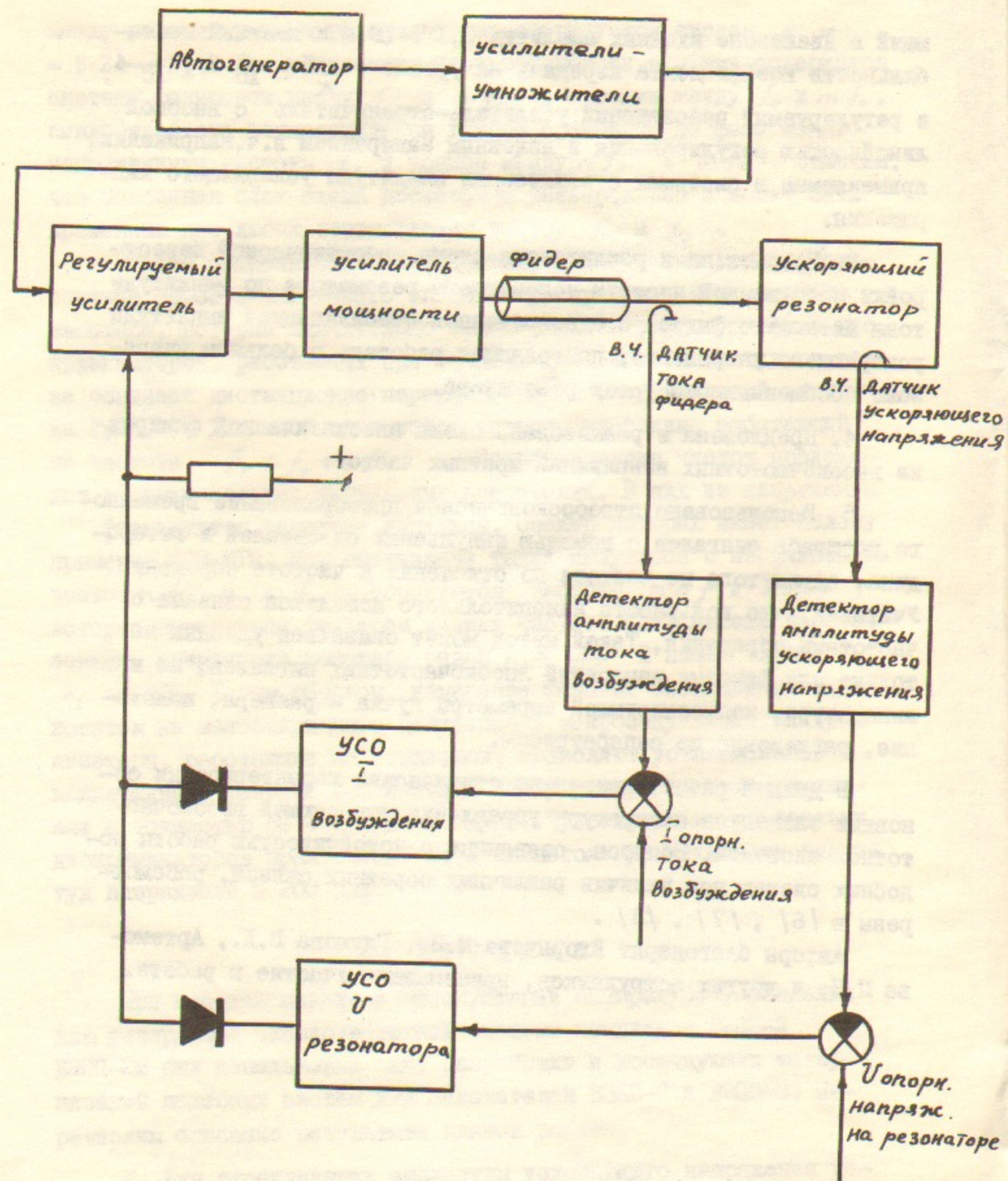


Рис.1. Схема стабилизации среднего уровня амплитуды ускоряющего напряжения.

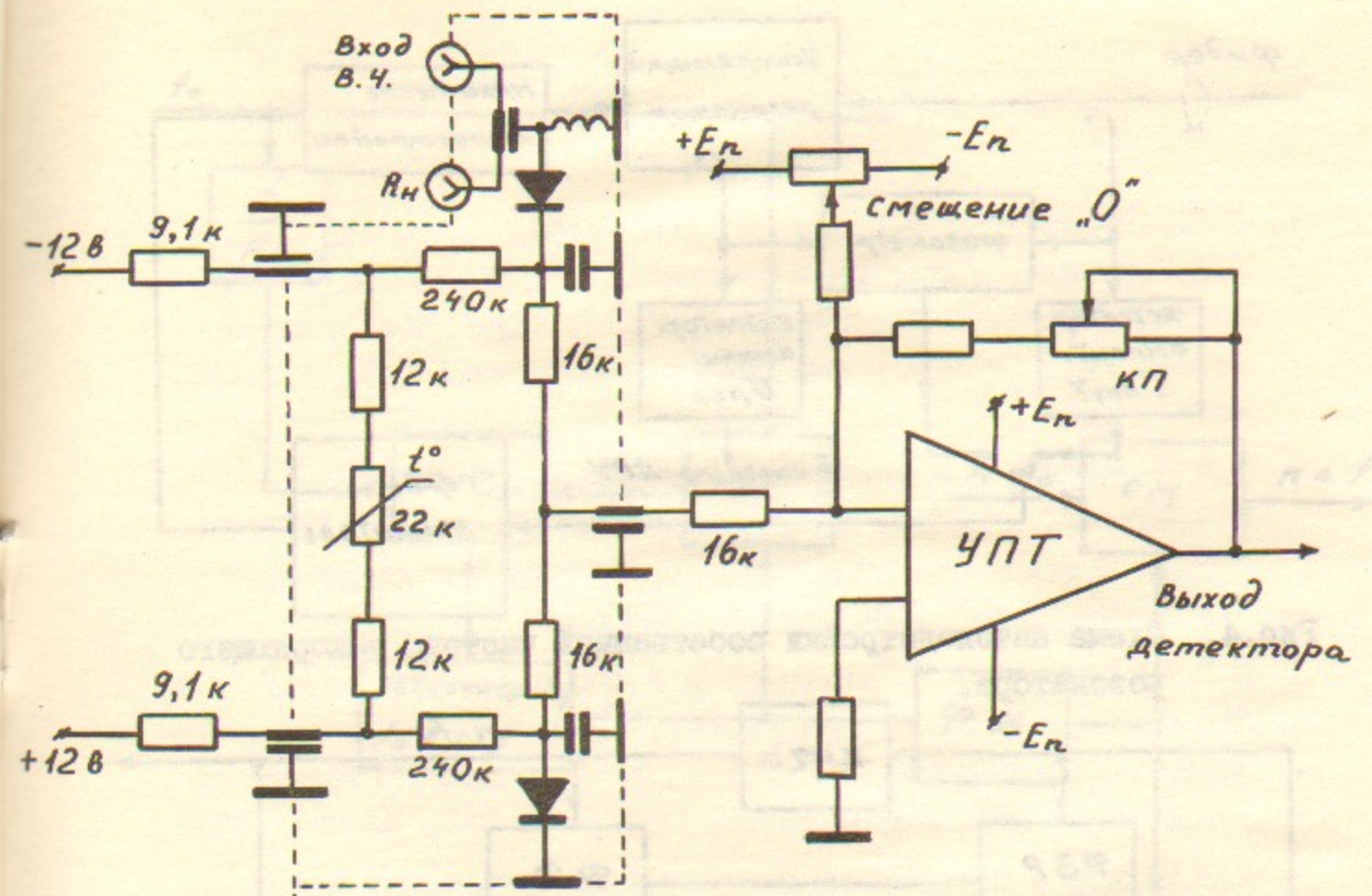


Рис.2. Детектор амплитуды в.ч. сигнала.

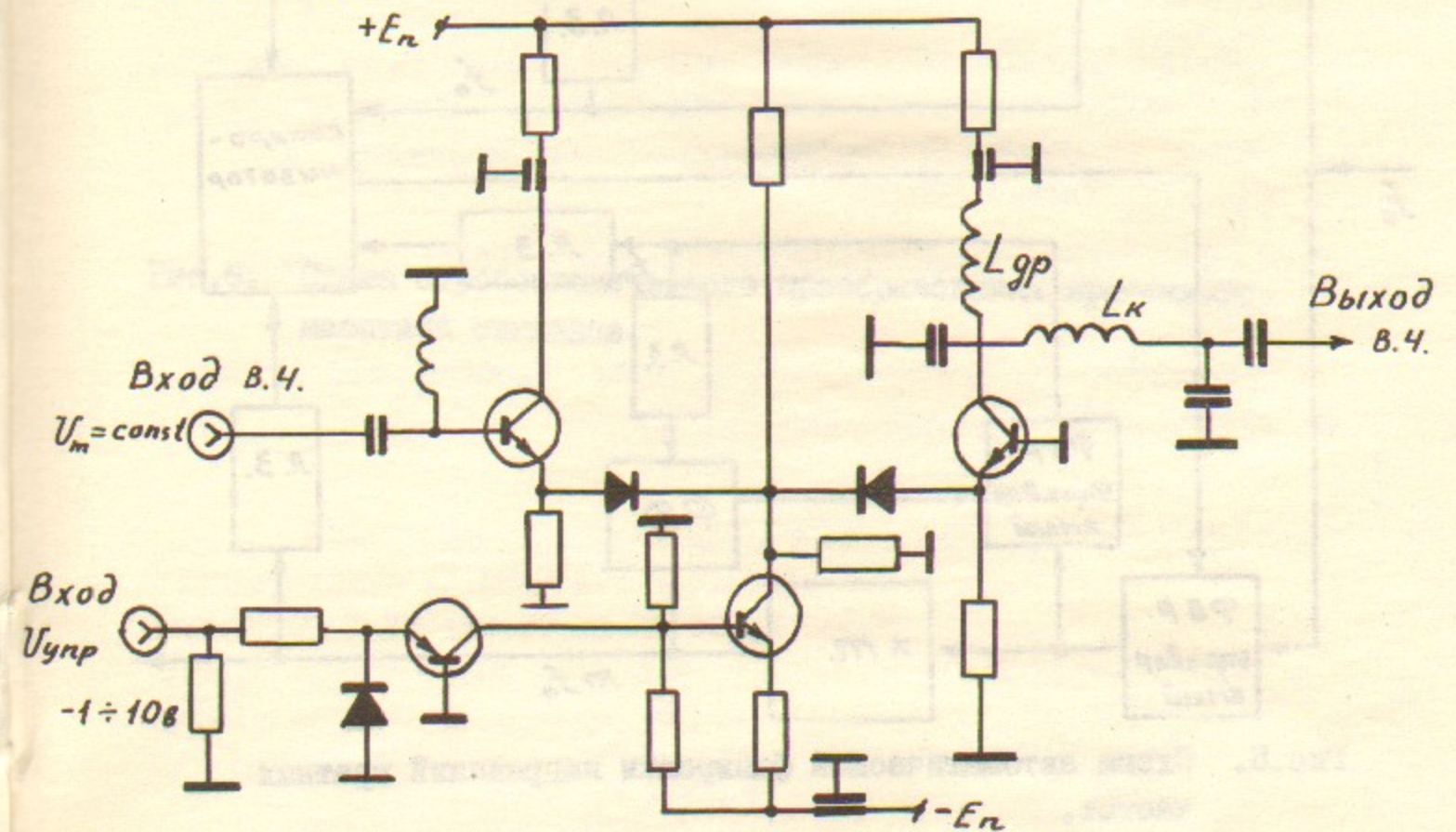


Рис.3. Резонансный регулируемый усилитель.

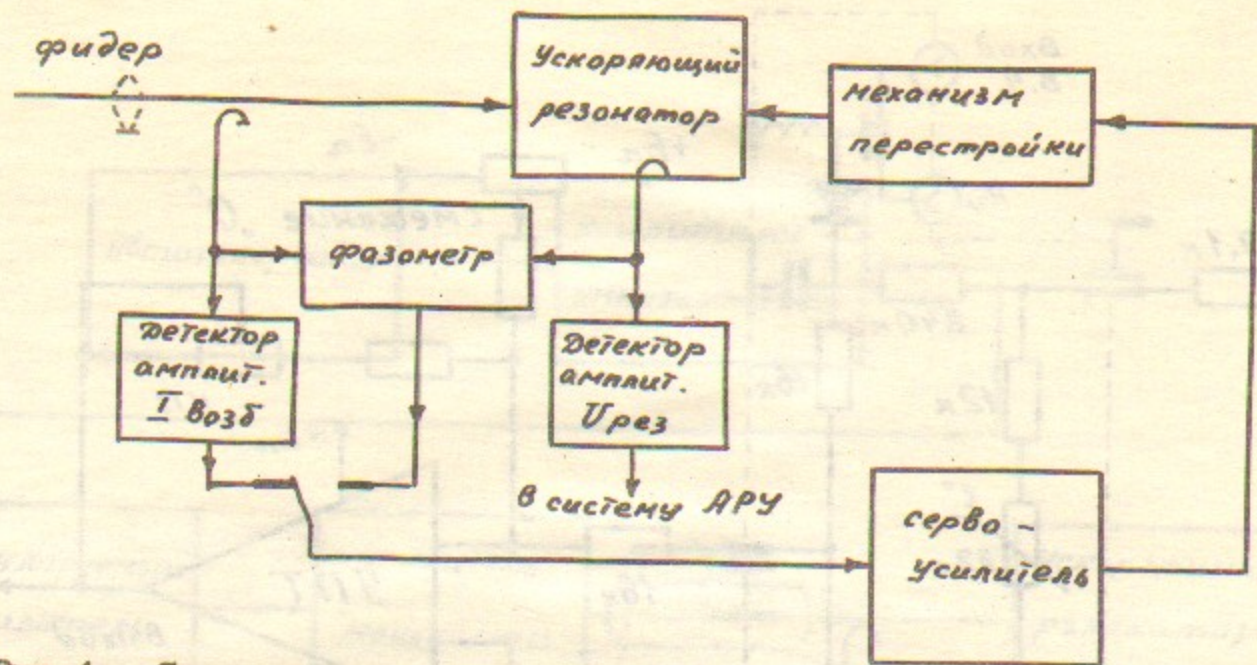


Рис.4. Схема автоподстройки собственной частоты ускоряющего резонатора.

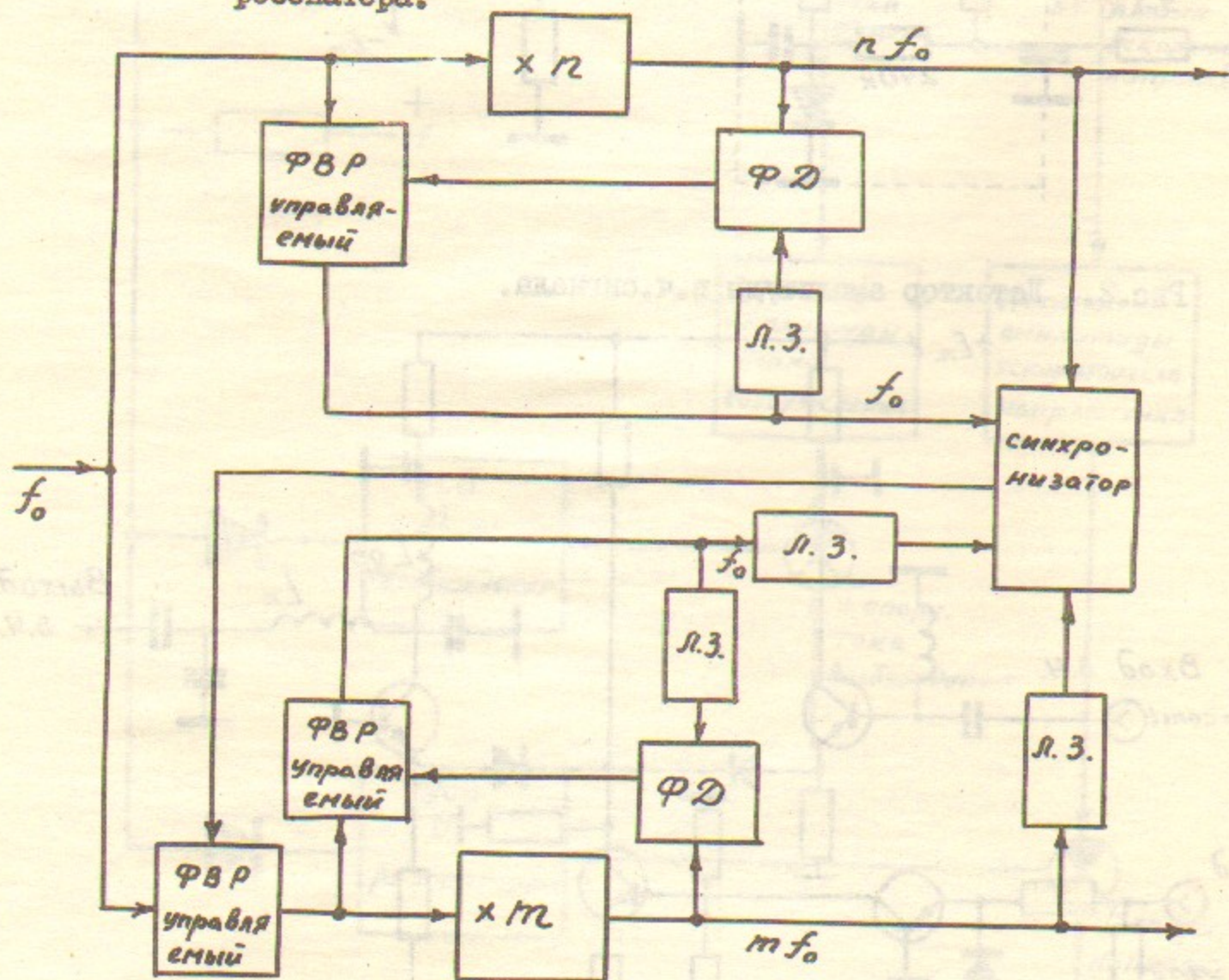


Рис.5. Схема автоматической фазировки напряжений кратных частот.

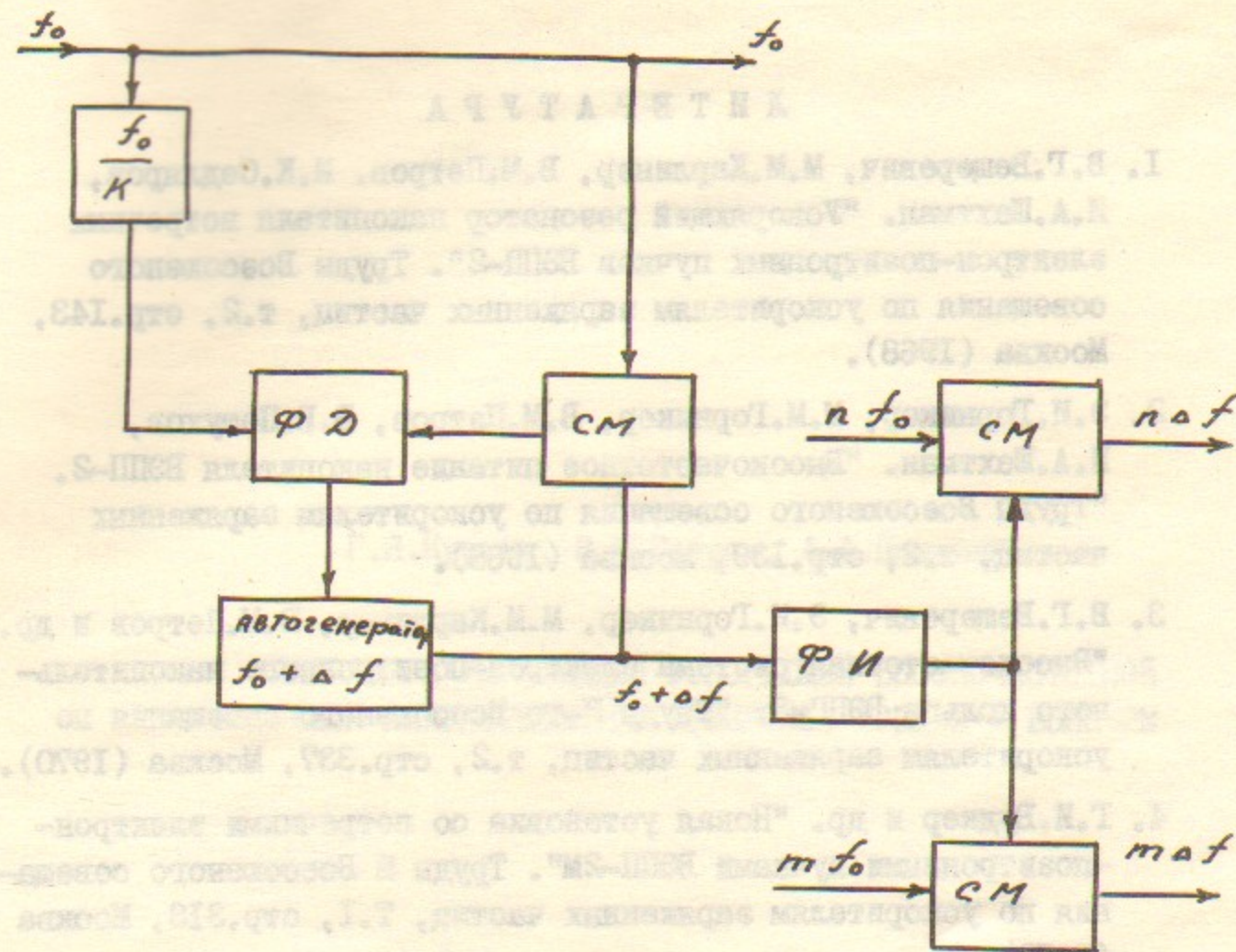


Рис.6. Схема стробоскопического преобразования временного масштаба сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г.Вещеревич, М.М.Карлинер, В.М.Петров, И.К.Седляров, И.А.Шехтман. "Ускоряющий резонатор накопителя встречных электрон-позитронных пучков ВЭП-2". Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, стр.143, Москва (1968).
2. Э.И.Горникер, М.М.Горникер, В.М.Петров, В.В.Петухов, И.А.Шехтман. "Высокочастотное питание накопителя ВЭП-2". Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, стр.139, Москва (1968).
3. В.Г.Вещеревич, Э.И.Горникер, М.М.Карлинер, В.М.Петров и др. "Высокочастотная система электрон-позитронного накопительного кольца ВЭП-3". Труды II-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, стр.337, Москва (1970).
4. Г.И.Будкер и др. "Новая установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭП-2М". Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Т.1, стр.318, Москва (1972).
5. Г.И.Будкер и др. "Состояние работ на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭП-2М". Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, стр.313, Москва (1974).
6. М.М.Карлинер, В.М.Петров, И.А.Шехтман. ЖТФ XXXIX, 1383 (1969 г.)
7. Г.Я.Куркин, В.М.Петров, И.К.Седляров. Препринт ИЯФ 77-81.
8. А.А.Полунин. Препринт ИЯФ 84-13.

Г.Я.Куркин, В.М.Петров, А.А.Полунин

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМОЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЭП-2 - ВЭП-2М

Препринт
№ 85-81

Работа поступила 13 мая 1985г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 21.06.85 г. МН 06687

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл. 0,9 печ.л., 0,8 учетно изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 81.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90