

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3768/2-80

11/8-80

P9-80-295

Л.В.Васильев, Ю.Н.Денисов, Б.Н.Марченко,
Т.Н.Томилина, П.Т.Шишлянников

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЧАСТОТНОЙ ПРОГРАММЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ
СИЛЬНОТОЧНОГО ФАЗОТРОНА ОИЯИ

1980

1. ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ /МЗЧ/ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Эффективность работы современного ускорителя в значительной мере зависит от оперативного контроля его параметров. Используемая ранее на синхроциклотроне ОИЯИ на 680 МэВ методика измерения мгновенного значения частоты /МЗЧ/ частотно-модулированного /ЧМ/ сигнала была громоздка, а определение первой производной \dot{f} было возможно только расчетным путем^{/1/}.

В последние десятилетия техника измерения частоты развивается преимущественно по линии создания электронно-счетных частотомеров, способных с большой точностью автоматически производить измерение частоты в диапазоне от долей герца /измеряется период колебаний/ до сотен мегагерц. Однако все стандартные и большинство оригинальных приборов пригодны, как правило, для измерения постоянной /в течение времени измерения/ частоты. Импульсный частотомер^{/2/}, разработанный для измерения постоянной частоты быстрозатухающего сигнала, в принципе пригоден для измерения МЗЧ ЧМ-сигнала только в том случае, если его использовать в совокупности с устройствами, задающими и измеряющими координату сканирования. Измеритель производной частоты, разработанный для синхроциклотрона ЦЕРНа^{/3/}, не обеспечивает одного из важнейших требований к такому прибору - с его помощью нельзя производить измерений ближе чем на 0,5 МГц от верхней и нижней границ диапазона, т.е. на самых интересных участках частотной программы /при частотах захвата и вывода частиц/.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для создаваемого высокоточного фазотрона были специально разработаны измерители параметров частотной программы ВЧ системы ускорителя^{/2/}, отвечающие требованиям точности и оперативности измерений. Эти приборы прошли всесторонние длительные эксплуатационные испытания на синхроциклотроне ОИЯИ и показали высокую надежность в работе.

Измерение мгновенного значения частоты.

Оценка ошибок измерения

Период модуляции исследуемого ЧМ-сигнала стабилизирован до сотых долей процента $/1 \cdot 10^{-4}/$, поэтому при измерении МЗЧ относительная погрешность в любом случае не может быть лучше $+1 \cdot 10^{-4}$.

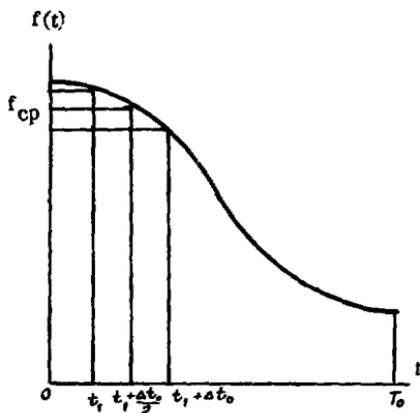


Рис.1. Примерная зависимость $f(t)$. Δt_0 - интервал сканирования, T_0 - рабочая часть цикла ускорения.

На рис.1 изображена приблизительная зависимость $f(t)$. Рабочий участок частотной программы, ограниченный интервалом времени T_0 , представляет собой монотонную убывающую функцию, которую можно интерполировать на достаточно малом интервале $/t_1, t_1 + \Delta t_0 /$ в виде ряда Тейлора:

$$f(t_1 + x) = f(t_1) + \dot{f}(t_1)x + \frac{\ddot{f}(t_1)x^2}{2!} + \dots \quad /1.1/$$

где $0 \leq x \leq \Delta t_0$.

Определим значение функции f_{cp} в интервале $(t_1, t_1 + \Delta t_0)$:

$$f_{cp} = f(t_1) + \dot{f}(t_1) \frac{\Delta t_0}{2} + \frac{\ddot{f}(t_1) \Delta t_0^2}{6} + \dots \quad /1.2/$$

При линейной интерполяции систематическая ошибка δ определяется третьим членом в разложении /2/:

$$\delta = \frac{\ddot{f}(t_1) \Delta t_0^2}{6} \quad /1.3/$$

Из выражения /1.3/ по заданной погрешности МЗЧ $1 \cdot 10^{-4}$ и по известной для синхроциклотрона величине $\ddot{f}(t) = 0,5 \text{ МГц/мс}^2$ * можно определить порядок величины интервала сканирования Δt_0 . Для нижней частоты диапазона $\delta = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 14 \cdot 10^6 = 1400 \text{ Гц}$ при этом $\Delta t = (6\delta)^{1/2} \ddot{f}(t)^{-1/2} \approx 130 \text{ мкс}$. Поскольку суммарная ошибка измерения складывается из погрешности интерполяции и погрешностей измерения, то необходимо стремиться уменьшить систематическую ошибку. Если выбрать интервал $\Delta t_0 = 100 \text{ мс}$, получим величину относительной систематической ошибки $0,4 \cdot 10^{-4}$, что вполне допустимо. Уменьшение Δt_0 в 10 раз, естественно, приведет к уменьшению систематической ошибки в 100 раз, однако этого не требует заданная точность измерения и, кроме того, как будет указано ниже, неоправданно усложнит технику измерения.

* Для сильноточного фазотрона $\ddot{f}(t) \leq 0,5 \text{ МГц/мс}^2$.

Если в основу измерителя МЗЧ положить электронно-счетное устройство с задающим генератором, стабилизированным кварцем, то при заданной погрешности измерения МЗЧ можно не учитывать разброс начальной установки частоты кварцевого генератора, на основе которого формируется эталонный интервал сканирования Δt_0 , т.к. погрешность начальной установки его частоты и нестабильность колебаний даже без термостатирования и стабилизации источников питания внесут незначительный вклад в погрешность измерения $/1 \cdot 10^{-8} /$.

Электронно-счетный частотомер фиксирует число колебаний за выбранный эталонный интервал времени Δt_0 с точностью до одного периода:

$$A = \int_{t_2}^{t_1 + \Delta t_0} f(r) = f_{\text{ср}} \Delta t_0 \pm 1 \quad /1.4/$$

/обозначения см. на рис.1/. Если $\Delta t_0 = 10^{-k}$ с, где k - целое положительное число, то результат счета A без переводных коэффициентов соответствует МЗЧ.

К сожалению, однократное прохождение Δt_0 не позволяет получить нужной точности измерения. Действительно,

$$\frac{1}{f_{\text{ср}} \Delta t} = \frac{1}{14 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 0,7 \cdot 10^{-8}.$$

Преодоление трудностей, связанных с величиной ошибки измерения из-за ограниченного времени сканирования Δt_0 , осуществлено таким же способом, как и в работе ^{/2/}, т.е. путем усреднения результатов за n циклов. В этом случае частотомер фиксирует число

$$B = nA \pm \sqrt{n}. \quad /1.5/$$

Для конкретного случая достаточно иметь $n=100$ /измерение в одной и той же точке за 100 циклов ускорения без сброса показаний частотомера/:

$$B = 100A \pm 10. \quad /1.6/$$

Естественно, младший десятичный разряд нет смысла принимать во внимание, поэтому в блоке счетных декад первая декада не индицируется и результат измерений регистрируется в виде

$$\bar{A} = 10f_{\text{ср}} \Delta t_0 \pm 1. \quad /1.7/$$

Для нижней частоты диапазона $f = 14,0$ МГц показания счетчика будут следующими:

$$\bar{A} = 10 \cdot 14 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \pm 1 = 14000 \pm 1. \quad /1.8/$$

и ошибка измерения меньше $0,7 \cdot 10^{-4}$. Для привязки измеренных МЗЧ к координате t запуск частотомера необходимо производить сиг-

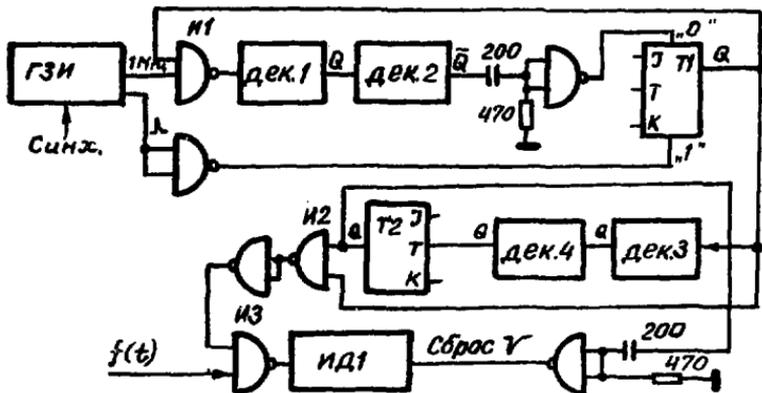


Рис.2. Функциональная схема измерителя мгновенного значения частоты /МЗ4/.

налами, задержанными относительно начала частотной программы. Эта задержка должна быть прецизионной и регулируемой в пределах всей рабочей части периода модуляции.

Измеритель мгновенного значения частоты

Функциональная схема измерителя МЗ4 представлена на рис.2. Необходимая задержка t_3 запуска формирователя ворот с длительностью импульса $\Delta t_0 = 100$ мкс относительно стартовых импульсов обеспечивается цифровым генератором задержанных импульсов /ГЗИ/. Формирователь импульсов ворот включает в себя декадные счетчики Дек.1 и Дек.2, триггер Т1 и схему совпадений И1, на один из входов которой поступают импульсы с частотой 1 МГц. Частота генератора на 1 МГц стабилизирована кварцевым резонатором.

С целью улучшения точности измерений осуществлен режим усреднения /накопления/ измерений за сто циклов ускорения. Создание последовательности из ста импульсов ворот /"гребенка"/ обеспечивается следующим образом: декадные пересчетные схемы Дек.3 и Дек.4, а также триггер Т2, работающий в счетном режиме, формируют периодически дополнительные импульсы ворот, длительность которых равна точно ста периодам ускорения.

На выходе схемы совпадений И2 получается последовательность из ста импульсов ворот, которая управляет ключевой схемой И3. Дифференцированный и инвертированный сигнал с выхода Т2 используется для сброса индицируемого счетчика в нулевое состояние.

Этот импульс появляется за 100 мкс до начала первого импульса ворот гребенки. Между гребенками импульсов образуется мертвое время, также равное ста циклам ускорения, которое используется как время индикации результатов измерений. Таким образом, измеритель МЗЧ работает в режиме периодического запуска. При работе на синхроциклотроне частота запуска составляет 0,8 Гц / время измерения и время индикации одинаковы и равны 0,6 с/.

Блок индицируемых декад выполнен на базе отдельных декад или декад, построенных на $j-k$ триггерах. В качестве индикаторов используются неоновые лампы типа ИИ-2 или сегментные светодиодные индикаторы. Функциональная схема ГЗИ представлена на рис.3. Минимальный шаг перестройки задержки составляет 1 мкс, максимальное время задержки - 10 мс.

В качестве задержанного импульса используются импульсы переноса на выходе декады Дек.4. Начало отсчета времени задержки определяется стартовым импульсом "Синх", переводящим триггер Т в состояние "1". Этот триггер в свою очередь управляет ключевой схемой И1. Регулировка задержки осуществляется посредством изменения исходного состояния декадного счетчика /4/. Схема одной декады такого счетчика вместе с переключателем, регулирующим ее начальное состояние, изображена на рис.4.

Стартовый сигнал "Синх" совпадает с началом частотной программы. С учетом того, что измеренное МЗЧ привязано к середине интервала $\Delta t_0 = 100$ мкс, результат измерений относится к координате

$$t = (t_3 + 50) \text{ мкс}, \quad /1.9/$$

где t_3 определяется положением ручек переключателя.

Импульсы ворот в приборе выведены на разъем, расположенный на задней стенке прибора, и могут быть использованы для свечивания точки измерения, если высокочастотное напряжение наблюдается на экране осциллографа.

Выводы

1. Измеритель МЗЧ /рис.5/ в течение нескольких последних лет использовался на синхроциклотроне ОИЯИ при снятии ВЧ характеристик перед ревизией и наладке ускорителя после ревизии.

2. Оперативные измерения частоты, которые стали возможны благодаря измерителю МЗЧ, позволили сформировать амплитудно-частотную характеристику ВЧ системы синхроциклотрона для ускорения пучка без фазовых потерь при минимальной потребляемой мощности /5/. Для формирования амплитуды ускоряющего напряжения в этом эксперименте использовался анодный модулятор, созданный для установки "Ф" /6/.

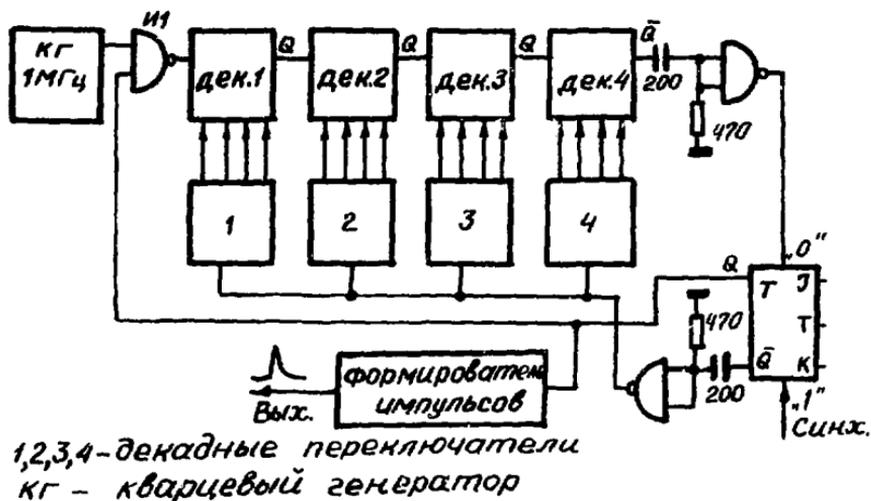


Рис. 3. Функциональная схема генератора задержанных импульсов /ГЗИ/.

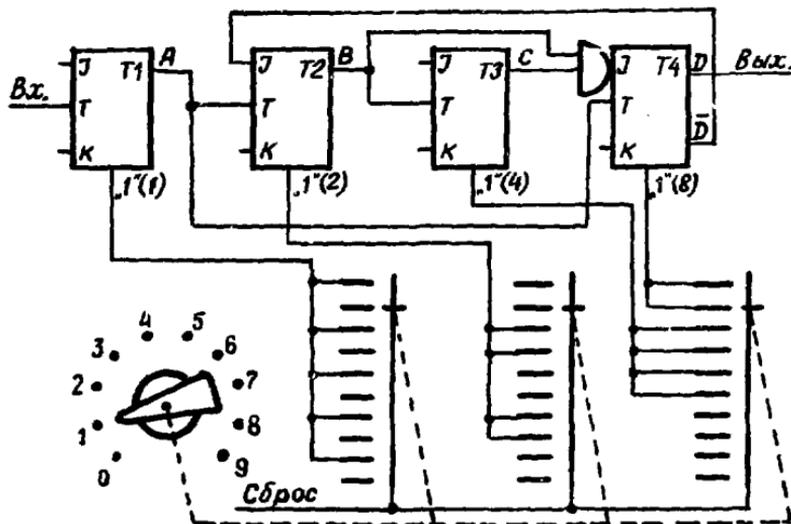


Рис. 4. Декада с регулируемым исходным состоянием.

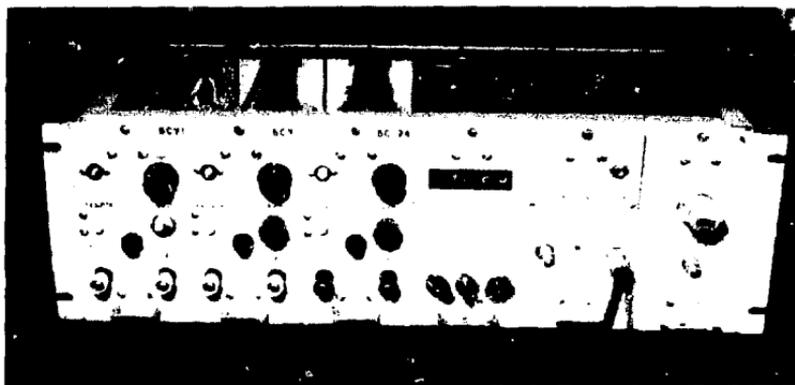


Рис.5. Общий вид измерителя МЗ4 /блок с индикационным табло/ в комплекте с задающим генератором растяжки ускоренного пучка.

3. Измеритель МЗ4 использовался для контроля частоты при настройке и эксплуатации системы растяжки протонного пучка при помощи С-электрода, а также во время работы по повышению эффективности и стабильности растянутого пучка^{/7/} при формировании частотной программы задающего ВЧ генератора С-электрода.

4. Уменьшение погрешности измерения МЗ4 сопряжено с уменьшением интервала сканирования и, соответственно, увеличением времени измерения.

Следует, однако, иметь в виду, что дальнейшее повышение точности прибора, предназначенного для работы на сильноточном фазотроне ОИЯИ, не имеет большого смысла, т.к. указанная точность порядка $+10^{-4}$ уже несколько лучше, чем требуется, поскольку нестабильность частотной программы ВЧ системы больше 10^{-4} .

11. ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ЧАСТОТЫ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

При измерении мгновенного значения частоты частотно-модулированного сигнала желательно иметь возможность фиксировать величину производной частоты в точке измерения. Этот прибор был создан и в течение двух лет использовался при исследованиях на синхроциклотроне для контроля его параметров.

По определению, первая производная функции

$$\dot{f}(t) = \frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t} \quad /2.1/$$

Электронно-счетные устройства способны зарегистрировать разность частот только при конечном и достаточно большом значении Δt , т.е. вычисление производной может быть только приближенным.

Поскольку функция $f(t)$ гладкая, с экстремумами только на концах частотной программы, то для $\Delta t < T$ согласно теореме Лагранжа

$$\frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t} = \dot{f}(\xi), \quad /2.2/$$

где ξ принадлежит интервалу $(t, t+\Delta t)$ и является единственной.

Выше было отмечено, что в любой точке зависимости $f(t)$ можно измерить МЗЧ с точностью не хуже $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, если реализовать синхронное /или даже раздельное/ измерение МЗЧ в точках $t+\Delta t$ и t , то, выбрав определенное Δt и осуществив вычисление разности МЗЧ, можно определить производную частоты, которая будет лежать внутри интервала Δt .

Чтобы обеспечить определенность вычисленного значения, необходима с допустимой точностью его привязка к координате t . Если Δt соизмерима с Δt_0 , то систематическая погрешность привязки измеренного значения производной к середине интервала $(t, t+\Delta t)$ будет значительно меньше, чем в случае измерения МЗЧ. Действительно, если погрешность привязки МЗЧ в основном определяется квадратичным членом разложения, то привязка производной к середине определяется членами более высокого порядка, так как для квадратичной функции соотношение

$$\xi = t + \frac{\Delta t}{2} \quad /2.3/$$

будет выполняться точно. Графически это иллюстрируется на рис.6.

Принцип действия и требования к прибору

Электронно-счетный измеритель первой производной осуществляет:

1. Измерение разности мгновенных значений частоты, определенных в точках t и $t+\Delta t$.

Рис.6. Графическая иллюстрация выражения $\xi = t_1 + \Delta t_0/2$ для полинома второго порядка.

2. Обеспечение задержки для запуска измерителя производной. Задержка должна быть регулируемой в диапазоне от 0 до T с заданным минимальным шагом.

3. Получение результата измерений величины производной без переводного коэффициента, для чего необходимо выбрать соответствующую величину времени сканирования для определения МЗЧ и временного разнота точек измерения.

Схемное решение измерителя производной может быть выполнено в различных вариантах /рис.7/:

а/ время разнота Δt меньше времени сканирования измерителей МЗЧ. Общее время сканирования /в одном цикле ускорения/ $t_0 < 2\Delta t_0$. Разрешающая способность наименьшая. Применение реверсивного счетчика невозможно. t_0 - минимально;

б/ время разнота Δt больше Δt_0 ; $t_0 > 2\Delta t_0$. Разрешающая способность наилучшая. Возможно применение реверсивного счетчика, так как мертвое время t_M можно использовать для перевода счетчика в режим вычитания. t_0 - максимально;

в/ время разнота $\Delta t = \Delta t_0$; $t_0 = 2\Delta t_0$. Разрешающая способность средняя. Автоматически отпадает надобность

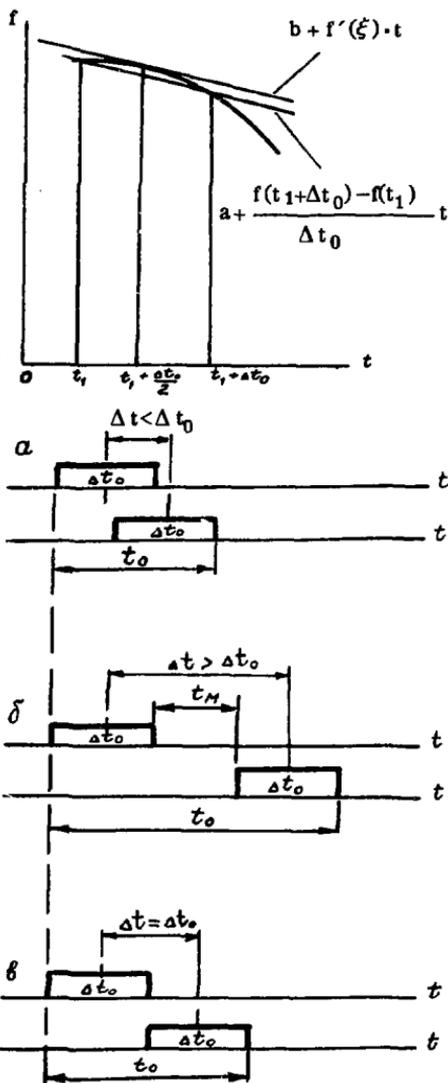


Рис.7. Возможные варианты выбора разнота по времени измеренных МЗЧ при определении производной.

в переводном коэффициенте, t_0 - среднее. Применение реверсивного счетчика затруднено.

При этом предполагается, что измерение МЗЧ /с оговоренной выше точностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ / производится при $\Delta t_0 = 100$ мкс и $n = 100$.

Основными характеристиками прибора являются его разрешающая способность и общее время сканирования t_0 . Наиболее оптимальным является вариант "в", так как при этом достигается достаточно высокая разрешающая способность прибора при небольшом t_0 . Ограничение на t_0 связано с тем, что выбранная методика не позволяет производить измерений производной в точке, отстоящей от верхней или нижней границы частотной программы на интервал меньше чем $t_0/2$.

Несинхронное измерение МЗЧ /например, в первых ста циклах измеряется МЗЧ(t), в последующих ста циклах - МЗЧ($t + \Delta t_0$) / является нерациональным хотя бы потому, что время измерения удваивается.

Техническая реализация измерителя производной

Функциональная схема измерителя представлена на рис.8. Здесь ГЗИ - генератор задержанных импульсов; ИД-2 - индицируемый счетчик, представляющий собой два декадных счетчика, работающих независимо друг от друга, но имеющих общую индикацию; ДС1 и ДС2 - двоичные счетчики.

Декада 1, верхняя половина ИД2 и ДС1 соединены последовательно и представляют собой пересчетный регистратор мгновенного значения частоты в точке t . Декада 2, нижняя половина ИД2 и ДС2 представляют собой аналогичный регистратор мгновенного значения частоты в точке $t + \Delta t_0$. Информация на эти регистраторы поступает через ключевые схемы И1 и И2, управляемые генератором временных интервалов ГВИ. Схема ГВИ достаточно сложна, поэтому она представлена отдельно на рис.9. Назначение ГВИ заключается в том, чтобы создать два канала последовательности /"гребенки"/ из ста импульсов ворот Δt_0 в каждом канале, обеспечить паузу для съема информации /время индикации/, а также обеспечить сброс информации перед очередным измерением, выработать сигнал "А", назначение которого будет описано ниже. Гребенка импульсов ворот Δt_0 для первого регистратора обозначена символом В1 и представляет собой последовательность из ста импульсов с длительностью ворот 100 мкс. Эти импульсы формируются с помощью Дек.1, Дек.2, Т1, Т2 и И2. Начало этих импульсов задержано на t_3 с помощью ГЗИ. Гребенка В2 формируется аналогично, однако ее импульсы задержаны на $t_3 + 100$ мкс/ элементы схемы те же, но вместо И2 используется И3/. Протяженность гребенок определяется декадами Дек.4, Дек.3 и Т3. Сиг-

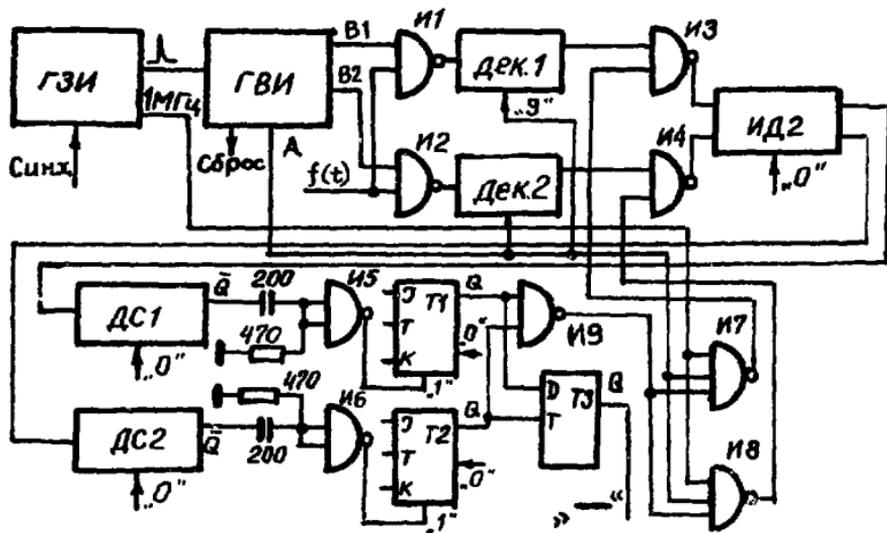


Рис. 8. Функциональная схема измерителя производной.

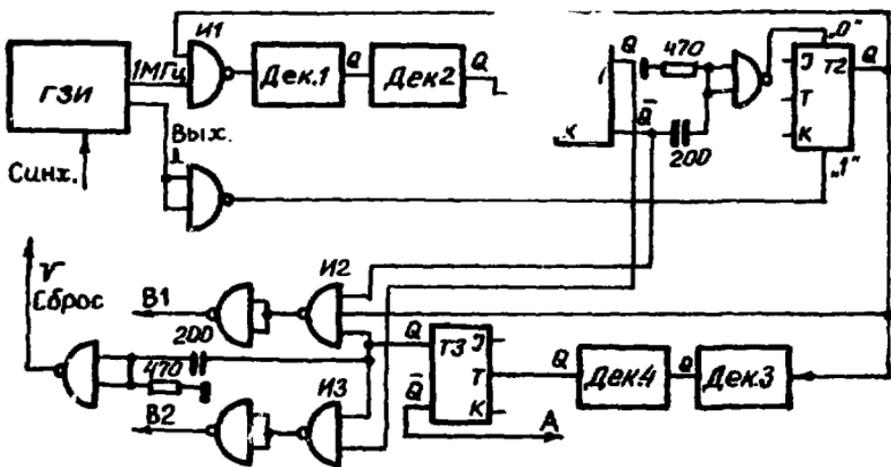


Рис. 9. Генератор временных интервалов /ГВИ/.

нал А представляет собой инвертированный импульс расширенных ворот. Он имеет нулевой уровень, когда вырабатываются гребенки, и высокий уровень, когда наступает пауза /режим индикации/. Импульсы сброса элементов схемы в исходное состояние вырабатываются перед началом каждой очередной пары гребенок. Поскольку В1 опережает В2 на 100 мкс, в верхнем регистраторе будет зафиксировано МЗЧ (t), а в нижнем - МЗЧ (t+Δt₀). Описанная схема ГВИ позволяет не только зафиксировать два значения МЗЧ, но и автоматически вычислить их разность без использования реверсивных счетчиков /их применение, как было отмечено, затруднено из-за того, что t_М = 0 /.

Рассмотрим логику измерения разности МЗЧ /рис.8/. В качестве элементов схемы используются микросхемы 155 серии /8,9/. Пересчетные декады этой серии имеют установочный вход "Сброс на 9" /кроме установочного входа "Сброс на 0"/. Если на этот вход подать высокий потенциал, декада устанавливается в положение "9", при этом на ее выходе также будет высокий потенциал. Кроме того, если высокий потенциал не снимается с установочного входа, то вход декады будет заблокирован.

Сигнал "Сброс" устанавливает элементы схемы в исходное состояние, как показано на рис.8. Сигнал "А" принимает нулевой уровень, блокируя прохождение сигналов с частотой 1 МГц через ключевые схемы И7 и И8 и деблокируя декады Дек.1 и Дек.2 /непосредственно/ и И3 и И4 /через И7 и И8/. Таким образом, оба регистратора готовы к приему информации. В течение ста циклов через схемы И1 и И2 на регистраторы поступает информация f(t). После этого сигнал "А" принимает высокий уровень, и сигнал f(t) перестает поступать в регистраторы /декады Дек.1 и Дек.2 заблокированы/. Объем каждого регистратора несколько больше максимально возможного значения МЗЧ, поэтому их переполнение невозможно и триггеры Т1 и Т2 останутся в нулевом состоянии. При этом ключевые схемы И7 и И8 начинают пропускать сигналы с частотой 1 МГц на входы И3 и И4, так как выход И9 и сигнал "А" имеют высокий уровень. В это время схемы И3 и И4 также деблокированы /выходы декад Дек.1 и Дек.2 имеют высокий уровень/, поэтому импульсы с частотой 1 МГц начнут синхронно поступать на оба регистратора. Эта операция будет продолжаться до тех пор, пока триггеры Т1 и Т2 не перейдут в состояние "1". При этом, разумеется, предполагается, что регистраторы переполнятся значительно раньше, чем сигнал "А" примет низкий уровень. Последним заполнится регистратор, в котором было записано меньшее МЗЧ. Последним перейдем в состояние "1" соответствующий триггер /Т1 или Т2/, возбуждаемый сигналом переноса регистратора. После этого регистраторы оказываются заблокированными как по каналу f(t), так и по каналу 1 МГц. Очевидно, что регистратор с меньшим МЗЧ в момент общей блокировки оказывается в нулевом состоянии:

$$MЗЧ_{\min} + K = 0, \quad /2.4/$$

где K - количество импульсов, поступивших по каналу 1 МГц. Так как и на второй регистратор поступило K импульсов и $MЗЧ_{\max} = MЗЧ_{\min} + \Delta MЗЧ$, то во втором регистраторе окончательное число будет таким:

$$C = \Delta MЗЧ = MЗЧ_{\max} - MЗЧ_{\min}. \quad /2.5/$$

Таким образом, блокировка регистраторов по обоим каналам соответствует тому, что регистратор с меньшим МЗЧ оказывается "пустым", а во втором регистраторе остается информация, численно совпадающая с разностью измеренных МЗЧ. Если счетчик ИД2 выполнить из декад, работающих на общую индикацию через схемы ИЛИ-НЕ-НЕ, как показано на рис.10, то "пустые" декады не будут мешать индикации состояния декад с ненулевой информацией. Первые декады обоих регистраторов не индицируются по той же причине, что и в измерителе МЗЧ. Последние элементы регистраторов выполнены в виде двоичных пересчетных схем, так как разность МЗЧ занимает не более трех десятичных разрядов. Считаю, что разность частот фиксируется с точностью ± 2 единиц младшего разряда, абсолютная ошибка измерения производной составляет ± 20 кГц $мс^{-1}$ /изменение частоты на ± 2 кГц за 100 мкс/.

Триггер Т3 /Д-триггер/ является дискриминатором знака производной. Если $MЗЧ(t) > MЗЧ(t + \Delta t_0)$, то производная отрицательна. В этом случае выходной сигнал "1" с триггера Т1 поступит на вход Д триггера Т3 раньше, чем такой же сигнал придет с выхода Т2 на синхровход Т3. При этом выходной сигнал Т3 будет иметь высокий уровень, которым высвечивается знак "Минус".

Координата, в которой производится измерение производной, определяется по формуле

$$t = (t_3 + 100) \text{ мкс}, \quad /2.6/$$

где t_3 - выбранная величина задержки.

Выводы

1. Абсолютная ошибка измерения производной составляет ± 20 кГц $мс^{-1}$.

2. При использовании промежуточного запоминающего регистра, связанного, например, с регистратором МЗЧ(t), измеритель производной можно превратить в комбинированный прибор, совмещающий в себе функции измерителя МЗЧ и производной.

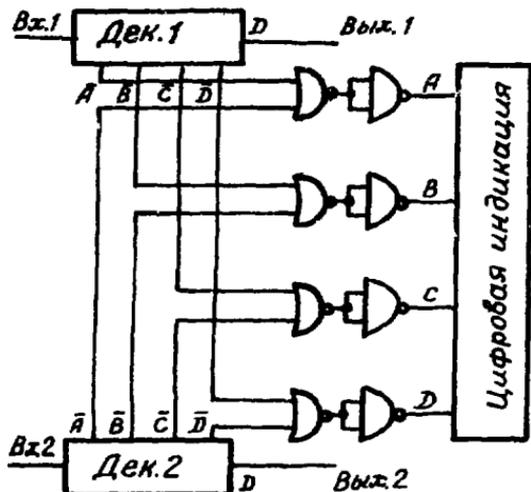


Рис.10. Схема связи счетных декад с индикацией, фиксирующей разность частот /дескадный элемент ИД2/.

3. Измерение параметров частотной программы ВЧ систем со значительно большими длительностями цикла /например, на синхротронах/ при помощи прибора производится без накопления информации за 100 циклов ускорения, а необходимая точность измерений достигается путем увеличения времени сканирования. Последнее обеспечивается посредством деления опорной частоты 1 МГц с помощью пересчетных элементов, выполнявших ранее функцию усреднения измерений.

Авторы признательны Л.М.Онищенко, В.П.Дмитриевскому, В.И.Данилову за внимание к работе, дежурному персоналу пульты управления синхротрона ОИЯИ за ценные замечания, позволившие значительно улучшить эксплуатационные характеристики приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Енчевич И.Б., Томилина Т.Н. ОИЯИ, Р9-3970, Дубна, 1968.
2. Новиков Д.Л., Онищенко Л.М., Шишлянников П.Т. ПТЭ, 1972, 4, с.21.
3. Blandamura F. et al. CERN, 70-28, Geneva, 1970.

4. Денисов Ю.Н. и др. ПТЭ, 1966, 3, с.107.
5. Онищенко Л.М., Сафонов А.Н. ОИЯИ, Р2-12128, Дубна, 1979.
6. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, Р9-12620, Дубна, 1979.
7. Марченко Б.Н., Томилина Т.Н., Яковлев В.А. ОИЯИ, Р9-12621, Дубна, 1979.
8. Шабашов М.Ф., Яник Р. ОИЯИ, 11-7564, Дубна, 1973.
9. Якубовский С.В. и др. Аналоговые и цифровые интегральные схемы. "Советское радио", М., 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 апреля 1980 года.