

## Глава 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 1.1. Структурная схема и принцип действия измерителя амплитудно-частотных характеристик

Важнейшей характеристикой четырехполюсника, особенно часто используемой при анализе и синтезе радиотехнических цепей, является зависимость его коэффициента передачи от частоты

$$\dot{K}(i\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (1.1)$$

где  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  — комплексные амплитуды входного и выходного напряжения четырехполюсника соответственно.

Коэффициент передачи удобно представить в следующей форме:

$$\dot{K}(i\omega) = K(\omega)e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1.2)$$

Модуль  $K(\omega)$  часто называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) четырехполюсника, аргумент  $\varphi(\omega)$  — фазочастотной характеристикой четырехполюсника.

Экспериментально АЧХ можно получить следующим образом. На вход четырехполюсника подается синусоидальное напряжение известной частоты  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  и амплитуды  $U_1(\omega)$ . Измерив амплитуду

выходного напряжения  $U_2(\omega)$ , можно вычислить значение АЧХ

для частоты  $\omega$   $K(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)}$ . Изменяя частоту и повторяя все

операции, можно построить полную АЧХ четырехполюсника.

Процесс снятия АЧХ можно несколько упростить, если амплитуду подаваемого напряжения поддерживать одной и той же для всех частот. Тогда с точностью до постоянного множителя зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты повторяет АЧХ четырехполюсника.

Но и в этом случае процесс снятый характеристик весьма трудоемок и особенно неудобен при настройке четырехполосника с целью получения заданной АЧХ, когда всю процедуру необходимо повторять после каждого изменения элемента настройки. Снижение трудоемкости и ускорение процесса снятия АЧХ достигается применением специальных приборов — измерителей частотных характеристик (ИАЧХ).

ИАЧХ — прибор, содержащий генератор качающейся частоты (ГКЧ) с плавным изменением частоты и осциллографический индикатор, обеспечивающий визуальное наблюдение АЧХ и измерение их параметров.

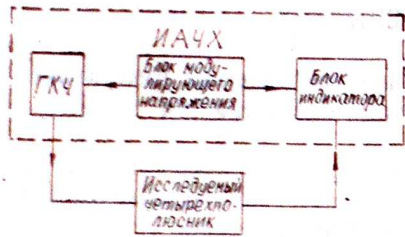


Рис. 1.1. Структурная схема измерения АЧХ четырехполосника

Структурная схема ИАЧХ представлена на рис. 1.1. Качание частоты ГКЧ осуществляется пилообразным напряжением, которое в простейшем случае совпадает по форме с напряжением), горизонтального отклонения луча индикатора (рис. 1.2, д). Перемещение луча вдоль горизонтальной оси экрана происходит синхронно с изменением частоты ГКЧ (рис. 1.2, а). Частотно-модулированное напряжение постоянной амплитуды  $U_{вх}$  с ГКЧ (рис. 1.2, б) подается на вход исследуемого четырехполосника. Каждому значению меняющейся частоты входного сигнала соответствует определенный коэффициент передачи, поэтому амплитуда

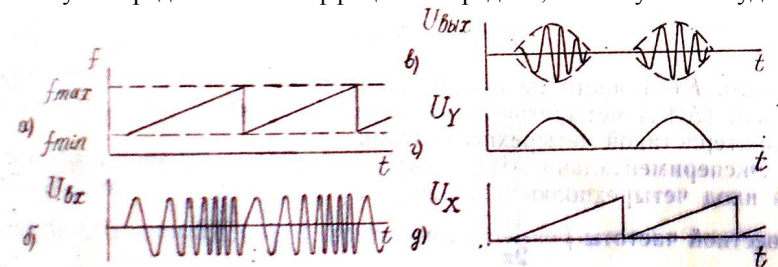


Рис. 1.2. Эпюры напряжений: а — закон изменения частоты ГКЧ; б — напряжение на входе четырехполосника; в — напряжение на выходе четырехполосника; г — напряжение на Y-пластинах индикатора; д — напряжение на X-пластинах индикатора

выходного напряжения  $U_{вых}$  изменяется в соответствии с его АЧХ (рис. 1.2, в). Напряжение с выхода четырехполосника подается на вход вертикального канала осциллографического индикатора, и на экране вычерчивается амплитудно-частотно-модулированное колебание, огибающая которого повторяет форму АЧХ устройства.

Для получения на экране индикатора ИАЧХ амплитудно-частотной характеристики-четыреполосника в виде односторонней кривой, более удобной для исследования, напряжение  $U_{вых}$  предварительно детектируется амплитудным детектором и протектированное напряжение (см. рис. 1.2, з) подается на вертикально-отклоняющие пластины индикатора ИАЧХ.

На время обратного хода луча индикатора ГКЧ запирается и на экране видна горизонтальная линия нулевого уровня.

Таким образом, на экране прибора за время прямого хода луча автоматически вычерчивается АЧХ исследуемого четырехполосника, причем ось абсцисс индикатора ИАЧХ является осью частот.

Структурная схема на рис. 1.1 максимально упрощена и иллюстрирует лишь принципиальную возможность визуального наблюдения АЧХ. Современные ИАЧХ снабжены дополнительными вспомогательными блоками, позволяющими измерять амплитудные и частотные параметры исследуемых АЧХ. Более подробно структурные схемы ИАЧХ будут рассмотрены после ознакомления с принципами построения отдельных блоков ИАЧХ.

## 1.2. Генератор качающейся частоты

Колебания качающейся частоты создаются в автогенераторе, у которого периодически изменяется либо  $L$  или  $C$  в задающем контуре  $LC$ -генератора, либо  $R$  или  $C$  в фазосдвигающей цепи  $RC$ -генератора.

### 1. Автогенератор с варикапом в контуре

Наиболее перспективным и часто встречающимся в современных ИАЧХ способом качания частоты автогенератора является изменение емкости контура с помощью варикапа — полупроводникового диода с электрически управляемой емкостью. Варикап — диод, всегда работающий при обратном напряжении смещения. Емкость  $p$ - $n$ -перехода зависит от величины напряжения смещения следующим, образом [2]:

$$C = \frac{A}{(U + \varphi_K)^n} \quad (1.3)$$

где  $A$  — постоянная величина, определяемая геометрией и физическими свойствами перехода;  $\varphi_K$  — контактная разность потенциалов перехода;  $U$  — внешнее напряжение, приложенное к переходу; в нашем случае оно состоит из модулирующего и высокочастотного напряжений;  $n$  — показатель, определяемый концентрацией и распределением примесей в переходе и в большинстве случаев рав-

$$\text{ный } \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{3}.$$

Типичные схемы включения варикапа в контур показаны на рис. 1.3. Схема 1.3, а обеспечивает максимальный коэффициент перекрытия рабочего диапазона частот. Но при таком способе включения на достаточно высоких частотах добротность всей колебательной системы может определяться сравнительно низкой добротностью варикапа. Схема 1.3, б, реализуя меньший коэффициент перекрытия по частоте, уменьшает влияние потерь варикапа на добротность колебательной системы генератора.

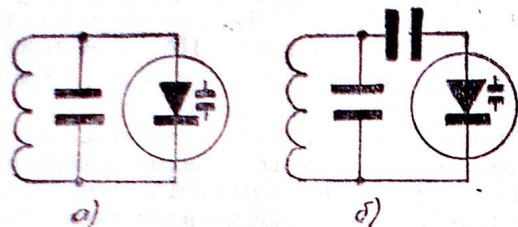


Рис. 1.3. Способы включения варикапов

Следует обратить внимание на особенности работы автогенератора, перестраиваемого варикапом при достаточно большом уровне генерируемого сигнала, когда соизмеримы величины высокочастотных колебаний и модулирующего напряжения. В этом случае изменение емкости с частотой генерируемых колебаний становится соизмеримым с величиной средней емкости варикапа, что приводит к существенному искажению формы генерируемых колебаний (особенно при небольших значениях начальной емкости контура). Кроме того, из-за нелинейной зависимости емкости варикапа от управляющего напряжения смещается среднее значение емкости контура, что снижает стабильность средней частоты генератора. Эти эффекты начинают проявляться, когда переменная составляющая достигает трети постоянной.

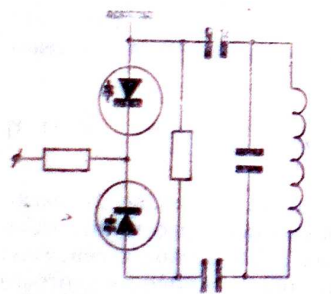


Рис. 1.4. Встречное включение варикапов

Допустимый уровень переменной составляющей можно увеличить использованием для модуляции двух варикапов, включенных, как показано на рис. 1.4. Варикапы включены по модулирующему сигналу параллельно, а по переменной (высокочастотной) составляющей последовательно. В результате переменное напряжение, подводимое к каждому варикапу, уменьшается вдвое. Кроме того, благодаря встречному включению мгновенные изменения емкости варикапов в такт с высокочастотным напряжением теперь противоположны

6

по знаку. Это, во-первых, уменьшает нелинейные искажения генерируемого колебания, во-вторых, увеличивает стабильность средней частоты. И, наконец, следует отметить, что модуляционная характеристика (зависимость частоты от подводимого напряжения) в ЧМ-генераторах с варикапами — нелинейная.

## 2. Автогенератор с управляемым ферритом в контурной катушке

Из других возможных способов качания частоты рассмотрим особенности построения ГКЧ с использованием ферритовых модуляторов. Такие ГКЧ имеют меньшую стабильность частоты, но обеспечивают более широкие полосы качания при сравнительно простом способе управления [3]. Упрощенная принципиальная схема такого ГКЧ (приведена на рис. 1.5. Автогенератор собран на лампе Л1 по схеме емкостной трехточки. Катушка L2 контура

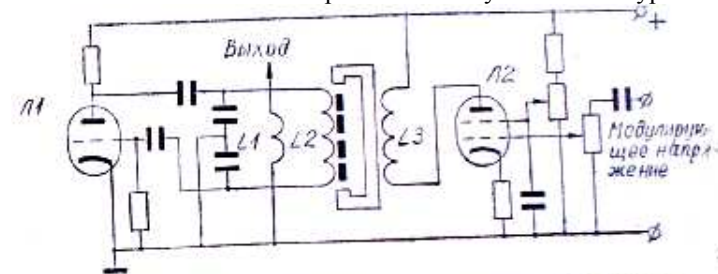


Рис. 1.5. ГКЧ с ферритовым частотным модулятором

автогенератора намотана на ферритовом сердечнике. Этот сердечник помещен между полюсами электромагнита. При изменении тока, протекающего по индуктивности L3, изменяется поле между полюсами электромагнита и, следовательно, изменяется проницаемость ферритового сердечника и индуктивность контурной катушки L2. Таким образом, необходимое изменение частоты автоколебания получается управлением тока электромагнита L3. Полоса качания определяется уровнем модулирующего напряжения, а средняя частота качания — потенциалом второй сетки Л2.

На сверхвысоких частотах частотно-модулированное колебание получают подачей пилообразного напряжения на отражатель клистрона (узкая полоса) или механически перестраивая резонатор (широкая полоса). Широкополосным генератором с электрическим качанием частоты служит генератор на лампе обратной волны, на ускоряющий электрод которой подается модулирующее напряжение.

## 3. ГКЧ с использованием преобразователей частоты

С увеличением отношения полосы качания к средней частоте ЧМ-колебаний ГКЧ, выполненного по схеме автогенератора с пе-

рестраиваемым элементом задающего контура, растет паразитная амплитудная модуляция. Для уменьшения уровня этой модуляции в ИАЧХ приходится либо предусматривать схему автоматической регулировки амплитуды (АРА) выходного напряжения ЧМ-генератора, либо выполнять ГКЧ с использованием преобразования частоты. Применение преобразования частоты дополнительно позволяет создавать широкую полосу качания, не зависящую от средней частоты автогенератора.

Структурная схема такого ГКЧ приведена на рис. 1.6. На смеситель подаются два колебания: с диапазонного генератора (частота  $f_d$ ) и с автогенератора частотно-модулированных колебаний (частота  $f_{чм}$ ). Взаимодействие этих напряжений на нелинейном элементе смесителя приводит к появлению на выходе преобразователя сложного спектра частот. В общем случае в нем присутствуют частоты смешиваемых колебаний, их гармоники, а также различного рода комбинационные частоты. Фильтр ниж-

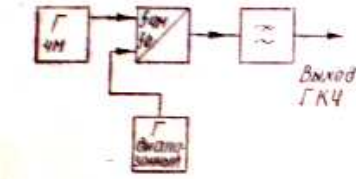


Рис. 1.6. Структурная схема ГКЧ

них частот выделяет составляющие спектра с частотами  $|f_{чм} - f_d|$ . Полоса качания теперь определяется девиацией частоты ЧМ-автогенератора, а средняя частота — частотой диапазонного генератора.

Следует отметить, что в рассмотренной схеме построения ГКЧ появляется дополнительный источник паразитных колебаний — неотфильтрованные гармоники и комбинационные частоты. Но в таких ГКЧ применением сложных схем преобразователей (балансных и кольцевых) удастся обеспечить зависимость выходного напряжения ГКЧ только от амплитуды генератора фиксированной частоты, стабильность которой выше, чем у ЧМ-генератора.

### 1.3. Линеаризация частотного масштаба в ИАЧХ

Поскольку в ИАЧХ изменение частоты ГКЧ и развертка луча электронно-лучевой трубки индикатора осуществляется одним и тем же модулирующим напряжением, то выбор формы этого напряжения несуществен. Для получения линейного частотного масштаба важно обеспечить линейную зависимость между отклонением луча индикатора и изменением частоты ГКЧ.

Отклонение частотного масштаба от линейного определяется нелинейностью модуляционной характеристики ГКЧ, нелинейными искажениями усилителя горизонтального канала и нелинейностью отклоняющей системы индикатора. Нелинейность частотного масштаба приводит к искажению формы АЧХ на экране индикатора и является источником погрешности определения частоты какой-либо точки АЧХ, находящейся между частотными метками.

В современных ИАЧХ для управления частотой ГКЧ формируется модулирующее напряжение специальной формы. Форма подбирается такой, чтобы с учетом реальной модуляционной характеристики примененного модулятора и формы отклоняющего напряжения обеспечивался заданный частотный масштаб (линейный или логарифмический). Для этого создается четырехполосник с динамической характеристикой  $U_{вых} = f(U_{вх})$  специальной формы. При подаче на его вход горизонтально-отклоняющего напряжения  $U_x$  на выходе получается модулирующее ГКЧ напряжение  $U_M$  такой формы, что связь между частотой выходного сигнала ГКЧ и отклонением луча является заданной (линейной или логарифмической).

При технической реализации фактически вырабатывается кусочно-линейная аппроксимация требуемой формы модулирующего напряжения. При этом заранее оговоренный интервал значений аргумента заданной функциональной зависимости  $f(U_x)$  разбивают на ряд подынтервалов, на которых  $f(U_x)$  заменяется кусочно-линейной функцией  $\Phi(U_x)$ .

На рис. 1.7, а функция  $\Phi(U_x)$  выбирается так, чтобы ошибка аппроксимации, оставаясь на каждом участке одного знака, не превосходила по абсолютной величине предельного значения  $\Delta_M$ .

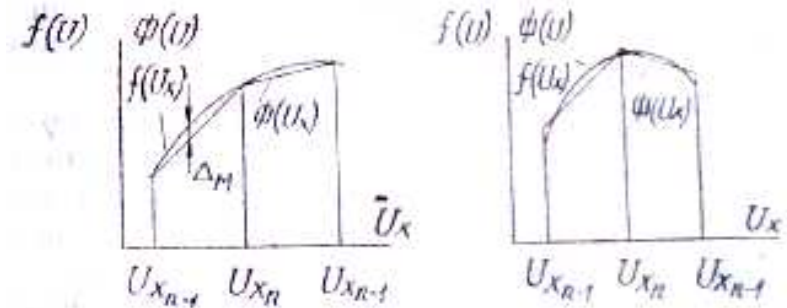


Рис. 1.7. Кусочно-линейная аппроксимация функций

Аппроксимация  $\Phi(U_x)$ , приведенная на рис. 1.7, б, допускает любой знак погрешности  $\Delta$  на каждом участке, лишь бы  $|\Delta| \leq \Delta_M$ .

При таком выборе построения аппроксимирующей функции увеличивается допустимая длина подынтервалов и, следовательно, уменьшается общее количество интервалов аппроксимации.

Рассматриваемый способ создания модулирующего напряжения сравнительно просто реализуется с помощью пассивных кусочно-линейных диодных функциональных преобразователей (КЛДФП) [4].

На рис. 1.8, а приведен пример КЛДФП воспроизведения монотонной функции с положительной убывающей производной (рис. 1.8, б). Постоянное напряжение с помощью делителя  $r1 - r(N + 1)$  (пороговой цепочки) запирает диоды Д1 - ДN опорными напряжениями  $U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0N}$  соответственно. Пороговая цепочка полагается низкоомной, т.е.  $r_n \ll R_n$

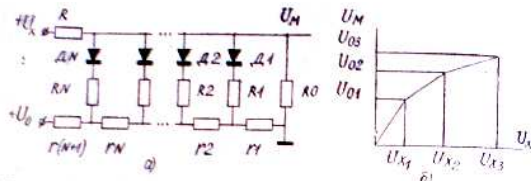


Рис. 1.8. Моделирование монотонной функциональной зависимости с убывающей положительной производной

Выходное напряжение  $U_M$  на каждом  $i$ -м подынтервале  $U_{0(i-1)} - U_{0i}$  является линейной функцией входного напряжения  $U_x$ .  $U_M = k_i U_x$ . Величина коэффициента  $k_i$  определяется выбором сопротивлений  $R1 - Ri$ .

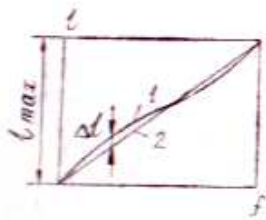


Рис. 1.9. Отклонение частотного масштаба от заданного: 1 — реальный закон; 2 — заданный

Погрешность воспроизведения моделируемой зависимости с помощью КЛДФП определяется погрешностью линейной аппроксимации  $\Delta_M$  и инструментальной погрешностью  $\Delta_u$ , обусловленной неточностью изготовления отдельных элементов преобразователя.

Степень близости реального частотного масштаба к требуемому (линейному или логарифмическому) в соответствии с ГОСТ 17023—71 характеризуется величиной  $K_M$  (отклонения частотного масштаба от заданного), определяемой по формуле

$$K_M = \pm \frac{\Delta l}{l_{\max}} \cdot 100,$$

где  $\Delta l$  — максимальное отклонение реального от заданного закона частотного масштаба в мм (рис. 1.9);

$l_{\max}$  — рабочая ширина экрана индикатора, соответствующая заданной полосе качания, мм.

В современных ГКЧ, использующих КЛДФП для линеаризации, отклонение частотного масштаба от заданного не более  $\pm 5\%$ .

#### 1.4. Основные источники погрешностей измерения относительной амплитуды АЧХ

В соответствии с ГОСТ 17023—71 относительная амплитуда — это амплитуда любой отдельной точки наблюдаемой АЧХ, взятая

относительно амплитуды определенной точки АЧХ или напряжения, заданных технической документацией на прибор. Чаще всего относительная амплитуда отсчитывается относительно максимума АЧХ. Наиболее просто относительную амплитуду можно определить через результаты прямых измерений ординат  $K(\omega_1)$  и  $K(\omega_2)$  наблюдаемой АЧХ (рис. 1.10)

$$A = 20 \lg \frac{K(\omega_1)}{K(\omega_2)} \text{ дБ.} \quad (1.4)$$

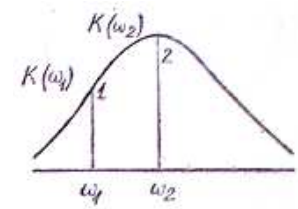


Рис. 1.10. АЧХ, наблюдаемая на экране индикатора

Погрешность измерения  $A$  определяется погрешностями измерения отдельных ординат, которые обусловлены неравномерностью выходного напряжения ГКЧ, нелинейностью амплитудных характеристик детектора и усилителя вертикального отклонения индикатора, паразитной частотной модуляцией ГКЧ и отличием динамической (наблюдаемой) АЧХ от статической. Рассмотрим отдельные составляющие этих погрешностей.

#### 1. Неравномерность выходного напряжения

Величина выражается в децибелах и определяется соотношением (ГОСТ 17023—71).

$$\sigma = \pm 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \text{ дБ,} \quad (1.5)$$

где  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  — соответственно амплитуды выходного напряжения ГКЧ в полосе качания или в диапазоне частот.

Она непосредственно пересчитывается в погрешность измерения относительной амплитуды. Действительно,

$$A = 20 \lg \frac{K(\omega_1) U_{\text{вых}}(\omega_1)}{K(\omega_2) U_{\text{вых}}(\omega_2)} = A_{\text{ист}} + 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}(\omega_1)}{U_{\text{вых}}(\omega_2)}, \quad (1.6)$$

где  $A_{\text{ист}}$  — истинное значение относительной амплитуды  $K(\omega_1)$

относительно  $K(\omega_2)$ , а второе слагаемое определяет погрешность измерения, обусловленную непостоянством выходного напряжения ИАЧХ.

#### 2. Нелинейность амплитудной характеристики детектора

Эта нелинейность искажает выходное напряжение исследуемого четырехполюсника, и поэтому приводит к погрешности в измерении относительного ослабления. Например, положение точки 1 на АЧХ (см. рис. 1.10) теперь определяется напряжением  $U_{\text{вых}}(\omega_1) K(\omega_1) \text{tg} \alpha_1$ , а точки 2 —  $U_{\text{вых}}(\omega_2) K(\omega_2) \text{tg} \alpha_2$ , где  $\alpha_1$  и

$\alpha_2$  определяются характеристикой детектора (рис. 1.11). Следовательно, погрешность измерения  $\Delta_D$ , обусловленная нелинейностью характеристики детектора, может быть вычислена по формуле

$$\Delta_D = 20 \lg \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}. \quad (1.7)$$

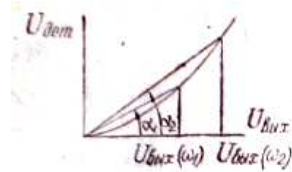


Рис. 1.11. Амплитудная характеристика детектора

Эта погрешность будет особенно велика при малых уровнях детектируемого напряжения.

### 3. Нелинейность амплитудной характеристики усилителя

Аналогичное воздействие на погрешность измерения относительной амплитуды оказывает нелинейность (или отклонение от заданного закона изменения) амплитудной характеристики усилителя. В ИАЧХ оговаривают допустимую величину  $K_l$  отклонения характеристики от заданного закона

$$K_l = \pm \frac{\Delta l_{\max}}{l_{\text{раб}}} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta l_{\max}$  — наибольшее отклонение реальной характеристики от заданной;  $l_{\text{раб}}$  — рабочая высота экрана индикатора.

### 4. Интегральная оценка влияния неравномерности выходного напряжения, нелинейности амплитудных характеристик детектора и усилителя

Суммарная погрешность от этих источников оценивается параметром  $\sigma'$  — неравномерностью собственной амплитудно-частотной характеристики. Его величина, выраженная в децибелах, определяется по формуле

$$\sigma' = \pm 20 \lg \frac{U'_{\max}}{U'_{\min}}, \quad (1.8)$$

где  $U'_{\max}$  и  $U'_{\min}$  соответственно максимальная и минимальная амплитуды выходного напряжения ГКЧ в полосе качания (или в диапазоне частот), измеренные на собственном индикаторе прибора ИАЧХ, т. е. в этом случае выход ИАЧХ подается на вход усилителя либо через встроенный, либо через выносной детектор,

входящий в комплект ИАЧХ; в современных ИАЧХ  $\sigma' = 0,15 - 1,5$  дБ.

Следует отметить, что неравномерность выходного напряжения, нелинейность амплитудных характеристик детектора и усилителя вертикального канала, искажая соотношение амплитуд АЧХ, затрудняют ее визуальное восприятие. Поэтому, когда из-за особенностей схемы или методики измерений, не все из перечисленных погрешностей влияют на точность измерения относительной амплитуды АЧХ, все равно оговаривают предельно допустимые значения величин  $\sigma'$  и  $K$ .

### 5. Влияние паразитной частотной модуляции

Паразитная ЧМ — это результат самопроизвольного, нежелательного воздействия на частоту сигнала, вызываемого паразитными наводками, фоном и т. д. Наличие паразитной ЧМ приводит к колебаниям АЧХ на экране индикатора вдоль оси частот (рис. 1.12), что резко ухудшает качество воспроизведения АЧХ, особенно наиболее крутых ее участков. Величина этой составляющей погрешности  $\Delta_{\text{пар}}$  измерения ординаты АЧХ определяется полосой  $\Delta F_{\text{пар}}$  паразитной ЧМ и крутизной  $S$  АЧХ четырехполосников

$$\Delta_{\text{пар}} = S \cdot \Delta F_{\text{пар}}. \quad (1.9)$$

Задавая предельно допустимое значение этой погрешности и оговаривая максимально возможное значение крутизны АЧХ, можно определить допустимую полосу  $\Delta F_{\text{пар}}$  паразитной ЧМ. В современных ИАЧХ в соответствии с ГОСТ 17023—71 допустимая полоса паразитной ЧМ не должна превышать 0,02 — 0,05 полосы качания.

### 6. Отличие динамической характеристики от статической

При анализе АЧХ по отдельным точкам измерение ординат производится сравнительно долго. Во всяком случае переходные процессы в системе, связанные с перестройкой частоты от точки к точке, успевают закончиться, т. е. в статическом режиме измеряют «истинные» АЧХ. При автоматическом измерении АЧХ частота перестраивается гораздо быстрее. И если, это изменение происходит достаточно быстро, начинает сказываться инерционность анализируемого фильтра. Наиболее интенсивные колебания развиваются не тогда, когда частота внешнего напряжения совпадает с частотой, соответствующей максимуму АЧХ, а несколько позже; максимальная амплитуда развиваемых колебаний меньше

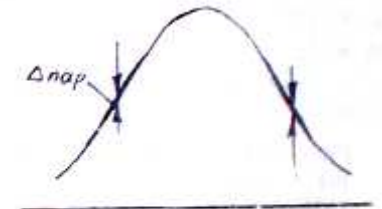


Рис. 1.12. Вид АЧХ вследствие паразитной ЧМ

величины резонансного напряжения в статическом режиме. Чем уже полоса и круче скаты наблюдаемой АЧХ, тем сильнее проявляются эти явления. Получаемая частотная характеристика, называемая динамической амплитудно-частотной характеристикой (ДАЧХ), может существенно отличаться от статической.

Простых формул, определяющих погрешность автоматического измерения АЧХ для любых четырехполосников, пока нет. Наиболее наглядно об отличиях ДАЧХ от статической характеристики можно судить по результатам исследования одиночного колебательного контура, приведенных в [1], [5]. Отличия этих характеристик (рис. 1.13) сводятся к следующему: при увеличении скорости перестройки частоты увеличивается сдвиг ДАЧХ в сторону изменения частоты, уменьшается амплитуда характеристики, кривая становится асимметричной, полоса пропускания увеличивается. Чтобы ДАЧХ одиночного колебательного контура мало отличалась от статической, скорость изменения частоты  $\beta$  — отношение разности пределов перестройки частоты ко времени, за которое происходит эта перестройка — должна выбираться из условия  $\beta \leq 0,1 - 0,3 f_{0,7}^2$ . Это соотно-

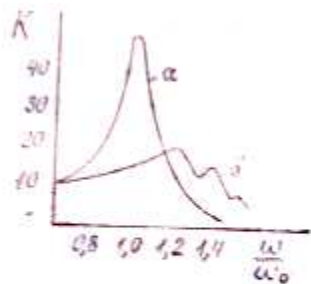


Рис. 1.13. Статическая (а) и динамическая (б) характеристики колебательного контура

шение может быть использовано для проверки наличия возможных динамических искажений при анализе АЧХ более сложной формы.

Возможен также другой эмпирический способ проверки отсутствия динамических искажений. Уменьшая полосу (или, если возможно, частоту) качания ГКЧ, наблюдаем за поведением АЧХ на экране индикатора. Если при этом максимум АЧХ не меняется, то динамическое искажение мало.

В ИАЧХ последних моделей для обеспечения выбора режима работы с малыми динамическими искажениями предусмотрена возможность изменения периода качания частоты. Кроме того, современные измерители АЧХ снабжаются стоп-меткой — меткой, образованной кратковременной остановкой качания частоты. Эту метку также можно использовать для проверки наличия динамических искажений и оценки их величины. А именно, устанавливаем стоп-метку на участок наибольшего наклона АЧХ. Если наблюдаемый участок АЧХ является восходящим по направлению движения луча и динамические искажения имеют место, то во время образования стоп-метки луч переместится вертикально вверх. Расстояние, на которое переместится луч, обусловлено отличием статической характеристики (она должна была бы пройти выше) от динамической. Если же стоп-метку разместить на участке с отрицательным наклоном (относительно движения луча), то во время ее образования луч сместится вниз на величину динами-

ческих искажений. Уменьшая полосу или период качания, можно выбрать оптимальный режим анализа АЧХ.

## 1.5. Методы измерения относительной амплитуды АЧХ

Рассмотрим наиболее употребительные методы измерения относительной амплитуды, позволяющие устранить (или существенно уменьшить) некоторые из перечисленных погрешностей.

На рис. 1.14, а приведена структурная схема измерения относительной амплитуды, исключая влияние, нелинейности характеристик детектора и усилителя на результирующую погрешность измерения. Измерение производится с помощью калиброванного аттенюатора, который включается между выходом ИАЧХ и входом исследуемого четырехполосника. Вначале при нулевом ослаблении аттенюатора на экране индикатора ИАЧХ отмечается горизонталь, на которой находится интересующая исследователя точка АЧХ. Затем введением ослабления калиброванного аттенюатора совмещаем вершину АЧХ с отмеченной горизонталью. Относительная амплитуда отсчитывается непосредственно по шкале калиброванного аттенюатора. При таком измерении требуется дополнительное согласование входа и выхода аттенюатора с трактом. Именно так измеряют относительную амплитуду в ИАЧХ тала Х1-7Б.

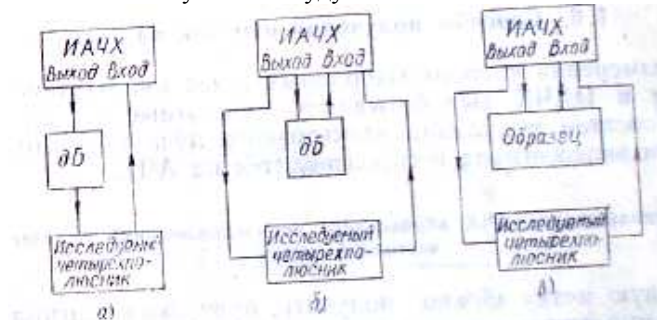


Рис. 1.14. Структурная схема измерения относительной амплитуды

Структурная схема рис. 1.14, б иллюстрирует методику измерения, которая в отличие от предыдущей дополнительно исключает влияние непостоянства выходного напряжения ГКЧ на точность измерения. Идея методики состоит в одновременной индикации АЧХ четырехполосника и собственной амплитудно-частотной характеристики ИАЧХ. Отсчет ординат АЧХ четырехполосника ведется относительно собственной АЧХ измерителя, поэтому ее неравномерность не влияет на точность измерения. Для реализации такой методики измерения ИАЧХ должен иметь два идентичных выхода ГКЧ и два одинаковых входных канала вертикального отклонения индикатора. С первого выхода ГКЧ колебания подаются

ся на исследуемый четырехполюсник, выход которого подключен к первому входу ИАЧХ. Со второго выхода ГКЧ напряжение через калиброванный аттенюатор подается на второй вход ИАЧХ. Для увеличения идентичности входные каналы ИАЧХ, как правило, различаются только входными цепями, которые через коммутатор поочередно подключаются к одному и тому же усилителю. Поэтому на индикаторе одновременно видны обе АЧХ. Вначале устанавливается такое ослабление аттенюатора, чтобы обе характеристики совпадали в точке максимума АЧХ. Затем изменяется ослабление аттенюатора так, чтобы обеспечивалось совпадение характеристик в точке АЧХ четырехполюсника, относительную амплитуду которой требуется измерить. Разность показаний аттенюатора и определит искомую величину.

Наличие двух каналов в ИАЧХ позволяет осуществить очень полезную в инженерной практике возможность настройки АЧХ исследуемого четырехполюсника по АЧХ образцового. Для этого во второй канал ИАЧХ вместо калиброванного аттенюатора включается образцовый четырехполюсник (см. рис. 1.14, в). В результате на экране индикатора одновременно наблюдаются две АЧХ — образцового и настраиваемого четырехполюсников. До начала настройки следует проверить и отрегулировать идентичность усиления каналов.

### 1.6. Способы получения отметок частоты

Для измерения частоты выбранных точек наблюдаемой характеристики в ИАЧХ вырабатываются частотные метки, которые путем яркостной модуляции электронного луча или амплитудной модуляции видеосигнала воспроизводятся на АЧХ.

#### 1. Использование АЧХ образцового четырехполюсника в качестве частотной метки

Частотную метку можно получить, пропуская сигнал ГКЧ в блоке формирования меток через полосовой фильтр (рис. 1.15). Продетектированное выходное напряжение фильтра и используется в качестве частотной метки. На рис. 1.16, а представлены эпюры напряжений на входе и выходе фильтра (точки 1 и 2 соответственно) и на выходе детектора (точка 3). Первая эпюра — это форма выходного напряжения ГКЧ. Выходное напряжение фильтра (эпюра 2) — имеет и частотную и амплитудную модуляцию. Частотная модуляция определяется законом изменения частоты входного колебания в полосе фильтра, амплитудная — формой динамической амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра. Место-положение метки на оси частот определяется резонансной частотой  $f_p$  фильтра. При подаче модулирующего напряжения метки в блок индикатора и использовании амплитудной модуляции для создания меток, на наблюдаемой АЧХ появится «всплеск» на



Рис. 1.15. Структурная схема получения частотной метки

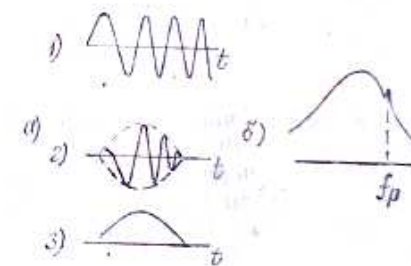


Рис. 1.16. Эпюры напряжений при формировании частотных меток



частоте  $f_p$ , форма которого определяется ДАЧХ фильтра (см.

рис. 1.16, б). Изменяя частоту настройки фильтра, можно перемещать частотную метку вдоль АЧХ. Такой способ создания меток используется в панорамных измерителях СВЧ-диапазона.

## 2. Формирование частотных меток с использованием преобразования частоты

Наиболее часто в ИАЧХ метки получаются методом смешения колебаний ГКЧ и генератора калибровочной (опорной) частоты (рис 1.17). Напряжение с выхода смесителя поступает в устройство формирования метки — в простейшем случае фильтр нижних частот (ФНЧ), т. е. блок-схема такого способа получения меток совпадает с блок-схемой построения ГКЧ с преобразованием частоты. Отличия формы выходного напряжения ГКЧ и формирователя меток определяются взаимным расположением (по оси частот) калибровочной частоты  $f_K$  и спектра  $f_{ЧМ}$  частотно-модулированного колебания, а также более узкой полосой ФНЧ в схеме генератора меток. Так, при формировании меток рассматриваемым способом частота  $f_K$  обязательно находится «внутри» полосы качания ЧМ-колебаний (рис. 1.18, а). В широкополосных ГКЧ такой случай также может встретиться (пример будет рассмотрен ниже), во все-таки чаще частота диапазонного генератора  $f_D$

ниже наименьшей частоты ГКЧ (рис. 1.18, б). Влияние взаимного расположения  $f_K$  и полосы качания  $f_{ЧМ}$  на форму выходного напряжения рассмотрим в предположении, что полоса ФНЧ выбрана так, как это делается в ГКЧ — чтобы пропускаться весь спектр разностных частот  $|f_{ЧМ} - f_K|$ , а все другие комбинационные частоты подавлялись.

Закон изменения разностной частоты и форма выходного напряжения представлены на рис. 1.19, а и б для случаев  $f_K > f_{min}$  и  $f_K < f_{min}$  соответственно. В первом случае разностная частота линейно нарастает от  $f_{min} - f_K$  до  $f_{max} - f_K$ . Выходное колебание — это ЧМ-колебание с постоянной амплитудой и линейным законом изменения частоты (см. рис. 1.19, б).

В случае  $f_K > f_{min}$ , который и имеет место при создании частотных меток, разностная частота вначале уменьшается от  $|f_{min} - f_K|$

до нуля, а затем увеличивается до  $|f_{max} - f_K|$ . Выходное колебание состоит как бы из двух ЧМ-колебаний (рис. 1.19, а) — вначале до сечения А с линейно падающей частотой, а после этого сечения — с линейно нарастающей. В момент совпадения текущего значения частоты ГКЧ с частотой калиброванного генератора можно создать частотную метку, если сузить полосу ФНЧ настолько, чтобы пропустить лишь колебания с частотой, близкой к нулю. Такой выбор полосы приведет к существенному изменению формы выходного напряжения — появится еще и амплитудная модуляция. Рассмотрим подробнее процесс формирования выходного напряжения. На

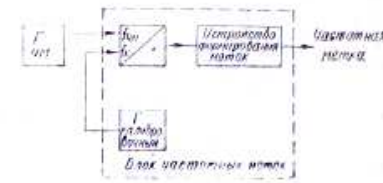


Рис. 1.17. Структурная схема формирования частотной метки

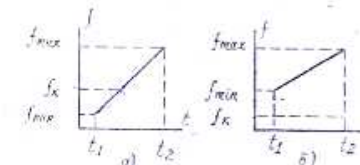


Рис. 1.18. Взаимное расположение спектра ЧМ и частоты калиброванного генератора

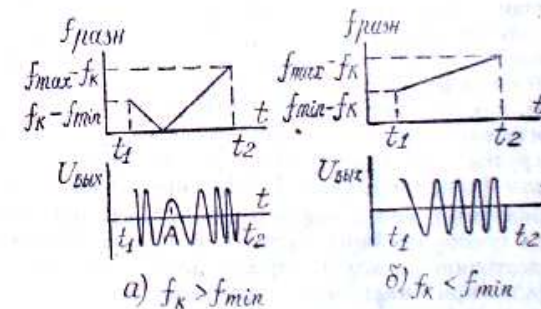


Рис. 1.19. Закон изменения разностной частоты и форма выходного напряжения

рис. 1.20, а представлены АЧХ используемого ФНЧ и условное обозначение мгновенного значения разностной частоты  $f_{разн} = |f_{ЧМ} - f_K|$ . Форма выходного напряжения (форма частотной метки) для случая медленного изменения частоты приведена на рис. 1.20, б. Вначале, до тех пор пока разностная частота, уменьшаясь от  $|f_{min} - f_K|$  до нуля (перемещаясь справа налево вдоль оси частот на рис. 1.20, а), остается больше частоты среза АЧХ фильтра, напряжение на выходе отсутствует (участок 0—1 на рис. 1.20, б). После того как разностная частота попадает в полосу прозрачности фильтра, на выходе генератора меток появляется колебание с амплитудной и частотной модуляцией. Пока разностная частота не достигла нулевого значения, закон изменения амплитуды является зеркальным отображением АЧХ ФНЧ. После достижения нулевого значения разностная частота увеличивается (перемещается слева направо на рис. 1.20, а) и амплитуда выходного напряжения повторяет АЧХ фильтра. При увеличении скорости перестройки частоты в ГКЧ закон изменения амплитуды выходного напряжения определится динамической амплитудно-частотной характеристикой ФНЧ (рис. 1.20, в).

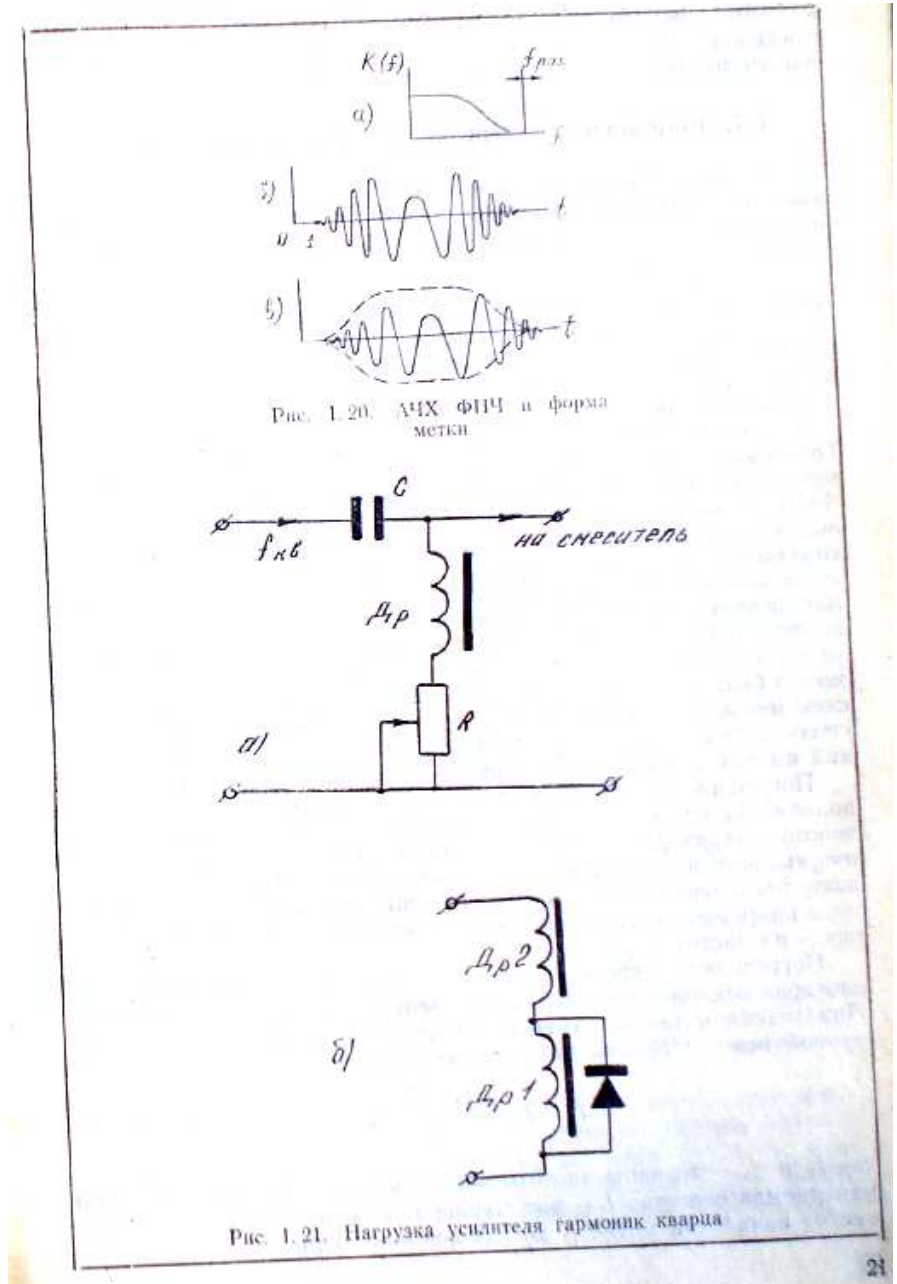
Такой способ формирования частотных меток позволяет сравнительно просто создать набор неподвижных высокостабильных меток с фиксированным частотным масштабом. Для этого в качестве генератора калиброванной частоты используют кварцевый генератор с обогащенным спектром гармоник. Каждый раз, когда частота ГКЧ совпадает с частотой какой-либо гармоники кварцевого генератора, на выходе формирователя меток появляются импульсы «нулевых биений» — частотные метки. В результате на экране индикатора создается серия частотных меток, отстоящих друг от друга по частоте на расстоянии  $f_{кварца}$ .

Выравнивание спектра гармоник кварцевого генератора достигается тем, что коллекторная нагрузка усилителя калибровочных частот выполняется частотно-зависимой. Так, например, в анализаторе Х1-40 опорные частоты передаются на смеситель через CLR-цепочку, как показано на рис. 1.21, а.

Для обогащения опорного напряжения гармониками, часть анодной нагрузки может шунтироваться нелинейным сопротивлением — диодом (например, как в ИАЧХ типа Х1-7Б — рис. 1.21, б).

Рассматриваемый метод формирования частотных меток с использованием преобразования частоты позволяет создавать метки, частотное расстояние между которыми легко контролируется. Это особенно важно при настройке узкополосных устройств, когда затруднительно создание мелкого масштаба неподвижных меток.

Для этого напряжение калибровочного генератора (см. структурную схему рис. 1.17) модулируется по амплитуде колебанием с частотой  $f_M$ . В результате на смеситель поступает несущая частота  $f_K$  и две боковые составляющие с частотами  $f_K - f_M$  и  $f_K + f_M$ . Таким образом, на исследуемой АЧХ будут воспроизведены центральная метка с частотой  $f_K$ , отсчитываемой по шкале калибро-



вочного генератора, и две боковые метки (иногда называемые «метки полосы»), частотный штурвал между которыми определяется по шкале генератора низкой частоты.

### 1.7. Погрешности измерения частотных параметров АЧХ

Эти погрешности складываются из неточности определения частоты в точках, отмечаемых меткой, и ошибок пересчета, когда интересующая нас точка АЧХ находится между частотными метками.

В рассмотренных способах формирования меток первая погрешность определяется величиной скорости качания частоты  $\beta$  (или полосой качания  $\Delta F$  при фиксированном времени анализа) и погрешностью измерения (выставления) частоты калибровочного генератора.

Частоту, соответствующую метке, как правило, отождествляют с местоположением максимального значения напряжения метки. Огибающая этого напряжения при достаточно высокой скорости изменения частоты определяется динамической характеристикой ФНЧ. Следовательно, наложение метки смещается на некоторую величину  $\Delta_d$  в сторону изменения частоты относительно момента совпадения частот калибровочного генератора и ГКЧ. Кроме того, из-за конечной полосы АЧХ ФНЧ можно ошибиться в определении местоположения метки на величину  $\Delta_d$ , равную примерно половине полосы ФНЧ в первом из рассмотренных методов формирования метки и полосе ФНЧ — во втором. Эта составляющая погрешности может быть уменьшена использованием специальных формирующих схем меток после ФНЧ. Например, можно уменьшить и ограничить снизу выходное напряжение фильтра. В результате остается короткий импульс, отмечающий вершину резонансной кривой.

Погрешность измерения частоты калибровочного генератора неподвижных меток существенно уменьшается использованием кварцевого генератора в качестве опорного. Для уменьшения подобной погрешности подвижных меток в современных ИАЧХ предусматривают разделение выхода внешнего генератора: одна часть выходного напряжения подается в блок частотных меток ИАЧХ, а другая — на частотомер.

Погрешность пересчета (интерполяционная погрешность) обусловлена отклонением закона изменения частоты от заданного.

При линейном законе изменения частоты ГКЧ частота  $f_x$  анализируемой точки АЧХ определяется по формуле

$$f_x = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{L} l, \quad (1.10)$$

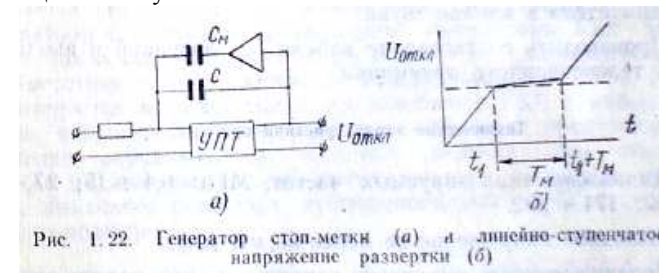
где  $f_1$  и  $f_2$  — значение частоты меток, между которыми находится измеряемая частота;  $L$  — расстояние между метками;  $l$  — расстояние от начальной метки  $f_1$  до измеряемой точки.

Погрешность измерения определяется погрешностью измерения  $f_1$ , величиной отклонения  $\Delta f_1$  реального закона изменения частоты от линейного и погрешностью измерения относительного расстояния  $\frac{l}{L}$ . Для уменьшения последней составляющей реко-

мендуется метки  $f_1$  и  $f_2$  устанавливать на крайних вертикалях экрана. В ИАЧХ погрешность измерения частоты не должна превышать величины  $\pm (10^{-3} f + 0,2 \Delta F)$ , где  $f$  — частота в измеряемой точке, Гц;  $\Delta F$  — полоса качания прибора ИАЧХ, Гц (ГОСТ 17023—21).

### 1.8. Методы уменьшения погрешностей измерения частоты АЧХ

В современных измерителях для существенного уменьшения всех отмеченных погрешностей измерения частоты предусматривается создание стоп-метки — частотной отметки, получаемой остановкой качания частоты ГКЧ. Это может быть обеспечено, например, подключением к зарядной емкости  $C$  генератора пилообразного напряжения на некоторое время  $T_M$  дополнительной емкости  $C_M$  достаточно большой величины (рис. 1.22, а). Подключение емкости  $C_M$  (момент времени  $t_1$  на рис. 1.22, б) резко уменьшает скорость нарастания отклоняющего напряжения, так, что на отрезке от  $t_1$  до  $t_1 + T_M$  это напряжение можно считать постоянным. Значит, будет постоянным и модулирующее напряжение, определяющее частоту ГКЧ.



Таким образом, в течение времени  $T_M$  частота ГКЧ не меняется и луч на экране индикатора неподвижен. При этом на АЧХ образуется яркостная частотная метка, размеры которой определяются толщиной сфокусированного луча.

На время  $T_M$  к выходу ГКЧ подключают цифровой частотомер. Момент образования частотной метки и время, на которое подключен частотомер, определяются параметрами усилителя в цепи обратной связи (см. рис. 1.22, а). Перемещая метку по экрану индикатора, можно измерить частоту любой точки АЧХ исследуемого четырехполюсника.

При измерении частотных параметров с помощью стоп-метки отсутствуют погрешности, обусловленные ДАЧХ ФНЧ, и погрешность, вызванная отклонением закона изменения частоты ГКЧ от заданного. И результирующая погрешность измерения частоты стоп-меткой определяется лишь погрешностью используемого частотомера и разрешающей способностью трубки, определяемой соотношением толщины сфокусированной линии и рабочей ширины экрана и полосой качания  $\Delta F$ .