

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Государственное образовательное учреждение высшего профес-**  
**сионального образования**  
**“Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет “ЛЭТИ”**  
**им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)**

**Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

**А.А.ДАНИЛИН**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению лабораторной работы по дисциплине**  
**“Приборы и техника радиоизмерений”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ**  
**ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ**  
**ИЗМЕРИТЕЛЕМ АКИП-4106**

**Санкт-Петербург**

**2022 г.**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

3. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ АКИП -4106 .....	2
3.1. Частотные характеристики радиоустройств .....	2
3.2. Основные методы измерения АЧХ .....	7
3.3. Цифровые микропроцессорные измерители АЧХ .....	12
3.4. Панорамный микропроцессорный измеритель АЧХ АКИП-4601 .....	14
3.5. Состав лабораторной установки.....	16
3.6. Задание и указания к выполнению лабораторной работы .....	16
3.6.1. Подготовка прибора к работе и установка начального диапазона качания частоты	16
3.6.2. Калибровка прибора	17
3.6.3. Сохранение скриншотов экрана прибора	17
3.6.4. Измерение АЧХ фильтра нижних частот (ФНЧ)	18
3.6.5. Измерение АЧХ полосно-пропускающего фильтра 1 (ППФ1)	19
3.6.6. Измерение АЧХ электромеханического фильтра (ППФ2).	19
3.6.7. Измерение АЧХ полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ).	20
3.6.8. Расчет параметров исследованных фильтров	20
3.6.9. Измерение АЧХ и ФЧХ узкополосного одиночного контура.	21
3.6.10. Измерение АЧХ пьезоэлектрического (кварцевого) фильтра 1 (ППФ3)	22
3.7. Содержание отчета .....	23
3.8. Контрольные вопросы .....	24

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ АКИП -4106

Цель работы — изучение методов исследования частотных характеристик радиотехнических устройств с использованием микропроцессорного измерителя частотных характеристик АКИП-4106.

#### 3.1. Частотные характеристики радиоустройств

Коэффициент передачи  $K(f)$  связывает комплексные амплитуды гармонического воздействия на входе и выходе линейной цепи. Обычно используют

коэффициент передачи по напряжению, равный отношению комплексных амплитуд напряжения на выходе  $\dot{U}_2 = U_2 \exp(i\varphi_2)$  и на входе  $\dot{U}_1 = U_1 \exp(i\varphi_1)$  четырехполюсника:

$$K(f) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} \exp(i(\varphi_2 - \varphi_1)) = \frac{U_2}{U_1} \exp(i\Delta\varphi) = |K(f)| \cdot \exp(i\Delta\varphi).$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — это зависимость модуля комплексного коэффициента передачи цепи от частоты  $|K(f)|$ . Фазочастотная характеристика (ФЧХ) описывает зависимость аргумента комплексного коэффициента передачи цепи от частоты  $\arg(K(f)) = \Delta\varphi(f)$ .

Наряду с модулем  $K(f)$  часто используют логарифмическую частотную характеристику устройства - *затухание* или *ослабление* :

$$A(f), \text{ дБ} = -20 \lg(K(f)).$$

Для правильной постановки измерительной задачи необходимо представить общую схему включения четырехполюсника между источником гармонического напряжения с выходным импедансом  $\dot{Z}_{\text{ген}}$  и нагрузкой  $\dot{Z}_{\text{н}}$  (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Общая схема включения четырехполюсника для измерения АЧХ

Реактивной составляющей импеданса нагрузки часто можно пренебречь ( $Z_{\text{н}} \approx R_{\text{н}}$ ). Очевидно, что амплитуда выходного напряжения  $U_2$  (и, соответственно, АЧХ) зависит от значения  $R_{\text{н}}$ , которое должно быть заранее *оговорено*. Обычно его выбирают из стандартного ряда значений (например, 50, 75, 600 Ом).

Зависимость частотной характеристики от выходного сопротивления генератора  $Z_{\text{ген}}$  существует только тогда, когда под АЧХ устройства понимают частотную зависимость отношения  $U_2/U_{\text{ген}}$ . При этом выходное сопротивление генератора включают в схему исследуемого устройства, что должно быть также заранее *оговорено*.

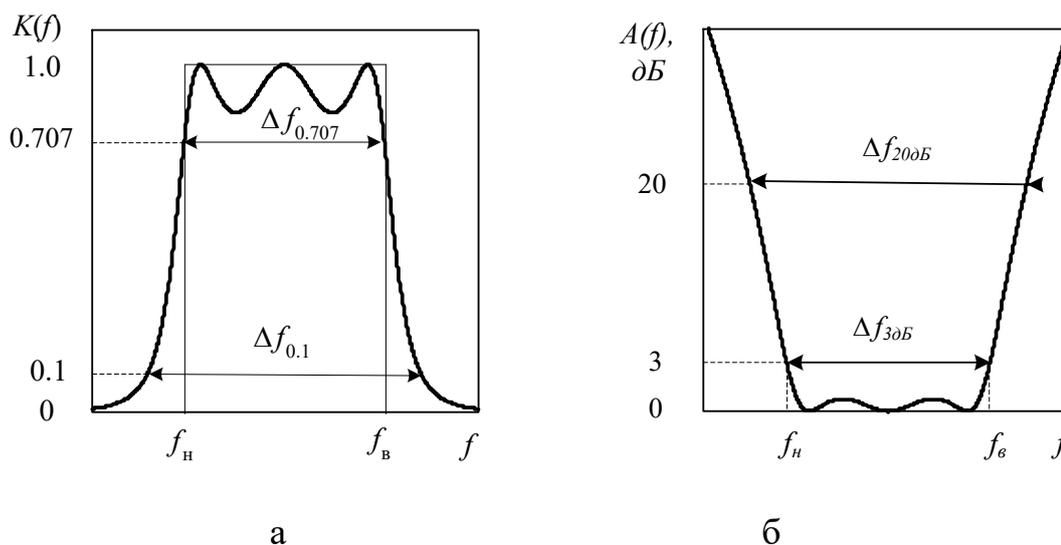


Рис. 3.2. Типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра:

а –  $|K(f)|$  в линейном масштабе;

б –  $A(f)$  в логарифмическом масштабе по уровню

Наиболее часто приходится измерять АЧХ фильтров — устройств, осуществляющих частотную селекцию сигналов. Различают фильтры низких (ФНЧ), высоких частот (ФВЧ), полосно-пропускающие (ППФ) и полосно-заграждающие (ПЗФ) фильтры. На рис. 3.2 представлены типичные АЧХ полосно-пропускающего фильтра. График  $|K(f)|$  строят как в линейном (относительные единицы), так и в логарифмическом (дБ) масштабах по оси уровня. Ослабление  $A(f)$  всегда имеет логарифмический (дБ) масштаб по вертикали. При построении графиков часто используют нормировку АЧХ к максимальному значению коэффициента передачи  $K_{\text{макс}}$ . Для оси частот в большинстве случаев используют линейный масштаб. Однако для фильтров, работающих с большим коэффициентом перекрытия  $f_B/f_H$  график АЧХ в линейном масштабе оказывается неудобным. В этом случае используют *логарифмический масштаб* по частоте. График оказывается растянутым в низкочастотной области и наблюдающийся там фрагмент АЧХ хорошо виден.

Вид АЧХ определяет *рабочие параметры* фильтров. Наиболее важным параметром является *полоса пропускания*  $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ . Это диапазон частот, в котором спад АЧХ не превышает заданного значения. Чаще всего используют полосу пропускания по уровню  $K(f)/K_{\text{макс}} = 0,707$  ( $-3$  дБ). Полоса пропускания ППФ ограничена нижней  $f_{\text{н}}$  и верхней  $f_{\text{в}}$  частотами среза, полоса пропускания ФНЧ - нулевой частотой и верхней частотой среза  $f_{\text{в}}$ . Полоса пропускания ФВЧ занимает область частот от нижней частоты среза  $f_{\text{н}}$  до бесконечности.

Близость формы АЧХ фильтров к прямоугольной принято характеризовать коэффициентом прямоугольности  $k_{\text{п}}$ :

$$k_{\text{п}} = \Delta f_{0,707} / \Delta f_{0,1} = \Delta f_{-3\text{дБ}} / \Delta f_{-20\text{дБ}} < 1,$$

который задают отношением полос пропускания, измеренными по уровню 0,707 и 0,1 ( $-3$  дБ и  $-20$  дБ соответственно). Коэффициент прямоугольности реального фильтра всегда меньше единицы. Другим параметром формы АЧХ являются крутизны скатов:

$$S = \frac{K(f_{-3\text{дБ}}) - K(f_{-20\text{дБ}})}{f_{-3\text{дБ}} - f_{-20\text{дБ}}}, \text{ дБ} / \text{Гц}.$$

Важным параметром фильтра является *неравномерность АЧХ* в полосе пропускания (*уровень пульсаций АЧХ*). Ее задают как разницу минимального и максимального значений АЧХ в полосе пропускания, исключая при этом значения АЧХ на граничных частотах. Обычно неравномерность АЧХ указывают в дБ.

Частотная характеристика полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ) соответствует «перевернутой» АЧХ полосно-пропускающего фильтра. Ее параметром является *полоса заграждения* (или *полоса затирания*)  $\Delta f_{\text{з}}$ , которую отсчитывают по заданному уровню (например,  $-3$  дБ или  $-20$  дБ) относительно  $K_{\text{макс}}$ . Границы полосы заграждения называют *частотами среза ПЗФ*.

Узкополосные фильтры применяют для выделения отдельных частотных компонент в спектре сигнала. Наиболее простым узкополосным фильтром является резонансный контур (резонатор). Частотные характеристики контура представлены на рис. 3.3

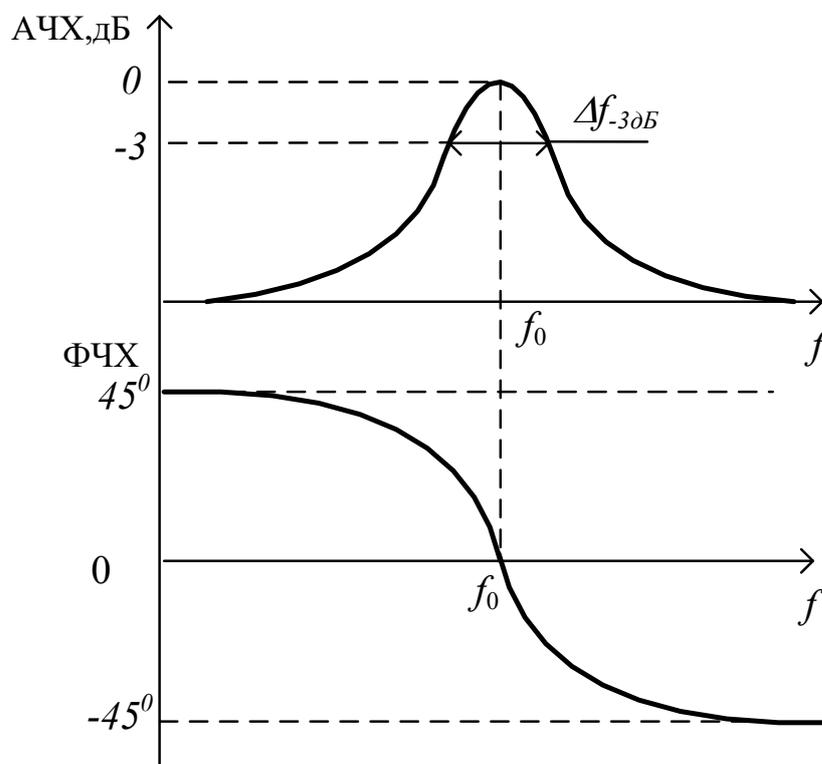


Рис. 3.3. АЧХ и ФЧХ узкополосного колебательного контура

Нормированный комплексный коэффициент передачи контура в предположении малых расстроек относительно резонансной частоты  $f_0$  описывается известным выражением:

$$K(f) = \frac{1}{1 + i2Q \frac{f - f_0}{f_0}},$$

откуда

$$AЧХ(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{f - f_0}{f_0}\right)^2}}, \quad \PhiЧХ(f) = -\arctg\left(2Q \frac{f - f_0}{f_0}\right).$$

Вид частотной характеристики контура определяется резонансной частотой  $f_0$  и добротностью контура  $Q$ . Их можно измерить по графикам АЧХ и ФЧХ. Так, резонансная частота – это координата максимума АЧХ и частота нулевого значения ФЧХ. Добротность измеряют по ширине полосы пропускания по уровню АЧХ 0.707 (-3 дБ):

$$Q \frac{\Delta f_{0,707}}{f_0} = 1; \rightarrow Q = \frac{f_0}{\Delta f_{0,707}} \quad (3.1)$$

Можно измерить добротность по скорости изменения ФЧХ вблизи резонансной частоты

$$\frac{d\Phi_{ЧХ}}{df} \approx \frac{\Delta\Phi_{ЧХ}}{\Delta f} \approx \left| \frac{2Q}{f_0} \right|; \quad Q = \frac{f_0}{2} \left| \frac{\Delta\Phi_{ЧХ}}{\Delta f} \right|. \quad (3.2)$$

В формуле использовано приближение малых расстройек  $\Delta f$  по частоте.

### 3.2. Основные методы измерения АЧХ

Измерение АЧХ по точкам. Генератор гармонических сигналов последовательно настраивают на ряд выбранных частот, поддерживая постоянной амплитуду сигнала  $U_{ген}$ . В каждой частотной точке измеряют амплитуду напряжения  $U_2 = U_{вых}$  на нагрузке. Зависимость  $U_{вых}/U_{ген}$ , построенная с интерполяцией значений в промежуточных точках, и представляет собой «снятую по точкам» АЧХ исследуемой цепи *при заданных сопротивлениях генератора и нагрузки*. Аналогично действуют и при измерении АЧХ как зависимости  $U_2/U_1$ , однако в этом случае необходимо дополнительно измерять амплитуду напряжения  $U_1$  на входе устройства.

Этот метод может быть весьма точным, но его главным недостатком является трудоёмкость. При заранее неизвестной форме АЧХ произвольный выбор частотных точек может привести к пропуску характерных особенностей АЧХ (например, в областях резкого её изменения). Из-за длительности процедуры измерения на результат влияют вариации температуры, дрейф питающих напряжений и т.д.

Панорамные измерители АЧХ. Отмеченные недостатки в значительной степени преодолены в *панорамных измерителях АЧХ*. Структурная схема панорамного измерителя представлена на рис. 3.4.

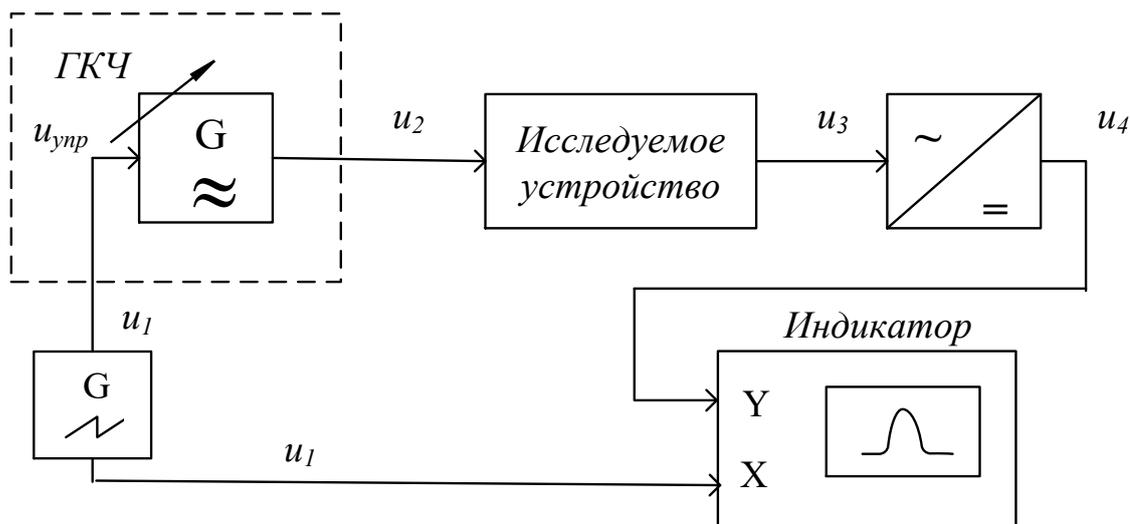


Рис. 3.4. Структурная схема панорамного измерителя АЧХ

В нем в качестве источника сигнала используют генератор «качающейся частоты» (ГКЧ). Он вырабатывает гармонический сигнал  $u_2$  с постоянной амплитудой и меняющейся во времени частотой (рис. 3.5). Закон изменения частоты повторяет форму управляющего напряжения  $u_1 = u_{\text{упр}}(t)$ :

$$f_{\text{ГКЧ}}(t) = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{U_{\text{упр}}} u_{\text{упр}}(t). \quad (3.3)$$

Как правило, в панорамных измерителях используют пилообразное напряжение  $u_{\text{упр}}(t)$ , при котором частота генератора линейно меняется в пределах установленного диапазона  $f_1 \dots f_2$ , а затем сбрасывается в исходную точку («качание» частоты). Выделяя с помощью детектора огибающую сигнала  $u_3$  на выходе исследуемого устройства, получают видеосигнал  $u_4$ , повторяющий форму АЧХ устройства. Этот сигнал подают на Y-канал осциллографического индикатора. По вертикальной шкале отсчитывают значения уровня АЧХ. Развертку изображения на индикаторе осуществляют тем же пилообразным напряжением  $u_1$ , которым управляется ГКЧ. Если между напряжением развертки и частотой генератора реализована линейная зависимость (3.3), то горизонтальная шкала экрана представляет собой ось значений частоты.

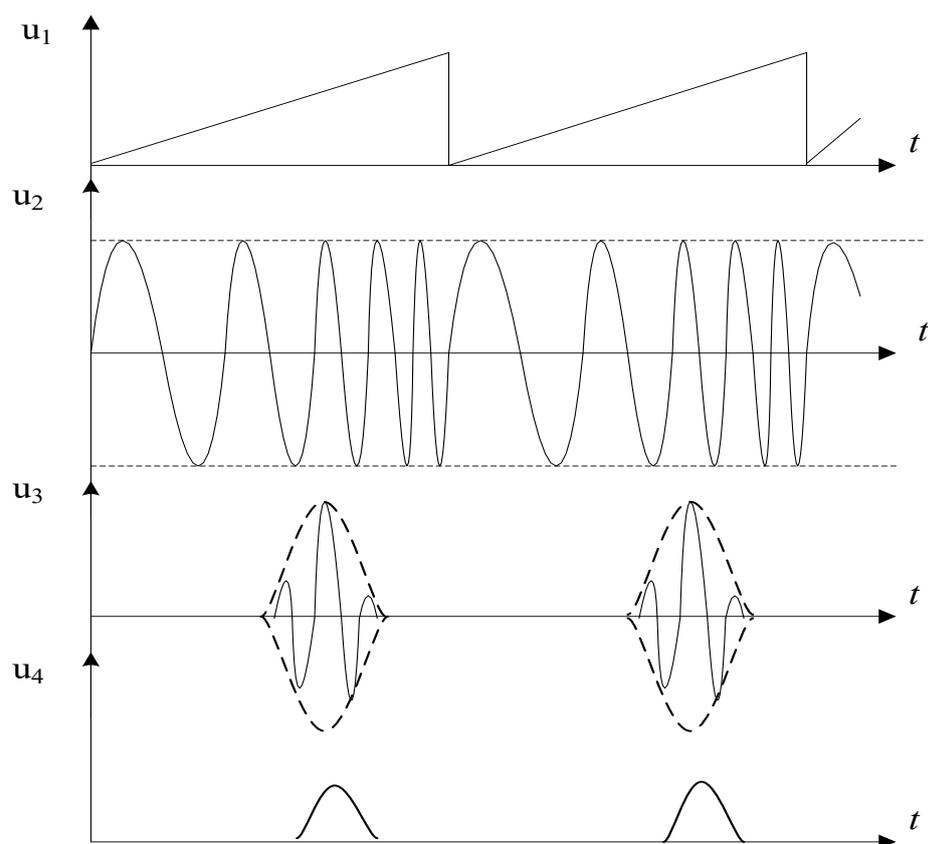


Рис. 3.5. Осциллограммы сигналов панорамного измерителя АЧХ

Условиями неискаженного воспроизведения формы АЧХ на экране являются:

- *линейность зависимости частоты от управляющего напряжения.* Она определяет равномерность оси частот на экране индикатора;
- *линейность детектора* (то есть независимость коэффициента преобразования детектора от уровня входного сигнала). Обеспечивает постоянство коэффициента отклонения луча по вертикали экрана;
- *постоянство амплитуды ГКЧ в диапазоне качания частоты.* Зависимость выходной амплитуды ГКЧ от частоты называют *собственной АЧХ* измерителя. Ее контролируют при непосредственном соединении выхода ГКЧ с входом индикаторного блока. Неравномерность собственной АЧХ приводит к появлению систематической погрешности измерений.
- *отсутствие динамических искажений кривой на экране* (они проявляются при измерении АЧХ узкополосных устройств панорамным способом).

Выше сказано, что огибающая выходного сигнала панорамного измерителя повторяет форму АЧХ. Это справедливо при достаточно медленном из-

менении частоты ГКЧ. Однако при быстром изменении частоты генератора становится существенным переходный процесс в исследуемом устройстве. Форма огибающей выходного сигнала в этом случае уже не повторяет форму АЧХ. Появляются *динамические искажения* формы АЧХ на экране панорамного измерителя. Эти искажения являются методическими погрешностями рассматриваемого способа измерения АЧХ.

В качестве примера рассмотрим динамические искажения при исследовании АЧХ одиночного резонансного контура. На рис. 3.6а представлены типичные искажения кривой его АЧХ.

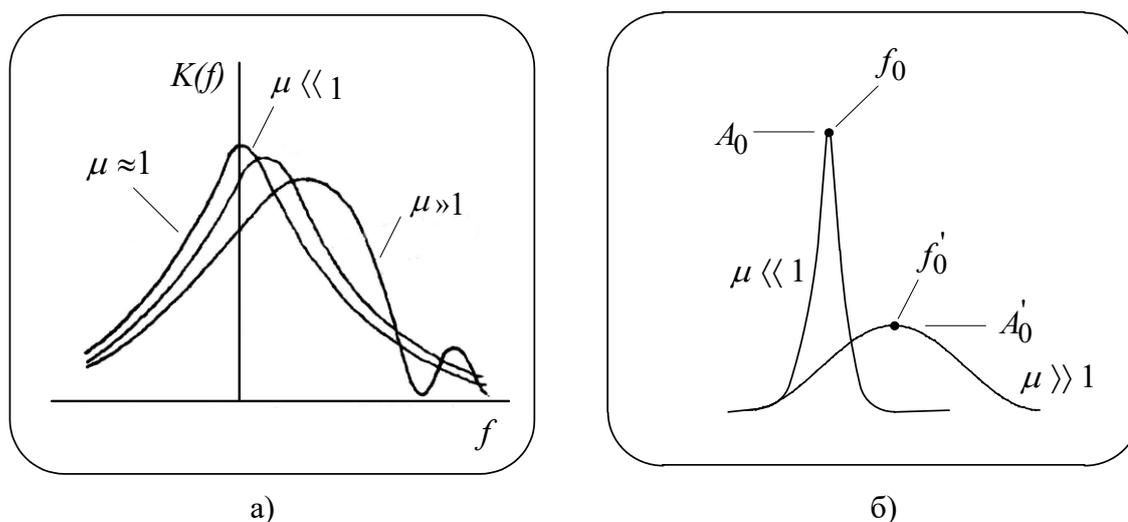


Рис. 3.6. Динамические искажения АЧХ колебательного контура

Они проявляются (см. рис. 3.6б) в:

- смещении вершины АЧХ  $\frac{f'_0 - f_0}{f_0}$  ;
- снижении ее уровня  $\frac{A'_0 - A_0}{A_0}$  ;
- расширении кривой на уровне 0,707 (-3дБ)  $\frac{\Delta f'_{0,707} - \Delta f_{0,707}}{\Delta f_{0,707}} \approx 1,04\mu^2$  .

Численную оценку степени динамических искажений для одиночного контура можно сделать следующим образом. Положим, что частота ГКЧ меняется от начальной частоты  $f_1$  до конечной  $f_2$  по линейному закону в течение периода развертки  $T_p$ . Скорость изменения частоты ГКЧ при этом равна:

$$V_f = \frac{f_2 - f_1}{T_p} \quad (3.4)$$

Пусть контур настроен на резонансную частоту  $f_0$  и имеет добротность  $Q$ . Полоса пропускания контура  $\Delta f_{0,707}$  связана с его добротностью соотношением  $Q = f_0 / \Delta f_{0,707}$ . Постоянная времени контура  $\tau_k$  (время затухания огибающей импульсной реакции в  $e \approx 2,73$  раз) обратно пропорциональна полосе пропускания:

$$\tau_k = \frac{2Q}{\omega_0} = \frac{Q}{\pi f_0} = \frac{1}{\pi \cdot \Delta f_{0,707}}. \quad (3.5)$$

Для оценки степени динамических искажений используют коэффициент динамических искажений  $\mu$ . Он равен отношению  $\tau_k$  - постоянной времени контура, к  $t_0$  - времени пребывания частоты ГКЧ в пределах полосы пропускания. Это время зависит от скорости перестройки частоты

$$t_0 = \frac{\Delta f_{0,707}}{V_f} = \frac{\Delta f_{0,707} \cdot T_p}{f_2 - f_1}. \quad (3.6)$$

Тогда коэффициент динамических искажений для одиночного контура равен:

$$\mu = \frac{\tau_k}{t_0} = \frac{(f_2 - f_1)}{\pi \cdot (\Delta f_{0,707})^2 \cdot T_p}. \quad (3.7)$$

Динамические искажения при панорамном способе измерения АЧХ считают допустимыми при  $\mu \leq 0,1$ . Отсюда следует правило выбора времени анализа  $T_p$  при условии неискаженной кривой АЧХ:

$$T_p \geq 10 \cdot \frac{(f_2 - f_1)}{\pi \cdot (\Delta f_{0,707})^2} \approx 3,2 \frac{f_2 - f_1}{(\Delta f_{0,707})^2}. \quad (3.8)$$

Для других узкополосных устройств коэффициент в формуле (3.8) может отличаться от указанного.

Таким образом, для минимизации динамических искажений необходимо правильно выбирать диапазон качания частоты ГКЧ  $(f_2 - f_1)$  и время ее перестройки  $T_p$ . При исследовании высокодобротных узкополосных устройств (например, пьезоэлектрических или кварцевых фильтров) время анализа АЧХ панорамным методом должно быть большим (десятки и сотни секунд). Для этого случая в панорамных измерителях АЧХ предусматривают режим *ручной перестройки* частоты.

### 3.3. Цифровые микропроцессорные измерители АЧХ

Использование микропроцессорной техники в панорамных измерителях АЧХ позволяет увеличить их точность, повысить быстродействие и надежность, решает задачу сохранения данных и передачи их в устройства обработки. Основные отличия микропроцессорных приборов от аналоговых панорамных измерителей АЧХ:

- применение цифрового управления частотой сигнала генератора;
- использование цифрового вольтметра для измерения амплитуды выходного сигнала;
- вычисление значений АЧХ непосредственно в процессе проведения измерения;

В цифровых измерителях АЧХ используют линейно-ступенчатый закон изменения частоты выходного сигнала генератора (рис. 3.7).

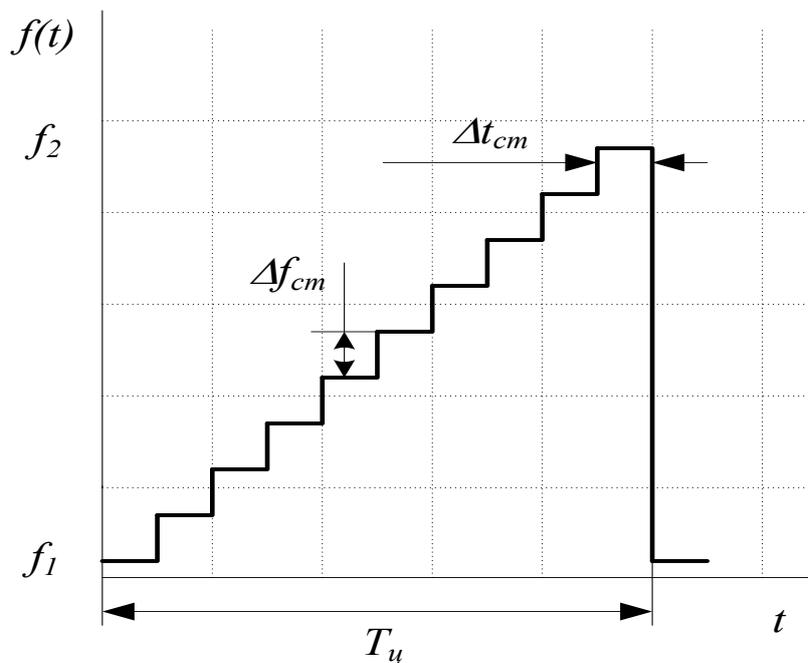


Рис. 3.7. Ступенчатый закон изменения частоты микропроцессорного измерителя АЧХ

Диапазон частот  $f_2 - f_1$ , в котором исследуется АЧХ, разбивается на  $N$  интервалов-ступеней  $\Delta f_{ст}$ . На каждой ступени частота генератора в течение интервала времени  $\Delta t_{ст}$  (длительность ступени) не меняется. Тогда время полного цикла измерения всей АЧХ равно  $T_{ц} = N \cdot \Delta t_{ст}$ . Установившееся на каждой ступени значение амплитуды выходного напряжения измеряется цифро-

вым вольтметром и передается в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) микропроцессорной системы (МПС). По массиву значений амплитуд, хранящимся в ОЗУ, микропроцессор формирует на экране кривую АЧХ в виде массива  $N$  точек. Таким образом, в микропроцессорных приборах фактически реализуется метод измерения АЧХ «по точкам». При большом количестве точек  $N$  изображение АЧХ практически совпадает с кривой АЧХ аналогового панорамного измерителя. Все особенности панорамного метода измерения (в частности, наличие динамических искажений) свойственны и цифровым измерителям АЧХ.

Обобщенная структурная схема микропроцессорного измерителя АЧХ представлена на рис. 3.8.

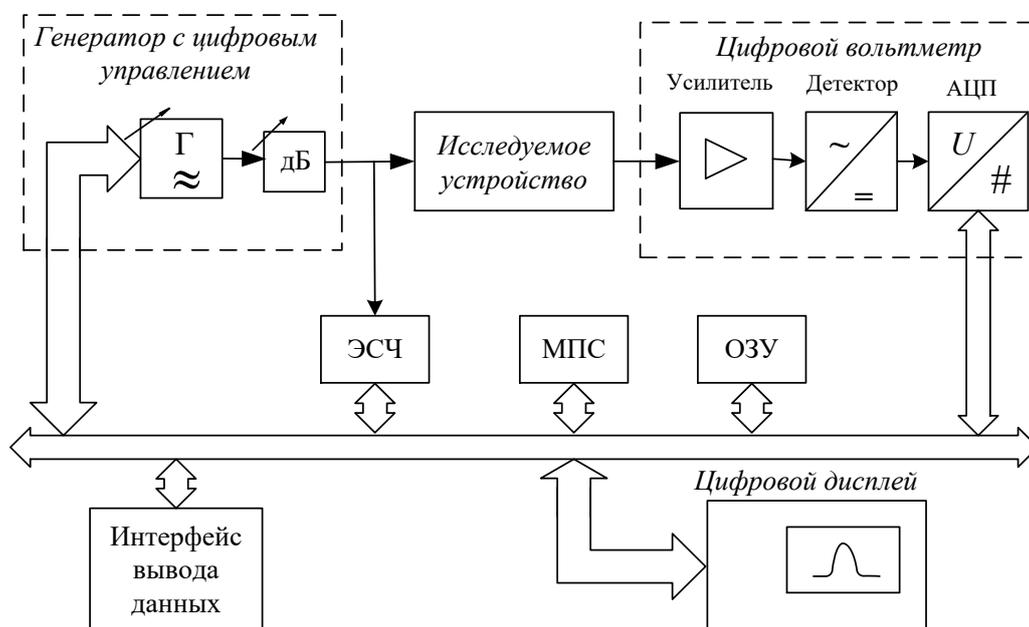


Рис. 3.8. Структурная схема микропроцессорного измерителя АЧХ

В неё входят, кроме микропроцессорной системы, генератор гармонических сигналов с цифровым управлением, электронно-счетный частотомер и цифровой вольтметр переменного тока. В качестве ГКЧ в микропроцессорных измерителях АЧХ часто применяют относительно простые генераторы, управляемые напряжением (ГУН). Управляющее напряжение получают путем цифро-аналогового преобразования кода частоты, подаваемого с микропроцессора. Для уменьшения погрешности установки частоты используют электронно-счетный частотомер (ЭСЧ), который измеряет частоту генератора на каждой ступеньке. В современных измерителях АЧХ предпочитают использовать синтезаторы частоты и генераторы с прямым цифровым синтезом (DDS),

для которых характерна высокая точность установки частоты. В этом случае контроль частоты с помощью ЭСЧ не обязателен.

Для исключения влияния неравномерности амплитуды ГКЧ производят *калибровку* прибора по уровню. В процессе калибровки измеряют и запоминают в ОЗУ собственную АЧХ прибора (частотную зависимость амплитуды выходного напряжения генератора). Для этого соединяют выход генератора и вход вольтметра напрямую. Результаты калибровки используются для корректировки данных измерения АЧХ исследуемого устройства.

### **3.4. Панорамный микропроцессорный измеритель АЧХ АКИП-4601**

В лабораторной работе используется микропроцессорный измеритель частотных характеристик АКИП-4601. Прибор состоит из генераторного и измерительного блоков, микропроцессорной системы, блока индикации и управления. В приборе использован цифровой генератор гармонического сигнала, основанный на прямом цифровом синтезе выходного сигнала (DDS). Рабочий диапазон частот генератора разбит на два поддиапазона:

- поддиапазон I (FREQ LOW) 20 Гц...200 кГц
- поддиапазон II (FREQ HIGH) 5 кГц...140 МГц.

Максимальное среднеквадратическое значение сигнала генератора порядка 0.5 В, выходное сопротивление 50 Ом. В приборе предусмотрена регулировка выходной амплитуды сигнала в пределах 0...-80 дБ с шагом 1 дБ.

Измерительный блок представляет собой аппаратно-программный векторный вольтметр, позволяющий измерить как амплитуду, так и фазу гармонического сигнала. Регулировку чувствительности вольтметра производят входным дискретным аттенуатором усилителя в пределах -30...+10 дБ с дискретом 10 дБ. В приборе предусмотрено определение фазы выходного сигнала в пределах -180...180 градусов с дискретом 1 градус. Измерительный блок имеет два значения входного сопротивления : 50 Ом и 500 кОм (высокоомный вход).

Микропроцессорная система (МПС) выполняет основные функции управления прибором, проводит обработку полученной измерительной информации, осуществляет вывод результатов на дисплей и на внешние устройства. Диапазон частот, в котором исследуется АЧХ, разбивается на дискретное число интервалов (от 2 до 501 частотных точек). Предусмотрены как линейный, так и логарифмический законы распределения частотных точек. АЧХ измеряется в течение интервала времени 125 мс, умноженного на коэффициент из ряда 2,4,8,16. Таким образом, минимальное время измерения составляет 250

мс, максимальное – 2 с. Предусмотрены следующие способы запуска измерений: непрерывный (CONTINUOUS) – периодические измерения АЧХ, однократный (SINGLE), режим остановки измерений (STOP).

МПС заметно расширяет функциональные возможности прибора по сравнению с аналоговыми панорамными измерителями АЧХ. Кроме кривой АЧХ, на экране отображается цифровая и знаковая информация о режиме работы прибора. Для измерений уровня и частот отдельных точек АЧХ используют маркеры: один основной (MARKER) и 6 дополнительных (SUB MKR). Отдельный дельта-маркер (MKR DELTA) позволяет производить измерения разностей опорного и текущего уровней АЧХ.

Прибором управляют с помощью кнопок на передней панели, а также кнопками функционального меню, выводимого в правой части дисплея. Для ввода числовых параметров предусмотрена цифровая клавиатура. Экран дисплея прибора АКПП-4601 разделен на несколько зон индикации (рис. 3.8).

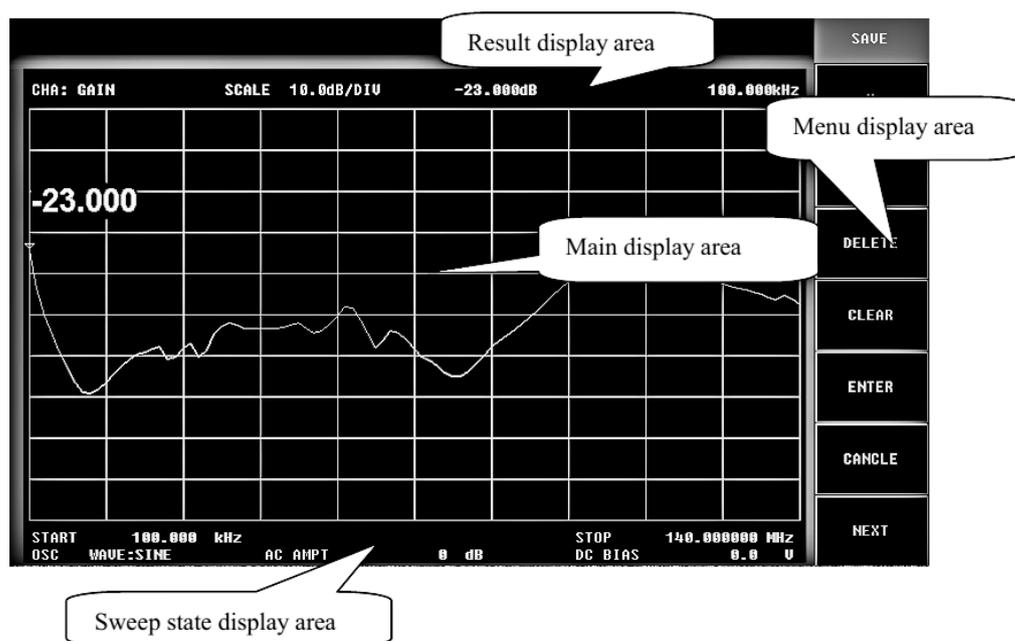


Рис. 3.9. Расположение зон вывода информации на экране

Кривая АЧХ выводится в основную зону экрана, справа – текущие параметры функционального меню. Сверху и снизу экрана выводятся текущие параметры режима прибора и результаты измерения АЧХ в точке маркера.

### 3.5. Состав лабораторной установки

В установку входят панорамный микропроцессорный измеритель амплитудно-частотных характеристик АКИП-4601 и лабораторный макет, содержащий два комплекта фильтров. Это набор *широкополосных* частотно-избирательных четырехполосников (фильтр нижних частот (ФНЧ), два полосно-пропускающих фильтра (*LC*-фильтр и электромеханический ППФ), полосно-заграждающий (ПЗФ) фильтр) и набор *узкополосных* фильтров (2 резонансных контура и 2 кварцевых фильтра). Выбор фильтра осуществляют переключателем «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ», который в двух положениях «0» соединяет входной и выходной разъемы макета напрямую. Эти положения используются для калибровки прибора. Переключатель «НАГРУЗКА» используют для установки расчетного значения сопротивления нагрузки фильтров: 600 Ом для широкополосных фильтров, 200кОм – для узкополосных.

### 3.6. Задание и указания к выполнению лабораторной работы

#### 3.6.1. Подготовка прибора к работе и установка начального диапазона качания частоты

Перед началом работы изучите устройство и назначение органов управления прибором АКИП-4601. Затем включите питание прибора кнопкой справа под экраном.

При выполнении лабораторной работы используется II диапазон качания частоты. Установите его, для чего нажмите кнопки [Freq] => [FREQ HIGH]. Затем введите начальную частоту командами [Freq] => [START] = 5 KHZ, конечную частоту [Freq] => [STOP] = 200 KHZ. Установите оптимальный уровень выходного напряжения генератора: [Gain] => [OUTPUT] = -10 [dB]. Затем установите чувствительность входа прибора [Gain] => [INPUT] = 10 [dB].

Выберите количество точек измерения [Sweep] => [SWEEP POINT] => 251 => [V/N] (ввод безразмерных чисел завершается нажатием кнопки [V/N]). Установите максимальный множитель времени свипирования 16 (при этом время анализа АЧХ порядка 2 с) [Sweep] => [SWEEP TIME] => 16 => [V/N].

Прибор готов к калибровке.

### 3.6.2. Калибровка прибора

Калибровка прибора проводится в установленном ранее частотном диапазоне при подаче на вход CHA INPUT сигнала генератора напрямую с разъема OUTPUT.

При калибровке необходимо **точное выполнение** следующей последовательности действий:

- Установите переключатель лабораторного макета «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» в положение «0» («НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СОЕДИНЕНИЕ»).
- Выберите масштаб изображения на экране 10 дБ/дел: [Scale] => [SCALE] => 10 dB/div, опорный уровень АЧХ [Scale] => [REF VAL] => 0 [dB], положение опорного уровня [Scale] => [REF POS SETTING] => 9 [V/N].
- Перейдите в пункт меню калибровки [CAL] и нажмите функциональную клавишу [CAL]. На экран выводится надпись ***In calibration***.
- После завершения калибровки не забудьте **включить режим корректировки данных** [CAL] => [COMPONENT ON]. При этом внизу экрана выводится красная надпись CAL, а на экране появится горизонтальная линия, указывающая опорный уровень отсчёта АЧХ 0 дБ

Прибор готов к измерениям в установленном диапазоне качания частоты. При изменении частотного диапазона, количества точек, уровня сигнала [OUTPUT] и (или) чувствительности индикатора [INPUT] калибровку необходимо выполнить заново.

### 3.6.3. Сохранение скриншотов экрана прибора

Сохранение вида экрана прибора в графическом файле (скриншот) делается в каждом пункте лабораторной работы. Последовательность действий при этом такая:

- Вставьте в USB-разъем флеш-накопитель.
- Для получения скриншота экрана нажмите кнопку [Save] и укажите место сохранения [NEXT ½] => [SAVE DEV->] => [REMOVAL E].
- Задайте тип файла [SAVE] => [FILE TYPE] => [GRAPH].
- Для сохранения изображения выберите пункт [NEXT ½] => [SAVE->] => и введите имя файла. Для этого используйте ручку прокрутки для указания символа на алфавитно-цифровой панели на экране. Выбор нужного символа осуществляется функциональной клавишей [SELECTED], окончательный ввод имени – клавишей [ENTER]. Формат сохраненного файла – графический, с расширением .bmp. Для выхода из режима сохранения файла нажмите кнопку [Freq].

## Часть 1. Исследование АЧХ широкополосных фильтров

### **3.6.4. Измерение АЧХ фильтра нижних частот (ФНЧ)**

Установите переключатель «НАГРУЗКА» макета в положение «Широкополосные фильтры» и проведите калибровку прибора в диапазоне частот 5...200 кГц по методике п. 3.6.2. Затем переключатель «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» поставьте в положение «1» (ФНЧ). На экране появится изображение АЧХ фильтра нижних частот. Установите оптимальный масштаб АЧХ по уровню ([Scale] => [AUTO]). Скопируйте скриншот АЧХ на флеш - накопитель по методике п. 3.6.3.

Переключите колесико прокрутки в режим управления маркером кнопкой [MKR] и включите основной маркер [Marker] => [MARKER ON]. На кривой АЧХ появится треугольная отметка маркера. Перемещая с помощью колесика прокрутки маркер в характерные точки кривой, отсчитывайте значения частоты  $f_i$  и уровня АЧХ  $K(f_i)$ , дБ. При выборе значений  $f_i$  следует учитывать особенности наблюдаемой АЧХ:

- количество точек измерения  $n$  должно обеспечивать малую погрешность интерполяции (выберите его в пределах  $n=10...20$ ).
- на участках быстрого изменения  $K(f)$  (например, на скатах кривой) интервалы между значениями  $f_i$  выбирают небольшие, на пологих участках АЧХ точки можно брать реже;
- обязательно измерить значения  $K(f)$  в характерных точках АЧХ (например, в локальных максимумах и минимумах);

Проведите измерение АЧХ в отдельных частотных точках  $f_i$ . Результаты измерений сведите в таблицу 3.1. По данным таблицы постройте график измеренной АЧХ.

Таблица 3.1

$f, \text{кГц}$	$f_1$	$f_2$	...	...	$f_n$
$K, \text{дБ}$					
$K \text{ (отн.ед.)}$					

Измерьте верхнюю частоту среза  $f_c$  по уровню -3 дБ. Для этого установите маркер в максимум АЧХ (используйте режим поиска [Search] => [MAX]). Далее активизируйте дельтамаркер: [Marker] => [MKR DELTA ON]. На

экране появится второй маркер, отмеченный буквой D. При активизации дельта-маркер совпадет с основным маркером, поэтому разница уровней и частот маркеров будет равна нулю. Перемещая дельтамаркер с помощью колесика, установите его в точку, примерно соответствующую спаду АЧХ -3 дБ относительно основного маркера. Запишите значение частоты дельтамаркера. Это будет верхняя частота среза и полоса пропускания ФНЧ  $f_g = \Delta f_{-3\text{дБ}}$ . Аналогичным образом измерьте частоту среза по уровню -20 дБ  $f_g = \Delta f_{-20\text{дБ}}$ . Затем отключите дельтамаркер: [Marker] => [MKR DELTA OFF].

Измерьте неравномерность (в дБ) АЧХ в пределах полосы пропускания ФНЧ как разницу минимального и максимального значений АЧХ (исключая значения АЧХ на границе полосы пропускания). Результаты измерений занесите в протокол лабораторной работы.

### ***3.6.5. Измерение АЧХ полосно-пропускающего фильтра 1 (ППФ1)***

Переключателем «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» лабораторного макета включите полосно-пропускающий фильтр ППФ1 (положение «2»). Действуя по методике, описанной в предыдущем пункте, проведите измерение АЧХ ППФ1 по точкам. Результаты измерений сведите в таблицу 3.1. По данным таблицы постройте АЧХ ППФ1. Сделайте скриншот экрана с АЧХ ППФ1.

Определите нижнюю  $f_n$  и верхнюю  $f_g$  частоты среза и полосы пропускания  $f_g - f_n = \Delta f$  по уровням -3 дБ ( $\Delta f_{-3\text{дБ}}$ ) и -20 дБ ( $\Delta f_{-20\text{дБ}}$ ) с помощью дельтамаркера по методике п. 3.6.4.

### ***3.6.6. Измерение АЧХ электромеханического фильтра (ППФ2).***

Переключатель «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» лабораторного макета поставьте в положение «3» (ППФ2). Поскольку полоса пропускания электромеханического фильтра мала, для исследования его АЧХ необходимо уменьшить диапазон перестройки частоты («растянуть» изображение). Для этого используйте режим корректировки диапазона частот с помощью маркера.

Установите маркер на точку левее АЧХ фильтра и сделайте ее начальной точкой частотного диапазона [Marker ->] => [MKR -> START]. Аналогичным образом установите конечную частоту правее АЧХ фильтра [MKR-> STOP].

Откалибруйте прибор в новом частотном диапазоне по методике п.3.6.1 и проведите измерение АЧХ ППФ2 по точкам. Результаты измерения АЧХ сведите в таблицу 3.1. Сделайте скриншот экрана с АЧХ ППФ2.

Измерьте полосы пропускания электромеханического фильтра по уровням -3 дБ и -20 дБ с помощью дельтамаркера по методике п.3.6.4. Затем отключите дельта-маркер [Marker] => [MKR DELTA OFF]. Результаты измерений занесите в протокол лабораторной работы.

### ***3.6.7. Измерение АЧХ полосно-заграждающего фильтра (ПЗФ).***

Установите частотный диапазон 5 кГц ... 200 кГц. Откалибруйте прибор в этом диапазоне.

Переключателем «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» лабораторного макета включите полосно-заграждающий фильтр ПЗФ (положение «4»). Установите оптимальный масштаб АЧХ по уровню ([Scale] => [AUTO]).

Проведите измерения АЧХ ПЗФ (10...20 точек). Результаты измерения АЧХ сведите в таблицу 3.1.

Определите частоты среза и полосы запираания ПЗФ. Напомним, что полосой запираания заграждающего фильтра называют интервал частот, в котором уровень его АЧХ *не превышает* некоторого (заданного относительно  $K_{max}$ ) уровня. Границы полосы запираания называют *частотами среза* ПЗФ по заданному уровню.

Определите частоты среза ПЗФ по уровням -3 дБ и -20 дБ относительно максимума АЧХ, используя дельтамаркер по методике п. 3.6.4. Результаты измерений занесите в протокол лабораторной работы.

### ***3.6.8. Расчет параметров исследованных фильтров***

При обработке результатов измерений для *каждого* типа фильтра считайте:

1. Значение АЧХ в относительном масштабе по уровню:

$$K(f) = 10^{\left(\frac{K(f), \text{дБ}}{20}\right)}. \text{ [отн. ед.]}$$

Результаты занесите в таблицу 3. 1. По данным таблицы постройте АЧХ в логарифмическом (в дБ) и относительном масштабах по уровню;

2. Коэффициент прямоугольности каждого фильтра:

$$k_n = \Delta f_{0,707} / \Delta f_{0,1} = \Delta f_{-3\text{дБ}} / \Delta f_{-20\text{дБ}};$$

3. Крутизну левого и правого скатов АЧХ фильтра  $S_{л(п)}$  (в дБ/кГц) как:

$$S_{л} = \left| \frac{K(f_{-3\text{дБ min}}) - K(f_{-20\text{дБ min}})}{f_{-3\text{дБ min}} - f_{-20\text{дБ min}}} \right|, \quad S_{п} = \left| \frac{K(f_{-3\text{дБ max}}) - K(f_{-20\text{дБ max}})}{f_{-20\text{дБ max}} - f_{-3\text{дБ max}}} \right|.$$

**Замечание:** для ФНЧ крутизну левого ската не рассчитывают, так как нижняя частота среза для него равна нулю.

## Часть 2. Исследование АЧХ узкополосных фильтров (выполняется по указанию преподавателя)

### **3.6.9. Измерение АЧХ и ФЧХ узкополосного одиночного контура.**

Переключатель «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» лабораторного макета поставьте в положение «5» (Колебательный контур 1), переключатель «НАГРУЗКА» - в положение «Узкополосные фильтры». Установите полосу качания 5 кГц ...200 кГц. На экране появится АЧХ узкополосного контура. Установите оптимальный масштаб АЧХ по уровню ([Scale] => [AUTO]). Колебательный контур 1 имеет нагруженную добротность порядка 100...120; следовательно, значения его полосы пропускания при резонансной частоте около 108 кГц лежит в интервале 900...1100 Гц.

Для исследования узкополосной АЧХ рекомендуется установить диапазон качания частоты методом последовательных приближений. Включите режим поиска для основного маркера и установите его на максимум АЧХ [Search] => [MAX]. Затем переместите маркер в точку слева от максимума АЧХ и установите нижнюю границу частотного диапазона [Marker->] => [MKR -> START]. Аналогично установите верхнюю граничную частоту [Marker->] => [MKR -> STOP]. Повторите поиск максимума АЧХ и совместите его с центральной частотой диапазона измерения [Marker->] => [MKR -> CENTER]. Откалибруйте прибор в новом частотном диапазоне.

Заново найдите максимум и запишите значение резонансной частоты  $f_0$ . Введите режим дельтамаркера [Marker] => [MKR DELTA ON]. Найдите полосу пропускания как разность частот среза слева и справа от максимума по уровню -3 дБ (разность уровней АЧХ и частот маркеров выводится слева под

надписью «deltamarker»). Рассчитайте добротность контура по формуле (3.1). Выключите дельта-маркер.

Выведите на дисплей одновременно АЧХ и ФЧХ контура [Display] => [GAIN PHASE]. Установите оптимальный масштаб изображения по уровню ([Scale] => [AUTO]). Переключите маркер на кривую ФЧХ ([Marker] => [MKR ON PHASE FREQ]). Установите маркер ФЧХ на резонансную частоту (по нулевой разности частот маркеров). Запишите фазовый сдвиг на этой частоте (он не равен нулю, поскольку прибор не откалиброван по фазе). Далее найдите фазовые сдвиги на граничных частотах полосы пропускания, определенных ранее по уровню -3 дБ. Вычтите из них значение фазового сдвига на резонансной частоте. Результаты запишите в протокол.

Измерьте скорость изменения ФЧХ на резонансной частоте. Для этого найдите изменение фазового сдвига  $\Delta\Phi_{\text{ЧХ}}$  вблизи резонансной частоты при смещении по частоте  $\Delta f = 100..200$  Гц от резонанса и оцените производную

$\left| \frac{\Delta\Phi_{\text{ЧХ}}}{\Delta f} \right|$ . Определите добротность контура по ФЧХ, используя формулу (3.2).

Сравните ее значение с полученной выше добротностью контура, рассчитанной через параметры АЧХ.

Сделайте скриншот экрана с АЧХ и ФЧХ контура. Вернитесь к режиму вывода на экран только АЧХ (Display] => [GAIN]). Переключите маркер на кривую АЧХ ([Marker] => [MKR ON AMPT FREQ]).

### ***3.6.10. Измерение АЧХ пьезоэлектрического (кварцевого) фильтра 1 (ППФ3)***

Переключатель «ИССЛЕДУЕМАЯ ЦЕПЬ» лабораторного макета поставьте в положение «б» (Пьезоэлектрический фильтр 1 (ППФ3), переключатель «НАГРУЗКА» - в положение «Узкополосные фильтры».

Установите начальный диапазон качания частоты 105 кГц ...110 кГц с максимальным временем свипирования 2 с ([Sweep] => [SWEEP TIME] =16 =>[V/N]). После установки частотного диапазона на экране появится короткий выброс, представляющий собой отклик узкополосной цепи на ударное возбуждение сигналом с меняющейся частотой, соответствующий коэффициенту динамических искажений  $\mu \gg 1$ . Отрегулируйте масштаб изображения по уровню ([Scale] => [AUTO]).

Очевидно, что для обеспечения точности измерений АЧХ надо небольшими шагами сужать полосу качания частоты и тем самым уменьшать скорость ка-

чания частоты. Маркером найдите максимум графики [Search] => [MAX]. Установите отклик в центр экрана [Marker->] => [MKR->CENTER] и повторно найдите максимум. Скорректируйте диапазон качания частоты по методике п.3.6.9 так, чтобы АЧХ фильтра занимал бы примерно треть ширины экрана. Оцените примерную полосу пропускания фильтра по уровню -3 дБ с использованием дельтамаркера ([MARKER] => [MKR DELTA ON] (см. п. 3.6.9). Кварцевые фильтры имеют эквивалентную добротность  $Q = 10^3 \dots 10^4$  и выше. Следовательно, значение полосы пропускания фильтра ППФ1 макета, имеющего резонансную частоту 107,75 кГц, будет в интервале 10...100 Гц. Запишите полученные результаты, а также начальную START и конечную STOP частоты диапазона свипирования (они выводятся в нижней части экрана). Отключите дельтамаркер ([Marker]=> [MKR DELTA OFF]).

Запишите в память прибора полученный график АЧХ в качестве референсного ([Display] => [UPDATE REF]) и выведите его на экран командой [REF DISP ON]. Увеличьте скорость перестройки частоты, задав минимальное время свипирования  $T_p = 250$  мс ([Sweep] => [SWEEP TIME] =2 =>[V/N]). На экране (кроме референсного графика) появится график с ярко выраженными динамическими искажениями. Можно видеть расширение кривой отклика, уменьшение его амплитуды и сдвиг максимума в сторону возрастания частоты. Наблюдается также колебательный переходной процесс на правом склоне характеристики АЧХ. Сделайте скриншот экрана по методике п. 3.6.3.

Рассчитайте коэффициент динамических искажений по формуле (3.4), при минимальном (250 мс) и максимальном (2 с) времени перестройки  $T_p$ , используя значения начальной START и конечной STOP частот диапазона перестройки. Отключите вывод референсной АЧХ ([Display] => [REF DISP ON]). Установите максимальное время свипирования [Sweep] => [SWEEP TIME] =16 => [V/N]. Верните переключатель макета «НАГРУЗКА» в положение «Широкополосные фильтры».

### 3.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему измерителя АЧХ, результаты измерений (таблицы и графики, данные расчетов параметров фильтров), краткие выводы по лабораторной работе.

### 3.8. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия панорамного измерителя АЧХ.
2. Какие погрешности измерения АЧХ «по точкам» отсутствуют в панорамном методе?
3. Укажите условия неискаженного воспроизведения формы АЧХ на экране панорамного измерителя частотных характеристик.
4. Сформулируйте и объясните преимущества микропроцессорного измерителя АЧХ в сравнении с аналоговым панорамным прибором.
5. Для чего в микропроцессорных измерителях АЧХ предусмотрен электронно-счетный частотомер? Как используют его показания?
6. Объясните, почему в числе прочих технических данных измерителей АЧХ указывают значения выходного сопротивления генератора и входного сопротивления индикаторного блока.
7. Используя измеритель АЧХ, можно производить измерение частотных характеристик импедансов двухполюсников. Предложите способ включения двухполюсника в схему установки.
8. Какие генераторы применяют в цифровых измерителях АЧХ? Приведите вид закона изменения частоты на выходе такого генератора. Как выбрать длительность ступеньки этого закона?
9. Как выполняется калибровка цифрового измерителя АЧХ? Как используют ее результаты?
10. Что такое маркер (курсор), выводимый на экран цифрового измерителя АЧХ? Какие функции он выполняет при исследовании АЧХ?