

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Методические указания к лабораторной работе

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Санкт-Петербург
2012

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

В процессе выполнения лабораторной работы исследуются амплитудные характеристики радиоэлектронных устройств, определяются коэффициенты нелинейных искажений и гармоник. Программа работы включает измерение амплитудной характеристики активного фильтра, расчет по ней зависимости коэффициента гармоник от амплитуды входного сигнала, измерение коэффициента гармоник фильтров цифровым автоматизированным прибором СК6-13.

Способы исследования амплитудных характеристик

Многие радиоэлектронные устройства (усилители, активные фильтры и пр.) применяют для линейного преобразования сигналов (увеличения или уменьшения уровня, изменения спектральных характеристик сигнала и др). Однако эти устройства могут считаться линейными лишь приближенно, в определенном диапазоне амплитуд входного сигнала. Увеличение амплитуды выше этого диапазона приводит к искажениям формы сигнала на выходе устройства. Эти искажения называют *нелинейными*. Они вызывают ряд нежелательных явлений: ухудшают разборчивость речи в системах связи и качество музыкальных радиопередач, приводят к увеличению погрешностей измерительных приборов, создают помехи радио- и телеприему. Уменьшения нелинейных искажений (НИ) достигают правильным выбором режимов работы элементов радиоаппаратуры, использованием отрицательной обратной связи и схем компенсации нежелательных гармоник. Для контроля эффективности этих мер необходимо исследовать амплитудные характеристики радиоэлектронных устройств и дать количественную оценку нелинейных искажений.

Амплитудной характеристикой (АХ) устройства называют зависимость между мгновенными значениями выходного и входного напряжений в один и тот же момент времени. АХ линейного устройства представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат; АХ квазилинейного устройства – кривую, имеющую линейный участок при малых значениях сигнала (рис. 6.1).

Для измерения АХ необходимо, подавая на вход меняющееся во времени напряжение, измерять мгновенные значения сигнала на выходе. Форма напряжения при этом особой роли не играет. В большинстве случаев используют гармоническую форму сигнала. Тогда чаще всего АХ получают, измеряя отношение амплитуд выходного и входного колебаний. Осциллограмму АХ и ее измерение проводят с помощью установки, показанной на рис. 6.2, а.

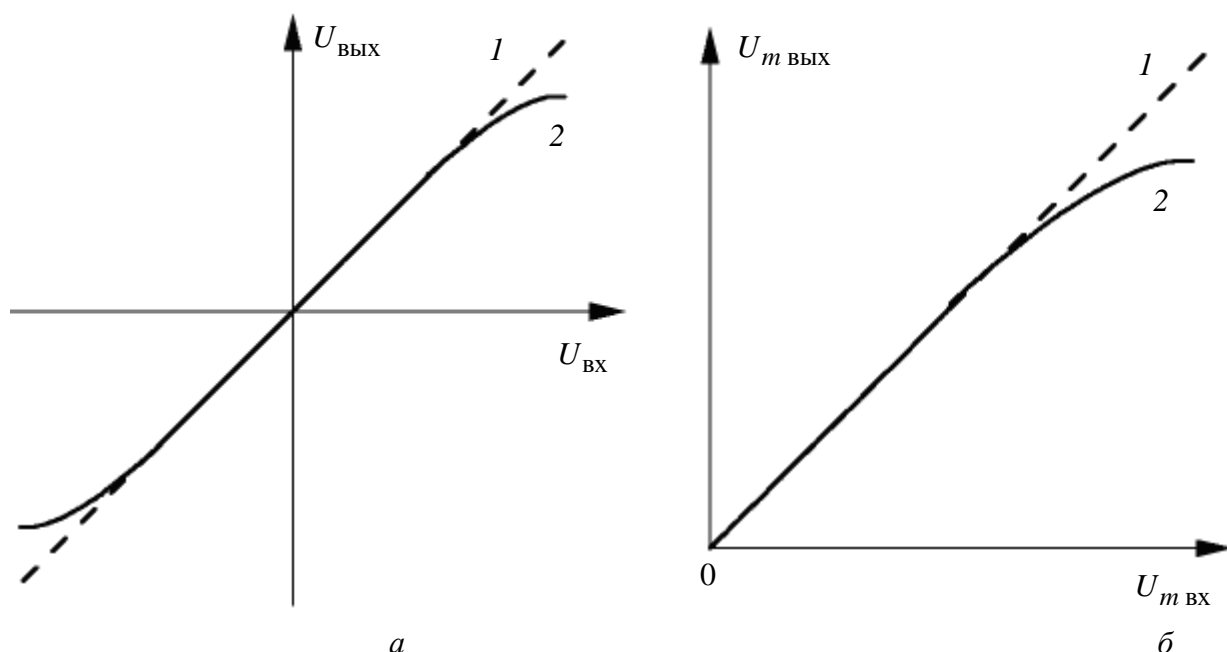


Рис. 6.1. Амплитудные характеристики. Зависимости между:

а – мгновенными значениями; б – амплитудами напряжений;

1 – линейное устройство; 2 – квазилинейное устройство

Генератор гармонических колебаний настраивают на частоту в пределах рабочей полосы исследуемого устройства. Напряжения $u_{\text{ВХ}}$ и $u_{\text{ВЫХ}}$ подают соответственно на входы X и Y осциллографа. Генератор линейной развертки отключают (режим $X-Y$). Тогда отклонение луча по оси X пропорционально мгновенным значениям $u_{\text{ВХ}}$, а по оси Y – мгновенным значениям $u_{\text{ВЫХ}}$. При отсутствии фазовых сдвигов между входным и выходным сигналами на экране осциллографа появится изображение АХ. Для измерения значений АХ в отдельных точках используют метод калиброванных шкал.

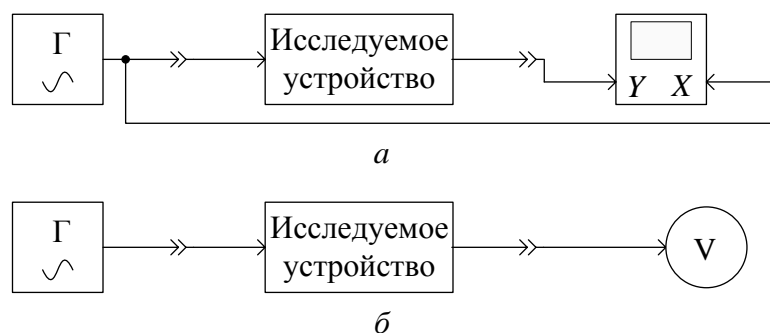


Рис. 6.2. Структурные схемы установок для измерения амплитудных характеристик:

а – с помощью осциллографа; б – с помощью вольтметра

Большинство радиоэлектронных устройств вносят фазовый сдвиг. Для них измерение АХ с помощью осциллографа указанным способом затруднено – на экране вместо линии АХ появляется искаженная фигура Лиссажу (эллипс). В этом

случае амплитудную характеристику измеряют с помощью генератора гармонических сигналов и вольтметра (рис. 6.2, б).

АХ не дает полных сведений о характере нелинейных искажений в устройстве, но позволяет определить степень отклонения от линейного режима, установить допустимые пределы изменения амплитуды входного сигнала.

Измерение нелинейных искажений

Нелинейность устройства вызывает гармонические и интермодуляционные НИ. *Гармонические НИ* появляются при подаче на вход нелинейного устройства гармонического напряжения. При этом спектр выходного напряжения наряду с колебанием основной частоты содержит высшие гармоники кратной частоты. *Интермодуляционные НИ* появляются при одновременном воздействии на вход нелинейного устройства гармонических напряжений с разными частотами. Они характеризуются образованием комбинационных частот в спектре выходного напряжения.

Гармонические НИ характеризуют *коэффициентом гармоник*:

$$K_{\text{гарм}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (6.1)$$

где $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ – среднеквадратические значения соответствующих гармоник на выходе исследуемого устройства.

Коэффициент можно оценить, определив амплитуды гармоник с помощью анализатора спектра. Этот метод используют в основном на высоких частотах. В диапазоне низких частот его применять трудно из-за низкой разрешающей способности спектроанализаторов. Чаще всего для измерения коэффициента гармоник используют специализированные приборы, называемые *измерителями нелинейных искажений* (ИНИ). Упрощенная структурная схема ИНИ приведена на рис. 6.3.

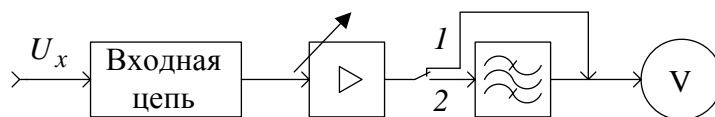


Рис. 6.3. Упрощенная структурная схема измерителя нелинейных искажений:

1 — калибровка; 2 — измерение

Прибор использует метод узкополосной фильтрации, состоящий в подавлении первой гармоники и измерении среднеквадратического значения совокупности высших гармоник. ИНИ состоит из входной цепи, которая включает разделительный конденсатор и аттенюатор, широкополосного усилителя с регулируемым

коэффициентом усиления, узкополосного режекторного фильтра, предназначенного для подавления первой гармоники сигнала, и электронного вольтметра среднеквадратических значений.

Измерение $K_{\text{гарм}}$ производят следующим образом. На вход ИНИ подают исследуемый сигнал. Переключатель ставят в положение 1 (режим КАЛИБРОВКА) и регулировкой коэффициента усиления добиваются показаний вольтметра, принимаемых за 100 %. Затем ставят переключатель в положение 2 – ИЗМЕРЕНИЕ. Перестраивая по частоте режекторный фильтр, подавляют первую гармонику сигнала. Настройка фильтра контролируется по минимальному показанию вольтметра, соответствующему сумме напряжений только высших гармоник. Благодаря произведенной ранее калибровке показания вольтметра пропорциональны отношению суммарного среднеквадратического напряжения высших гармоник к среднеквадратическому напряжению полного сигнала:

$$K'_{\text{гарм}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}}. \quad (6.2)$$

Это выражение определяет *коэффициент нелинейных искажений* (КНИ). Он связан с коэффициентом гармоник (6.1) простым соотношением:

$$K_{\text{гарм}} = \frac{K'_{\text{гарм}}}{\sqrt{1 - K_{\text{гарм}}'^2}}. \quad (6.3)$$

При малых искажениях $K_{\text{гарм}}$ и КНИ практически совпадают. Шкалу вольтметра градуируют в значениях $K_{\text{гарм}}$ или $K'_{\text{гарм}}$ [%].

Цифровой измеритель нелинейных искажений СК6-13

Автоматизированный цифровой прибор СК6-13 предназначен для измерения коэффициента гармоник и среднеквадратического значения напряжения. Он состоит из измерителя нелинейных искажений и перестраиваемого синхронно с ним генератора гармонического сигнала. Прибор СК6-13 обеспечивает автоматическое и ручное переключение пределов измерения, возможность запоминания значений частоты и напряжения генератора, вывод результата измерения на печать.

Основные технические характеристики прибора СК6-13:

1. Диапазон рабочих частот: при измерении коэффициента гармоник – от 10 Гц до 120 кГц; при измерении напряжения – от 10 Гц до 600 кГц.
2. Диапазон измерения коэффициента гармоник 0.003...100 %.

3. Диапазон измерения среднеквадратического значения напряжения от 100 мкВ до 100 В в частотном диапазоне от 10 Гц до 600 кГц.

4. Входное сопротивление прибора 15 кОм в режиме измерения $K_{\text{гарм}}$ и не менее 500 кОм в режиме измерения напряжения.

5. Диапазон установки напряжения встроенного генератора от 1 мВ до 9.99 В, выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 600 \text{ Ом}$.

6. Метрологические характеристики прибора:

основная относительная погрешность измерения коэффициент гармоник $\pm 0.01K_{\text{гарм}} + 0.02 \dots 0.07 \%$;

основная погрешность измерения напряжения $\pm 0.025U_x + 1 \cdot 10^{-5} \text{ В}$;

погрешность установки частоты генератора $\pm 0.01f$, напряжения генератора $-\pm 0.03U_{\text{Г}} + 1 \cdot 10^{-4} \text{ В}$;

Коэффициент гармоник встроенного генератора составляет 0.002...0.004 % в диапазоне частот от 100 Гц до 20 кГц и не хуже 0.02 % в диапазоне 20...120 кГц.

Прибор состоит из трех блоков – измерителя, генератора и микропроцессорной системы (рис. 6.4).

В режиме измерения коэффициента гармоник $K_{\text{гарм}}$ сигнал с входа измерителя поступает на масштабный усилитель-компрессор. Он ограничивает динамический диапазон сигнала с 60 до 6 дБ, т.е. при изменении уровня входного сигнала от 0.1 до 100 В уровень выходного сигнала усилителя поддерживается в пределах 0.85...2.25 В. Это снижает искажения, вносимые самим прибором, упрощает работу блоков фильтрации и конструкцию АЦП цифрового вольтметра.

Далее сигнал поступает на вход режекторного фильтра, построенного на основе трех RC-звеньев с коммутацией резистивных и емкостных матриц. Этот фильтр удаляет (подавляет) из сигнала первую гармонику, оставляя высшие гармоники без изменения. Настройка режекторного фильтра производится микропроцессором тем же кодом, что и перестройка генератора. Тем самым обеспечивается точная настройка фильтра на частоту входного сигнала.

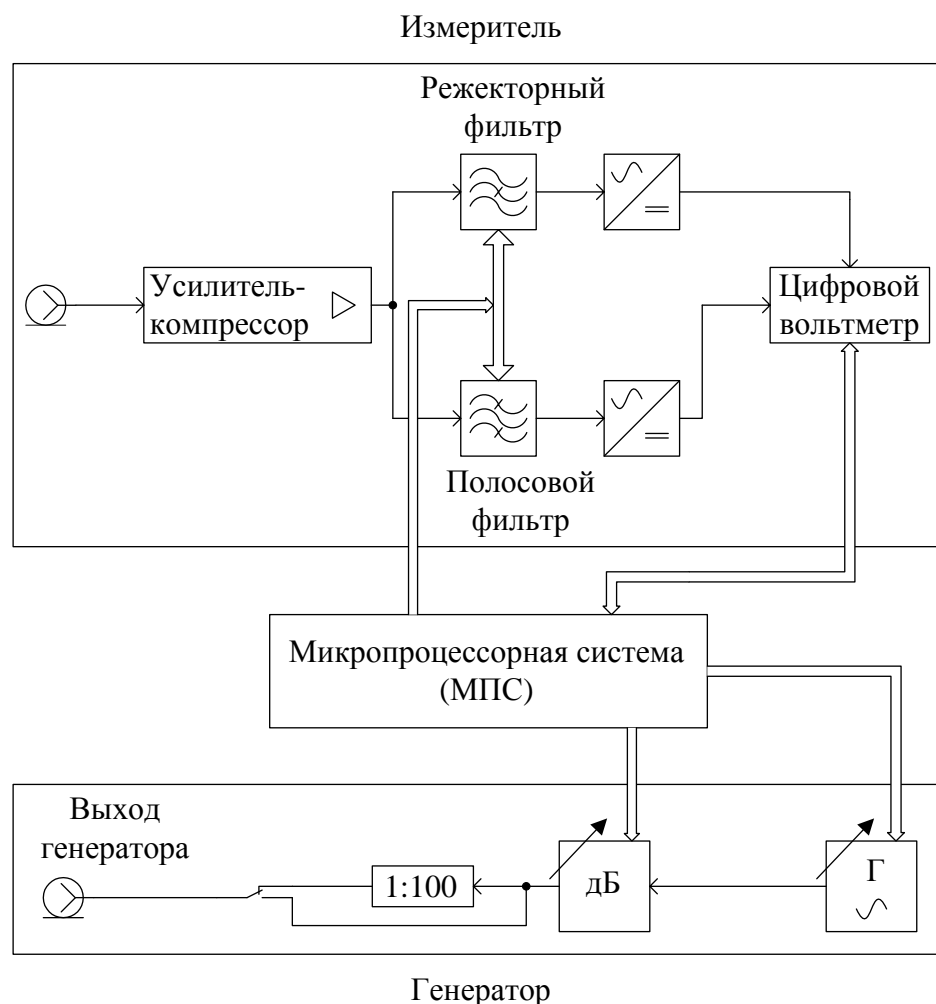


Рис. 6.4. Структурная схема измерителя нелинейных искажений

С выхода фильтра сигнал подается на калиброванный дискретный аттенюатор. Он позволяет переключать диапазоны измерения. Преобразователь (детектор) среднеквадратического значения формирует постоянное напряжение, измеряемое цифровым вольтметром постоянного тока. Используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) двойного интегрирования.

Для вычисления коэффициента гармоник согласно (6.1) требуется сигнал суммы высших гармоник нормировать к уровню первой гармоники. Для этого в приборе предусмотрен блок выделения сигнала первой гармоники. Он включает в себя полосовой фильтр и линейный детектор (выпрямитель). Постоянное напряжение, пропорциональное уровню первой гармоники, подается в качестве опорного на АЦП цифрового вольтметра. При этом АЦП вырабатывает код, равный отношению среднеквадратической суммы высших гармоник к уровню первой гармоники.

В режиме измерения напряжения V входной сигнал подается непосредственно на вольтметр. В качестве опорного в АЦП используется его собственный образцовый источник постоянного напряжения.

Генератор прибора представляет собой функциональный генератор с цифровым управлением. Он содержит два интегратора и суммирующий усилитель. Частота генератора регулируется переключением матрицы конденсаторов и резистивной матрицы делителя напряжения, уровень выходного напряжения – дискретным аттенуатором с цифровым управлением. Для получения малых значений выходного напряжения (до 100 мВ) предусмотрен дополнительный делитель напряжения 1:100, включаемый вручную.

Управляющая часть прибора представляет собой микропроцессорную систему, реализующую:

- прием и обработку команд с клавиш управления прибором;
- управление работой цифрового вольтметра;
- перестройку частоты генератора и режекторного фильтра;
- запоминание 9 значений частоты и уровня сигнала генератора (режим ПАМЯТЬ);
- переключение пределов измерения в ручном или автоматическом режимах;
- индикацию результатов измерения на цифровом табло.

Описание лабораторной установки

В данной работе исследуются гармонические нелинейные искажения, возникающие в активных фильтрах. *Активным* называют частотный фильтр, содержащий один или несколько усилительных элементов.

Такие фильтры реализуют на основе усилителей с обратными связями. Активные фильтры имеют значительно меньшие габариты и массу по сравнению с пассивными (выполненными на RLC-элементах). Однако они являются квазилинейными устройствами и могут работать лишь в ограниченных диапазонах уровней входных сигналов.

Лабораторный макет содержит два активных фильтра – верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот. Они подключаются к разъемам ВХОД и ВЫХОД с помощью сдвоенного переключателя. Положение 1 переключателя соответствует включению фильтра нижних частот с частотой среза $f_{\text{В}} = 2.5$ кГц; положение 2 – включению фильтра верхних частот с частотой среза $f_{\text{Н}} = 100$ Гц. Положение 3 переключателя позволяет соединить вход и выход макета непосредственно для контроля входного напряжения.

В лабораторную установку, кроме макета, входит измеритель СК6-13 и двухканальный аналоговый осциллограф для измерения амплитудных характеристик и наблюдения формы сигналов.

Задание и указания к выполнению работы

Подготовка макета и прибора СК6-13 к работе

Подключите выход генератора прибора СК6-13 к входному разъему макета. Вход измерителя прибора СК6-13 соедините с выходным разъемом макета. Осциллограф подключите к макету следующим образом: канал СН1 (в режиме $X-Y$ он выполняет функции канала X) соедините с входным разъемом (на него подается напряжение генератора), канал СН2 (канал Y) – с выходным разъемом макета. Включите питание приборов и макета.

Установите исходные параметры генератора – частоту 1 кГц и напряжение 1 В. Для выбора частоты нажмите кнопку F и укажите желаемую единицу измерения – герц или килогерц, нажав, соответственно, кнопку mV/Hz или V/kHz . Набор численного значения частоты производится с помощью цифровых клавиш. Выбор старшего разряда трехзначного числа, соответствующего устанавливаемой частоте, производится кнопкой $P3$. Аналогично устанавливаются средний ($P2$) и младший разряды ($P1$). Для установки десятичной точки нажмите кнопку « $,$ ». Если точка не устанавливается, то необходимо стереть набранные значения кнопкой « x » и повторить ввод заново. Установку выходного напряжения генератора производят после нажатия кнопки V , единицу измерения (милливольт или вольт) выбирают кнопками mV/Hz и V/kHz . Среднеквадратическое значение напряжения набирают на цифровом табло по описанной ранее методике.

Переключатель выхода генератора установите в положение 1:1 600 Ом. Кнопки ПАМЯТЬ и \blacktriangle должны быть неактивны. Включите ручной режим измерения напряжения V , внутренние фильтры измерителя ФНЧ, ФВЧ должны быть выключены.

Измерение амплитудной характеристики активного ФВЧ

Амплитудную характеристику в данной лабораторной работе измеряют с помощью осциллографа. Осциллограф поставьте в режим $X-Y$. Отрегулируйте коэффициенты отклонения в каналах – они должны быть одинаковыми и равными 1 В/дел. Проверьте установку плавных регуляторов коэффициентов отклонения каналов (должны быть в крайнем правом положении).

Для центровки положения осциллограммы используйте непосредственное соединение входа и выхода макета (положение 3 переключателя). Установите частоту

генератора 1 кГц, выходное напряжение уменьшите до нуля. На экране осциллографа в режиме $X-Y$ появится светящаяся точка. Регуляторами смещения по осям X и Y установите ее на начало координат координатной сетки. При увеличении значения выходного напряжения генератора вы должны наблюдать прямую линию (см. рис. 6.1, а) под углом 45° . Если это не выполняется, проверьте равенство коэффициентов отклонения каналов осциллографа.

Подключите ФВЧ (положение переключателя 2) и установите напряжение генератора $U_{\Gamma} = 5$ В. На экране появится изображение амплитудной характеристики ФВЧ. Координаты точек характеристики в делениях масштабной сетки по оси X определяются мгновенными значениями $u_{\text{ВХ}}$, по оси Y – мгновенными значениями $u_{\text{ВЫХ}}$ в вольтах. Наблюдаемое небольшое раздвоение линии изображения вызвано фазовым сдвигом в фильтре, небольшая разница установленного напряжения генератора и входного напряжения фильтра объясняется влиянием входного сопротивления ФВЧ.

Таблица 6.1

Измерение амплитудной характеристики активного ФВЧ

$U_{\Gamma}, \text{В}$	0	0.5	...	5
$U_{m \text{ ВХ}}, \text{В}$				
$U_{m \text{ ВЫХ}}, \text{В}$				

Измерьте амплитудную характеристику по точкам. Для этого, меняя установленное напряжение генератора U_{Γ} от 0 до 5 В с шагом 0.5 В, по экрану осциллографа измеряйте амплитуды входного и выходного напряжения $U_{m \text{ ВХ}}$ и $U_{m \text{ ВЫХ}}$. Результаты измерений занесите в таблицу по форме табл. 6.1. Постройте график амплитудной характеристики ФВЧ $U_{m \text{ ВЫХ}} = f U_{m \text{ ВХ}}$ (см. рис. 6.1, б).

Измерение зависимости коэффициента гармоник выходного сигнала активных фильтров от уровня входного сигнала

Соедините кабелем выход лабораторного макета с гнездом ВХОД прибора СК6-13. Для контроля работы режекторного фильтра в приборе предусмотрен вывод отфильтрованного сигнала (без первой гармоники). Соедините выход измерителя с входом канала вертикального отклонения СН1 осциллографа. Настройте осциллограф на работу с непрерывной разверткой в режиме внутренней синхронизации (режим $X-Y$ надо отключить). На второй канал подайте выходной сигнал с макета. Используйте поочередный (ALT) или прерывистый (CHOP) режим рабо-

ты коммутатора каналов Y . При этом по первому каналу будет наблюдаться сигнал высших гармоник, по второму – полный выходной сигнал фильтра.

Включите ФНЧ. Для этого переключатель макета поставьте в положение 1. На измерителе СК6-13 нажмите кнопку K_r . Установите частоту генератора 200 Гц и уровень напряжения 0,5 В. На табло K_r прибора СК6-13 появится показание, указывающее значение K_r в процентах. Выберите вручную необходимый предел K_r или используйте автоматический режим настройки прибора. Правильный выбор предела контролируют по виду отфильтрованного сигнала – он не должен быть ограничен по уровню. Устойчивые показания на табло K_r свидетельствуют о завершении измерения.

Измерьте значения коэффициента гармоник, соответствующие среднеквадратическим значениям напряжения генератора $U_r = 0.5...5$ В с шагом 0.5 В. Повторите измерения на частотах 1 и 2 кГц. Для напряжения $U_r = 5$ В зарисуйте осциллограммы напряжений на выходах макета и прибора. Результаты измерений занесите в таблицу по форме табл. 6.2.

Таблица 6.2

Измерение коэффициента гармоник активного фильтра

$U_{вх} = U_r$, В	$U_{m вх}$, В	K_r , %		
		$f = 200$ Гц	$f = 1$ кГц	$f = 2$ кГц

Включите ФВЧ (переключатель макета в положении 2) и сделайте аналогичные измерения для этого фильтра с занесением результатов измерений в таблицу по форме табл. 6.2. Отдельно для ФНЧ и ФВЧ постройте семейства графиков измеренных зависимостей K_r от $U_{m вх} = \sqrt{2}U_r$, используя в качестве параметра зависимостей частоту входного сигнала.

Измерение собственного коэффициента гармоник генератора

Измерьте частотную зависимость собственного коэффициента гармоник генератора прибора СК6-13. Используйте непосредственное соединение входа и выхода макета (положение 3 переключателя). Можно применить режим самоконтроля прибора (кнопка \blacktriangle), при котором сигнал генератора подается на вход измерителя внутри прибора. Установите напряжение генератора 5 В. Выберите 10–15 частотных точек в диапазоне от 200 Гц до 200 кГц и измерьте на этих частотах K_r сигнала генератора. Занесите данные измерения в таблицу по форме табл. 6.3. Постройте частотную зависимость $K_r(f)$.

Измерение собственного коэффициента гармоник генератора

f , Гц				
K_r , %				

**Расчет зависимости коэффициента гармоник активного ФВЧ
по экспериментально полученной АХ**

Алгоритм вычислений основан на расчете значений K_r по формуле (6.1), в которую подставляются значения амплитуд гармоник (до пятой включительно). Для симметричной АХ при слабой нелинейности и рабочей точке, расположенной в нуле, K_r можно оценить только по третьей и пятой гармоникам (остальные при этом равны нулю, а высшие не учитываются из-за их малости). Амплитудная характеристика является в этом случае нечетной функцией. На рис. 6.5 представлен график, поясняющий положение отсчетных ординат АХ относительно амплитуды сигнала; они берутся через интервал $U_{m\text{ вх}}/3$, а $U_{m\text{ вх}}$ соответствует y_3 :

$$U_{m1} = -180y_1 + 1008y_2 + 668y_3 / 1280;$$

$$U_{m3} = -630y_1 - 360y_2 + 450y_3 / 1280;$$

$$U_{m5} = 810y_1 - 648y_2 + 162y_3 / 1280;$$

где y_1 , y_2 , y_3 – ординаты положительной части АХ (мгновенные значения выходного напряжения).

Вычисления произведите для амплитуд входного напряжения $U_{m\text{ вх}}$, равных 1, 2, 3, 4, 5 В. Значения ординат АХ y_1 , y_2 , y_3 возьмите с кривых, построенных по результатам измерений в 6.5.2. Результаты расчетов сведите в таблицу по форме табл. 6.4. Постройте на одном графике зависимости K_r и амплитуд гармоник от амплитуды входного напряжения. Сравните расчетную зависимость K_r с экспериментальной, полученной для ФВЧ в 6.5.3.

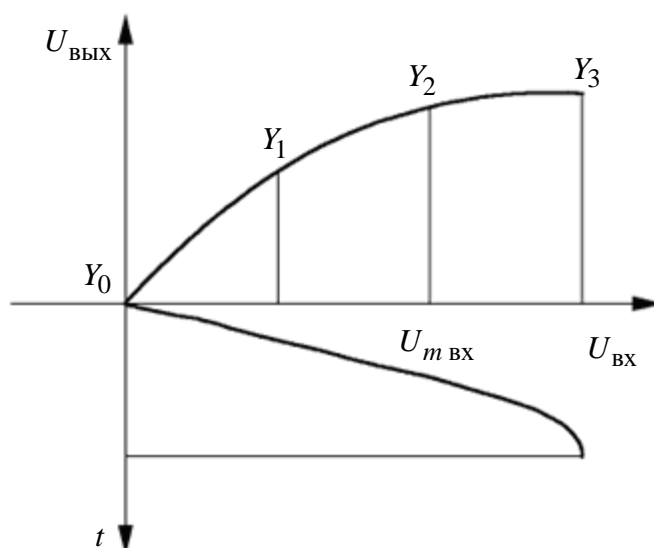


Рис. 6.5. Выбор ординат амплитудной характеристики для расчета коэффициента гармоник

Таблица 6.4

Измерение собственного коэффициента гармоник генератора

$U_{ВХ}, В$	$U_{m1}, В$	$U_{m3}, В$	$U_{m5}, В$	$K_{Г}, \%$

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурную схему измерительной установки, упрощенную структурную схему измерителя нелинейных искажений, таблицы с результатами измерений, графики измеренных и рассчитанных зависимостей, а также краткие выводы по каждому из пунктов задания.