ТУСУР

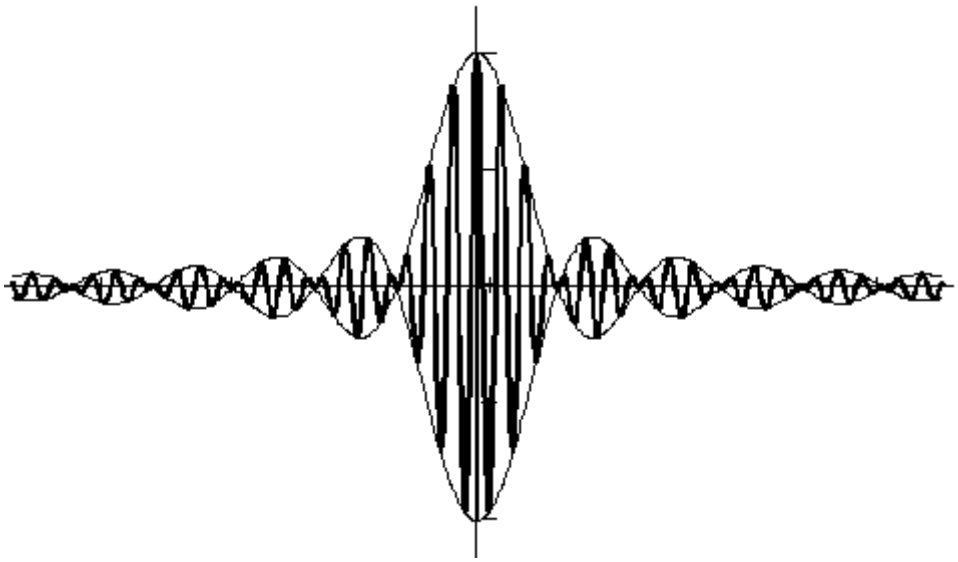
КАФЕДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ОСНОВ РАДИОТЕХНИКИ

Брагин Д.С., Попова А.И., Степной В.С.

Лабораторный практикум
по дисциплинам:

«Радиотехнические цепи и сигналы» и «Сигналы электросвязи»

Часть 2. Преобразования сигналов в нелинейных цепях



Томск - 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра Телекоммуникаций и Основ Радиотехники

Брагин Д.С., Попова А.И., Степной В.С.

Лабораторный практикум
по дисциплинам:

«Радиотехнические цепи и сигналы» и «Сигналы электросвязи»

Часть 2. Преобразования сигналов в нелинейных цепях

Томск – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	4
1.	ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	4
1.1.	СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА	5
1.2.	СДАЧА ЗАЧЕТА	5
2.	ОПИСАНИЕ ПАНЕЛИ "НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ" ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА	5
3	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 Исследование нелинейного усилителя и умножителя частоты	7
4.	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 Амплитудная модуляция	14
5.	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 Исследование детектирования АМ колебаний	21
6.	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 Исследование *LC*-автогенератора	27
	Список использованных источников	34
	ПРИЛОЖЕНИЕ. Работа с осциллографом *KeySight*	35

.

Введение

Лабораторный практикум по дисциплинам «Радиотехнические цепи и сигналы» и «Сигналы электросвязи» направлен закрепить и расширить теоретические знания студентов в области радиоэлектроники, ознакомить их с методикой исследования электронных схем и дать практические навыки работы с основными радиоизмерительными приборами.

Вторая часть лабораторного практикума, предназначенного для студентов всех технических специальностей, содержит описание следующих работ:

1. Исследование нелинейного усилителя и умножителя частоты.
2. Амплитудный модулятор.
3. Исследование детектирования амплитудно-модулированных колебаний (АМ-колебаний).
4. Исследование *LC*-автогенератора.

Лабораторные работы выполняются на макетной панели "Нелинейные цепи", описание которой приведено в начале практикума.

Все измерения временных и спектральных характеристик выполняются с помощью осциллографа *KeySight.* Осциллограф *KeySight* работает в режимах: Генератора сигналов *WaveGen,* анализатора спектра *(функция преобразование FFT* - Быстрое Преобразование Фурье*).* В качестве низкочастотного генератора для формирования модулирующего сигнала используется генератор *PCLab*2000.

1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Перед выполнением работы студенты обязаны:

а) Изучить соответствующие разделы теоретического курса.

б) Ознакомиться с описанием работы и используемыми при её выполнении измерительными приборами.

в) Произвести необходимые предварительные расчёты, изложенные в домашнем задании.

г) Ознакомиться с лабораторной установкой и чётко знать назначение и расположение её отдельных узлов и всех органов управления.

д) Ознакомиться с правилами техники безопасности.

2. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, выполнившие требования п.1 и показавшие свою подготовленность при собеседовании с преподавателем.

3. Лабораторные работы выполняются бригадами из двух-трех человек.

4. При выполнении работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и следовать указанной методике.

5. В процессе выполнения работы составляется предварительный отчёт, один на бригаду. Предварительный отчет должен содержать таблицы и графики полученных экспериментально зависимостей.

6. Если при составлении предварительного отчёта выявится недостаточность или сомнительность полученных данных, то необходимо экспериментально получить недостающие данные и произвести проверку сомнительных результатов.

7. Работа считается выполненной после утверждения предварительного отчета преподавателем.

8. По окончании работы все источники питания, и приборы лабораторного стенда должны быть выключены, а рабочее местоприведенов порядок.

9. Студенты, не выполнившие работу в часы занятий, обязаны выполнить ее в специально отведенное время.

10. Лабораторная работа считается выполненной, если студент представил отчет преподавателю и защитил его, ответив на контрольные вопросы, предлагаемые преподавателем.

1.1 СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА

1. Отчет по выполненной работе составляется индивидуально каждым студентом или один на бригаду (по усмотрению преподавателя) (см. п.1.2 Сдача зачета).

2. Отчет оформляется в соответствии с образовательным стандартом. Студенты обязаны с

ним ознакомиться. Отчет должен быть подписан студентом.

3. Содержание отчета:

- Цель исследования.
- Электрическая схема исследуемого устройства или структурная схема проводимого исследования с указанием всех измерительных приборов.
- Расчетная часть задания.
- Результаты исследования в виде таблиц, графиков и осциллограмм с обязательным указанием условий, при которых они были получены (режим усилительного элемента, частота и амплитуда входного сигнала, параметры нагрузки и т.д.).
- Выводы, полученные на основании анализа расчетных и экспериментальных данных.

1.2 СДАЧА ЗАЧЕТА

1. При защите отчета студент должен представить оформленный по образовательному стандарту ВУЗа отчет, и показать свои знания в следующих вопросах:
   - структурная схема стенда и методика выполнения работ;
   - электрическая схема исследуемого устройства и назначение всех её элементов;
   - теоретические закономерности, эквивалентные схемы и расчетные соотношения по данной работе;
   - результаты расчётов по домашнему заданию и методика его выполнения;
   - полученные экспериментальные результаты и иханализ.
2. Студенты могут сдать отчет о проделанной работе сразу же после её выполнения.
3. Студенты, не выполнившие предыдущую работу, к выполнению следующей работы не допускаются.

2. ОПИСАНИЕ ПАНЕЛИ "НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ" ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторные работы выполняются на панели лабораторного макета. Внешний вид панели и ее электрическая схема изображены на рис.1.

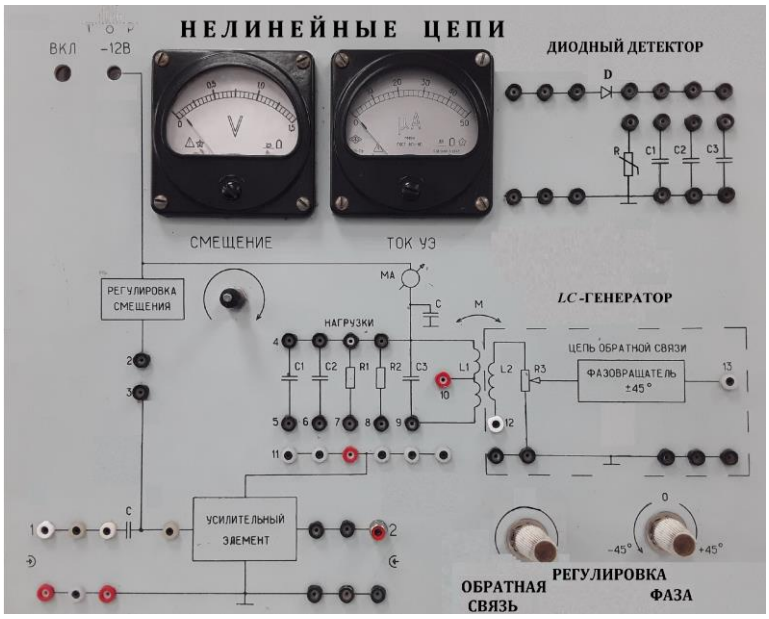


Рис. 1. — Вид панели лабораторного макета «Нелинейные цепи»

В состав панели входят:

1. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (УС)**.**
2. НАГРУЗКИ усилительного элемента.
3. ЦЕПЬ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ.
4. СХЕМА РЕГУЛИРОВКИ СМЕЩЕНИЯ.
5. Вольтметр (0+1,5 В) и миллиамперметр (0+50 mA) постоянного тока.
6. Диодный детектор.
7. Органы регулировки: РЕГУЛИРОВКА СМЕЩЕНИЯ, РЕГУЛИРОВКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ и РЕГУЛИРОВКА ФАЗЫ.

Соединения узлов между собой, а также с генераторами сигналов и контрольными приборами (осциллограф) лабораторного стенда, производятся с помощью проводов с наконечниками, включаемыми в гнезда лицевой панели.

Входной сигнал с гнезда 1, через разделительный конденсатор подводится к входу УЭ. В эту же точку через дроссель (клеммы 2-3) подводится напряжение смещения УЭ, величина которого регулируется потенциометром РЕГУЛИРОВКА СМЕЩЕНИЯ.

Выходом УЭ являются гнезда 11. К гнездам 11 соединительными проводами подключается необходимая нагрузка. Схемы нагрузок и номера соответствующих гнезд указаны на панели. Параметры лабораторного макета указаны в таблице 1.

В состав цепи обратной связи входят катушка связи $M_{Lсв}$, потенциометр РЕГУЛИРОВКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ и ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ ±45°. Вращением ручек потенциометров РЕГУЛИРОВКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ и РЕГУЛИРОВКА ФАЗЫ производится изменение соответственно модуля и фазы коэффициента обратной связи.

Таблица 1. Значения параметров лабораторных макетов

№ макета	Частота $f_р$ (кГц)	Емкость контура С3 (пФ)	Добротность Q	Нагрузка R2(кОм)
1	265	6800	40	2,2
2	300	5600	30	2,4
3	230	5600	35	2,7
4	245	5600	40	3,0
5	270	5600	45	3,3
6	250	5600	45	3,6
7	255	5600	35	3,9
8	250	5600	30	4,3
9	220	5600	40	4,7

В правой верхней части панели установлены элементы, необходимые для исследования диодного детектора АМ колебаний. Схема соединения этих элементов с соответствующими гнёздами выгравирована на лицевой панели. Питание лабораторной панели производится от блока питания (12 В) стенда. Напряжение питания подводится к панели с помощью разъема, расположенного на внутренней части панели.

Электрическое соединение выводов «земля» всех элементов произведено при монтаже панели. Подключение выводов «земля» приборами, оснащенными таким типом подключения, осуществляется с помощью гнёзд, обозначенных знаком –«⊥».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УСИЛИТЕЛЯ И УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

1. Цель работы

Изучение режимов работы нелинейного усилителя и умножителя частоты при изменениях входного напряжения и напряжении смещения.

Задачи, решаемые при выполнении работы:

1. Освоение методики выбора параметров нелинейного резонансного усилителя и умножителя частоты.
2. Исследование режимов работы нелинейного резонансного усилителя.
3. Исследование умножителя частоты с отсечкой тока.
4. Исследование умножителя частоты на квадратичном участке вольт-амперной характеристики.
5. Исследование роли избирательной нагрузки в режиме усиления и удвоения УЭ.

2. Краткие теоретические сведения

В работе исследуются линейный и нелинейный режим усиления электрических колебаний и умножение частоты гармонических колебаний. Принцип работы усилительного элемента в нелинейном режиме иллюстрируется рис. 1.1.

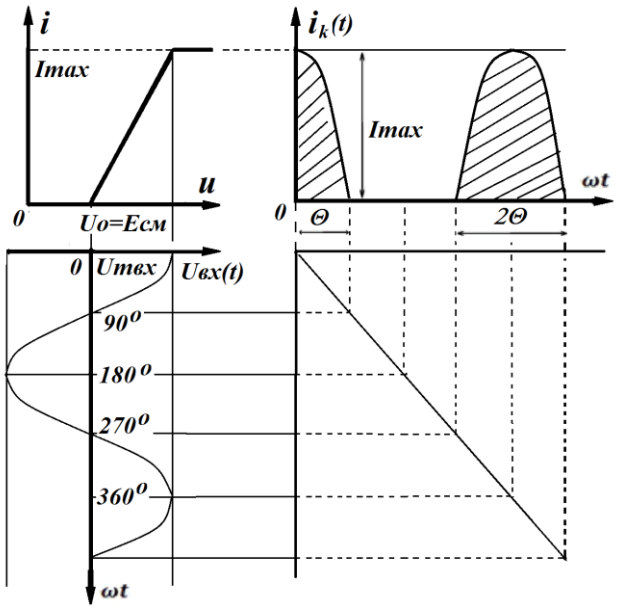


Рис.1.1 Иллюстрация принципа работы усилительного элемента в режиме отсечки методом трех плоскостей

Как видно из рисунка 1.1, если на вход УЭ подается колебание большой амплитуды, то коллекторный ток УЭ не повторяет форму входного сигнала, а имеет форму косинусоидальных импульсов. И, следовательно, содержит большое число гармоник, из которых полезной в усилительном режиме является первая, а в режиме умножения та гармоника, которая соответствует коэффициенту умножения частоты (n). Нужная гармоника выделяется с помощью избирательной нагрузки (одиночный или связанные контуры).

Амплитуда импульса коллекторного тока определяется выражением:

$$I_{max}=S\cdot U_{mвх}(1-\cos\theta), \qquad (1.1)$$

где S – крутизна характеристики УЭ,

$U_{mвх}$ - амплитуда напряжения входного сигнала,

θ - угол отсечки коллекторного тока, определяемый напряжением отсечки УЭ U_o, напряжением смещения $E_{см}$ и входной амплитудой $U_{mвх}$:

$$cos\theta = \frac{U_o - E_{CM}}{U_{m\text{вх}}}. \quad (1.2)$$

Амплитуда n-й гармоники может быть найдена по формуле:

$$I_{mn} = \alpha_n(\theta) I_{max}, \quad (1.3)$$

где $\alpha_n(\theta)$- коэффициенты разложения косинусоидальных импульсов в ряд Фурье или коэффициенты Берга, величина которых определяется номером гармоники изависит только от угла отсечки θ. Значение коэффициентов Берга берутся из таблиц или графиков, либо вычисляются по определённым формулам.

Относительная амплитуда каждой гармоники в импульсе коллекторного тока достигает наибольшего значения при определенном (оптимальном) угле отсечки θ_{opt}:

$$\theta_{opt} \cong 120°/n.$$

Амплитуду напряжения на контуре можно найти по формуле:

$$U_{m1} = I_{m1} \cdot R_p, \quad (1.4)$$

где *Rp* – резонансное сопротивление контура.

Используя формулы (1.1), (1.3), (1.4), напряжение на контуре в режиме усиления будет равно:

$$U_{m1} = S \cdot R_p \cdot U_{m\text{вх}} \cdot (1 - cos\theta) \cdot \alpha_1(\theta), \quad (1.5)$$

где $\alpha_1(\theta)$- можно вычислить по формуле (1.6) или по графикам рисунка 1.2:

$$\alpha_1(\theta) = \frac{\theta - \cos\theta \sin\theta}{\pi(1 - \cos\theta)} \quad (1.6)$$

Зависимость амплитуды выходного напряжения U_{m1} от амплитуды входного напряжения $U_{m1}=f(U_{mвх})$ называется колебательной характеристикой, форма которой зависит от положения рабочей точки на характеристике нелинейного элемента.

Основным достоинством нелинейного режима усиления является высокий коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_1}{P_o}, \quad (1.7)$$

где$P_1 = \frac{I_{m1} \cdot U_{m1}}{2}$ - полезная мощность сигнала, вычисляемая на нагрузке,

$P_o = I_o \cdot E$-мощность, подводимая к усилителю от источника питания,

I_o - постоянная составляющая коллекторного тока,

E- напряжение питания.

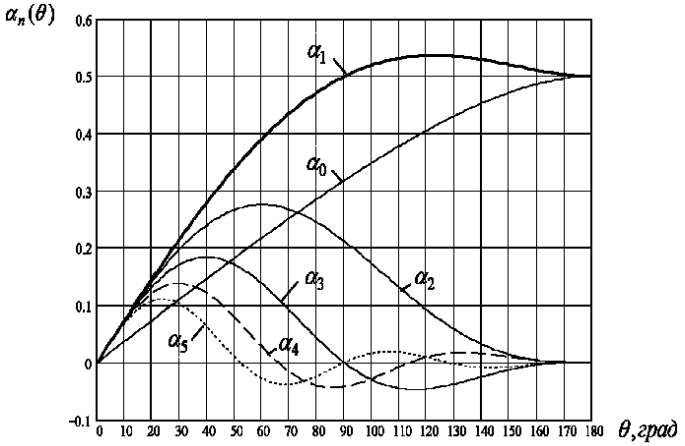


Рис. 1.2 Графики коэффициентов Берга

Умножением частоты называется операция, увеличения частоты гармонического колебания в целое число раз n ($n \geq 2$). Эта операция используется для получения колебаний кратных частот от кварцевых генераторов, в системах синхронизации и других областях техники связи.

В данной работе изучается умножитель частоты (УЧ), в основе действия которого лежит свойство нелинейных элементов обогащать спектр сигнала. Если на нелинейный элемент (НЭ) с вольтамперной характеристикой $i=f(u)$ подать напряжение в виде гармонического колебания $u(t)=U_m \cdot \cos\omega_0 t$, то протекающий через него ток можно представить в виде

$$i(t)=I_0+I_{m1} \cdot \cos(\omega_0 t+\phi_1)+I_{m2} \cdot \cos(2\omega_0 t+\phi_2)+\cdots \quad (1.8)$$

т.е. в общем случае он содержит постоянную составляющую I_0 и колебания кратных частот $n \cdot \omega_0$ ($n = 2, 3, \ldots$), называемые *высшими* гармониками. Установив на выходе НЭ полосовой фильтр (ПФ), можно выделить гармонику нужной кратности n. На рис. 1.3 приведена структурная схема умножителя частоты.

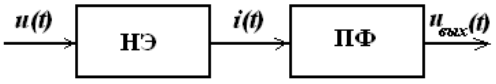


Рис. 1.3. Структурная схема умножителя частоты.

В данной лабораторной работе исследуется УЧ, содержащий в качестве НЭ биполярный транзистор (БТ) и в качестве ПФ – параллельный колебательный контур.

Напряжение, подаваемое на НЭ представляет собой сумму входного сигнала (на входе 1 сумматора) $u(t)$ и постоянного напряжения смещения E_{CM}, определяющего положение рабочей точки на вольт-амперной характеристике БТ,

$$u(t)=E_{\text{СМ}}+u(t)=E_{\text{СМ}}+U_{m1} \cdot \cos(\omega_1 t+\phi_1) \quad (1.9)$$

Приняв для простоты нулевыми напряжение смещения E_{CM} и начальную фазу ϕ_1 входного колебания и используя известные в теории цепей методы, аппроксимируем вольт-амперную характеристику БТ полиномом третьей степени:

$$i(t) = a_0+a_1 u+a_2 u^2+a_3 u^3, \quad (1.10)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3- постоянные коэффициенты. Подставляя выражение для входного колебания в этот полином, находим выражение для тока стока

$$i(t)=a_0+a_1 U_{m1}\cos\omega_1 t+a_2 U_{m1}^2 \cos^2\omega_1 t+a_3 U_{m1}^3 \cos^3\omega_1 t \quad (1.11)$$

Чтобы определить спектральный состав полученного несинусоидального колебания, воспользуемся методом кратных аргументов (или метод, основанный на использовании тригонометрических формул) (см. [1] стр.50-54, 323). Он состоит в том, что каждое слагаемое приводится к сумме гармонических колебаний в соответствии с известными тригонометрическими формулами

$$\cos^2 x=\frac{1}{2}[1+\cos 2x], \qquad \cos^3 x=\frac{3}{4}\cos x+\frac{1}{4}\cos 3x. \quad (1.12)$$

Тогда
$$i(t)=a_0+a_1 U_{m1}\cos\omega_1 t+\frac{a_2 U_{m1}^2}{2}+\frac{a_2 U_{m1}^2}{2}\cos 2\omega_1 t+\frac{3a_3 U_{m1}^3}{4}\cos\omega_1 t+$$
$$+\frac{a_3 U_{m1}^3}{4}\cos 3\omega_1 t+\frac{3a_3 U_{m1}^3}{4}\cos\omega_1 t=[a_0+\frac{(a_1 U_{m1}^2)}{2}]+$$
$$+[a_1 U_{m1}+\frac{(3a_3 U_{m1}^3)}{4}]\cdot\cos\omega_1 t+\frac{(a_2 U_{m1}^2)}{2}\cdot\cos 2\omega_1 t+\frac{(a_3 U_{m1}^3)}{4}\cdot\cos 3\omega_1 t. \quad (1.13)$$

Из полученного выражения видно, что спектр тока стока ПТ содержит четыре составляющие:

а) постоянную составляющую

$$I_0 = a_0 + \frac{(a_1 U_{m1}^2)}{2}, \tag{1.14}$$

т.е. значение амплитуды тока на нулевой частоте ($\omega=0$);

б) колебание с частотой, равной частоте входного сигнала ($\omega=\omega_1$), и амплитудой

$$I_{m1} = a_1 U_{m1} + \frac{(3 a_3 U_{m1}^2)}{4}, \tag{1.15}$$

называемой *первой* гармоникой;

в) колебания новых частот - удвоенной и утроенной по сравнению с частотой входного сигнала, $\omega_2 = 2\,\omega_1$ и $\omega_3 = 3\,\omega_1$, называемые *высшими* гармониками. Последние имеют амплитуды, как видно из выражения (1.5):

$$I_{m2} = \frac{(a_2 U_{m1}^2)}{2}, \text{ и } \quad I_{m3} = \frac{(a_3 U_{m1}^3)}{4}. \tag{1.16}$$

Таким образом, выходной ток коллектора НЭ равен

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \cdot \cos\omega_1 t + I_{m2} \cdot \cos 2\omega_1 t + I_{m3} \cdot \cos 3\omega_1 t$$

и его спектр более богатый по сравнению со спектром воздействия. При этом форма сигнала на выходе отличается от синусоидальной функции, т.е. возникли нелинейные искажения.

Если контур настроить на удвоенную частоту входного сигнала

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 2 \cdot \omega_1, \tag{1.17}$$

то амплитуда напряжения коллектора $U_{твых}$ на этой частоте будет максимальной, так как сопротивление параллельного *LC*-контура на резонансной частоте имеет максимальное значение по сравнению с другими частотами. Как известно, оно является чисто активным и равно $R_{0э} = \frac{\rho^2}{r} = \frac{L}{C \cdot r}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ характеристическое сопротивление контура; r - активное сопротивление нагрузки параллельного контура. То есть контур в данной схеме выступает в роли полосового фильтра, пропускающего колебание с частотой $2\omega_1$ и подавляющего остальные, причем степень их подавления увеличивается с ростом добротности контура $Q = \frac{r}{\rho} = r \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$.

Амплитудные спектры сигналов в различных точках схемы для $n=2$ имеют вид, показанный на рис. 1.4 (пунктиром изображена зависимость модуля сопротивления контура от частоты $|Z(\omega)|$ для разных значений добротности Q). Аналогично, настроив контур на частоту $3\omega_1$, можно получить утроение частоты.

Из полученных результатов видно, что порядок высшей гармоники в спектре тока НЭ (в данном случае $n=3$) равен степени аппроксимирующего полинома. Аппроксимируя характеристику НЭ более точно, т.е. увеличивая степень полинома, можно рассчитывать УЧ при $n>3$ (контур в этом случае настраивают на нужную гармонику).

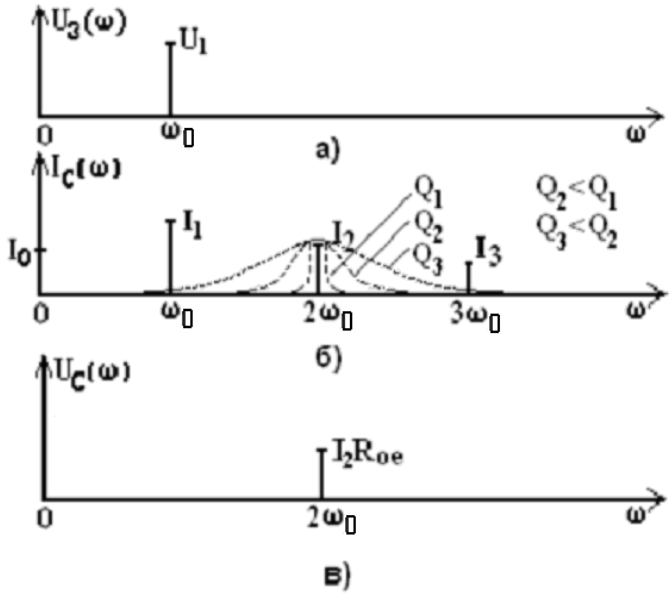


Рис. 1.4. Амплитудные спектры в режиме умножения частоты а) входного сигнала; б) тока, протекающего через НЭ; в) напряжения на выходе полосового фильтра.

Изменяя напряжение смещения E_{CM}, можно выбрать в качестве рабочего, участок характеристики с желаемой формой (т.е., вид полинома). Обычно величину E_{CM} выбирают такой, чтобы нелинейность НЭ проявлялась достаточно сильно (транзистор вносил в сигнал большие нелинейные искажения).

Существуют и другие методы расчета умножителей частоты, например, методы «трех и пяти ординат», позволяющие рассчитать спектр тока НЭ, минуя стадию аппроксимации (см. [1] стр.58-60, [2] стр.84-88).

При большой амплитуде входного сигнала удобно использовать кусочно-линейную аппроксимацию характеристики НЭ, т.к. кривизной ее начального участка можно пренебречь. Для расчета спектральных составляющих тока НЭ в этом случае используют метод угла отсечки, рассмотренный ранее.

3. Краткое описание исследуемой схемы

Схема для исследования резонансного усилителя и умножителя частоты приведена на рис. 1.5. На вход усилительного элемента через разделительный конденсатор $C_р$ подается высокочастотный сигнал с выхода встроенного генератора осциллографа ***KeySight*** *(*работающего в режиме *WaveGen)*; параметры сигнала измеряются при помощи измерительного входа осциллографа ***KeySight.*** Постоянное напряжение смещения E_{CM} (ручка СМЕЩЕНИЕ на рисунке 1.3) подается через высокочастотный дроссель Др и измеряется вольтметром, который расположен на панели стенда. Блокировочный конденсатор $C_{бл1}$ шунтирует источник смещения по высокочастотному напряжению. Нагрузка усилительного элемента образована параллельным контуром L_1C_3 с частичным включением.

Блокировочный конденсатор $C_{бл1}$ шунтирует источник питания по высокой частоте. Постоянная составляющая тока УЭ измеряется миллиамперметром мА. С помощью осциллографа ***KeySight*** контролируется форма выходного сигнала и измеряется напряжение на входе и выходе усилительного элемента (на нагрузке).

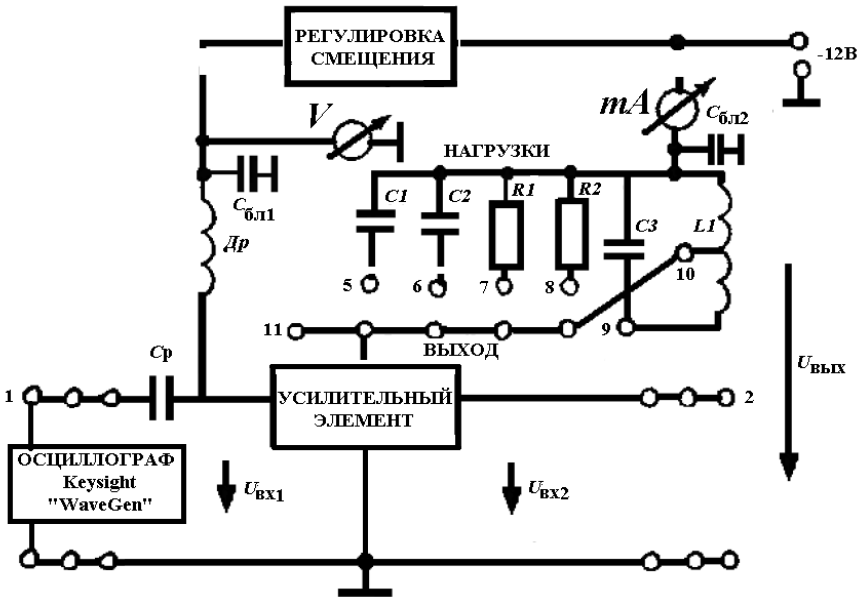


Рис. 1.5 Схема исследования резонансного усилителя

4. Домашнее задание

1. Изучите схемы резонансного усилителя и умножителя частоты.

2. Задавшись максимальным импульсом коллекторного тока I_{max} = 40-50 мА и крутизной характеристики нелинейного усилительного элемента S = 75 мА/В, рассчитайте значения напряжения смещения E_{CM} и амплитуду входного сигнала $U_{mвх}$, необходимые для обеспечения режима нелинейного усиления с углом отсечки $\theta = 90°$ и режима удвоения $\theta = 60°$, приняв напряжение отсечки U_o = 0.4 В.

3. Рассчитайте коэффициент усиления резонансного усилителя в линейном (рабочая точка на середине линейного участка характеристики) и нелинейном режимах. Параметры нагрузки для каждого рабочего места приведены в таблице 1.1

4. Рассчитайте коэффициент передачи усилителя в режиме с отсечкой тока.

5. Изобразите примерные колебательные характеристики усилителя в линейном и нелинейном режимах.

6. Ознакомьтесь с лабораторным заданием, контрольными вопросами и продумайте, какие таблицы и графики нужны при выполнении работы.

7. Изобразите спектральные диаграммы входного сигнала, тока нелинейного элемента, выходного сигнала усилителя и умножителя частоты.

5 Лабораторное задание

1. Ознакомиться с описанием и схемой модели "Нелинейные цепи".

2. Снять вольт-амперную характеристику усилительного элемента. Выполнить ее кусочно-линейную аппроксимацию.

3. Определить резонансную частоту параллельного колебательного контура и построить график амплитудно-частотной характеристики, выделить частоты среза и максимальные частоты.

4. Исследовать режимы работы нелинейного усилителя при разных углах отсечки, измерить и построить колебательные характеристики для каждого из режимов.

5. Исследовать режимы работы умножителя частоты для кратности n=2. Зафиксировать осциллограммы входного и выходного сигнала и спектрограммы выходного сигнала в этих режимах.

6. Исследование роли избирательной нагрузки в режиме усиления и удвоения УЭ.

6. Методические указания по выполнению лабораторной работы

6.1. Исследование нелинейного усилителя

6.1.1. Подайте питание на усилительный элемент (включите питание макета) соберите схему рис.1.3 (соедините дополнительным проводом-перемычкой клеммы 11 и 10), и, меняя напряжение смещения (блок регулировки смещения), снимите статическую характеристику УЭ.

ПРИМЕЧАНИЕ: Сопротивление нагрузки УЭ выбрано таким, что статическая и динамическая характеристики УЭ практически совпадают.

6.1.2. Постройте полученную характеристику в крупном масштабе и выполните кусочно-линейную аппроксимацию. Эта характеристика нужна ВАМ для выполнения последующих заданий в этой работе и следующих за ней лабораторных работ.

6.1.3. Выберите рабочую точку (смещение E_{CM}) в середине линейного участка и определите значение амплитуды входного сигнала $U_{твх}$. По полученной характеристике уточните расчёты в домашнем задании.

6.2. Исследование роли избирательной нагрузки в режиме усиления и удвоения УЭ.

6.2.1. Включите резистор R_1=100 Ом имеющийся на панели (соедините дополнительным проводом-перемычкой клеммы 11 и R_1).

6.2.2. Настройте осциллограф в режим быстрого преобразования сигналов *FFT* для измерения спектра выходного сигнала. Настройте УЭ в режим умножения частоты (подберите E_{CM} таким, чтобы вторая гармоника в спектре была максимальной). Зарисуйте осциллограммы и спектрограммы входного и выходного напряжений. Измерьте по осциллограмме угол отсечки, соответствующий этому режиму.

6.2.3. При этом же сопротивлении исследуйте и зарисуйте спектрограмму тока усилительного элемента в режиме усиления(подберите E_{CM} таким, чтобы первая гармоника в спектре была максимальной). Зарисуйте осциллограммы и спектрограммы входного и выходного напряжений. Измерьте по осциллограмме угол отсечки, соответствующий этому режиму.

6.3. Нахождение резонансной частоты колебательного контура и построение амплитудно-частотной характеристики

6.3.4. Соберите схему для исследования резонансного усилителя. (Рис.1.5). Установите значение выбранной в пункте 6.1.3. рабочей точки смещение E_{CM}. В генераторе *WaveGen* осциллографа *KeySight,* установите синусоидальный сигнал и амплитуду входного напряжения равную V_{pp}=1 В.

6.3.5. Плавно меняя частоту генератора *WaveGen* от 25 кГц приблизительно до 300 кГц, добейтесь максимальной амплитуды выходного колебания. По показаниям генератора сигнала запишите значение резонансной частоты контура, а по показаниям измерений канала 2 запишите максимальную амплитуду выходного колебания. Измерения амплитуды выполнять в режиме *AC RMS* [полный экран].

6.3.6. Снимите частотную характеристику контура, выделив и измерив на графике частоту среза контура и максимальную частоту. Таблица должна содержать 10-12 измеренных точек. Постройте частотную характеристику, нормировав ее по амплитуде.

Примечание: частота среза находится как частота, при которой амплитуда выходного сигнала равна $U_{твых}/\sqrt{2}$, а максимальная частота – при значении амплитуды выходного сигнала равной $0{,}1 \cdot U_{твых}$.

6.4 Исследовать режимы работы нелинейного усилителя при разных углах отсечки

6.4.7. Снимите колебательные характеристики $I_{m1}=f(U_{твх})$ усилителя УЭ для трех режимов работы с напряжениями смещения:

а) E_{CM} - на середине линейного участка характеристики;

б) E_{CM}, соответствующее углу отсечки 90°

в) E_{CM}, соответствующее углу отсечки 0°,

при изменении амплитуды входного напряжения от 0,1 до 1,4 В с шагом 0,1 В.

6.4.8 Снятые зависимости постройте на одном графике. Определите коэффициенты усиления для линейных участков колебательных характеристик и сравните с расчётными

данными. Вычислите для всех режимов коэффициент полезного действия.

6.5. Исследование умножителя частоты с отсечкой тока УЭ и за счет квадратичного участка вольт-амперной характеристики

6.5.1. Режим умножения частоты с отсечкой тока УЭ. Уменьшите частоту входного колебания в два раза по сравнению с резонансной частоты контура. Напряжение смещения $E_{см}$и входной сигнал $U_{твх}$ установите соответствующими углу отсечки 60°. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений. Измерьте коэффициент передачи удвоителя.

6.5.2. Исследуйте эффект умножения частоты за счёт квадратичного участка характеристики УЭ. Для этого установите входной сигнал $U_{твх}$=0,05-0,1 В и по анализатору спектра зафиксируйте такое напряжение смещения $E_{СМ,}$ при котором амплитуда выходного сигнала максимальна. Постройте спектр входного и выходногосигналов и определите по ней максимальный коэффициент передачи удвоителя.

Работа закончена. Не забудьте получить подтверждение результатов измерений у преподавателя, выключить макет и приборы.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое линейный и нелинейный режимы усиления?
2. Что такое колебательная характеристика усилителя? Чем определяется форма колебательной характеристики?
3. Укажите достоинства и недостатки нелинейного режима усиления.
4. Что такое угол отсечки тока нелинейного элемента?
5. Запишите аналитическое выражение кусочно-линейной аппроксимации.
6. Что такое крутизна характеристики нелинейного элемента?
7. Какова роль нелинейного элемента в схеме умножителя частоты? С какой целью применяют умножители частоты?
8. Как выбирается угол отсечки в умножителе частоты?
9. Какова роль избирательной нагрузки в схеме умножителя частоты?
10. Какое влияние оказывает выбор напряжения смещения на работу умножителя частоты?
11. Как рассчитать резонансное сопротивление контура?
12. Как рассчитать добротность нагрузочного контура? Какое влияние и почему оказывает добротность контура нагрузки на качество умножителя частоты.
13. Дайте определение коэффициента полезного действия, как его рассчитать?
14. Запишите выражение мгновенного тока на выходе усилительного элемента. Как определить амплитуду каждой гармоники?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

1. Цель работы

Изучение процесса амплитудной модуляции в цепи с нелинейным элементом.

Задачи, решаемые при выполнении работы:

1. Освоение методики расчёта и снятия модуляционных характеристик модулятора и определения их параметров.
2. Выбор оптимального режима работы модулятора.
3. Исследование формы и спектра тока нелинейного элемента в режиме модуляции.
4. Исследование влияния амплитуды и частоты полезного сигнала на глубину модуляции модулированного сигнала.

2. Краткие теоретические сведения

Модуляцией называется процесс изменения какого-либо параметра несущего колебания в

соответствии с полезным(или первичным) сигналом, представляющим передаваемое сообщение *b(t).* На практике в качестве несущего чаще всего используют гармоническое колебание $u(t)=\mathrm{U}_0 \cdot \cos(\omega_0 \mathrm{t}+\phi_0)$. Гармоническое колебание имеет три независимых параметра – амплитуду U_0, частоту ω_0 и начальную фазу ϕ_0, различают соответственно три основных вида модуляции: амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ). Амплитудно-модулированное колебание можно представить в виде гармонического колебания, амплитуда которого зависит от первичного сигнала:

$$u_{\mathrm{AM}}(t)=U[b(t)] \cdot \cos(\omega_0 t+\phi_0). \quad (2.1)$$

Начальная фаза ϕ_0 не влияет на его основные характеристики, поэтому в дальнейшем положим $\phi_0=0$.

По характеру зависимости амплитуды от сообщения $U[b(t)]$различают обычную, балансную и однополосную АМ. При обычной АМ эта зависимость имеет вид

$$u_{\mathrm{AM}}(t)=[U_0+k_a \cdot U_b(t)] \cdot \cos(\omega_0 t)=[U_0+\Delta U \cdot b(t)] \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (2.2)$$

где $U_b(t)$ - первичный сигнал, представляющий сообщение *b(t);*

k_a – крутизна характеристики модулятора (коэффициент модуляции);

ΔU- максимальное отклонение амплитуды от среднего значения U_0.

Причем, $\Delta U=k_a \cdot U_m$ где $U_m = \max|U_b(t)|$. Для изучения свойств сигналов АМ зададим простейший первичный сигнал в виде гармонического колебания

$$U_b(t)=U_m \cdot \cos\Omega t. \quad (2.3)$$

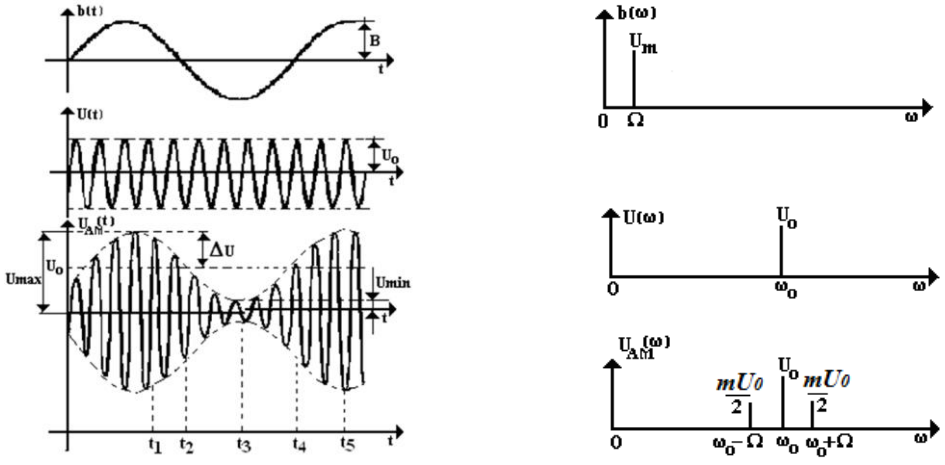
В этом случае $b(t) = \cos\Omega t$ и сигнал АМ в целом имеет вид:

$$u_{\mathrm{AM}}(t) = [U_0+\Delta \mathrm{U} \cdot \cos\Omega t] \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t}=U_0 \left[1+\frac{\Delta \mathrm{U}}{U_0} \cdot \cos\Omega t\right] \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t},$$

то есть,

$$u_{\mathrm{AM}}(t)=U_0[1+\mathrm{m} \cdot \cos\Omega t] \cdot \cos\omega_0 t. \quad (2.4)$$

Коэффициент $m=\frac{\Delta \mathrm{U}}{U_0}=\frac{k_a \cdot U_m}{U_0}$- называют глубиной модуляции. Временные диаграммы полезного и модулированного сигналов изображены на рис. 2.1. (а).



а б

Рис. 2.1. Временные диаграммы (а) и спектры (б) полезного, несущего и модулированного сигналов.

Рассчитаем амплитудный спектр АМ сигнала, используя формулу для произведения косинусов, получаем

$$u_{\mathrm{AM}}(t)=\mathrm{U}_0[1+\mathrm{m} \cdot \cos\Omega t] \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t}=U_0 \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t}+\mathrm{mU}_0 \cdot \cos\Omega t \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t}=$$
$$=\mathrm{U}_0 \cdot \cos\omega_0 \mathrm{t}+0{,}5 \cdot \mathrm{mU}_0 \cdot \cos(\omega_0-\Omega)\mathrm{t}+ + 0{,}5 \cdot \mathrm{mU}_0 \cdot \cos(\omega_0+\Omega)t \quad (2.5)$$

Амплитудные спектры первичного, несущего и модулированного сигналов изображены на рис. 2.1. (б).

Иногда полезно представление АМ сигнала с помощью суммы векторов, вращающихся в комплексной плоскости [4, с.167-176] рис.2.2.

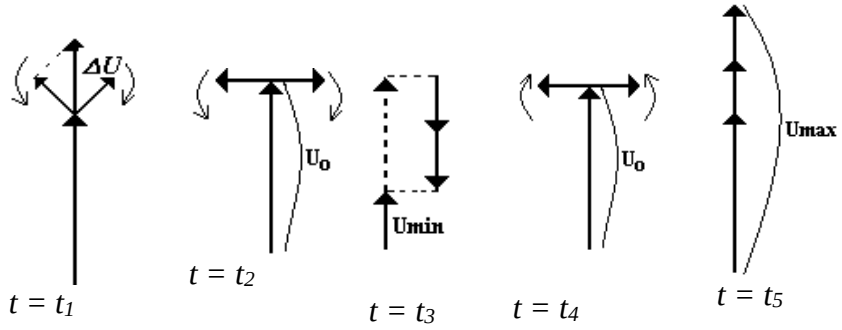


Рис. 2.2. Векторные диаграммы, поясняющие характерные состояния огибающей ($U_0+\Delta U$, U_{min}, U_0,U_{max})

На рис. 2.2 показаны характерные состояния векторных диаграмм для пяти моментов времени, обозначенных на временной диаграмме АМ сигнала (рис. 2.1). Начальная фаза несущего колебания $\varphi_0 = 90$. Векторы боковых частот имеют встречное направление вращения.

Достоинством векторного представления является возможность анализа огибающей (а не мгновенного значения).

При максимальной амплитуде модулирующего сигнала ($m=1$) амплитуда несущей U_o в 2 раза превышает амплитуду каждой боковых составляющих $\left(\frac{U_0}{2}\right)$.

Следовательно, на полезную часть спектра АМ сигнала приходится малая часть мощности передатчика, а подавляющая часть ее бесполезно расходуется на создание гармонического колебания на частоте ω_0. Поэтому возникло предложение удалить несущую из спектра АМ сигнала, улучшив энергетические характеристики устройства, так как вся мощность передатчика будет расходоваться на создание колебаний боковых частот. Такую разновидность АМ называют **балансной** (БМ).

Сигнал с балансной АМ можно получить путем перемножения несущей $u_\omega(t)=\mathrm{U}_0\cos\omega_0 t$ и модулирующего сигнала $u_b(t)=\mathrm{U}_m\cos\Omega t$. На выходе перемножителя получим:

$$U_{БМ}(t)=mu_\omega(t)u_b(t)=mU_0\cos\omega_0 t\cdot U_m\cos\Omega t=\frac{m}{2}U_0U_m\cos(\omega_0+\Omega)t+\frac{m}{2}U_0U_m\cos(\omega_0-\Omega)t \quad (2.6)$$

При этом никаких фильтров не требуется. Такую операцию можно выполнить на аналоговых перемножителях сигналов или на балансных схемах, которые и дали название этой разновидности АМ. Дальнейшим "усовершенствованием" БМ является отказ от одной из боковых полос (для тональной модуляции - одной из боковых составляющих), так как каждая из них содержит одинаковую информацию о модулирующем сигнале.

Так возникла еще одна разновидность АМ - **однополосная модуляция** (ОБП - одна боковая полоса или *SSB - SingleSideBand).* Судя по спектру сигнала с ОБП, последняя может быть получена путем переноса спектра модулирующего низкочастотного сигнала вверх по оси частот на частоту ω_0 (подобно процессу преобразования частоты). Общим недостатком БМ и ОБП являются трудности при детектировании этих сигналов, вызванные отсутствием несущей.

Для количественной оценки качества работы модулятора в качестве первичного сигнала примем напряжение смещения, т.е. $U_b(t)=E_{\mathrm{CM}}$. Для различных значений E_{CM}, можно получить ряд значений амплитуды первой гармоники тока коллектора БТ (с частотой ω_o), т.е. можно проследить зависимость амплитуды сигнала на выходе модулятора от мгновенных значений первичного сигнала.

Зависимость амплитуды первой гармоники тока НЭ от напряжения смещения E_{CM} при

постоянной амплитуде несущего колебания $U_{m\Omega}$ называется статической модуляционной характеристикой (СМХ) амплитудного модулятора.

$$I_{m1} = f(E_{CM}) \quad (2.7)$$

В качестве примера рассчитаем и построим СМХ модулятора, в состав которого входит БТ с квадратичной характеристикой. Для этого подставим в характеристику БТ сумму несущего колебания и напряжения смещения и найдем амплитуду колебания с частотой ω_o:

$$u_{\text{ВХ}}(t) = U_{\text{m}\omega} \cdot \cos\omega_0 t + E_{\text{СМ}} \quad (2.8)$$

Тогда спектр тока коллектора БТ, используя метод кратных аргументов (или метод, основанный на использовании тригонометрических формул) (см. [1] стр.50-54, 323):

$$i_k(t) = a_0 + a_1 u_{\text{вх}} + a_2 u_{\text{вх}}^2 = a_0 + a_1(U_{m\omega} \cdot cos\omega_0 t + E_{\text{СМ}}) + a_2(U_{m\omega} \cdot cos\omega_0 t + E_{\text{СМ}})^2 =$$
$$= a_0 + a_1 \cdot E_{\text{СМ}} + 0{,}5 \cdot a_2 \cdot U_{m\omega}^2 + 0{,}5 \cdot a_2 \cdot U_{m\omega}^2 \cdot cos\omega_0 t + 2 \cdot a_2 \cdot U_{m\omega} \cdot E_{\text{СМ}} \cdot cos\omega_0 t + a_2 \cdot E_{\text{СМ}}^2.$$

Слагаемые $(a_1 U_{\text{m}\omega} cos\omega_0 t)$ и $(2a_2 U_{\text{m}\omega} E_{\text{СМ}} cos\omega_0 t)$ в выражении тока коллектора составляют гармоники с частотой ω_0 [2]. Статическая модуляционная характеристика СМХ амплитудного модулятора имеет вид $I_{m1} = a_1 U_{\text{m}\omega} + 2a_2 U_{\text{m}\omega} E_{\text{СМ}}$ и является линейной функцией.

Таким образом, модулятор на НЭ с квадратичной вольтамперной характеристикой является идеальным преобразователем и при изменении E_{CM} по закону $U_b(t)$, изменение тока I_{m1} будет происходить пропорционально, т.е. не будут наблюдаться нелинейные искажения огибающей АМ сигнала.

При расчете СМХ могут быть использованы и другие методы анализа спектра, в зависимости от аппроксимации характеристики НЭ (метод угла отсечки, трех или пяти ординат и т.д.) [2], стр. 88-96.

Методика расчёта модуляционной характеристики.

Для того чтобы построить модуляционную характеристику необходимо по известной характеристике нелинейного элемента и выбранной амплитуде входного сигнала, рассчитать зависимость первой гармоники тока нелинейного элемента при изменении напряжения смещения, т.е. положения рабочей точки на характеристике НЭ. При изменении рабочей точки изменяется как амплитуда, так и угол отсечки тока НЭ, что необходимо учитывать при вычислении первой гармоники. Первая гармоника тока вычисляется по формуле:

$I_{m1} = \alpha_1(\theta) I_{max}$, где $\alpha_1(\theta)$- вычисляется по формуле (1.6),

а I_{max} и θ определяются по формулам (1.1)- (1.6) и из графических построений для различных $U_{m\Omega}$ по вольт-амперной характеристике, снятой в лабораторной работе №1.

3. Краткое описание исследуемой схемы

Структурная схема амплитудного модулятора приведена на рисунке 2.3. Высокочастотный модулируемый сигнал от генератора *WaveGen* осциллографа *KeySight,* подается через разделительный конденсатор непосредственно на вход УЭ, модулирующий же сигнал от генератора *PCLab*2000 подаётся на вход 2. Величина и форма выходного сигнала контролируются осциллографом в режиме измерения с использованием курсоров.

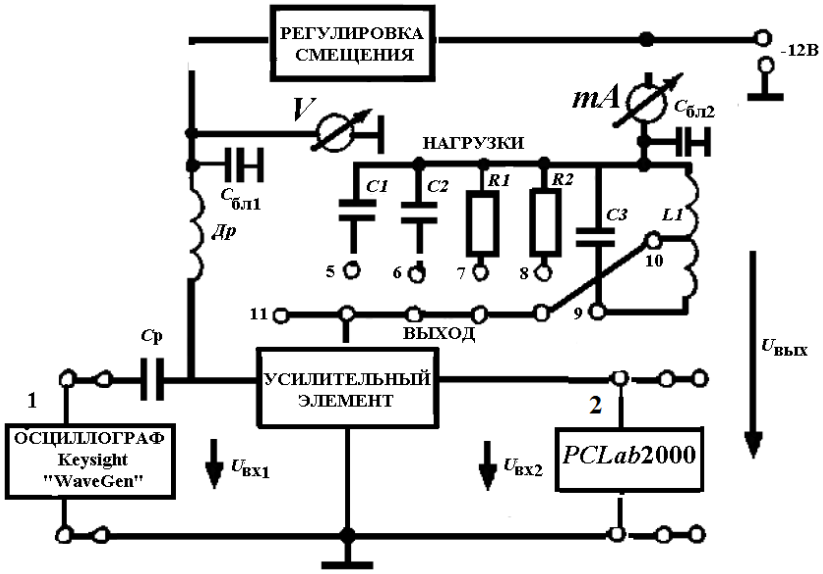


Рис.2.3 Структурная схема амплитудного модулятора

4. Домашнее задание

1. Изучить работу амплитудного модулятора макета лабораторного стенда.
2. Выбрать два значения входного напряжения $U_{m\omega}$, соответствующих приблизительно 0,25 и 0,5 раствора характеристики УЭ и рассчитать семейство модуляционных характеристик.*ПРИМЕЧАНИЕ: При расчёте использовать кусочно-линейную аппроксимацию.*
3. На модуляционной характеристике с наиболее протяженным линейным участком, выбрать рабочую точку на середине линейного участка.
4. Рассчитать максимальный коэффициент модуляции по току m_i для выбранного участка модуляционной характеристики.
5. Изобразить ход зависимости коэффициента модуляции напряжения на контуре m_u от амплитуды модулирующего напряжения $U_{m\omega}$ для выбранной рабочей точки E_{CM} и постоянного значения модулирующей частоты F_Ω.
6. Изобразить примерный ход зависимости m_u от модулирующей частоты F_Ω для выбранных значений E_{CM} и $U_{m\Omega}$ в диапазоне от 500 Гц до 15 кГц.
7. Изобразить спектральные диаграммы входных напряжений $U_{m\Omega}$, тока УЭ и напряжения на колебательном контуре амплитудного модулятора.

5. Лабораторное задание

1. Настройка колебательного контура в резонанс.

2. Освоение методики расчёта и снятия модуляционных характеристик модулятора и определения их параметров.

2. Выбор оптимального режима работы модулятора.

3. Исследование формы и спектра тока нелинейного элемента в режиме модуляции.

4. Исследование влияния амплитуды и частоты полезного сигнала на глубину модуляции модулированного сигнала

6. Методические указания по выполнению лабораторной работы

6.1. Определение резонансной частоты контура *LC*.

6.1.1. Соберите схему для исследования амплитудной модуляции (рис.2.3).

6.1.2. Подайте на вход УЭ напряжение $U_{m\omega}$ =0,25 В от генератора *WaveGen* осциллографа *KeySight.*

6.1.3. Подключите к гнезду 10 канал 2 осциллографа и, меняя частоту генератора *WaveGen*,

настройте в резонанс контур *L1C3*. Достижение резонанса фиксируется на осциллографе по максимальному значению выходного напряжения гнезда 10. Значение резонансной частоты f_p внесите в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Значения модуляционной характеристики при напряжении генератора полезного сигнала $U_{m\Omega=}0$ В.

F_p=__ *кГц*	$U_{m\omega}$=*0,25 В;*		$U_{m\Omega=}$*0*					
E_{CM},*В*								
$U_{вых}$,*В*								
I_{m1}, *мА*								

6.2. Снятие модуляционных характеристик

6.2.1. Установите напряжение генератора сигналов *WaveGen* равное $U_{m\omega}$ = 0,25 В (несущее колебание). Изменяя напряжение смещения от нулевого значения и выше, определите максимальное значение напряжения смещения, при котором амплитуда выходного напряжения (гнездо 10) принимает максимальное значение. В зафиксированном диапазоне изменения смещения от 0 до E_{CMmax} выберите такой шаг измерения, при котором можно было бы произвести 6 – 8 измерений выходного напряжения.

Изменяя напряжение смещения с выбранным шагом измерьте в гнезде 11 выходное напряжение $U_{вых}$. Измеренные данные внесите в таблицу 2.1.

6.2.2. Установите напряжение генератора *WaveGen* $U_{m\omega}$ = 0,5 В и повторите измерения п.6.2.1. Измеренные данные внесите в таблицу 2.1.

6.2.3. Первую гармонику тока стока рассчитайте по формуле: $I_{m1}= U_{вых}/R_p$,

где R_p - сопротивление контура на резонансной частоте, рассчитанного в лабораторной работе №1. По таблицам на одном графике постройте обе зависимости $I_{m1}=\gamma_1(E_{CM})$ при $U_{m\omega}$=0,25 В и $Im_1=\gamma_2(E_{CM})$ при $U_{m\omega}$=0,5 В, а $U_{\Omega}=0$.

6.3. Выбор оптимального режима работы модулятора

6.3.1. Выберите модуляционную характеристику, обеспечивающую наибольшую глубину модуляции при незначительных искажениях. Определите по ней рабочую точку $E_{CM,}$ максимальную амплитуду полезного сигнала $U_{\Omega MAX}$, амплитуду несущего сигнала $U_{m\omega}$ и коэффициент модуляции по напряжению, занесите все полученные напряжения в таблицу 2.2

Таблица 2.2. Оптимальный режим модулятора.

f_p, *кГц*	$E_{CM\ ОПТ}$, *В*	$U_{m\omega}$, *В*	$U_{\Omega MAX}$, *В*

6.3.2. Подключите к выходу 2 генератора *PCLab2000* (генератор полезного сигнала). Установите выбранные в п.6.3.1 все параметры оптимального режима работы модулятора, а частоту полезного сигнала равную 10 кГц. Зафиксируйте осциллограммы и спектрограммы, измерив амплитуды, периоды и частоты:

— входного полезного сигнала;

— входного несущего сигнала;

— выходного модулированного сигнала.

Построенные осциллограммы и спектрограммы занесите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3.Осциллограммы и спектрограммы сигналов в контрольных точках.

Осциллограммы	Спектрограммы
Входной полезный сигнал	
Входной несущий сигнал	
Выходной модулированный сигнал	

6.4. Исследование влияния амплитуды и частоты полезного сигнала на глубину модуляции модулированного сигнала.

6.4.1. Установите выбранные в п.6.3.1 значения напряжения $U_{m\omega}$, E_{CM}. Снимите зависимость глубины модуляции от амплитуды входного полезного колебания $m_u = f(U_\Omega)$ от нуля до 0,5 В с шагом ΔU_Ω = 0,05 В для трех значений частоты F_Ω из диапазона 600 - 1000 Гц (600, 800, 1000 Гц).

6.4.2. Установите выбранные в п.6.3.1 значения напряжения $U_{m\omega}$, E_{CM} и амплитуду полезного сигнала $U_{m\Omega}$. Снимите зависимость $m_u = f(F_\Omega)$, изменяя частоту полезного сигнала от 500 Гц до 15 кГц с шагом 3 кГц.

6.5. Исследование роли избирательной нагрузки на процесс модуляции

6.5.1. Замените контур сопротивлением R_1, посмотрите и зарисуйте осциллограмму тока УЭ при выбранных значениях $U_{m\omega}$, E_{CM} и амплитуде модулирующего напряжения U_Ω, соответствующие $m_u \approx 50\%$. Частоту генератора полезного сигнала подберите так, чтобы получилась устойчивая осциллограмма.

Работа закончена. Не забудьте получить подтверждение результатов измерений у преподавателя, выключить макет и приборы.

7. Контрольные вопросы

1. Поясните физические процессы при амплитудной модуляции. Приведите временные диаграммы иллюстрирующие получение АМ колебаний.
2. Возможно ли осуществление амплитудной модуляции с помощью линейного элемента?
3. Дайте определение статической модуляционной характеристики.
4. Как по модуляционной характеристике определить рабочую точку максимальную амплитуду модулирующего сигнала, глубину модуляции?
5. Как выбирается угол отсечки в модуляторе?
6. В каких пределах может изменяться угол отсечки нелинейного элемента для получения малых искажений при модуляции?
7. Как изменяется коэффициент модуляции M_Uот величины модулирующего напряжения U_Ω при выбранной рабочей точке E_{CM}ипостоянном значении модулирующей частоты Ω.
8. Объясните, почему коэффициент модуляции напряжения на контуре уменьшается с увеличением модулирующей частоты?
9. Какие искажения передаваемого сигнала возможны при осуществлении амплитудной модуляции?
10. Как изменится сигнал и его спектр при амплитудной модуляции? Запишите аналитическое выражение АМ колебания $U_{AM}(t)$, если модулирующий сигнал $U_b(t)$, а несущее колебание $u(t)=U_0 \cdot \cos\omega_0 t$. Изобразите временную и спектральную диаграммы амплитудно-модулированного сигнала.
11. Что называется статической модуляционной характеристикой (СМХ)? Выведите аналитическое выражение СМХ модулятора при аппроксимации вольтамперной характеристики нелинейного элемента полиномом 2-й степени.
12. Как выбираются начальное напряжение смещения E_{CM} и наибольшая амплитуда модулирующего напряжения U_m по характеристике нелинейного элемента модулятора (на примере лабораторной работы)? Как выбираются начальное напряжение смещения E_{CM} и наибольшая амплитуда модулирующего напряжения U_m по статической модуляционной характеристике модулятора?
13. Что такое глубина модуляции m? Как измерить глубину модуляции по временной диаграмме (осциллограмме) и по спектру АМ колебания? В каких пределах меняется m без искажения сигнала? Вычертите осциллограмму АМ сигнала с $m=0,5$ при условии, что модулирующий сигнал гармонический.
14. Объясните назначение полосового фильтра на выходе амплитудного модулятора.
15. Изобразите спектр сложного АМ колебания, в котором модулирующий сигнал состоит из первых трех гармоник частоты F_Ω=1 кГц.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АМ КОЛЕБАНИЙ

1. Цель работы

Изучение работы диодного детектора.

Задачи, решаемые для выполнения работы:

1. Изучение физических процессов при детектировании АМ колебаний.
2. Освоение методики расчета и снятия основных характеристик детектора.
3. Исследование влияния параметров нагрузки детектора на его характеристики.

2.Краткие теоретические сведения по работе

Целью детектирования АМ колебаний является получение полезного (низкочастотного) сигнала, повторяющего закон изменения амплитуды высокочастотного модулированного несущего колебания, т.е. выделение переданного сообщения *b(t).*

Принципиальная схема простейшего диодного детектора состоит из НЭ (полупроводниковый диод) и фильтра нижних частот (ФНЧ) (рисунок 3.1.).

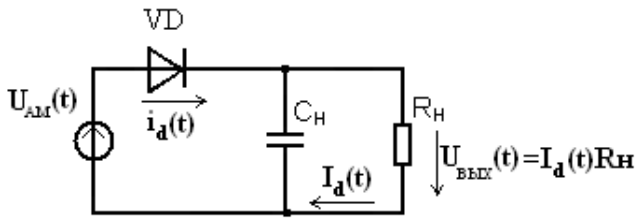


Рис. 3.1. Схема диодного детектора

В качестве НЭ (рис. 3.1) используется полупроводниковый диод *VD*, а ФНЧ – цепь $R_нC_н$. Пусть на вход диодного детектора (*VD*) поступает гармоническое напряжение с медленно меняющейся амплитудой $u_{\text{АМ}}(t)$. Если напряжение $u_{\text{АМ}}(t)$ положительно, то диод открывается, и конденсатор $C_н$ начинает заряжаться.

Постоянная времени заряда $\tau_{\text{зар}}$ конденсатора определяется емкостью $C_н$ и малым сопротивление открытого диода. По мере заряда $C_н$ выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ растет, и стремиться закрыть диод. Напряжение на диоде равно $U_d(t)=U_{AM}(t)-U_{ВЫХ}(t)$ и в момент времени $t=t_1$, $U_{AM}=U_{ВЫХ}(t)$, при этом $U_d(t)=0$. Начиная с момента времени t_1 диод закрывается ($U_{AM}<U_{ВЫХ}(t)$), и конденсатор $C_н$ начинает разряжаться через резистор $R_н$.

Постоянная времени разряда конденсатора $\tau_{\text{раз}}=R_HC_H>>\tau_{\text{зар}}$, поэтому разряд конденсатора $C_н$ происходит значительно медленнее, чем его заряд. Разряд конденсатора $C_н$ продолжается до момента времени $t=t_2$, при котором напряжение U_d становиться равным нулю. Начиная с момента времени t_2, диод снова открывается, и конденсатор $C_н$ начинает заряжаться.

В результате серии зарядов и разрядов на выходе детектора создается детектированное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$, имеющее пульсирующую составляющую. Учитывая, что время τ_p в практических схемах детектора во много раз больше периода несущей $u_{\text{АМ}}(t)$, уровень пульсации $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ мал.

Для того чтобы избежать искажений вида 3 на рис.3.2, надо поставить условие $\tau_{разр}<<T_{нч}$, где $T_{нч}=\frac{2\pi}{\Omega}$ - период модулирующего (низкочастотного) сигнала. Это означает, что конденсатор $C_н$ должен успевать разряжаться за время полупериода огибающей. Очевидно, что наиболее важно выполнить это условие на максимальной частоте модуляции Ω_{max}, когда огибающая изменяется наиболее быстро. Поэтому

$$\tau_{\text{разр}}<<\frac{2\pi}{\Omega_{\max}}. \qquad (3.1)$$

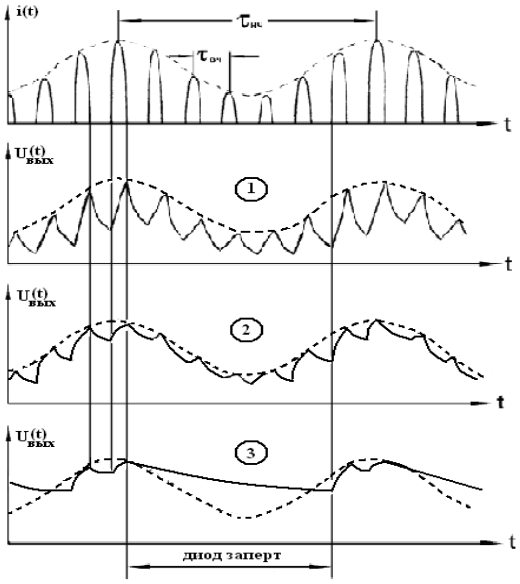


Рис. 3.2. Форма тока диода и выходное напряжение детектора при различных$\tau_{раз}$. Пунктиром показана огибающая сигнала.

Постоянная времени $\tau_{разр}=R_{Н}C_{Н}$ этого фильтра выбирается так, чтобы обеспечить неискаженное воспроизведение огибающей АМ - колебаний и необходимое подавление высокочастотной пульсаций. Для этого должно выполняться условие, при котором сопротивление нагрузки выбирается из соотношения:

$$\frac{1}{\omega_0 \cdot C_{Н}} < R_{Н} < \frac{1}{\Omega \cdot C_{Н}}, \tag{3.2}$$

где ω_0 - несущая частота АМ - колебания, Ω – частота модулирующего сигнала.

Или постоянная времени цепи нагрузки выбирается из неравенства:

$$\frac{2\pi}{\omega_0} << R_{Н}C_{Н} << \frac{2\pi}{\Omega_{max}}. \tag{3.3}$$

Учитывая, что $\omega_0 >> \Omega_{max}$, удовлетворить этому двойному неравенству несложно.

Качество работы амплитудного детектора определяется характеристикой детектирования, под которой понимается зависимость тока детектирования I_d от амплитуды входного немодулированного высокочастотного колебания $U_{m\omega}$ т.е. зависимость $I_d = f(U_{m\omega})$.

Линейным называется детектор, у которого характеристика детектирования является линейной функцией. Квадратичный детектор соответственно имеет квадратичную характеристику детектирования. Режим работы диодного детектора определяется амплитудой входного высокочастотного колебания $U_{m\omega}$:

- для слабых сигналов, амплитуда которых не превосходит 0,1 - 0,2 В, характеристика детектирования близка к квадратичной кривой, а именно: ($I_d = \frac{a_2 U_{m\omega}^2}{2}$),

- для сильных сигналов, амплитуда которых от 1 - 1,5 В, режим детектирования можно считать линейным.

При квадратичном детектировании АМ - колебания на выходе детектора возникают большие нелинейные искажения. В режиме сильных сигналов применима кусочно-линейная аппроксимация вольтамперной характеристики диода:

$$i(u) = \begin{cases} 0, \text{при} U_0 < 0 \\ S(U - U_0), \text{при} U_0 \geq 0 \end{cases} \tag{3.4}$$

Чтобы ответить на вопрос, где находится граница слабых и сильных сигналов, следует

снять характеристику детектирования $I_d=f(U_{m\omega})$ при глубине модуляции $m=0$. Эта характеристика по смыслу обратна статической модуляционной характеристике амплитудной модуляции и показывает, как меняется ток I_d (а, следовательно, и $U_{Hd}(t)=I_dR_H$) при изменении амплитуды входного сигнала. Напомним, что полезная информация в АМ - колебании заключена в его огибающей. Если огибающая полезного сигнала приходится на линейный участок характеристики детектирования, то искажения при детектировании отсутствуют. При малых сигналах (участок левее точки А – квадратичный участок на рис.3.3) детектирование сопровождается искажениями. Граница линейного участка (точка А) характеристики детектирования соответствует границе слабых и сильных сигналов.

Рассмотренная характеристика детектирования позволяет определять условия, при которых искажения отсутствуют - выбрать амплитуду несущей на входе детектора и максимально допустимую глубину модуляции $m_{\max}$.

В данной работе исследуем детекторную характеристику, как зависимость постоянной составляющей тока нелинейного элемента I_0 от амплитуды $U_{m\omega}$ входного немодулированного высокочастотного сигнала (рис.3.3). Эта характеристика является основой для расчёта параметров входного сигнала и детектора. По ней можно выбрать линейный участок, где будут отсутствовать (либо не превышать заданного значения) искажения при детектировании и рабочую точку на его середине, определяющуюуровень входного немодулированного сигнала $U_{m\omega н}$.

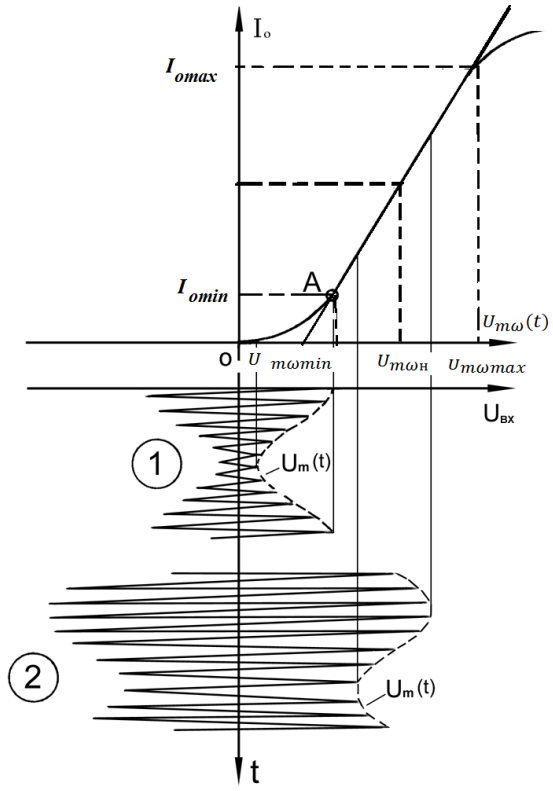


Рис.3.3. Характеристика детектирования. Работа детектора в режиме малых (1) и больших (2) сигналов.

Зная детекторную характеристику и сопротивление нагрузки R_H детектора можно вычислить амплитуду выходного напряжения детектора U_{dF} :

$$U_{dF} = \Delta I_0 R_H, \tag{3.5}$$

где $\Delta I_0=\frac{1}{2}(I_{0max} - I_{0min})$определяется по границам линейного участка детекторной характеристики. Коэффициент передачи детектора может быть вычислен по формуле

$$K_d = \frac{U_{dF}}{mU_{m\omega}} \tag{3.6}$$

где m – коэффициент модуляции входного сигнала, а $U_{m\omega}$ и $U_{m\omega H}$ определены из детекторной характеристики или экспериментально.

Начальный участок детекторной характеристики от 0 до $U_{m\omega min}$ имеет квадратичный (нелинейный) характер и описывается формулой

$$I_d = \frac{a_2 U_{m\omega}^2}{2} \quad (3.7)$$

где a_2 - коэффициент аппроксимации начального участка характеристики нелинейного элемента.

При работе детектора на этом участке характеристики возможны значительные искажения выходного сигнала при больших коэффициентах модуляции. При использовании усилительного элемента в качестве детектора, верхний участок детекторной характеристики то же нелинейный, из-за ограничения тока усилительного элемента.Для диодного же детектора такого ограничения обычно не наблюдается.

3. Краткое описание исследуемой схемы

Структурная схема для исследования детектора приведена на рисунке 3.4.

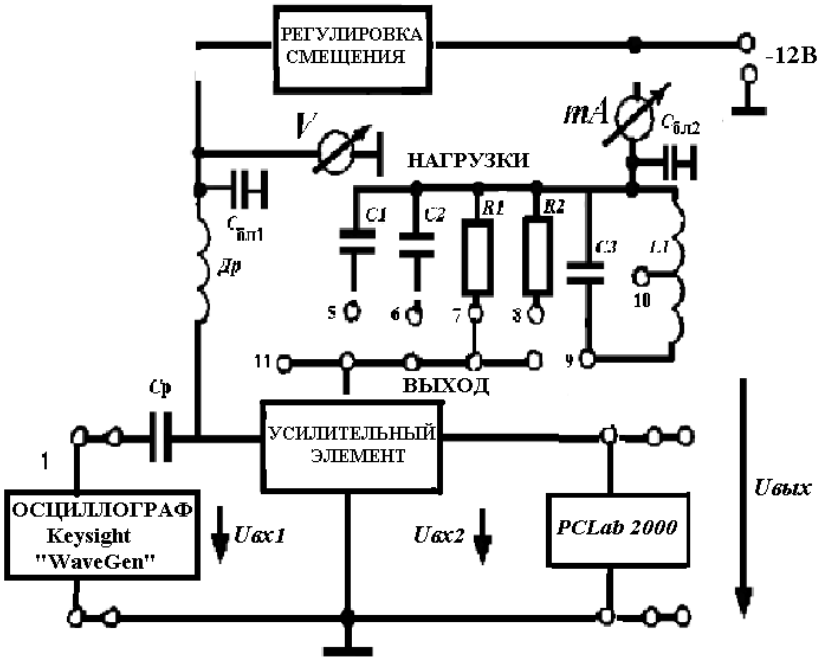


Рис.3.4 Структурная схема амплитудного детектора

Высокочастотный модулируемый сигнал от генератора *WaveGen* осциллографа *KeySight,* подается через разделительный конденсатор непосредственно на вход УЭ, модулирующий же сигнал от генератора *PCLab*2000 подаётся на вход 2. Величина и форма выходного сигнала контролируются осциллографом в режиме измерения и курсор. Исследование диодного детектора выполняется по схеме, представленной на рис. 3.5.

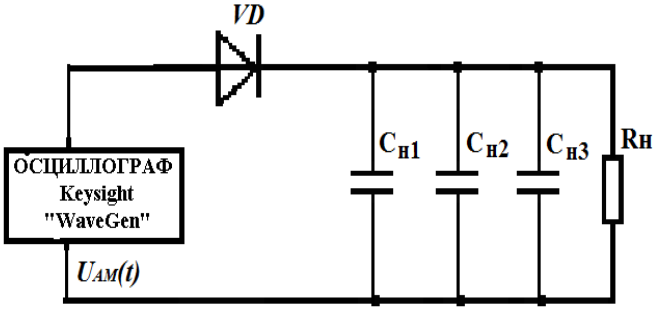


Рис.3.5 Схема диодного детектора

4. Домашнее задание

1. Изучить схемы детекторов АМ - колебаний.

2. Рассчитать величину ёмкости нагрузки C_H детектора, при которой возможно неискажённое детектирование АМ - колебания с частотой модуляции Ω = 400 Гц и несущей частотой $f_0 = 200$ *кГц.* Величину сопротивления нагрузки *R1* взять из таблицы.

3. Изобразить качественно временные диаграммы входного АМ - колебания U_{AM}(t) и напряжения на нагрузке $U_{вых}$(t):

а) при правильно выбранной величине ёмкости нагрузки C_H;

б) при слишком большой ёмкости нагрузки C_H;

в) при отключённом конденсаторе нагрузки.

4. Определить коэффициент передачи детектора в режиме линейного детектирования.

5. Определить коэффициент передачи диодного детектора, приняв внутреннее сопротивление диода порядка R_i=20-30 Ом.

6. Изобразить примерный вид частотной характеристики диодного детектора.

7. Изобразить спектральные диаграммы входного сигнала, тока нелинейного элемента и выходного сигнала.

8. Ознакомиться с лабораторным заданием, контрольными вопросами.

5.Лабораторное задание

1. Освоение методики расчета и снятия основных характеристик детектора.

2. Изучение физических процессов при детектировании АМ колебаний.

3. Исследование влияния глубины модуляции на выходное напряжение.

4. Изучение работы диодного детектора.Исследование влияния параметров нагрузки детектора на форму детектируемого напряжения

5. Исследование частотной характеристики диодного детектора.

6. Исследование влияния глубины модуляции на выходное напряжение диодного детектора.

6.Методические указания по выполнению лабораторной работы

6.1 Снятие детекторнойхарактеристики детектора

6.1.1.Для исследования детектора «АМ колебаний» с использованием усилительного элемента (рис.3.4) в качестве нагрузки используется резистивная нагрузка *R1* на панели лабораторного макета.

Установите частоту генератора *WaveGen* осциллографа *KeySight* равной несущей частоте косинусоидального модулируемого сигнала $F\omega$=50 кГц и напряжение смещения E_{CM} равное напряжению отсечки усилительного элемента по аппроксимирующей характеристике (Лабораторная работа №1 п.6.1.2).

6.1.2. Снимите детекторную характеристику $Io=\Psi(Um\omega)$. Напряжение входного немодулированного высокочастотного напряжения от генератора *WaveGen* меняется в интервале (от 0 до1,6 В), а постоянная составляющая тока УЭ измеряется по миллиамперметру (*мА*) на панели лабораторного макета. По результатам измерений постройте эту зависимость.

6.1.3. Определите границы линейного рабочего участка детекторной характеристики и выберите рабочую точку (т.е. амплитуду немодулированного высокочастотного сигнала на входе детектора рис.3.2). Результаты занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Оптимальные параметры детектора

$F\omega$, *кГц*	*Есм, В*	$Um\omega$, *В*	$Um\Omega$, *В*	F_Ω, *кГц*
			0	2

6.2 Исследование процесса детектирования АМ-колебаний

6.2.1. В качестве источника модулированного сигнала используем генератор *WaveGen* осциллографа *KeySight.* Установите выбранные значения частоты и амплитуды высокочастотного сигнала (таб.3.1) в генераторе сигналов, а в режиме «Настройки» установите частоту полезного сигнала и глубину модуляции равную 75 %.

6.2.2. Настройте осциллограф для наблюдения за входным модулированным и выходным детектированным сигналами.

6.2.3. Настройте осциллограф в режим «Быстрого преобразования сигналов – клавиша *FFT*», установив диапазон частот – 100 кГц, центр –50 кГц, настройте масштаб и смещение для лучшей визуализации.

6.2.4. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов и спектрограмму выходного сигнала.

6.2.5. Подключите на панели лабораторного макета конденсатор *C2* и зарисуйте осциллограмму и спектрограмму выходного сигнала.

6.2.6. Подключите на панели лабораторного макета вместо конденсатора *C2* конденсатор *C1* и зарисуйте осциллограмму и спектрограмму выходного сигнала.

6.2.7. Выберите и подключите тот конденсатор, который детектирует сигнал с наименьшими искажениями.

6.2.8. В генераторе сигналов *WaveGen*, в режиме «Настройки» установите частоту несущего сигнала $F\omega$=200 кГц и зарисуйте осциллограмму и спектрограмму выходного сигнала.

6.3Исследование влияния глубины модуляции на выходное напряжение

6.3.1.Не меняя настройки макета, снимите зависимость $U_{вых}=\varphi(m\%)$напряжения на выходе детектора от глубины модуляции входного сигнала (тумблер «глубина модуляции» генератора сигнала *WaveGen)*. Измерение напряжения на выходе детектора выполняйте в режиме «*AC RMS* полное». Постройте эту зависимость.

6.4. Изучение работы диодного детектора. Исследование влияния параметров нагрузки детектора на форму детектируемого напряжения

6.4.1. Соберите схему диодного детектора (рис.3.5). Элементы схемы расположены в правом верхнем углу панели лабораторного макета.

6.4.2. Зарисуйте осциллограммы с сохранением масштаба в контрольных точках:

– модулированного колебания на входе ДЕТЕКТОРА;

– напряжения на выходе ДЕТЕКТОРА при всех значениях емкости нагрузки C_H=*C1, C2, C3.*

6.4.3. Выберите и подключите тот конденсатор, который детектирует сигнал с наименьшими искажениями.

6.5.Исследование влияния глубины модуляции на выходное напряжение диодного детектора

6.5.1.Установите амплитуду несущего сигнала *Vpp* равную 4 В, частоту несущего сигнала $F\omega$=300 кГц, снимите зависимость напряжения на выходе детектора $U_{вых}=\varphi(m\%)$ от глубины модуляции входного сигнала.

6.5.2. Постройте измеренную зависимость, определите коэффициент передачи детектора и сравнитерезультат с расчётными данными.

6.6 Исследование частотной характеристики диодного детектора.

6.6.1. Снимите частотную характеристику диодного детектора $U_{вых}=\varphi(F\Omega)$ при правильно выбранных параметрах нагрузки (*R, C*). Ручкой «глубина модуляции»установить глубину модуляции порядка 75 %. Изменяя частоту полезного сигнала в пределах 500 Гц-15 кГц, с шагом 1 кГц измерьте напряжение на выходе детектора при постоянной глубине модуляции.

Работа закончена. Не забудьте получить подтверждение результатов измерений у преподавателя и выключить макет и приборы.

7. Контрольные вопросы

1. Каково назначение детектора в радиоприёмнике?
2. Какие возможны режимы работы диодного детектора? Чем они определяются?
3. В чём преимущества линейного детектирования перед квадратичным?
4. Чем следует руководствоваться при выборе параметров нагрузки диодного детектора?
5. Как будет изменяться угол отсечки при изменении сопротивления нагрузки диодного детектора *R*от 0 до ∞?
6. Как будет изменяться угол отсечки при уменьшении ёмкости конденсатора нагрузки до

нуля?

7. Дайте определение детекторной характеристики.

8. Какими причинами обусловлено появление нелинейных искажений на выходе детектора АМ колебаний?

9. Что такое коэффициент передачи детектора? От каких параметров зависит коэффициент передачи детектора?

10. Как выбираются рабочие точки настатической характеристике УЭ для линейного и квадратичного режимов детектирования?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4
ИССЛЕДОВАНИЕ *LC* –АВТОГЕНЕРАТОР

1. Цель работы

Целью работы является исследование работы транзисторного автогенератора гармонических колебаний с трансформаторной связью. Для реализации поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Изучение принципов работы основной схемы автогенератора.
2. Освоение методики расчёта условий самовозбуждения в стационарном режиме.
3. Экспериментальное исследование условий самовозбуждения и амплитудных характеристик автогенератора.
4. Исследование колебательных характеристик автогенератора.
5. Исследование влияния изменения фазового сдвига в цепи обратной связи на стабильность частоты автоколебаний.

2.Краткие теоретические сведения по работе

Устройства, генерирующие автоколебания, называют автоколебательными системами, или автогенераторами. Работа любого автогенератора основана на том, что энергия от источника питания через управляемый элемент, например, через транзистор, подается в колебательную систему. Цепь, в которой входной сигнал возвращается на вход, называется цепью с обратной связью (ОС).

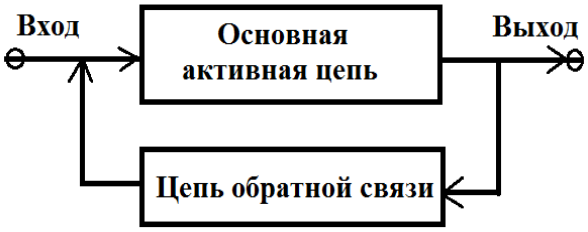


Рис. 4.1 Структурная схема цепи с обратной связью

Введение обратной связи в электрическую цепь изменяет рабочие характеристики цепи. Например, если в усилителях ОС такова, что часть выходного сигнала подается через ОС на вход и вычитается из входного сигнала, то такая ОС называется отрицательной обратной связью (ООС).

Если часть выходного сигнала подается на вход и прибавляется к входному сигналу, то такая ОС называется положительной обратной связью (ПОС).

Отрицательная обратная связь (ООС) стабилизирует и уменьшает коэффициент усиления, расширяет его полосу пропускания, уменьшает шумы и искажения. В усилителях преимущественно применяется ООС.

Положительная обратная связь (ПОС) увеличивает коэффициент усиления, уменьшает полосу пропускания и ухудшает стабильность усиления. ПОС преимущественно применяют в генераторах.

Рассмотрим цепи с ОС с системной точки зрения. Пусть две подсистемы с операторными передаточными функциями *K(p)* и *β(p)* соединены так, как показано на рис.4.2.

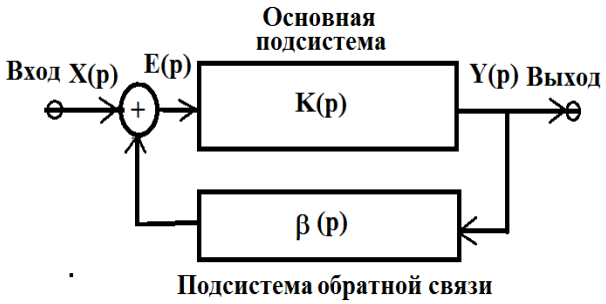


Рис.4.2 Схема системы с обратной связью

В этой схеме *X(p)* и *Y(p)* – входной и выходной операторные сигналы.

Передаточная функция этой системы

$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{E(p)\cdot K(p)}{E(p)-\beta(p)\cdot Y(p)}, \quad (4.1)$$

где выходной сигнал $Y(p) = E(p) \cdot K(p)$;

$E(p) = X(p) + \beta(p) \cdot K(p)$ - операторный сигнал на входе основной подсистемы;

$X(p) = E(p) - \beta(p) \cdot K(p)$ - сигнал на входе системы.

В выражении (4.1) числитель и знаменатель поделим на сигнал на входе основной подсистемы *E(p):*

$$H(p) = \frac{K(p)}{1-\beta(p)\cdot\frac{Y(p)}{E(p)}} = \frac{K(p)}{1-\beta(p)\cdot K(p)}. \quad (4.2)$$

Рассмотрим выражение (4.2) при $p=j\omega$

$$H(j\omega) = \frac{K(j\omega)}{1-\beta(j\omega)\cdot K(j\omega)} = \frac{K(j\omega)}{F(j\omega)}$$

где $F(j\omega) = 1 - \beta(j\omega) \cdot K(j\omega)$ - комплексная глубина (фактор) обратной связи.

Если$|1 - \beta(j\omega) \cdot K(j\omega)| > 1$,то имеет место ООС. Так как уменьшается модуль коэффициента передачи системы и, следовательно, амплитуда выходного сигнала.

Если $|1 - \beta(j\omega) \cdot K(j\omega)| < 1$,то имеет место ПОС.

В классическом варианте автогенератор состоит из нелинейного усилительного элемента, нагрузочного колебательного контура и цепи положительной обратной связи (ПОС) (рис.4.3).

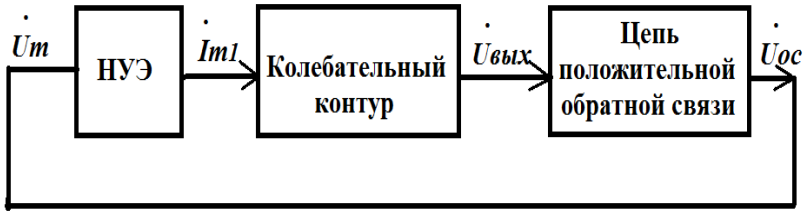


Рис.4.3 Структурная схема автогенератора

В качестве нелинейного усилительного элемента используют транзисторы, диоды, колебательная цепь и цепь ОС – это, как правило, линейные цепи. Нелинейный усилительный элемент и колебательный контур образуют нелинейный резонансный усилитель. Цепь обратной

связи служит для обеспечения на входе усилителя необходимого по амплитуде и фазе напряжения для поддержания незатухающих колебаний в контуре.

Коэффициенты передачи НУЭ и цепи обратной связи комплексные равные

$\dot{K}(j\omega) = K \cdot e^{j\varphi_K}$ и $\dot{\beta}(j\omega) = \beta \cdot e^{j\varphi_B}$,

где K и β модули коэффициентов передачи НУЭ и цепи обратной связи, φ_K и φ_β и фазы, соответственно.

На входе усилителя существует гармоническое колебание с угловой частотой ω_o и амплитудой U_m. Чтобы поддерживать эти колебания, необходимо после обхода всей цепи подать на вход колебания с такой же частотой, фазой и амплитудой.

Переменное напряжение, которое подается на вход усилителя U_m, называют сигналом возбуждения, для которого должно выполняться условие:
$\dot{U}_m = \dot{\beta}(j\omega) \cdot \dot{U}_{oc} = \dot{\beta}(j\omega) \cdot \dot{K}(j\omega) \cdot \dot{U}_m$, и, следовательно, $\dot{\beta}(j\omega) \cdot \dot{K}(j\omega) = 1$. Перепишем это уравнение в показательной форме

$$\beta \cdot e^{j\varphi_B} \cdot K \cdot e^{j\varphi_K} = 1 + j0$$

или $\beta \cdot K = 1$ и $\varphi_B + \varphi_K = 2 \cdot \pi \cdot k$, где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Учитывая, что усилитель содержит нелинейный активный элемент, то коэффициенты передачи будут зависеть от амплитуды U_m, т.е.

$$\beta(U_m) \cdot K(U_m) = 1. \qquad (4.3)$$

Это условие называется **балансом амплитуд**.

Сдвиг фаз при наличии резонансного контура сильно зависит от частоты:

$$\varphi_B(\omega_o) + \varphi_K(\omega_o) = 2 \cdot \pi \cdot k, \qquad (4.4)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.- условие **баланса фаз.**

На практике у генератора сдвиг фазы должен составлять 360^o, так как усилитель обычно инвертирует сигнал, создавая сдвиг фазы равный 180^o, а частотно-избирательная цепь ПОС создает дополнительный сдвиг фазы на 180^o на нужной частоте.

При стационарной амплитуде колебаний U_m общий коэффициент всей системы на генерируемой частоте при обходе усилителя и цепи обратной связи, равен 1. Из условия баланса амплитуд определяют амплитуду генерируемого колебания U_m,

$$\beta(U_m) \cdot K(U_m) = S_{cp} \cdot R_p \cdot \beta(U_m) = 1, \qquad (4.5)$$

где S_{cp} - средняя крутизна характеристики УЭ, R_p- резонансное сопротивление контура.

Из условия (4.5) по известной колебательной характеристике $U_{вых} = f(U_m)$ и величине обратной связи можно графически определить амплитуду стационарных колебаний, проведя на ней линию обратной связи (рис.4.4). При условии $\beta \cdot K < 1$ амплитуда колебаний уменьшается, при $\beta \cdot K > 1$ амплитуда колебаний увеличивается.

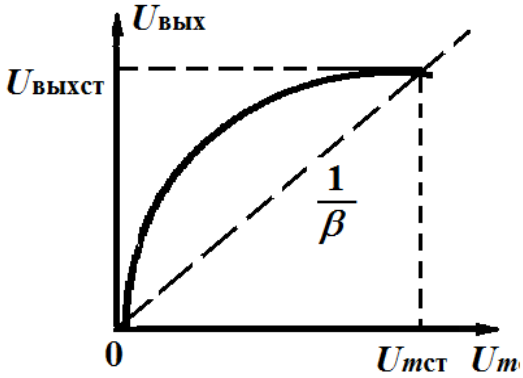


Рис.4.4 Иллюстрация определения амплитуды генерирующего колебания

Из условия баланса фаз, зная фазо-частотную характеристику нагрузки и фазовый сдвиг в цепи обратной связи, можно вычислить частоту автоколебаний или её отклонение Δf от резонансной частоты нагрузки

$$\phi_\beta = \text{arctg}2Q\frac{\Delta f}{f_0}, \Delta f = -\frac{f_p}{2\theta}\text{tg}\phi_\beta \quad (4.6)$$

Основной характеристикой автогенератора является зависимость амплитуды стационарных колебаний от величины обратной связи. По характеру этой зависимости различают два режима работы автогенератора: «мягкий» и «жёсткий».

«Мягкий» режим обеспечивает плавное изменение амплитуды автоколебаний с изменением связи, причем направление изменения связи картину не изменяет. Этот режим обеспечивается выбором рабочей точки на участке характеристики УЭ с максимальной крутизной.

В «жёстком» режиме наблюдается скачкообразное изменение амплитуды автоколебаний при регулировке обратной связи, а возникновение и срыв колебаний происходят при разных значениях связи. Рабочая точка в этом режиме выбирается на нижнем сгибе характеристики усилительного элемента. Условие самовозбуждения автогенератора

$$K_{кр} \geq 1/S_o R_p \quad (4.7)$$

позволяет вычислить критическое значение связи $K_{кр}$ в заданной рабочей точке (S_0 - крутизна характеристики в этой точке), при условии, что $\varphi_\beta = 0$ и сопротивление контура на генерируемой частоте равно R_p.

3. Краткое описание исследуемой схемы

LC-автогенератор собран на биполярном транзисторе с колебательным контуром в цепи коллектора и трансформаторной обратной связью. Частота генерации постоянна и находится в пределах 250-300 кГц. Тумблер обратной связи позволяет плавно менять абсолютную величину обратной связи. Тумблер фаза позволяет плавно менять фазу комплексного коэффициента передачи цепи обратной связи. Регулировка смещения, подаваемого на базу биполярного транзистора производится потенциометром *Есм*, и контролируется вольтметром, расположенным над потенциометром регулировка смещения. Миллиамперметр для измерения тока коллектора биполярного транзистора при снятии его вольт-амперной характеристики, находится на этой же панели.

Выходное напряжение цепи обратной связи U_o снимается с гнезда 13, а выходное напряжение нелинейного усилительного элемента $U_{вых}$ с гнезда 11.

Для снятия колебательных характеристик используют осциллограф *KeySight* в режиме генератора *WaveGen.* В качестве измерительного прибора используют осциллограф *KeySight* в режиме измерения.

4. Домашнее задание

1. Изучить схемы автогенераторов, принципы и режимы их работы.
2. Подготовить заготовку отчета.

5.Лабораторное задание

1. Исследовать «мягкий» и «жесткий» режимы самовозбуждения.
2. Получить амплитудные характеристики стационарного режима при разных напряжениях смещения.
3. Получить колебательные характеристики резонансного усилителя без обратной связи.

6. Методические указания по выполнению лабораторной работы

6.1 Исследование режимов самовозбуждения автогенератора.

Снятие вольт-амперной характеристики нелинейного элемента.

6.1.1. Снимите вольт-амперную характеристику (ВАХ) транзистора. Подайте питание на усилительный элемент (включите питание макета), соедините дополнительным проводком клеммы 11 и 10, подготовьте таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Вольт-амперная характеристика транзистора

$E_{см}=U_{бэ}$	*В*	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	…	$U_н$
I_k	*мА*								$I_н$

6.1.2. Меняя напряжение смещения (блок регулировки смещения) снимите статическую вольт-амперную характеристику УЭ $i_k=f_1(E_{см})$.

Примечание: Сопротивление нагрузки УЭ выбрано таким, что статическая и динамическая характеристики УЭ практически совпадают.

6.1.3. Постройте полученную характеристику в крупном масштабе.

6.1.4. Выберите рабочую точку (смещение $E_{см}$) в середине линейного участка и установите выбранное напряжение смещения $E_{см}$ на панели лабораторного макета.

Исследование «мягкого» режима самовозбуждения автогенератора.

6.1.5.Ручку регулировки «Обратная связь» установите в крайнее левое положение. К выходу НЭУ (гнездо 11) подключите осциллограф. Соедините гнезда 1 и 13 дополнительным проводом.

6.1.6. Плавно увеличивая значение обратной связи ручкой «Обратная связь» дождитесь появления генерации (по осциллографу). Уменьшите значение обратной связи, добиваясь минимальных устойчивых колебаний (не более 0,5 В). Далее регулятором «Обратная связь» добейтесь прекращения колебаний.

Таким образом, вы определили смещение «мягкого» режима $E_{см1}$ и критическое значение величины обратной связи $K_{кр1}$, которые следует занести в таблицу 6.2

Таблица 6.2. Влияние обратной связи на «мягкий» режим

«Мягкий» режим; $E_{см1}$= … В; $K_{кр1}$=…								
$K_{ос}$								
$U_{вых}$	В							При увеличении $K_{ос}$
$U_{вых}$	В							При уменьшении $K_{ос}$

Устанавливая ряд значений $K_{ос}$, снимите зависимость напряжения с выхода автогенератора от величины значения обратной связи $K_{ос}$ и результаты внесите в таблицу 6.2, причем обе строчки $U_{вых}$ снимайте при одних и тех же значениях $K_{ос}$. По данным таблицы построить график

$U_{вых}=f_2(K_{ос})$.

6.1.7. Убедившись в наличии генерации, определите частоту генерируемых колебаний по осциллографу (измерьте период колебаний) или по шкале анализатора спектра режим *FFT* – осциллографа.

Исследование «жесткого» режима самовозбуждения автогенератора.

6.1.8. Выберите рабочую точку (смещение $E_{см}$) на нижнем сгибе ВАХ и установите соответствующее смещение $E_{см}$ на панели лабораторного макета.

6.1.9. Плавно регулируя значение ручкой «Обратная связь» убедитесь, что при некотором $K_{ос}=K_{кр1}$ происходит скачкообразное возникновение колебаний, а при некотором $K_{ос}=K_{кр2}$ – срыв колебаний ($K_{кр2}<K_{кр1}$).

Если колебания вообще не возникают, необходимо немного уменьшите напряжение смещения $E_{см}$, а если $K_{кр1}$ и $K_{кр2}$ различаются незначительно – соответственно увеличьте $E_{см}$.

Путем нескольких таких проб найти $E_{см2}$ «жесткого» режима, при котором $K_{кр1}$ и $K_{кр2}$ существенно различаются. Внесите значения в таблицу 6.3

Таблица 6.3 Влияние обратной связи на «жесткий» режим самовозбуждения

«Жесткий» режим; $E_{см2}$= … В; $K_{кр1}$=…; $K_{кр2}$=…								
$K_{ос}$								
$U_{вых}$	В							При увеличении $K_{ос}$
$U_{вых}$	В							При уменьшении $K_{ос}$

Примечание: После окончательного выбора $E_{см2}$, до полного заполнения таблицы 6.3 трогать ручку «Регулировка смещения» не рекомендуется.

6.1.10. Устанавливая ряд значений $K_{ос}$, снимите зависимость напряжения с выхода автогенератора от величины значения обратной связи $K_{ос}$ и результаты внесите в таблицу 6.3, причем обе строчки $U_{вых}$ снимать при одних и тех же значениях $K_{ос}$. По данным таблицы простроить график $U_{вых}=f_3(K_{ос})$.

6.2. Исследование колебательных характеристик автогенератора.

6.2.1. Отключите обратную связь. Ручку регулировки «Обратная связь» установите в крайнее левое положение. К входу автогенератора (гнездо 1) подключите осциллограф *KeySight* в режиме генератора *WaveGen.* Для того, чтобы контролировать вносимый в автогенератор сигнал первый канал осциллографа подключите к гнезду 1. К выходу 11 подключите второй канал осциллографа. Установите вид сигнала «гармонический», частоту генератора 300 кГц, а напряжение V_{pp} = 0,4 В.

6.2.2. Определите частоту резонанса *LC*-контура путем плавной перестройки частоты генератора *WaveGen* в пределах 150 - 350 кГц. Достижение резонанса фиксируйте по максимуму выходного напряжения (гнездо 11). Значение резонансной частоты $f_{рез}$ внесите в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 Колебательная характеристика автогенератора

«Мягкий» режим; $E_{см1}$= … В; $f_{рез}$=…кГц; Rр=…кОм								
$U_{вх}$	*В*	0,1						
$U_{вых}$	*В*							
$I_{т1}$	*мА*							
$S_{ср}$	*мА/В*							

6.2.3. Установите смещение «мягкого» режима $E_{см1}$и снимите зависимость $U_{вых}=f_4(U_{вх})$ на резонансной частоте. В качестве минимального значения входного напряжения примите $U_{вхmin}$=0.1 В. Результаты измерений внесите в таблицу 6.4.

6.2.4.Установите смещение «жесткого» режима $E_{см2}$ снимите зависимость $U_{вых}=f_5(U_{вх})$ на резонансной частоте и результаты измерений внесите в таблицу 6.5, имеющую такой же вид, как таблица 6.4.

Напомним, что средняя крутизна – это отношение действующих значений амплитуд первой гармоники тока коллектора и входного напряжения:

$$S_{ср} = \frac{I_{m1}}{U_{mвх}}, \quad (4.6)$$

Находим: $I_{m1} = \frac{U_{mвх}}{R_p}$, а резонансное сопротивление определяется из выражения:

$$K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{mвхmin}} = S_{ср} \cdot R_p.$$

Пользуясь графиком ВАХ для $E_{см1}$ («мягкий» режим), определите крутизну $S_{ср}$ в *мА/В,* и найдите R_p (кОм):

$$R_p = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{mвх} \cdot S_{ср}}.$$

Используя полученные формулы, заполните последние две строки таблицы 6.4 и 6.5.

6.2.5. Проверьте, выполняются ли условия баланса амплитуд и баланса фаз. К входу автогенератора (гнездо 1) подключите осциллограф *KeySight* в режиме генератора *WaveGen.* Канал 1 осциллографа подключите на вход НУЭ, а канал 2 на выход цепи обратной связи гнездо 13. Наложите гармонические колебания этих каналов друг на друга (они должны быть совмещены точно). Для того что совместить фазы, меняйте значения фазы «регулятором фазы», а амплитуды — регулятором «обратной связи».

6.2.6. Проверьте работу автогенератора. Отключите от гнезда 1 генератор *WaveGen* и соедините гнезда 13 и 1 дополнительным проводком. Убедитесь, что на входе автогенератора, гнездо 1,получен гармонический сигнал. Зарисуйте осциллограмму.

Работа выполнена. Не забудьте получить подтверждение результатов измерений у преподавателя и выключить макет и приборы

7. Контрольные вопросы

1. Какие режимы самовозбуждения автогенератора Вы знаете?
2. При каких условиях возможен мягкий режим самовозбуждения?
3. Почему этот режим называется "мягкий"?
4. При каких условиях возможен жёсткий режим самовозбуждения?
5. Почему такой режим называется "жёстким"?
6. Что такое средняя крутизна характеристики Н.Э.?
7. По заданной колебательной характеристике построить зависимость средней крутизны от амплитуды колебаний.
8. Дать сравнительную характеристику мягкого и жёсткого режимов самовозбуждения.
9. Возможно ли самовозбуждение автогенератора, если напряжение смещения больше напряжения отсечки УЭ $|E_0|>|U_o|$?
10. Возможен ли стационарный режим при тех же условиях?
11. Как зависит величина критической связи от режима самовозбуждения автогенератора?
11. Как изменяется величина критической связи при шунтировании контура?
12. В чём сущность квазилинейного метода исследования нелинейных цепей?
13. Изобразите характерные колебательные характеристики для мягкого и жёсткого режимов самовозбуждения.
14. Как по колебательной характеристике и линии обратной связи определить устойчивость автоколебаний в точках их пересечения?
15. Запишите условия баланса амплитуд и фаз? Поясните физический смысл этих условий.

Список используемых источников

1. Андреев, Вадим Сергеевич**.**Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов / В. С. Андреев. - М.: Радио и связь, 1982. – с.279.

2. Каратаева Н.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов и линейные цепи.- Томск:Томск.гос.ун-т систем управления, 2003, с.254.

3. Кушнир В.Ф., Ферсман Б.А. Теория нелинейных электрических цепей.- М.: Связь, 1974, с.287.

4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы Издательство: "Высшая школа" 2005. – с.462.

5. Гоноровский, Иосиф Семенович. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие для вузов / Иосиф Семенович Гоноровский, Михаил Петрович Демин. - 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1994. –с. 480.

6. Денисов Н.П., Шарапов А.В., Шибаев А.А. Электроника и схемотехника -, Томск - 2002 г., с. 21-32.

7. Осциллографы *Keysight Infinii Vision 100*0 серии X. Руководство по эксплуатации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Работа с осциллографом *Keysight Infinii Vision* 1000 серии X

1. Включение осциллографа Требования к электропитанию.Требования относительно напряжения в сети, частоты и электропитания: • напряжение в сети: ~100-120 В (перем.), 50/60/400 Гц • 100-240В (перем.), 50/60 Гц • 50Вт макс. Требования к системам вентиляции Расположите прибор таким образом, чтобы обеспечить достаточный зазор для притока и вывода воздуха. Для обеспечения надлежащего охлаждения прибора нельзя ограничивать циркуляцию воздуха. Не перекрывайте воздухозаборные отверстия и отверстия для выхода воздуха. Вентилятор охлаждает прибор, втягивая воздух через отверстия на левой и нижней панелях осциллографа и выдувая его через заднюю панель. При установке осциллографа на рабочем столе для надлежащего охлаждения прибора необходимо обеспечить 50-миллиметровые зазоры побоками 100-миллиметровые зазоры над прибором и за ним. Включение осциллографа:

1.1 Подключите кабель питания к гнезду на задней панели осциллографа, затем подключите его к подходящему источнику напряжения переменного тока. Проложите кабель питания таким образом, чтобы исключить защемление кабеля ножками осциллографа.

1.2 Осциллограф автоматически подстраивается к сетевому напряжению в диапазоне от 100 до 240 В. Прилагаемый к прибору сетевой шнур должен соответствовать национальному стандарту страны, в которую поставляется осциллограф.

1.3 Нажмите кнопку включения/выключения питания. Кнопка включения/выключения питания находится в левом нижнем углу передней панели устройства. Осциллограф выполнит процедуру самодиагностики и через несколько секунд будет готов к работе.

ОСТОРОЖНО. Всегда используйте заземленный кабель питания. Не снимайте заземление с кабеля питания.

2. Подключение пробников к осциллографу. Подключите пробник к разъему канала BNC осциллографа. Подключите выдвижной наконечник пробника к нужной точке цепи или тестируемого устройства. Обязательно подключите кабель заземления пробника к точке заземления цепи. **ВНИМАНИЕ.**Предельное входное напряжение на аналоговом входе 150 В СКЗ, 200 В (макс.) **ВНИМАНИЕ.**Не допускайте работы без заземления Нарушение заземления и последующая работа без заземления может привести к неточным измерениям, а также повреждению оборудования. Кабель заземления пробника следует замкнуть на корпус осциллографа и подключить к проводу заземления силового кабеля. Если нужно выполнить измерение между двумя точками, находящимися под напряжением, следует использовать дифференциальный пробник с достаточным динамическим диапазоном.

ОСТОРОЖНО. Не следует пренебрегать обеспечением защиты путем заземления осциллографа. Заземление осциллографа осуществляется посредством кабеля питания. Нарушение заземления повышает риск поражения электротоком.

3. Входной сигнал. Сигнал P*robeComp* применяется для компенсации пробников.одключите пробник канала 1 осциллографа к разъему ***Demo, ProbeComp*** на передней панели. Подключите кабель заземления данного пробника к разъему заземления (рядом с разъемом ***Demo***).

4. Восстановление настроек осциллографа по умолчанию. Восстановление настроек осциллографа по умолчанию. Нажмите кнопку **[DefaultSetup] (Настр.по умолчанию)**. Нажатие этой кнопки восстанавливает настройки осциллографа по умолчанию. Это приводит осциллограф в известное рабочее состояние. В меню сохранения/вызова имеются функции полного восстановления заводских настроек или выполнения безопасной очистки.

5. Органы управления и разъемы передней панели.Под *кнопкой*, находящейся на передней панели, подразумевается любая кнопка (клавиша), которую можно нажать. *Программные*

кнопки – это шесть кнопок, расположенных непосредственно рядом с дисплеем. Меню и метки программных кнопок отображаются на дисплее при нажатии других кнопок на передней панели. Функции программных кнопок меняются при навигации по разным меню осциллографа. Описание элементов, обозначенных на данном рисунке с помощью цифр, см. в приведенной далее таблице 1.

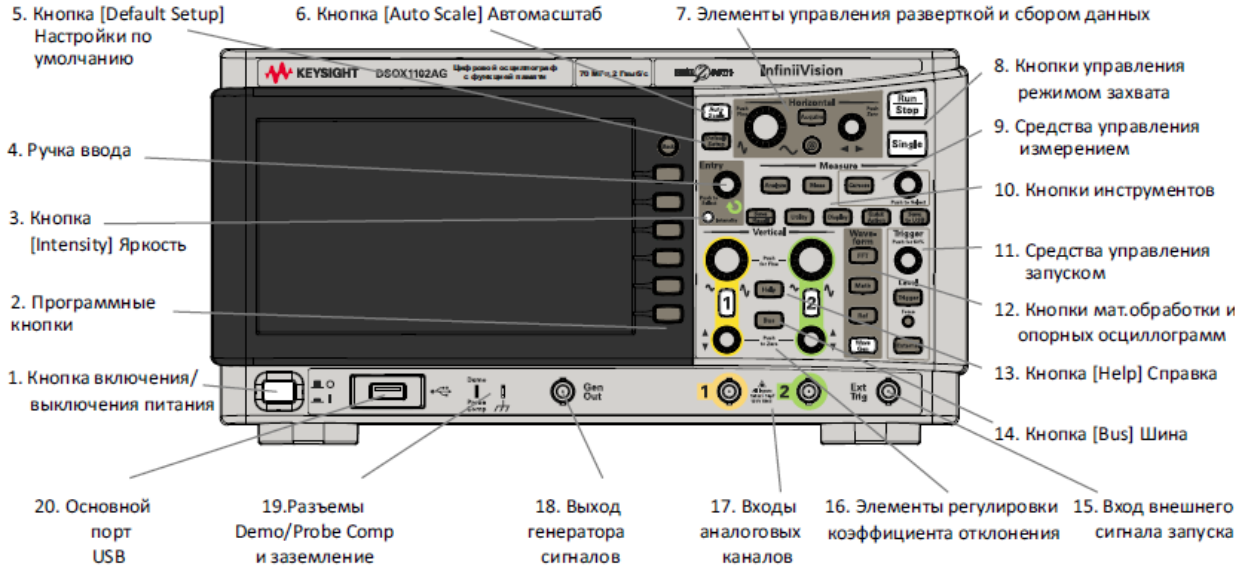


Таблица 1. Перечисление органов управления и разъемов передней панели осциллографа.

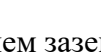
Номер кнопки	Название кнопки	Функции кнопки
1.	Кнопка вкл/	Чтобы включить питание, нажмите один раз; нажмите еще раз, чтобы отключить питание.
2.	Программные кнопки	Функции этих кнопок зависят от меню, отображаемых на дисплее рядом с ними. Кнопка Back (Назад) выполняет перемещение назад в иерархии меню программных кнопок. На вершине иерархии кнопка Back (Назад) отключает меню. Вместо него на экране отображаются сведения об осциллографе
3.	Кнопка **[Intensity] (Яркость)**	Нажмите эту кнопку, чтобы включить её подсветку. После поверните ручку ввода, чтобы отрегулировать яркость отображаемого сигнала. Вы можете изменять яркость для выявления подробностей формы сигнала, как и при работе с аналоговым осциллографом.
4.	Ручка ввода	Ручка ввода используется для выбора элементов меню и изменения значений параметров. Функция ручки ввода меняется в зависимости от выбранных меню и программной кнопки. Учтите, что когда символ ручки ввода отображается на одной из программных кнопок, также можно выбрать значение с помощью ручки ввода. Часто для осуществления выбора достаточно поворота ручки ввода. Иногда ручку ввода можно нажать, чтобы подтвердить или отменить выбор. Кроме того, нажатием ручки ввода с экрана убираются всплывающие меню.
5.	Кнопка**[Default Setup]**	Нажмите эту кнопку, чтобы восстановить настройки

	(Настр.поумолчанию)	осциллографа по умолчанию Восстановление настроек осциллографа по умолчанию:**1** Нажмите кнопку **[DefaultSetup] (Настр.по умолчанию)**. Нажатие этой кнопки восстанавливает настройки осциллографа по умолчанию. Это приводит осциллограф в известное рабочее состояние. В меню сохранения/вызова имеются функции полного восстановления заводских настроек или выполнения безопасной очистки
6.	Кнопка **[AutoScale] (Автомасштаб)**	При нажатии кнопки **[AutoScale] (Автомасштаб)** осциллограф быстро определяет активные каналы, включает их и масштабирует для отображения входных сигналов на экране.
7.	Элементы управления разверткой и сбором данных	Управление разверткой и сбором данных включает следующие элементы: • Ручка масштаба развертки – поверните ручку в секции развертки с меткой для настройки значения времени/деления. Знаки под этой ручкой означают, что с ее помощью можно развернуть или уменьшить сигнал за счет масштабирования по горизонтали. Нажмите ручку масштаба развертки для переключения между точной и грубой регулировкой. • Ручка положения коэффициента развертки – поверните ручку, обозначенную как для горизонтального перемещения по сигналу. При этом можно отобразить полученный сигнал до момента запуска (поворот ручки по часовой стрелке) или после (поворот ручки против часовой стрелки). Если перемещение по сигналу происходит при остановленном захвате осциллографе (по нажатию кнопки STOP), то отображаются данные сигнала, полученного последним. • Кнопка **[Acquire] Сбор** – нажмите эту кнопку, чтобы открыть меню сбора данных, в котором можно выбрать временной режим "Нормальный", "XY" или "Прокрутки", включить или выключить масштабирование и выбрать точку отсчета времени запуска. Кроме того, можно выбрать режим сбора данных "Нормальный", "Обнаружение пиков", "Усреднение" или "Высокое разрешение", а в моделях серии DSOX1000 можно использовать сегментированную память. Выбирая режим сбора данных осциллографа, помните, что при больших коэффициентах горизонтальной развертки обычно выполняется прореживание (отбрасывание) выборок. При больших настройках горизонтальной развертки эффективная частота дискретизации падает (а эффективный период выборки увеличивается), так как время сбора данных возрастает, и дискретизатор осциллографа осуществляет выборку чаще, чем это необходимо для заполнения памяти. Допустим, что для дискретизатора осциллографа заданы период выборки в 1 нс (максимальная частота дискретизации 1 Гвыб/с) и объем памяти 1 М. При такой частоте память заполняется в течение 1 мс. Если время сбора данных составляет 100 мс (10 мс/дел), то для заполнения памяти требуется

		только 1 из каждых 100 проб. • Кнопка "Масштаб" – нажмите кнопку масштаба , чтобы разделить дисплей осциллографа на экраны "Нормальный" и "Масштаб", не открывая меню "Сбор". Дополнительные сведения о “Средствах управления разверткой" приводятся на рисунке 1 и таблице 3.
8.	Кнопки управления режимом захвата	Когда кнопка **[Run/Stop] (Пуск/Стоп)** светится зеленым светом, осциллограф работает, то есть, при соблюдении условий запуска выполняется сбор данных. Для останова сбора данных нажмите кнопку **[Run/Stop] (Пуск/Стоп)**. Когда кнопка **[Run/Stop] (Пуск/Стоп)** светится красным светом, сбор данных остановлен. Для запуска сбора данных нажмите кнопку **[Run/Stop] (Пуск/Стоп)**. Для однократного запуска и отображения данных (вне зависимости, работает осциллограф или остановлен) нажмите кнопку **[Single] (Однократный запуск)**. Пока идет запуск осциллографа, кнопка **[Single] (Однократный запуск)** светится желтым светом.
9.	Средства управления измерением	К средствам управления измерением относятся следующие. • Кнопка **[Analyze] Анализ** – нажмите эту кнопку, чтобы обратиться к функциям анализа, таким как установка уровня запуска, установка измерительных порогов, автоматическая настройка запуска по видеосигналам и их отображение или цифровой вольтметр. Функция анализа цифрового вольтметра обеспечивает измерение напряжения с точностью до 3 знаков и частоты с точностью до 5 знаков с помощью любого аналогового канала. Измерения цифрового мультиметра не зависят от работы системы сбора данных осциллографа и производятся непрерывно. Функции цифрового осциллографа приведены в таблице 4. • Кнопка **[Meas] Измерения**– нажмите эту кнопку для доступа к предварительно заданным измерениям. С помощью кнопки **[Meas] Измерения** можно автоматически выполнять измерение сигналов. Некоторые виды измерений доступны только для аналоговых входных каналов. Результаты самых последних измерений отображаются в области информации об измерениях в правой части экрана. Курсоры включены для отображения последней измеряемой части сигнала (крайний нижний показатель в области измерений справа). Для сигналов аналоговых каналов возможно выполнение всех измерений. Для сигналов математических функций, за исключением БПФ, возможно проведение всех измерений, кроме измерения "Счетчик". Для сигналов математических функций БПФ возможно выполнение ограниченного набора измерений. Для выполнения других измерений сигнала FFT воспользуйтесь курсорами. **ЗАМЕЧАНИЕ**Если необходимая для измерений часть сигнала отсутствует на экране или отображается

		недостаточно четко для выполнения измерений (приблизительно 4% полного масштаба), то отображаемый результат будет больше, меньше, с отсутствующими границами, меньшей амплитудой (малый сигнал), или сигнал будет обрезан. В таблице 2 приведены функции измерений. • Кнопка **[Cursors] Курсоры** – нажмите эту кнопку, чтобы открыть меню, с помощью которого можно выбрать режим курсоров и источник. • Ручка курсоров – нажмите эту ручку, чтобы выбрать во всплывающем меню курсоры. Затем, когда всплывающее меню закроется (по истечении времени отображения или после повторного нажатия данной ручки), отрегулируйте с ее помощью положение выбранного курсора.
10.	Клавиши Tools	Сюда относятся следующие кнопки: • Кнопка **[Save/Recall] Сохранение/вызов** – нажмите эту кнопку, чтобы сохранить настройки осциллографа, изображения экрана, данные сигналов или файлы маски, либо восстановить настройки, файлы маски или опорные сигналы. • Кнопка **[Utility] Утилиты** – нажмите эту кнопку, чтобы обратиться к меню "Утилиты", в котором можно настроить параметры ввода-вывода осциллографа, пользоваться файловым обозревателем, задавать значения параметров, обращаться к меню обслуживания и выбирать другие функции. • Кнопка **[Display] Дисплей** – нажмите эту кнопку, чтобы открыть меню, в котором можно включить послесвечение, настроить яркость сетки (координатной), метки сигналов, добавить аннотацию и очистить дисплей. • Кнопка **[QuickAction] Быстрое действие** – нажмите эту кнопку, чтобы выполнить выбранное быстрое действие: общий снимок измерений, печать, сохранение, вызов, остановка изображения и другие. • Кнопка **[Saveto USB] Сохр на устр-ве USB** – нажмите эту кнопку, чтобы выполнить быстрое сохранение на USB-накопителе.
11.	Средства управления запуском	С помощью элементов управления запуском задаются параметры запуска осциллографа для сбора данных. Управление включает следующие элементы: • Ручка уровня – поверните ручку уровня, чтобы настроить уровень запуска для выбранного аналогового канала. Нажмите ручку, чтобы установить уровень на 50% сигнала. Если используется связь по переменному току, то при нажатии этой ручки уровень запуска будет установлен на 0 В. Положение уровня запуска для аналогового канала показано соответствующим значком в крайней левой части экрана (если аналоговый канал включен). Значение уровня запуска для аналогового канала отображается в верхнем правом углу экрана. • Кнопка **[Trig] Зап.** – нажмите эту кнопку, чтобы выбрать тип запуска (по фронту, по длительности импульса, по видеосигналу и т.д.).

		• Кнопка **[Force] Принуд.** – инициирует запуск (какого-либо действия) и отображает сбор данных. Эту кнопку можно использовать в режиме запуска "Нормальный", когда сбор данных осуществляется только при выполнении условия запуска. В этом режиме, если запуск не выполняется (то есть отображается индикатор "Запущ.?"), можно нажать кнопку **[Force] Принуд.**, чтобы принудительно выполнить запуск и проверить поступающие сигналы. • Кнопка **[External] Внешн.** – нажмите эту кнопку, чтобы настроить параметры входа внешнего запуска.
12.	Мат.обработка и опорные осциллограммы	К дополнительным средствам управления сигналом относятся следующие: • Кнопка **[FFT] БПФ** – доступ к функции анализа спектра БПФ. Функция БПФ применяется для вычисления быстрого преобразования Фурье с использованием аналоговых входных каналов. Функция БПФ берет оцифрованную запись временной зависимости сигнала заданного источника и преобразует ее в частотную область. Когда выбрана функция БПФ, на экране осциллографа отображается спектр БПФ как зависимость уровня в децибелах от вольта (дБв) от частоты. При этом по горизонтальной оси вместо времени откладывается частота (Гц), а по вертикальной оси вместо напряжения – уровень в децибелах. Функцию БПФ применяют для выявления проблем, связанных с перекрестными помехами, для выявления причин нелинейных искажений в аналоговых сигналах, вызванных нелинейностью усилителей, а также для настройки аналоговых фильтров. • Кнопка **[Math] (Математика)** — доступ к сигналам математических функций (сложение, вычитание, и т.д.). • Кнопка **[Ref] (Опорн.)** — доступ к функциям опорного сигнала. Опорный сигнал – это сохраненный сигнал, который можно отобразить и сравнить с сигналом другого аналогового канала или математической функции. • Кнопка **[WaveGen] Генер.сигналов**– в моделях осциллографов с индексом G в конце номера, имеющих встроенный генератор сигналов, нажмите эту кнопку, чтобы получить доступ к функциям генератора сигналов. В моделях осциллографов, чей номер модели заканчивается на G, имеется встроенный генератор сигналов. С помощью генератора сигналов можно легко создавать входные сигналы при проверке цепи с помощью осциллографа. Функции генератора сигналов приведены в таблице 5.
13.	Кнопка **[Help] (Справка)**	Открывает меню справки, в котором можно просматривать темы справки и выбрать язык отображения.
14.	Кнопка **[Bus] Шина**	Открывается меню шины, в котором доступны следующие действия. • Отображение шины, состоящей из входов аналоговых

		каналов и входа внешнего запуска, где канал 1 представляет младший бит, а вход внешнего запуска – старший бит. • Включение декодеров последовательной шины.
15.	Вход сигнала внешнего запуска	Внешний разъем входного сигнала запуска BNC.
16.	Средства регулировки по вертикали	К средствам регулировки по вертикали относятся следующие: • Кнопки включения/выключения аналоговых каналов — эти кнопки используются для включения или выключения канала или для доступа к меню каналов, присвоенных программным кнопкам. Для каждого аналогового канала имеется своя кнопка включения/выключения. • Ручка масштаба коэффициента отклонения – для каждого канала имеются ручки, обозначенные как . Эти ручки используются для изменения чувствительности по вертикали (усиление) каждого из аналоговых каналов. Нажмите ручку масштаба коэффициента отклонения канала для переключения между точной и грубой регулировкой. По умолчанию устанавливается режим расширения сигналаотносительно уровня заземления канала, однако этот режим можно изменить на расширение относительно центра экрана. • Ручки положения по вертикали – эти ручки используются для изменения положения канала по вертикали. Для каждого аналогового канала имеется свой регулятор положения по вертикали. Значение напряжения, которое мгновенно отображается в правом верхнем углу дисплея, соответствует разности напряжений между центром экрана по вертикали и уровнем заземления  . Оно также может соответствовать напряжению в центре экрана по вертикали, если вертикальное расширение задано относительно заземления.
17.	Входы аналоговых каналов	Подключите к этим разъемам BNC пробники осциллографа или кабели BNC. Импеданс на входе аналогового канала осциллографа InfiniiVision1000 серии X составляет 1 МОм. Кроме того, в них не предусмотрено автоматического определения пробника, поэтому для обеспечения точности измерений следует должным образом настроить коэффициент затухания пробника.
18.	Выход генератора сигналов	В моделях осциллографов, оканчивающихся на G, встроенный генератор сигналов может выводить на разъем GenOut BNC синусоидальный, прямоугольный, пилообразный, импульсный сигналы, постоянное напряжение или шум. Нажмите кнопку **[WaveGen] (Генер.сигналов)**, чтобы настроить генератор сигналов. Функции генератора сигналов представлены в таблице 5.. Можно также отправить выходной сигнал запуска или сигнал сбоя теста по маске на разъем **GenOut**BNC.
19.	Разъемы Demo/Probe	• Разъем Demo – на этот разъем выводится сигнал

	Comp, Ground	компенсации пробника, с помощью которого можно сопоставить входное емкостное сопротивление пробника с каналом осциллографа, к которому тот подключен. При наличии определенных лицензированных функций на этот контакт осциллографа могут также выводиться демонстрационные и учебные сигналы. • Разъем заземления – этот разъем используется для заземления пробников, подключенных к разъему Demo/ProbeComp.
20.	Основной порт USB	Этот порт предназначен для подключения к осциллографу USB-накопителей или принтеров. Подключите совместимый с USB накопитель (флеш-память, жесткий диск и т.д.) для сохранения или восстановления файлов настроек осциллографа и опорных сигналов или сохранения данных и изображений экрана. Для выполнения печати подключите совместимый USB-принтер. При наличии доступных обновлений порт USB можно использовать и для обновления системного ПО осциллографа. Перед отключением USB-накопителя "извлекать" его не требуется. Просто убедитесь, что все запущенные операции с файлами выполнены, и отключите устройство от порта USB осциллографа. **ВНИМАНИЕ!** ⚠ **Не следует подключать основной компьютер к основному порту USB осциллографа.** Основной компьютер распознает осциллограф как устройство, поэтому его следует подключать к порту осциллографа для устройств (расположен на задней панели).

Таблица 2 – Функции измерений

Функция	Положение кнопки/программной кнопки на передней панели (см. встроенную справку для получения дополнительной информации)
Тип измерения	**[Meas] Измерение >Измерение:**
Измерения с общим снимком	**[Meas] Измерение >Измерение: Общий снимок, Добавить измерение** Можно также выполнить настройку для кнопки **[QuickAction] (Быстрое действие)**, чтобы при ее нажатии отображалось в сплывающее окно "Общий снимок".
Измерения напряжения	**[Meas] Измерение >Измерение:** (Полная амплитуда, Максимум, Минимум, Амплитуда, Вершина, Основание, Отклонение, Отрицательный выброс, Среднее значение, DC RMS, AC RMS), **Добавить измерение**
Измерения времени	**[Meas] Измерение >Измерение:** (Период, Частота, Счетчик, Длительность +, Длительность -, Скорость передачи в битах, Коэффициент заполнения, Время нарастания, Время спада, Задержка, Фаза), **Добавить измерение** Измерение "Счетчик" доступно, когда выбран режим запуска по фронту или длительности импульса, а источник измерения совпадает с источником запуска.
Пороги измерений	**[Meas] Измерение > Настройки > Порог. Уровни>**А также: **[Analyze] Анализ > Функции**, **Порог. Уровни измерений**.
Окно измерения	**[Meas] Измерение > Настройки > Окно измер**(Автовыбор,

	Главное, Масштаб)
Сброс измерений	**[Meas] Измерение > Сброс**

Ручки и кнопки управления разверткой

Программные кнопки управления разверткой
Показано меню «Сбор», которое открывается при нажатии кнопки **[Acquire] Сбор**.

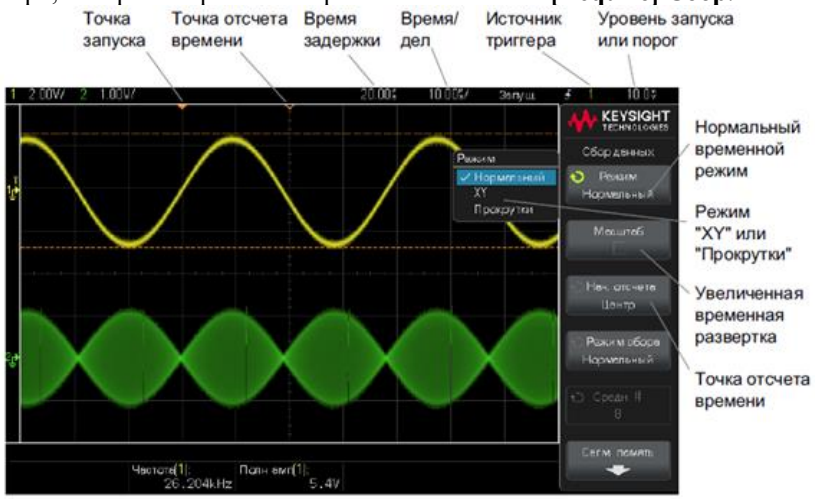


Рисунок 1. Средства управления разверткой

Краткая информация к рисунку 1: Точка отсчета времени отображается в верхней части сетки экрана с помощью маленького незакрашенного треугольника (∇). При вращении ручки масштабирования по горизонтали изображение сигнала растягивается или сжимается относительно точки начала отсчета времени (∇). Точка запуска, в которой всегда время = 0, отображается в верхней части сетки экрана с помощью маленького закрашенного треугольника (▼). Время задержки – это время точки начала отсчета относительно запуска. При вращении ручки положения коэффициента развертки ( )точка запуска (▼) перемещается влево или вправо относительно точки отсчета времени (∇) и позволяет отобразить время задержки. Меню "Сбор" позволяет выбрать временной режим ("Нормальный", "XY" или "Прокрутки"), включить масштабирование, отрегулировать контроллер точной настройки по времени (верньер), а также задать точку отсчета.

Таблица 3 – Функции развертки

Функция	**Положение кнопки/программной кнопки на передней панели (см. встроенную справку для получения дополнительной информации)**
Временной режим	**[Acquire] Сбор > Режим** (Нормальный, XY или Прокрутки) www.keysight.com/find/xy-display-mode).
Временной режим XY	**[Acquire] Сбор > Режим, XY** Входной сигнал канала 1 отображается по оси X, а канала 2 – по оси Y. Входной сигнал, отображаемый по оси Z, (ExtTrig) позволяет включить или выключить изображение (гашение). При низком уровне сигнала Z (<1,4 В) отображается зависимость Y от X, а при высоком (>1,4 В) изображение отключается. Как правило, режим отображения XY используется для измерения разности фаз между двумя сигналами одной частоты по методу Лиссажу (см. описание "XY DisplayModeExample" на веб-странице по адресу www.keysight.com/find/xy-display-mode).
Временной режим	**[Acquire] Сбор > Режим, Прокрутки**

Прокрутки	
Масштаб	**[Acquire] Сбор > Масштаб** (или нажмите кнопку масштаба)
Точка отсчета времени	**[Acquire] Сбор > Нач. отсчета** (Левый, Центр, Правый

Таблица 4 – Функции цифрового вольтметра

Функция	**Положение кнопки/программной кнопки на передней панели (см. встроенную справку для получения дополнительной информации)**
Включение/ выключение цифрового вольтметра	**[Analyze] Анализ > Функции**, Ручка ввода ↻ , чтобы выбрать **Цифр. вольтметр**, нажмите ручку ввода для включения или выключения
Режим цифрового вольтметра	**[Analyze] Анализ > Реж.** (Пост. ток., Пост. ток., RMS, Перем. ток., RMS, Частота) Режим "Частота" требует включения типа запуска по фронту или по длительности импульса, а источником цифрового вольтметра и сигнала запуска должен быть один и тот же аналоговый канал.
Включение/ выключение автодиапазона	**[Analyze] Анализ >Автодиапазон**Автодиапазон можно применять, когда входной канал цифрового вольтметра не используется для запуска осциллографа.

Таблица 5 – Функции генератора сигналов

Функция	**Положение кнопки/программной кнопки на передней панели (см. встроенную справку для получения дополнительной информации)**
Тип сигнала	**[WaveGen] Генер.сигналов> Сигнал** (Синус, Меандр, Пила, Импульсный, Пост. напряжение, Шум)
Расчетная нагрузка на выходе генератора сигналов	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Выход** (50 Ом, Выс. импеданс)
Логические предустановки генератора сигналов	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Логика Presets>**(TTL, CMOS 5,0 В, CMOS 3,3 В, CMOS 2,5 В, ECL)
Добавление шума на выход	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Доб. шума**
Модуляция, включение/ выключение	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Модуляция >Модуляция**
Выход AM	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Модуляция > Тип, Амплитудная модуляция (AM)**
Выход FM	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Модуляция > Тип, Частотная модуляция (FM)**
Выход FSK	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки > Модуляция > Тип, Манипуляция сдвигом частоты (FSK)**
Восстановление настроек генератора сигналов по умолчанию	**[WaveGen] Генер.сигналов> Настройки> По умолчаниюГенераторсигн.**

Учебное издание

Брагин Д.С., Попова А.И., Степной В.С.

Лабораторный практикум
по дисциплинам:

«Радиотехнические цепи и сигналы» и «Сигналы электросвязи»

Часть 2. Преобразования сигналов в нелинейных цепях