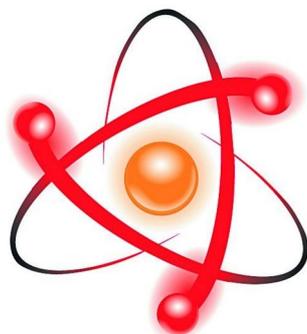


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФОЭЛ-6К

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ
ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ.
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС (С
ВЫВОДОМ ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЙ ПЭВМ)**

Тула, 2011 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС (С ВЫВОДОМ ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЙ ПЭВМ)

Цель работы: изучить назначение, принципы построения и структуру схемы резистивного усилителя звуковой частоты на транзисторе, собранного по схеме с общим эмиттером.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Назначение и классификация усилителей.

Усилитель — устройство, увеличивающее мощность (напряжение, ток) входного сигнала за счет энергии внешнего источника питания посредством усилительных элементов (полупроводниковых приборов, электронных ламп и др.). На рис. 1.1. представлена структурная схема включения усилителя в цепь усиления электрического сигнала, где 1 — источник входного сигнала; 2 — усилитель; 3 — источник питания; 4 — нагрузка.

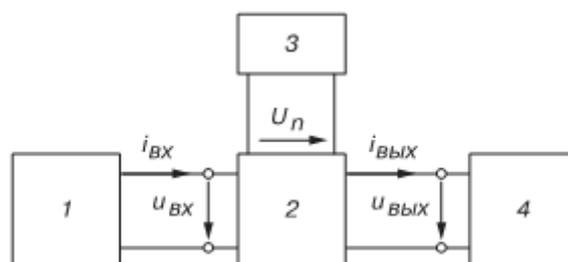


Рис. 1.1

В качестве источника питания усилителя используют стабильные источники энергии постоянного тока. Источник входного сигнала формирует изменяющееся во времени напряжение $u_{вх}$ (ток $i_{вх}$) различной амплитуды, частоты и формы. Нагрузка усилителя — устройство, которое можно представить в виде линейного пассивного двухполюсника. Сам усилитель с парой входных и парой выходных зажимов обычно представляют в виде нелинейного четырехполюсника вследствие нелинейности характеристик входящих в него элементов.

Усиление входного сигнала по мощности (по напряжению, по току) происходит за счет преобразования электрической энергии источника питания в энергию выходного сигнала

вследствие изменения сопротивления усилительных элементов (транзисторов, электронных ламп и др.) по закону, задаваемому входным сигналом.

Условное обозначение

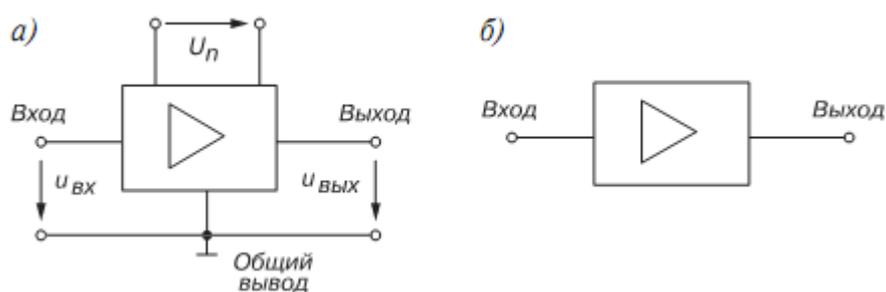


Рис. 1.2

ние усилителей на схемах изображено на рис. 1.2. Напряжение входа $u_{вх}$ и напряжение выхода $u_{вых}$ измеряют относительно общего вывода (рис. 1.2, а).

При упрощенном изображении усилителя в виде прямоугольника, на нем изображают только вход и выход (рис. 1.2, б), опуская выводы напряжения питания $U_{п}$ и общий вывод.

Важнейшим параметром усилителя является коэффициент усиления по мощности, равный отношению изменения мощности выходного сигнала к изменению мощности входного сигнала, т. е.

$$K_p = \frac{\Delta P_{вых}}{\Delta P_{вх}}$$

Помимо коэффициента усиления по мощности вводят также:

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$$

Тогда коэффициент усиления по мощности можно определить как

$$K_p = K_u \cdot K_I$$

В некоторых схемах усиления один из двух коэффициентов (K_u или K_I) может быть меньше единицы.

В связи с тем, что восприятие органов чувств человека подчиняется логарифмическому закону, коэффициенты усиления нередко выражаются в децибеллах или неперах, для чего пользуются соотношения:

$$\begin{aligned} K_I[\text{дБ}] &= 20 \cdot \lg K_I & K_U[\text{дБ}] &= 20 \cdot \lg K_U & K_p[\text{дБ}] &= 10 \cdot \lg K_p \\ K_I[\text{неп}] &= \ln K_I & K_U[\text{неп}] &= \ln K_U & K_p[\text{неп}] &= 0,5 \cdot \ln K_p \end{aligned}$$

Коэффициенты усиления по напряжению и току, как правило, комплексные величины, характеризуемые как модулем, так и фазой. Это связано с тем, что отдельные составляющие спектра сигнала усиливаются по разному из-за наличия реактивных компонентов и инерционности активных приборов.

Усилитель может усиливать подводимые к его входу сигналы с напряжением не ниже $U_{вх \min}$ так как более слабые сигналы заглушаются напряжением собственных шумов усилителя и не выше $U_{вх \max}$ как иначе

усилитель вносит очень большие нелинейные искажения. Отношением $\frac{U_{ex. max}}{U_{ex. min}}$ характеризуется диапазон напряжений сигнала, усиливаемых данным усилителем без чрезмерных помех и искажений, и называется динамическим диапазоном усилителя:

$$D = \frac{U_{ex. max}}{U_{ex. min}} ; \quad D [\text{дБ}] = 20 \cdot \lg \frac{U_{ex. max}}{U_{ex. min}}$$

Введение коэффициента D , характеризующего динамический диапазон, необходимо потому, что максимально допустимое входное напряжение усилителя ограничено искажениями сигнала, вызванными выходом рабочих точек усилительных каскадов за пределы линейного участка характеристики. Минимально допустимое напряжение обычно ограничено уровнем собственных шумов усилителя, на фоне которых полезный сигнал не удается выделить. В ряде случаев напряжением U_{exmin} считается сигнал, который дает выходное напряжение, равное действующему значению напряжения шумов усилителя.

Электронные усилители классифицируют по следующим признакам:

- по усиливаемой величине: усилители напряжения (УН), тока (УТ), мощности (УР);
- по назначению: измерительные; для устройств теле и радиовещания; общепромышленного использования; операционные, используемые в аналоговых и аналого-цифровых устройствах;
- по характеру усиливаемых сигналов: усилители гармонических, импульсных и другой формы сигналов;
- по частоте усиливаемых сигналов: усилители постоянного тока (УПТ); усилители звуковой частоты (УНЧ, $f < 30$ кГц); усилители высокой частоты (УВЧ, $f < 300$ МГц); усилители сверхвысокой частоты (УСВЧ, $f < 300$ ГГц);
- по ширине частотного спектра выходного сигнала: широкополосные и узкополосные (резонансные);
- по схеме включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ); с общей базой (ОБ); с общим коллектором (ОК); с общим истоком (ОИ); с общим стоком (ОС); с общим затвором (ОЗ);
- по количеству каскадов усиления: однокаскадные; многокаскадные (каскад предварительного усиления, промежуточные и выходной каскады);
- по типу связи между каскадами и между оконечным каскадом и нагрузкой: резистивная (гальваническая), ёмкостная, трансформаторная.

У многокаскадного усилителя общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n.$$

Характеристики усилителей.

Важнейшими характеристиками усилителя являются амплитудная и частотные. Амплитудная характеристика описывает усилитель при фиксированной нагрузке и подаче на вход синусоидального напряжения фиксированной частоты:

$$u_{вх} = U_m \sin \omega t, \quad \omega = const.$$

Амплитудная характеристика — это зависимость амплитуды (или действующего значения) выходного сигнала от амплитуды (или действующего значения) входного синусоидального сигнала, т. е.:

$$U_{вых} = f(U_{вх}).$$

Типичный вид амплитудной характеристики усилителя изображен на рис. 1.3. Пунктиром показана амплитудная характеристика идеального усилителя. Отклонение реальной характеристики от идеальной объясняется наличием шумов и нелинейностями характеристик усилительных элементов при слабых и больших входных сигналах.

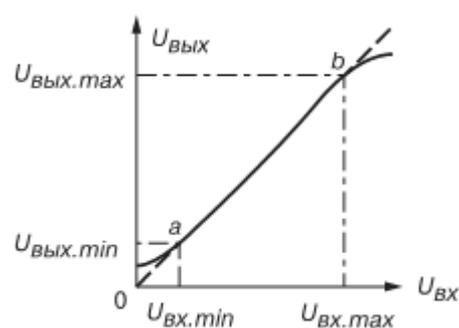


Рис. 1.3

Согласно рис. 1.3 динамический диапазон усилителя можно определить как отношение максимального значения входного напряжения к минимальному на линейном участке *ab* амплитудной характеристики (см. рис. 1.3):

$$D = \frac{U_{вх.max}}{U_{вх.min}}; \quad D[\text{дБ}] = 20 \cdot \lg \frac{U_{вх.max}}{U_{вх.min}}$$

Уровень шума — это отношение напряжения шумов $U_{ш}$ в режиме покоя (приведенного к входу усилителя) к максимальному значению выходного напряжения $U_{вых.max}$, выраженное в децибелах:

$$K_{ш} = 20 \lg(U_{ш} / U_{вых.max}).$$

Одна из важнейших характеристик усилителя — коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник):

$$K_{н.и.} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}},$$

где U_{m1} — амплитуда первой гармоники (основной); U_{m2} , U_{m3} , — амплитуды высших гармоник выходного напряжения.

Частотные характеристики усилителя строят при фиксированной нагрузке и входном синусоидальном напряжении, измеряя при этом зависимость $u_{\text{вых}} = u_{\text{вых}}(\omega)$:

$$u_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t; U_m = \text{const};$$

ω — изменяемая величина

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — это зависимость коэффициента усиления, например, по напряжению K_u от частоты f входного сигнала.

Обычно АЧХ строят на двойной логарифмической сетке: по оси ординат откладывают значения K_u в децибелах, а по оси абсцисс — частоту в логарифмическом масштабе, однако около делений записывают значения частоты без логарифма (рис. 1.4).

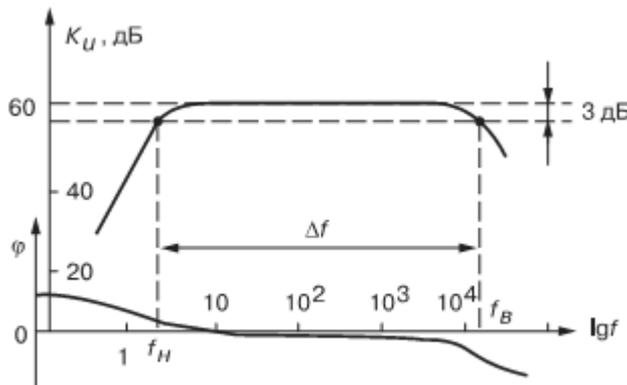


Рис. 1.4

Полоса пропускания усилителя определяет диапазон частот Δf (или $\Delta\omega$), в пределах которой коэффициент усиления на средней частоте не снижается ниже $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ (3 дБ) от своего уровня:

$$\Delta f = f_B - f_H,$$

где f_B и f_H — верхняя и нижняя частоты среза АЧХ усилителя.

Фазочастотная характеристика $\Phi(f)$ — зависимость угла сдвига фаз Φ между выходным и входным напряжениями усилителя от частоты f (см. рис. 1.4). Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг Φ линейно зависит от частоты. Входное и выходное сопротивления усилителя:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}; \underline{Z}_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} = R_{\text{вых}} + jX_{\text{вых}}.$$

Выходная мощность при сопротивлении нагрузки R_H :

$$P_{\text{вых}} = I_{\text{вых}}^2 \cdot R_H = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_H}$$

Схема резистивного усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе, включенном по схеме ОЭ, является одним из наиболее распространенных асимметричных усилителей. Принципиальная схема такого каскада, выполненная на дискретных элементах, изображена на рис. 2.1.

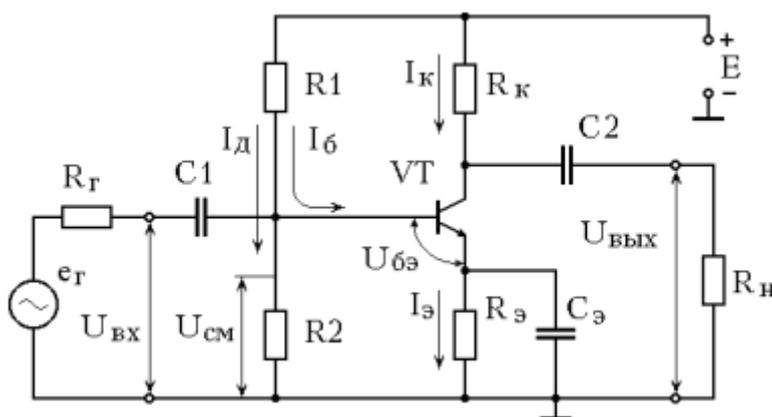


Рис. 2.1. Усилительный каскад на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером

В этой схеме резистор R_k , включенный в главную цепь транзистора, служит для ограничения коллекторного тока, а также для обеспечения необходимого коэффициента усиления. При помощи делителя напряжения R_1R_2 задается начальное напряжение смещения на базе транзистора VT , необходимое для режима усиления класса А.

Цепь $R_эC_э$ выполняет функцию эмиттерной термостабилизации точки покоя; конденсаторы C_1 и C_2 являются разделительными для постоянной и переменной составляющих тока. Конденсатор $C_э$ шунтирует резистор $R_э$ по переменному току, так как емкость $C_э$ значительна.

Анализ работы каскада на постоянном токе производят с помощью эквивалентной схемы (рис. 2.2.), в которой транзистор заменен Т-образной схемой замещения. В этой эквивалентной схеме все физические процессы, происходящие в транзисторе, учитываются при помощи малосигнальных Н-параметров транзистора, которые приведены ниже.

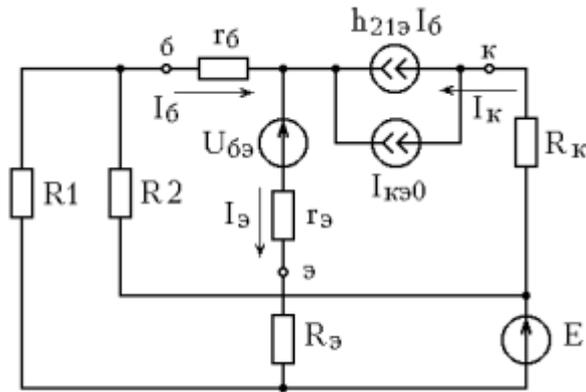


Рис. 2.2. Схема замещения усилительного каскада.

$h_{21э} I_{6П}$ - "генератор тока", характеризующий усилительные свойства транзистора;

$r_э = \frac{h_{21э}}{h_{22э}} \approx \varphi_T / I_э$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$r_к^* = \frac{\Gamma_к}{h_{21э} + 1}$; $r_к = \frac{1}{h_{22б}}$ - дифференциальное сопротивление коллекторного перехода для схемы ОЭ и ОБ соответственно.

$r_б = h_{11э} - r_э(h_{21э} + 1)$ - омическое сопротивление базовой области (достигает 100...200 Ом);

$I_{кэ0} = I_{кб0} / (1 - h_{21б})$ - обратный сквозной ток транзистора;

$U_{6э}$ - контактная разность потенциалов эмиттерного перехода;

При подаче на вход усилителя напряжения сигнала неизменной амплитуды при различных частотах выходное напряжение в зависимости от частоты сигнала будет изменяться, так как сопротивление конденсаторов C_1 , C_2 на разных

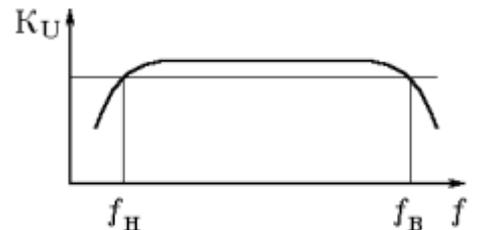


Рис. 2.3. Типичный вид АЧХ усилительного каскада с ОЭ.

частотах различно. Зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала получило название частотной характеристики усилителя (амплитудно-частотной характеристики, АЧХ).

Электрические режимы работы каскада. Статический режим работы каскада характеризуется постоянным падением напряжения на всех элементах схемы, измеряемых при отсутствии входного сигнала. В статическом режиме через транзистор протекают токи покоя ($I_{кп}$, $I_{бп}$), соответствующие рабочей точке на выходных ВАХ транзистора, которые задаются соответствующим выбором параметров внешних линейных элементов (R_1 , R_2 , R_k , $R_э$). Статический режим работы транзистора описывается статической линией нагрузки, которая представляет собой геометрическое место точек, координаты которых ($U_{кэ}$ и I_k) соответствуют возможным значениям точки покоя каскада.

Аналитически статическая линия нагрузки описывается уравнением:

$$E = U_{кэ} + I_k(R_k + R_э).$$

Точку покоя в режиме А выбирают посередине участка статической линии нагрузки, пересекающей линейные участки выходных ВАХ транзистора. Для исключения возможных искажений формы усиливаемого сигнала параметры режима покоя должны удовлетворять следующим условиям

$$\begin{aligned} U_{кп} &> U_{Вых.А} + U_{к.ост} \\ I_{кп} &> I_{к.А} + I_{кэ0} \end{aligned} \quad (7)$$

где $U_{кэп}$, $I_{кп}$ - напряжение коллектор-эмиттер и ток коллектора в режиме покоя;

$U_{Вых.А}$, $I_{к.А}$ - амплитуда напряжения и тока в нагрузке;

$U_{к.ост}$ - напряжение коллектор-эмиттер, соответствующее области начальных участков выходных ВАХ транзистора;

$I_{кэ0}$ - начальный сквозной ток при максимальной температуре.

Для питания усилителей используются источники напряжения с малым внутренним сопротивлением, поэтому можно считать, что по отношению к входному сигналу резисторы R_1 и R_2 включены параллельно и их можно заменить одним эквивалентным $R_B = R_1R_2/(R_1+R_2)$.

Важным критерием для выбора номиналов резисторов $R_э$, R_1 и R_2 является обеспечение температурной стабильности статического режима работы транзистора. Значительная зависимость параметров транзистора от температуры приводит к неуправляемому изменению коллекторного тока ΔI_k , вследствие чего могут возникнуть нелинейные искажения усиливаемых сигналов.

Нестабильность коллекторного тока в общем случае зависит от нестабильности обратного (теплового) тока коллекторного перехода $\Delta I_{к60}$, напряжения между базой и эмиттером $\Delta U_{6э}$ и коэффициента передачи тока $\Delta h_{21э}$. Эта зависимость описывается уравнением:

$$\Delta I_{к} = \frac{h_{21э}}{1+h_{21э}\gamma_{Б}} \left[\frac{\Delta I_{к60}(h_{21э}+1)}{h_{21э}} - \frac{\Delta U_{6э}}{R_{э}+R_{Б}} + (I_{6п}+I_{к60}) \frac{\Delta h_{21э}}{h_{21э}} \right] \quad (8)$$

Величина, вынесенная за квадратные скобки, получила название коэффициент нестабильности S:

$$S = \frac{h_{21э}}{1+h_{21э}\gamma_{Б}} \quad , \quad (9)$$

где $\gamma_{Б} = R_{э}/(R_{э}+R_{Б})$ коэффициент, показывающий какая часть коллекторного тока ответвляется в цепь базы.

Все источники нестабильности в уравнении (8) зависят от температуры сложным образом. У германиевых транзисторов наибольшее влияние оказывает нестабильность теплового тока, а у кремниевых - нестабильность коэффициента передачи тока. Поэтому расчет по уравнению (8) дает очень приблизительные результаты.

Как видно из выражения (9) величина S в общем случае не зависит от температуры и режима работы транзистора, а определяется соотношением между сопротивлениями режимных резисторов $R_{э}$ и $R_{Б}$. Очевидно, что чем меньше коэффициент нестабильности, тем лучше, так как при этом ток коллектора изменяется в меньших пределах.

При изменении $\gamma_{Б}$ от 1 ($R_{э} \gg R_{Б}$) до 0 ($R_{Б} \gg R_{э}$) коэффициент нестабильности изменяется в пределах:

$$S_{\min} = h_{21э}/(1 + h_{21э}) = h_{21Б} ; \quad S_{\max} = h_{21э}.$$

Следовательно, для достижения наилучшей температурной стабилизации режима надо увеличивать сопротивление $R_{э}$. Однако это приводит к необходимости повышать напряжение питания E и увеличивает потребляемую от него мощность. При уменьшении сопротивлений резисторов R1 и R2 также возрастает потребляемая мощность, снижающая экономичность схемы и уменьшается входное сопротивление усилительного каскада.

В практических расчетах значение коэффициента нестабильности S выбирают в зависимости от материала, из которого изготовлены транзисторы, а также в зависимости от температуры окружающей среды, при которой будет

работать проектируемый усилитель.

Динамический режим работы каскада характеризуется изменениями токов и напряжений в цепях схемы при подаче сигнала на вход усилителя. В этом режиме для анализа работы каскада используют малосигнальную эквивалентную схему для области средних частот (рис. 2.4). При этом пренебрегают влиянием реактивных элементов схемы (емкости разделительных и эмиттерного конденсаторов, а также емкость коллекторного перехода).

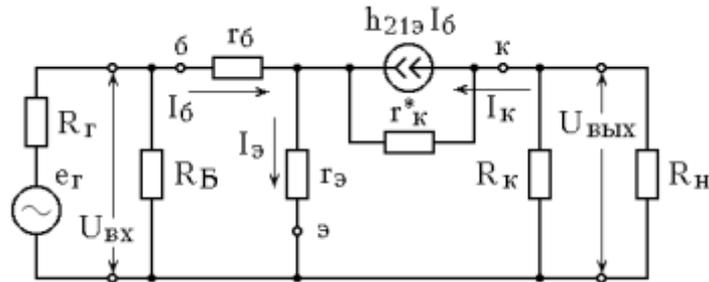


Рис. 2.4. Схема замещения усилительного каскада в динамическом режиме.

Все возможные значения токов и напряжений транзистора находятся на пересечении его статических ВАХ с динамической линией нагрузки (ЛН~). Поскольку сопротивление нагрузки транзистора по переменному току $R_{к\sim}$ меньше, чем сопротивление по постоянному току ($R_{к} + R_{э}$), то ЛН~ проходит круче, однако она обязательно должна проходить через точку покоя (рис. 2.5). При этом угол наклона ЛН~ к оси абсцисс определяется формулой:

$$\alpha = \arctg(1/R_{к\sim}), \quad (10)$$

где $R_{к\sim}$ - эквивалентное сопротивление коллекторной цепи транзистора для переменного тока.

Однако формулой (10) можно пользоваться, если масштабы токов и напряжений одинаковы. Если же это условие не выполняется, то необходимо вводить уравнивающий коэффициент:

$$K_m = m_U / m_I,$$

где m_U - масштаб напряжений (В/дел);
 m_I - масштаб токов (мА/дел).

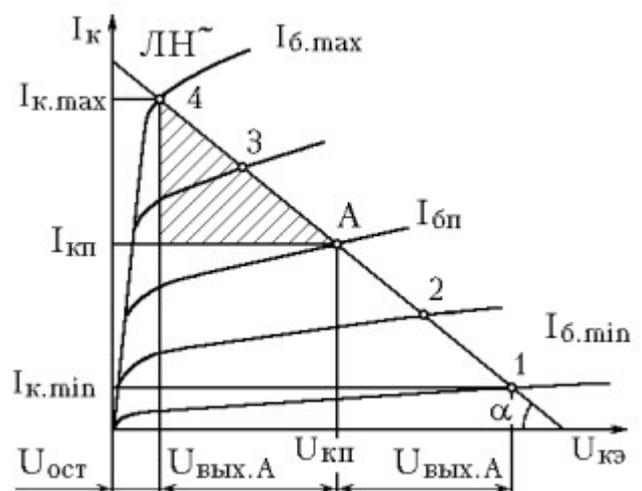


Рис. 2.5.

Из геометрических построений можно определить

$$R_{к\sim} = U_{кэ}^* / I_{к}^* = m_U l_U / m_I l_I ,$$

где $U_{кэ}^*$ и $I_{к}^*$ - физические координаты произвольной точки на ЛН~, l_U и l_I - геометрические координаты этой же точки.

или с учетом K_m

$$R_{к\sim} = K_m (l_U / l_I) ,$$

тогда

$$K_m / R_{к\sim} = l_I / l_U = \operatorname{tg} \alpha ,$$

откуда

$$\alpha = \operatorname{arctg}(K_m / R_{к\sim}) . \quad (11)$$

Примечание: величину $R_{к\sim}$ следует подставлять в Омах.

При помощи динамической линии нагрузки можно определить амплитудные значения токов и напряжений транзистора. Для этого на графике выполняют следующие построения:

- на оси абсцисс откладывают амплитуду выходного напряжения $U_{\text{вых.А}}$ симметрично относительно $U_{кп}$;
- из полученных точек восстанавливают перпендикуляры до пересечения с ЛН~, а затем определяют значения токов $I_{к.макс}$, $I_{к.мин}$ в точках 4 и 1 и соответствующие им значения тока базы $I_{б.макс}$, $I_{б.мин}$ (при необходимости через точки 1 и 4 проводят дополнительные характеристики), тогда амплитуды токов вычисляют по формулам:

$$I_{к.А} = (I_{к.макс} - I_{к.мин}) / 2 ; \quad (12)$$

$$I_{б.А} = (I_{б.макс} - I_{б.мин}) / 2 ;$$

- переносят значения $I_{б.макс}$ и $I_{б.мин}$ на семейство входных характеристик, определяют напряжения $U_{бэ.макс}$, $U_{бэ.мин}$ и вычисляют амплитуду входного напряжения каскада, считая, что по переменному току эмиттер транзистора соединен с общим проводом через $C_э$:

$$U_{\text{вх.А}} = (U_{бэ.макс} - U_{бэ.мин}) / 2 . \quad (13)$$

Основные параметры каскада. Анализ работы каскада при помощи малосигнальной эквивалентной схемы (рис. 13) позволяет определить такие его параметры, как входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности. Входное сопротивление каскада с ОЭ слабо зависит от сопротивления нагрузки, у маломощных каскадов колеблется от 300 до 3000 Ом, а у мощных бывает и меньше 10 Ом. Величина $R_{\text{вх.к}}$ определяется суммарным влиянием входного сопротивления транзистора:

$$h_{11э} = r_{б} + r_{э}(1 + h_{21э})$$

и шунтирующим его эквивалентным сопротивлением базового делителя $R_{\text{Б}}$. С учетом сказанного

$$R_{\text{вх.к}} = R_{\text{Б}} \parallel h_{11э} = R_{\text{Б}} h_{11э} / (R_{\text{Б}} + h_{11э}) \quad (14)$$

Выходное сопротивление каскада определяют, подавая на выходные зажимы переменное напряжение при отключенной нагрузке и нулевом входном сигнале.

Если считать, что доля коллекторного тока, ответвляющаяся в цепь базы, мала, тогда из эквивалентной схемы каскада очевидно, что выходной ток каскада протекает по двум параллельным ветвям $R_{\text{к}}$ и $r_{эд} + r_{\text{к}}^*$. Учитывая что $r_{\text{кд}}^* \gg r_{эд} \gg R_{э}$, то

$$R_{\text{вых.к}} = r_{\text{к}}^* \parallel R_{\text{к}} = R_{\text{к}} r_{\text{к}}^* / (R_{\text{к}} + r_{\text{к}}^*) \quad (15)$$

В прикидочных расчетах величиной $r_{\text{к}}^*$ обычно пренебрегают, тогда

$$R_{\text{вых.к}} \approx R_{\text{к}} \quad (16)$$

Коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности соответственно равны:

$$\begin{aligned} K_U &= \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \\ K_I &= \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \\ K_P &= \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = K_U \cdot K_I \end{aligned} \quad (17)$$

В связи с тем, что восприятие органов чувств человека подчиняется логарифмическому закону, коэффициенты усиления нередко выражаются в децибеллах или неперах, для чего пользуются соотношения:

$$\begin{aligned} K_I[\partial B] &= 20 \cdot \lg K_I & K_U[\partial B] &= 20 \cdot \lg K_U & K_P[\partial B] &= 10 \cdot \lg K_P & (18) \\ K_I[неп] &= \ln K_I & K_U[неп] &= \ln K_U & K_P[неп] &= 0,5 \cdot \ln K_P \end{aligned}$$

Коэффициенты усиления по напряжению и току, как правило, комплексные величины, характеризуемые как модулем, так и фазой. Это связано с тем, что отдельные составляющие спектра сигнала усиливаются по разному из-за наличия реактивных компонентов и инерционности активных приборов.

Усилитель может усиливать подводимые к его входу сигналы с напряжением не ниже $U_{вх\ min}$ так как более слабые сигналы заглушаются напряжением собственных шумов усилителя и не выше $U_{вх\ max}$ как иначе усилитель вносит очень большие нелинейные искажения. Отношением $\frac{U_{ex.\ max}}{U_{ex.\ min}}$ характеризуется диапазон напряжений сигнала, усиливаемых данным усилителем без чрезмерных помех и искажений, и называется динамическим диапазоном усилителя:

$$D = \frac{U_{ex.\ max}}{U_{ex.\ min}} ; \quad D[\partial B] = 20 \cdot \lg \frac{U_{ex.\ max}}{U_{ex.\ min}} \quad (19)$$

Введение коэффициента D , характеризующего динамический диапазон, необходимо потому, что максимально допустимое входное напряжение усилителя ограничено искажениями сигнала, вызванными выходом рабочих точек усилительных каскадов за пределы линейного участка характеристики. Минимально допустимое напряжение обычно ограничено уровнем собственных шумов усилителя, на фоне которых полезный сигнал не удастся выделить. В ряде случаев напряжением $U_{ex\ min}$ считается сигнал, который дает выходное напряжение, равное действующему значению напряжения шумов усилителя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Аппаратная часть. Приборы и оборудование.

Эксперимент выполняется на комбинированном лабораторном комплексе ФОЭЛ-6К, имеющим сопряжение с ПЭВМ. В данном варианте учебной установки ПЭВМ используется в качестве источника сигнала гармонического напряжения (генератора), регистратора переменных сигналов (осциллографа) и частотомера.

Принципиальная электрическая схема учебного стенда приведена на рис. 3.1.

Для соединения учебной установки с компьютером используются экранированные провода типа «тюльпан»- «jack». Вывод тюльпан подключается ко входу «XS1» усилителя ФОЭЛ-6К, другой конец провода, имеющий штекер типа «jack» подключается к линейному выходу LINE OUT звуковой карты ПК, с которого будет подаваться гармонический сигнал на вход усилителя. Для наблюдения сигналов в режиме реального времени ПЭВМ используется в роли осциллографа. При этом, выход усилителя XS9 подключается к линейному входу LINE IN либо микрофонному входу MIC ПЭВМ с помощью провода типа «тюльпан — jack» (вывод тюльпан подключается к выходу «XS9» усилителя ФОЭЛ-6К, другой конец провода, имеющий штекер типа «jack» подключается к LINE IN либо MIC входу звуковой карты ПЭВМ).

УСТАНОВКА УЧЕБНАЯ ФОЭЛ-6К. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УНЧ НА ТРАНЗИСТОРЕ.

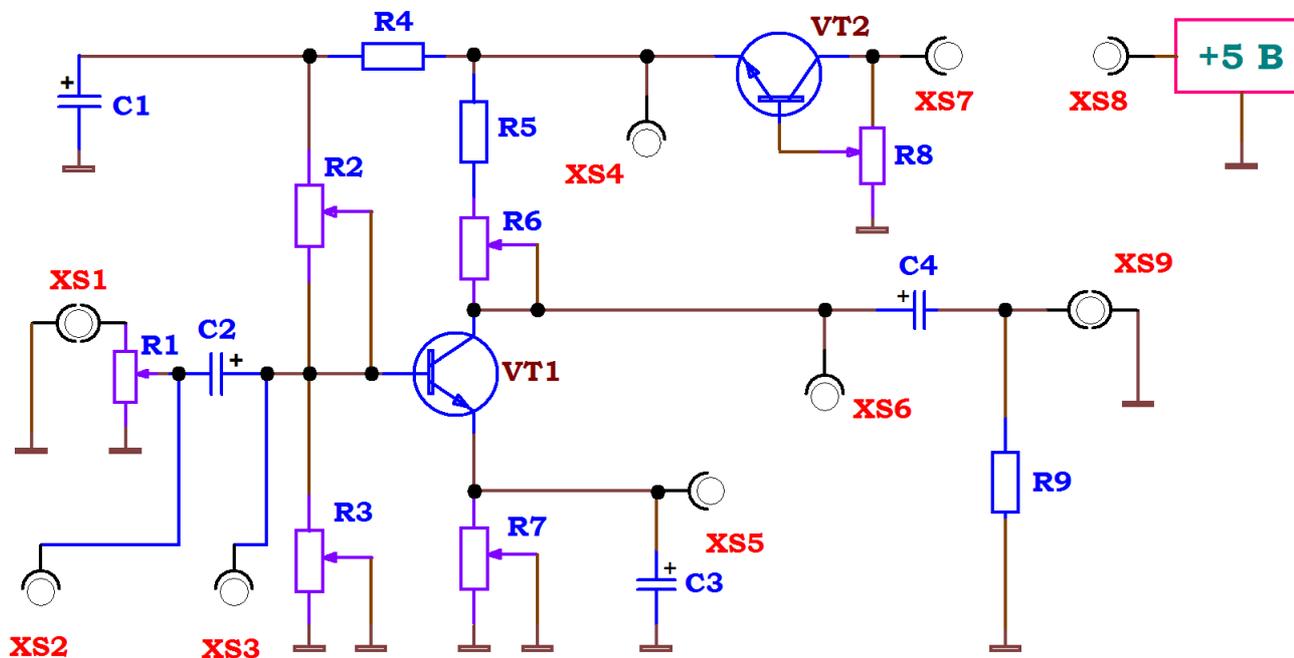


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема учебной лабораторной установки ФОЭЛ-6К для исследования резистивного УЗЧ на транзисторе.

Переменный резистор R1, отображенный на схеме, предназначен для регулировки амплитуды входного сигнала. В качестве этого регулятора может использоваться как делитель, предусмотренные непосредственно в лабораторной установке, так и программные методы управления громкостью звука с выхода звуковой карты ПК, а также регулятор амплитуды компонента «ГЕНЕРАТОР НЧ». В качестве нагрузки усилителя используется резистор R9=1 кОм. Для работы усилителя необходимо подать питание на схему, соединив выводы XS7 – XS8 через мультиметр, включенный в режим измерения постоянного тока AC 200 m. Это позволяет наблюдать за током потребления усилителя в различных режимах работы.

Учебная модель усилителя собрана по наиболее распространенной схеме усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме ОЭ рис. 2.1.

Для регулировки напряжения питания, подаваемого на схему от встроенного источника питания, предусмотрен регулятор, собранный на транзисторе VT2. Регулировка напряжения питания схемы производится переменным резистором R8. Установленное значение напряжения питания может быть измерено мультиметром, подключенным в режим вольтметра постоянного тока DCV 20 V, к выводам XS10 (корпус) и XS4 схемы.

В этой схеме постоянный резистор R5 и переменный R6, включенные в главную цепь транзистора, служат для ограничения коллекторного тока, а также для обеспечения необходимого коэффициента усиления. При помощи делителя напряжения R2R3, собранного на переменных сопротивлениях, задается начальное напряжение смещения на базе транзистора VT1, необходимое для режима усиления класса А.

Цепь R7C3 выполняет функцию эмиттерной термостабилизации точки покоя; конденсаторы C2 и C4 являются разделительными для постоянной и переменной составляющих тока. Конденсатор C3 шунтирует резистор R7 по переменному току, так как емкость C3 значительна.

C1=47 мкФ; C2=10 мкФ; C3=47 мкФ; R4=1 кОм; R5=1 кОм; R9=1кОм.

Программная часть. Подготовка к работе.

Перед началом работы следует настроить линейный вход компьютера. При этом следует включить линейный выход LINE OUT, линейный вход LINE IN (либо микрофонный вход MIC) звуковой карты в системе и настроить усиление LINE IN (MIC), LINE OUT средствами операционной системы. Процедура настройки зависит от звуковой карты, в общем случае следует два раза щелкнуть правой кнопкой мыши на значок «ЗВУК», обычно располагающийся в системной области уведомлений и выбрать ПАРАМЕТРЫ → СВОЙСТВА → Устройства Записи (Устройства Воспроизведения). Для некоторых моделей звуковых карт регулировка входов и выходов возможна с помощью программ, поставляемых в комплекте с драйверами для звуковой карты (например встроенные звуковые карты Realtek).

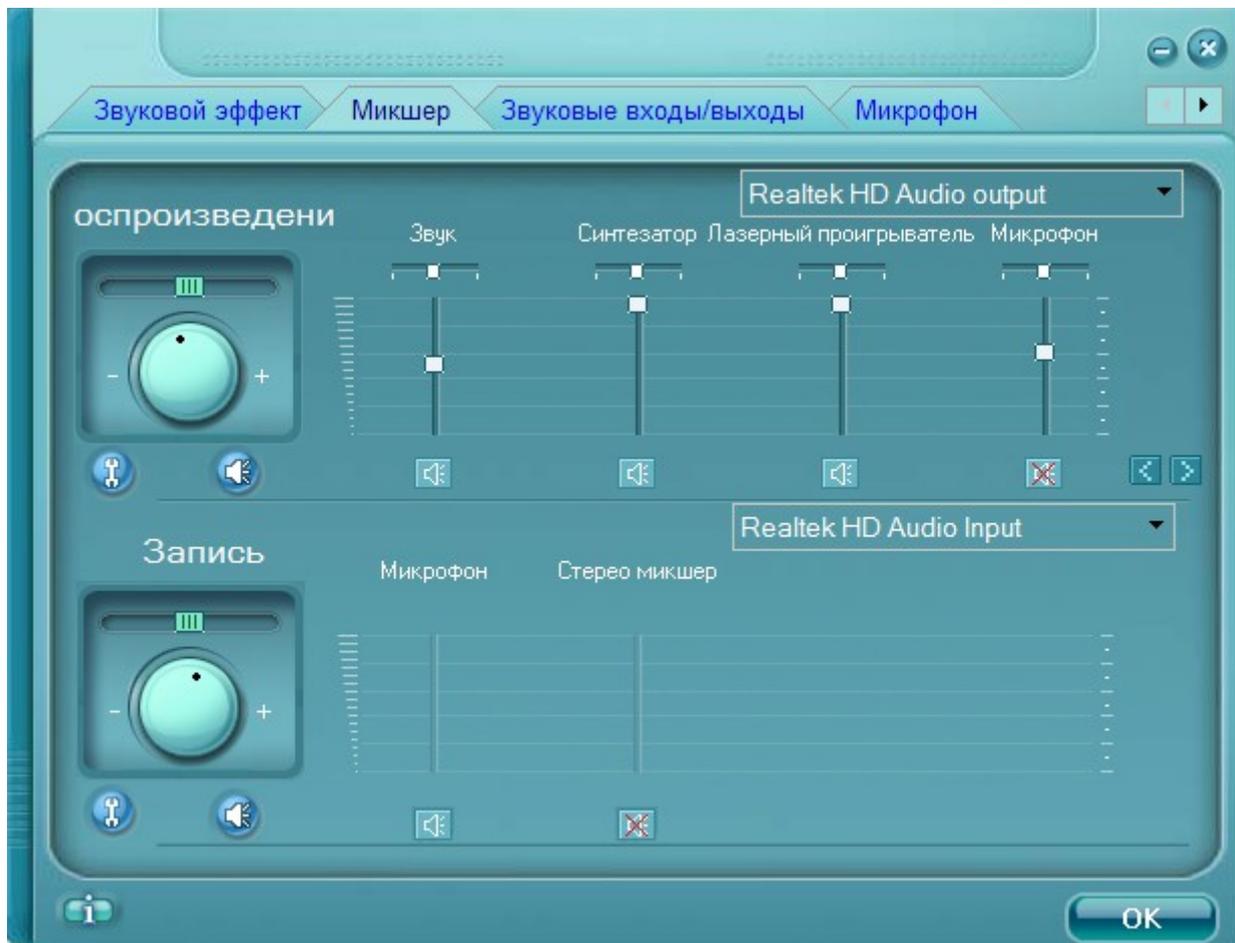


Рис. 3.2. Оптимальные настройки звуковой карты на чипсете RealTek. Обратите внимание, следует отключить «стереомикшер» (встроенный микшер для автоматической программной записи сигналов), в устройствах воспроизведения отключить «МИКРОФОН» и установить все регуляторы воспроизведения и записи в среднее положение. **Обратите внимание, что в настройках на вкладке «МИКРОФОН» следует отключить все эффекты («ЭХО», «ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА» и т. д.), иначе возможна некорректная работа компонентов LabVisual.**

Для получения гармонического сигнала используется свободно распространяемый компонент LabVisual Генератор рис. 3.3, представляющий из себя низкочастотный комбинированный генератор функций. Выходные сигналы генератора могут поступать на два канала стерео выхода звуковой карты компьютера.

Генератор вырабатывает сигналы следующего вида:..

- синусоидальный,
- прямоугольный (меандр),
- треугольный симметричный,
- пилообразный нарастающий,
- пилообразный спадающий.

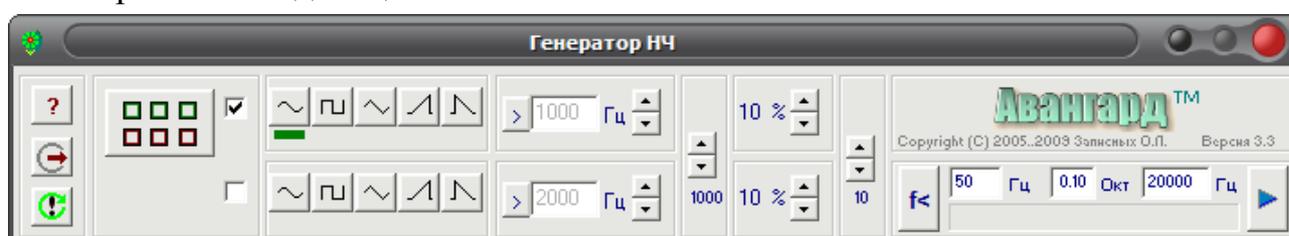


Рис. 3.3. Компонент «ГЕНЕРАТОР НЧ» для получения гармонических сигналов. Оптимальные настройки.

Компонент может работать в различных режимах. В постоянном независимом режиме форма, частота и амплитуда сигналов по двум каналам устанавливаются отдельно. В постоянном зависимом режиме форма, частота и амплитуда сигналов по обоим каналам одинаковые, сигнал второго (правого) канала может быть произвольно сдвинут по фазе относительно сигнала первого (левого) канала. В режиме нарастания частоты сигнал по первому (левому) каналу меняется по частоте в заданных пределах с установленной скоростью. Сигнал второго канала выключен. В режиме нарастания амплитуды сигнал по первому (левому) каналу меняется по амплитуде в заданных пределах с установленной скоростью. Сигнал второго канала выключен. [Экранные органы управления снабжены всплывающими комментариями.](#)

Частота сигналов может устанавливаться двумя способами. Установка [прямым вводом](#) производится в окне вида . Для редактирования следует нажать кнопку слева от окна, ввести новое значение, затем нажать клавишу **Enter**. Второй способ - [ступенчатое изменение](#) частоты с заданным шагом. Для этого имеются переключатели "выше-ниже". Двумя изменяется частота, третьим переключается шаг этого изменения. Дискретность установки частоты 1 Гц.

Амплитуда задается ступенчатым изменением с заданным шагом. Для этого имеются переключатели "выше-ниже". Двумя изменяется частота, третьим переключается шаг этого изменения. Дискретность установки амплитуды 1 % от максимальной.

Сдвиг фаз между сигналами [в зависимом режиме](#) устанавливается пря-

мым вводом значений в градусах. Для редактирования нажмите кнопку слева от окна, введите новое значение, затем нажмите клавишу **Enter**. Дискретность установки сдвига 1 градус.

Ввиду большого размера буферов обмена звуковой карты управление прибором несколько замедленно. Реакция на переключения составляет примерно 1 секунду.

В случае возникновения пауз выходных сигналов воспользуйтесь экранной кнопкой перезапуска (🔴).

Программа запоминает установки и настройки, и восстанавливает их при следующем включении.

Для визуальной регистрации сигналов используется многофункциональный компонент LabVisual Visual Analyser рис. 3.4.

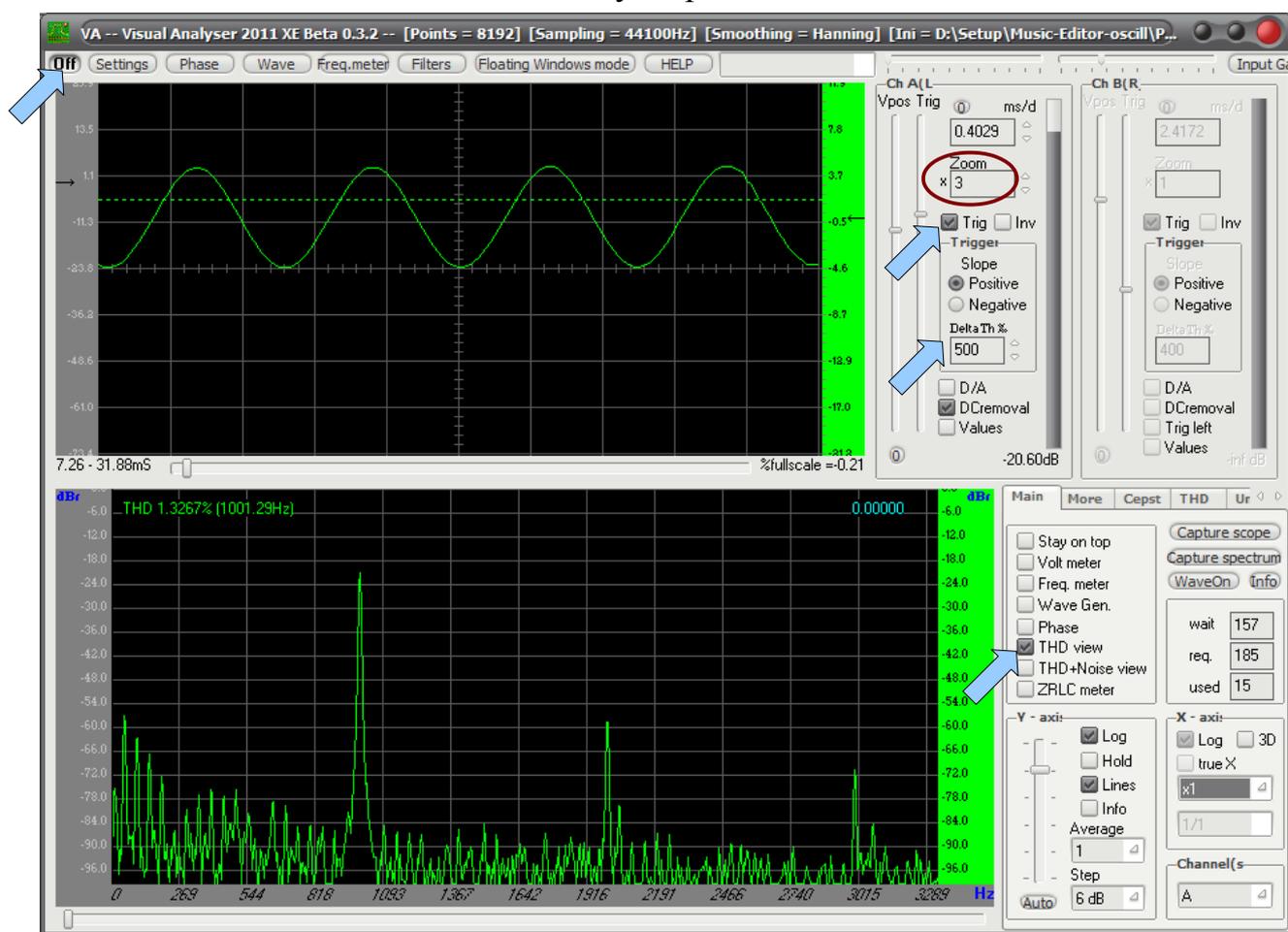


Рис. 3.4. Многофункциональный компонент-осциллограф «LabVisual Visual Analyser» для регистрации и анализа сигналов.

Для настройки компонента нажмите в главном меню кнопку **SETTINGS**. В появившемся окне рис. 3.5 перейдите на вкладку «**DEVICE**» и выберите в качестве устройства входа и выхода вашу звуковую карту (в примере рис. 3.5 используется встроенная звуковая карта RealTek).

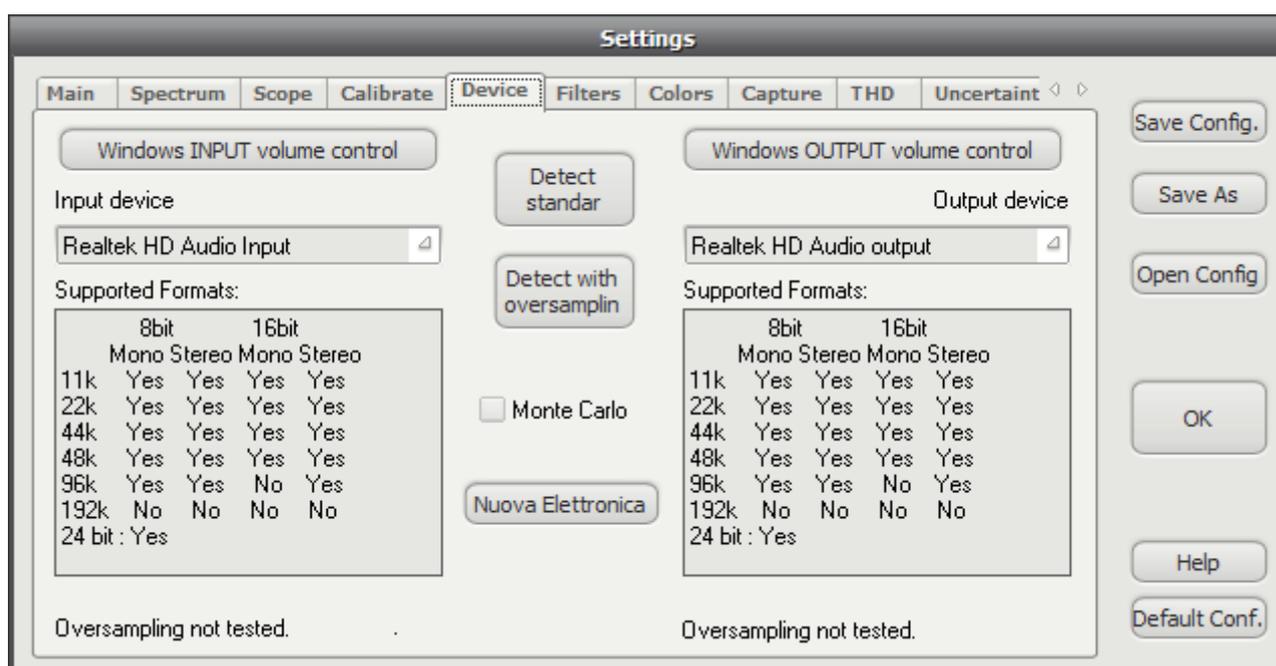


Рис. 3.5. Настройка используемых устройств компонента «LabVisual Visual Analyser»

Перейдите на вкладку Main рис. 3.6 и установите частоту дискретизации Frequency Sample и размер буфера FFT Size. Наиболее оптимальные значения для большинства устройств Frequency Sample=44100 Hz; FFT Size=8192. Так как вы используете только один канал устройства, установите режим в выпадающем списке Channels A.

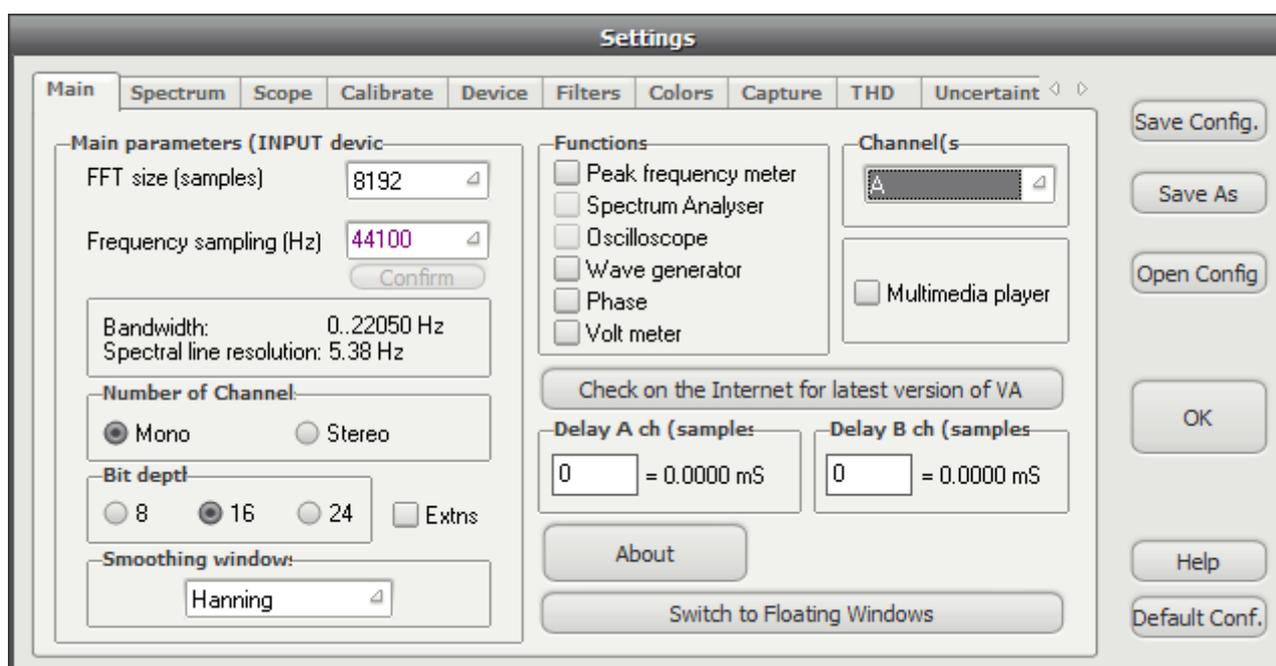


Рис. 3.6. Настройка частоты дискретизации и размера буфера данных компонента «LabVisual Visual Analyser»

Программа запоминает установки и настройки, и восстанавливает их при следующем включении.

Компонент «LabVisual Visual Analyser» может использоваться не только как осциллограф, но и в качестве частотомера, анализатора спектра и нелинейных искажений в области звуковых частот.

Для запуска частотомера нажмите кнопку «Freq Meter» в главном меню компонента. При этом в программе отобразится всплывающее окно с текущими значениями частоты сигнала рис. 3.7. Для точной регистрации частоты установите Resolut.=1,3 Hz, а Power of peak=1 % для слабых сигналов.

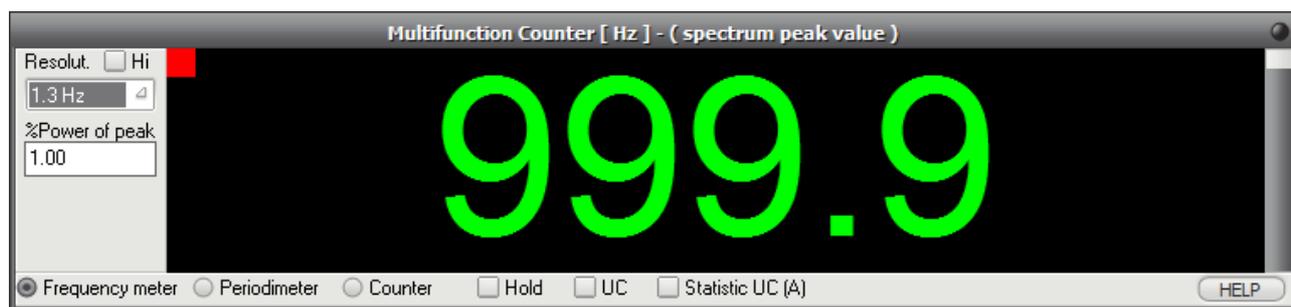


Рис. 3.7. Подпрограмма «ЧАСТОТОМЕР» компонента «LabVisual Visual Analyser»

Область осциллографа представляет собой верхнюю часть компонента, область анализатора спектра отображается в нижней части компонента. При установленном флажке THD View также автоматически вычисляется и отображается коэффициент гармоник:

$$K_{н.и.} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}},$$

Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов. Все работы по подключению комплекса к компьютеру следует выполнять только при отключенных от сети приборах. Разобраться с принципиальными блок-схемами опытов, в назначении кнопок, переключателей и ручек прибора.
2. Соединить монитор с системным блоком ПЭВМ, подключить клавиатуру и мышь к системному блоку используя стандартные провода для подключения. Подключить системный блок ПЭВМ и монитор к сети ~220 В.
3. Загрузить операционную систему согласно стандартным процедурам загрузки.
4. При необходимости, настроить компьютер для работы с учебной установкой согласно прилагаемому руководству к среде LabVisual.
5. Запустить программу LabVisual для работы с учебной установкой для данного эксперимента пользуясь ярлыком на рабочем столе либо другим способом, указанным лаборантом.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

6. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки, разобраться в назначении кнопок и измерительных приборов. Проверить целостность сетевого провода.
7. Подать питание на усилительный каскад, соединив выводы XS7 – XS8 через мультиметр, включенный в режим измерения постоянного тока AC 200 m. Это позволяет наблюдать за током потребления усилителя в различных режимах работы.
8. Проводом типа «ТЮЛЬПАН — jack» подключить вход усилителя мощности XS1 к линейному выходу ПЭВМ (куда обычно и подключаются динамики). Вывод тюльпан подключается ко входу «XS1» усилителя ФОЭЛ-6К, другой конец провода, имеющий штекер типа «jack» подключается к линейному выходу LINE OUT звуковой карты ПК, с которого будет подаваться гармонический сигнал на вход усилителя.
9. Подключить выход усилителя XS9 к линейному входу LINE IN либо микрофонному входу MIC звуковой карты ПЭВМ с помощью провода типа «тюльпан — jack» (вывод тюльпан подключается к выходу «XS9» усилителя ФОЭЛ-6К, другой конец провода, имеющий штекер типа «jack» подключается к LINE IN либо MIC входу звуковой карты ПЭВМ).
10. При необходимости настроить линейный выход и линейный и микрофонный входы звуковой карты.
11. Подать на вход усилителя тестовый гармонический синусоидальный сигнал частоты 1 кГц. Для этого запустить компонент «ГЕНЕРАТОР-НЧ» рис. 3.3. Установить «независимый режим» для разных каналов, отключить второй неиспользуемый канал, сняв нижнюю галочку и установив верхний флажок, как на рис. 3.3. В первом канале установить

- значение частоты 1 кГц и нажать Enter. Установить амплитуду сигнала 10 %.
12. Запустить компонент-осциллограф «LabVisual Visual Analyser». При необходимости настроить компонент для данного экземпляра звуковой карты.
 13. Перед началом работы установить все ручки управления в среднее положение.
 14. Нажать кнопку On в главном меню компонента рис. 3.4. При этом на экране ПК в области компонента отобразится осциллограмма сигнала с выхода усилителя и одновременно спектрограмма сигнала. Плавным вращением ручки регулировки напряжения питания R8 по часовой стрелке, установить максимальное значение напряжения питания усилителя. Вращая ручки базового делителя R2 и R3, ручку ограничения коллекторного тока R6 и резистор R7 в эмиттерной цепи, добиться максимальной амплитуды гармонического сигнала на выходе схемы с минимальными искажениями.
 15. Переключатель ms/d компонента установить таким образом, чтобы наблюдались 3-4 периода выходного сигнала. Установить флажок «THD View» для автоматического вычисления и наблюдения за значением коэффициента гармоник. Синхронизировать сигнал, для этого включить триггер, поставив флажок «Trig» в окне управления компонентом, установить «Delta Trig»=500 % и, зацепив левой кнопкой мыши бегунок «Trigger Level» переместить уровень синхронизации таким образом, чтобы полоса синхронизации (прерывистая горизонтальная линия) попадала в середину сигнала.
 16. Установить бегунком Vertical Position “Vpos” расположение осциллограммы симметрично относительно оси Oy. Управляя значением Zoom в компоненте, а также уровнем усиления «ЗАПИСЬ» посредством драйвера звуковой карты рис. 3.2, добиться чтобы размер осциллограммы занимал примерно $\frac{3}{4}$ экрана компонента.
 17. Включить встроенный частотомер рис. 3.7. для измерения частоты выходного сигнала.
 18. Измерить амплитуду входного сигнала $U_{вх}$. Для этого следует отключить измерительный щуп «тюльпан-jack» от выхода XS9 и подключить его выводу XS3 учебной установки. Амплитуда сигнала на входе может оказаться столь малой, что в окне Zoom компонента-осциллографа приходится ставить увеличение $\sim Zoom=200$ единиц для визуализации сигнала, поступающего через разделительную емкость C2 на вход усилителя. После измерений амплитуду входного сигнала не менять.
 19. Измерение амплитуды (размаха) в программе проводится следующим образом. Установив указатель мыши возле нижнего края синусоиды, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее нажатой, вести мышь к верхнему краю синусоиды. При этом измеренное значение амплитуды

- от нижней точки до верхней выводится в относительных единицах %.
20. После настройки усилителя ручками управления на наилучшее усиление с наименьшим коэффициентом гармоник $\text{THD}=\text{Kг}$, измерить вторым мультиметром из комплекта установленное значение сопротивлений R2, R3, R6, R7 (гнезда для измерения сопротивлений находятся слева и справа от соответствующей ручки управления). Мультиметр должен находиться в положении «Ω». Рассчитать коэффициент усиления для данного режима как $K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$, где $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ значения амплитуд сигналов в относительных % соответственно на входе и выходе схемы. Типичные значения коэффициента усиления данной схемы в пределах 100 — 1000 единиц.
21. Исследовать зависимость работы схемы усилителя от напряжения питания $U_{\text{пит}}$. Для этого при неизменных положения других ручек регулировки, вращать ручку регулировки напряжения питания R8. Измерять установленное значение $U_{\text{пит}}$ следует мультиметром, подключенным в режим вольтметра постоянного тока DCV 20 V, к выводам XS10 (корпус) и XS4 схемы. Построить графики зависимости амплитуды выходного сигнала от $U_{\text{пит}}$: $U_{\text{вых}}=U_{\text{вых}}(U_{\text{пит}})$; коэффициента гармоник от $U_{\text{пит}}$: $\text{Kг}=\text{Kг}(U_{\text{пит}})$ и коэффициента усиления $K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ от напряжения питания: $K_{\text{ус}}=K_{\text{ус}}(U_{\text{пит}})$. Для каждого значения напряжения питания вычислить потребляемую данной схемой мощность как $P_{\text{п}}=U_{\text{пит}} \cdot I_{\text{пит}}$, где $I_{\text{пит}}$ — ток потребления, измеряемый мультиметром, включенным в разрыв схемы XS7 – XS8.
22. Определить диапазон значений напряжения питания, при которых усилитель остается работоспособным.
23. Установив ручку регулировки напряжения питания R8 в среднее либо крайнее правое положение, вращать ручку регулировки сопротивления базового делителя R2.
24. Для каждого установленного значения сопротивления R2 базового делителя измерять амплитуду сигнала на выходе $U_{\text{вых}}$ с помощью программы-осциллографа, а значение сопротивления измерять мультиметром, подключив его к клеммам измерения сопротивления.
25. Для каждого установленного значения R2 определить коэффициент усиления $K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$, где $U_{\text{ВЫХ}}$ — амплитуда выходного сигнала, зарегистрированная осциллографом, коэффициент гармоник $\text{Kг}=\text{THD}$ по данным спектроанализатора сигнала и построить графики зависимости данных величин от значения сопротивления R2.
26. Установив ручку R2 в среднее положение, проделать пп. 24 — 25 для сопротивления R3 базового делителя.

27. Исследовать работу схемы от установленного значения сопротивления, ограничивающего ток коллектора R6. Для этого для каждого установленного значения сопротивления R6 измерять амплитуду сигнала на выходе $U_{\text{вых}}$ с помощью программы-осциллографа, а значение сопротивления измерять мультиметром, подключив его к клеммам измерения сопротивления.
28. Для каждого установленного значения R6 определить коэффициент усиления $K_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$, где $U_{\text{ВЫХ}}$ — амплитуда выходного сигнала, зарегистрированная осциллографом, коэффициент гармоник $K_{\text{Г}} = \text{THD}$ по данным спектроанализатора сигнала и построить графики зависимости данных величин от значения сопротивления R6.
29. Повторить пп. 27 — 28 для сопротивления R7 схемы.
30. Настроить усилитель на наилучший режим работы (максимальная амплитуда выходного сигнала и наименьший коэффициент гармоник), вращая ручки R2, R3, R6, R7.
31. Изменяя на генераторе амплитуду сигнала от 10 % до 90 % наблюдать за искажениями выходного сигнала, возникающими при подаче на вход усилителя слишком большой амплитуды.
32. Построить график зависимости коэффициента гармоник от амплитуды входного сигнала $K_{\text{Г}} = K_{\text{Г}}(U_{\text{ВХ}} \%)$ (устанавливаемую и измеряемую в относительных % в компоненте «ГЕНЕРАТОР — НЧ»).
33. Построить амплитудную характеристику усилителя как зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ в относительных единицах и выделить на ней линейный участок.
34. При данных положениях резисторов R2, R3, R6, R7 определить мощность, потребляемую схемой от источника питания как $P_{\text{п}} = U_{\text{ист}} \cdot I_{\text{п}}$, где $U_{\text{ист}}$ — напряжение питания схемы, $I_{\text{п}}$ — ток потребления схемы по показаниям мультиметра, подключенного в разрыв цепи питания XS7 — XS8. Изменяя значения переменных сопротивлений наблюдать за искажениями сигнала и за изменением потребляемой мощности от источника питания. Измерить потребляемую мощность на «холостом ходу», т. е. при отключенном генераторе, для остановки генерации сняв галочку в компоненте «ГЕНЕРАТОР НЧ».
35. Провести эксперименты при других частотах звукового генератора 200 Гц — 5000 кГц.
36. Подать на усилитель с генератора прямоугольные и треугольные импульсы частотой 200 — 1000 Гц и наблюдать за формой сигналов на выходе.
37. Сделать вывод о работе усилителя в разных режимах.
38. По окончании работы следует закрыть программу-оболочку LabVisual и все открытые подпрограммы, закрыть виртуальную среду VirtualBox

(при работе в среде Linux).

39. Выключить компьютер, нажав на кнопку, находящуюся в крайнем нижнем левом углу экрана. Из доступных действий выбрать «ВЫХОД»--> «ВЫКЛЮЧИТЬ КОМПЬЮТЕР».
40. Отключить установку от сети, поставив переключатели «СЕТЬ» на панели установки в положение «выкл» и вынуть сетевые вилки из розеток.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. М.: Высш.шк., 1982. 496 с.; ил.
2. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1988. 464 с.; ил.
2. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / Пер. с англ. И. Влаха, К. Сингхал. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.; ил.
3. Основы радиоэлектроники: Учебное пособие / Ю. И. Волощенко, Ю. Ю. Мартюшев и др./ Под ред. Г.Д. Петрухина. М.: Изд-во МАИ, 1993. 416 с.; ил.
4. Радиотехника: Учебное пособие для студентов вузов /Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. М.: Просвещение, 1986. 319 с.; ил.
5. Элементы информационных систем: Учеб. для вузов / В.П. Миловзоров. М.: Высш.шк., 1989. 440 с.; ил.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**