

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Отделение электроники и телекоммуникаций
Кафедра радиофизики

Ю. Н. Новиков

Исследование триодного генератора гармонических колебаний

Лабораторный практикум

Учебное пособие

УДК 621.3 (075)

ББК 32.85я7

Н77

Новиков Ю. Н. Исследование триодного генератора гармонических колебаний. Лабораторный практикум: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 24 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины электронной и радиотехнической тематики («Электроника», «Радиотехнические цепи и сигналы» и им подобные) ООП подготовки бакалавров по направлениям ФГОС *Физика, Техническая физика, Электроника и нанoeлектроника, Радиотехника, Инфокоммуникационные технологии и системы связи*. Содержит материал лабораторного практикума по теме генерации автоколебаний генераторами с резонансной системой (колебательным контуром) и трансформаторной обратной связью. В пособии изложены: основы теории, описание опытов, контрольные вопросы, методические рекомендации по выполнению программы исследований и анализа явлений в автоколебательной системе. Лабораторная работа практикума (идейная основа, лабораторный стенд) разработана, изготовлена, снабжена методической и технической документацией преподавателями и сотрудниками кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Лабораторные установки находятся в лаборатории «Основы радиоэлектроники» кафедры радиофизики.

Ил. 16. Библиогр.: 3 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Оглавление

Тема, цель и программа лабораторной работы	4
Основы теории автогенератора гармонических колебаний.....	6
Принципиальная схема и принцип действия автогенератора	6
Характеристики, рабочая точка, малосигнальные параметры	6
Малосигнальные схемы, частотные свойства усилителя	8
Условие самовозбуждения автономной системы.....	9
Уравнение установившегося режима, баланс фаз	12
Колебательные характеристики, баланс амплитуд.....	13
Жесткий и мягкий режимы возбуждения	15
О транзисторной схеме автогенератора.....	18
Литература.....	18
Контрольные вопросы.....	19
Программа исследований.....	20

На протяжении многих лет в состав практикума лаборатории «Основы радиоэлектроники и радиофизики» кафедры радиофизики Политехнического университета входила работа «Исследование LC -генератора». Ее разработали, изготовили, снабдили методической и технической документацией преподаватели и сотрудники кафедры радиофизики. Автор работы: Наталия Олеговна Соколова [1].

Переход на двухуровневую систему высшего профессионального образования, введение государственных образовательных стандартов третьего поколения (ФГОС), модификация направлений подготовки в высшей школе России и учебных планов в Политехническом университете актуализировали разработку новой редакции лабораторной работы. Плодотворную помощь на этапах подготовки рукописи и программы опытов оказали сотрудники кафедры радиофизики: Копылов Федор Александрович, Дубровский Владимир Николаевич, Баскакова Валентина Ивановна.

Ю. Н. Новиков, февраль 2013

Тема, цель и программа лабораторной работы

Темы лабораторного исследования:

- принцип действия и устройство автогенератора,
- возбуждение и генерация стационарных автоколебаний - периодических колебаний, существующих без внешнего периодического воздействия.

Если форма колебаний синусоидальная, имеем дело с *автогенераторами гармонических колебаний*. Их можно строить на транзисторах, операционных усилителях, электронных лампах, других элементах. При подаче питания состояние автоколебательной системы оказывается неустойчивым: происходит *самовозбуждение*. Токи и напряжения ведут себя подобно нарастающему гармоническому колебанию и плавно переходят в *стационарный режим*, или *режим установившихся колебаний*. Интерес представляют:

- условия самовозбуждения системы;
- вид установившихся колебаний.

Объект исследования лабораторной работы: ламповый автогенератор (далее также *LC-генератор*), реализованный по схеме с трансформаторной обратной связью (рис. 1).

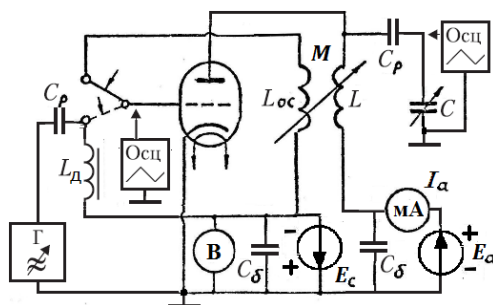


Рис. 1. Схема лабораторного макета *LC-генератора*

В качестве активного элемента, обеспечивающего преобразование энергии источника питания в колебательный процесс, используется миниатюрный электровакуумный триод: нувистор марки 6С62Н. Анодную и сеточную цепи лампы питает встроенный в макет регулируемый источник постоянного напряжения, для разогрева катода к цепи накала подведено напряжение 6,3 В. В анодную цепь триода включен полосовой фильтр: *LC-контур*. В системе реализована цепь обратной связи: напряжение с контура через трансформатор подведено к сетке триода. Уровень связи регулируют вариометром. Лабораторный макет позволяет отключать цепь обратной связи (нижнее положение ключа на рис. 1) и превращать генератор в резонансный усилитель. В этом режиме постоянное напряжение на сетку лампы попадает через катушку L_d . Индуктивность

катушки велика, и цепь для переменных токов на частотах близких частоте генерации практически разорвана. Разделительные и блокировочные конденсаторы - C_p и C_6 – разрывают цепи постоянного тока, а на частоте генерации ведут себя как короткое замыкание. При подключении измерительных приборов к контуру (резонансной системе) нужно учитывать, что они вносят дополнительные емкости и проводимости в цепь контура.

Цели лабораторной работы:

- углубление знаний о принципах устройства и функционирования автогенераторов гармонических колебаний, об условиях возбуждения колебаний, о стационарных колебательных режимах, о практическом построении автогенераторов;
- приобретение навыков экспериментального исследования процессов в автогенераторах и анализа явлений в автоколебательной системе.

Программа работы включает:

- определение параметров лампы по статическим характеристикам;
- выбор рабочих точек для разных режимов генерации и проверку условий самовозбуждения;
- исследование стационарных процессов разного вида, выявление порогов возбуждения и срыва колебаний.

Предварительная подготовка предусматривает изучение теоретического раздела, следующего далее, ознакомление с порядком выполнения лабораторной работы и методикой измерений. Проконтролировать уровень подготовки помогают вопросы, включенные в пособие.

О ламповой схеме автогенератора

Идейная основа и принципы построения LC -генераторов в общем плане не зависят от типа активного элемента - будь то электронная лампа, биполярный или полевой транзисторы. Реализация лабораторного макета на электровакуумном триоде решает среди прочих определенную методическую задачу: продемонстрировать в составе лабораторного практикума радиоэлектронное устройство, в котором используется электровакуумная лампа. Хотя по ряду позиций (кпд, потребляемая мощность, уровень напряжения питания, габариты) ламповый вариант генератора проигрывает транзисторным аналогам, физические процессы, характерные для автоколебательных систем, здесь отчетливо наблюдаются. Это позволяет подробно их исследовать.

Историческая справка

Двуэлектродную лампу - электровакуумный диод - изобрел в 1904 г. Флеминг (англ. *Sir John Ambrose Fleming*). В 1907 г. американец Ли де Форрест (англ. *Lee De Forest*) построил в лампу третий электрод – сетку. Так появился триод, позволяющий управлять потоком электронов от катода к аноду и усиливать электрические сигналы, подведенные к сетке. В 1913 г. Александр Мейснер (Германия) построил на триоде автогенератор гармонических колебаний.

Основы теории автогенератора гармонических колебаний

Принципиальная схема и принцип действия автогенератора

Структура автогенератора гармонических колебаний предполагает наличие *усилителя колебаний, полосового фильтра и цепи обратной связи*. Эти структурные компоненты при надлежащем выборе параметров цепей и условий работы обеспечивают преобразование энергии источника питания в энергию синусоидального колебательного процесса.

Схема LC -генератора (рис. 2), структурно представляет собой ламповый *резонансный усилитель*, охваченный *обратной связью*. Выход

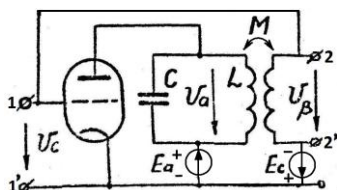


Рис. 2. Схема лампового генератора с трансформаторной обратной связью

усилителя с колебательным контуром в анодной цепи связан через взаимную индуктивность (трансформатор) с сеточной цепью (входом усилителя). Выводы вторичной обмотки трансформатора включают так, чтобы обратная связь оказалась положительной на частоте резонанса в контуре.

Если при включении питания выполняется *условие самовозбуждения*, состояние равновесия системы будет неустойчивым. Вследствие этого растет интенсивность малых колебаний (флуктуаций) токов, существующих в проводниках за счет теплового движения зарядов. В системе развивается процесс в форме нарастающего гармонического колебания токов и напряжений с частотой близкой резонансной частоте контура. С увеличением интенсивности колебаний все более проявляется нелинейность характеристик триода, поэтому рост амплитуды колебаний замедляется и постепенно останавливается. Процесс приобретает *стационарный* характер: автогенератор переходит в *режим установившихся колебаний*. В этом режиме энергия, поступающая в контур за один цикл, равна энергии, расходуемой в контуре за то же время.

Характеристики, рабочая точка, малосигнальные параметры

Электрические свойства триода описывают семейством статических анодно-сеточных характеристик $I_a(V_c, V_a)$, отражающих связь анодного тока I_a с напряжениями на сетке V_c и на аноде V_a . Напряжения отсчитывают относительно катода. Характеристики $I_a(V_c, V_a)$ триода 6С62Н показаны на рис. 3 [2]. Способность триода усиливать поданное на сетку напряжение зависит от выбора *рабочей точки* - уровней постоянных напряжений, приложенных к сетке и аноду. На сетку подают отрицательное напряжение (доли вольта), на анод – положительное (десятки вольт).

Следует учитывать, что при подаче отрицательного напряжения на сетку сеточный ток практически отсутствует. Далее будем им пренебрегать.

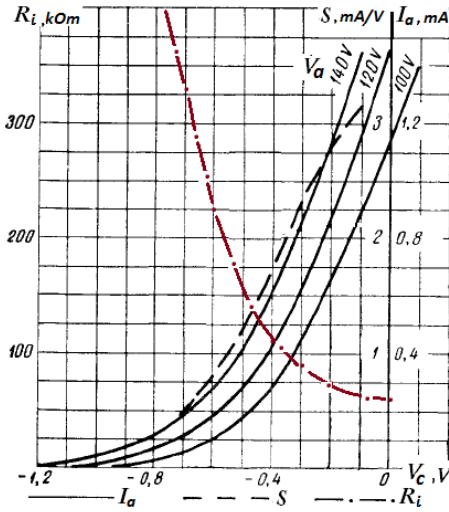


Рис. 3. Анодно-сеточные характеристики триода 6С62Н, графики крутизны (S) и коэффициента усиления (μ).

Малосигнальное приближение означает столь малые переменные составляющие, что при разложении функции $I_a(V_c, V_a)$ в ряд Тэйлора относительно рабочей точки $I_{a=}(V_{c=}, V_{a=})$ достаточно учитывать только линейные члены:

$$I_a = I_{a=} + \left. \frac{\partial I_a}{\partial V_c} \right|_{p.t.} u_c + \left. \frac{\partial I_a}{\partial V_a} \right|_{p.t.} u_a .$$

Видим, что переменные составляющие тока и напряжений связаны линейно через коэффициенты $S = \left. \partial I_a / \partial V_c \right|_{p.t.}$ и $R_i^{-1} = \left. \partial I_a / \partial V_a \right|_{p.t.}$:

$$i_a = S u_c + R_i^{-1} u_a . \tag{1}$$

Эти величины - *малосигнальные параметры* - именуют:

- S - *крутизна*, или (подробнее) *дифференциальная крутизна в рабочей точке*;
- R_i - *внутреннее сопротивление*, или (подробнее) *дифференциальное сопротивление триода в рабочей точке*.

На рис. 3 показаны графики $S(V_c)$ и $R_i(V_c)$ при фиксированном напряжении на аноде (здесь: 120 В). Существенно, что малосигнальные параметры зависят от рабочей точки и не зависят от переменных напряжений.

Триод - нелинейный элемент. В случае малых колебаний величин при использовании вольт-амперных характеристик целесообразно применять *малосигнальное приближение* [3, с.32]. В его основе *линеаризация связи* переменных составляющих тока и напряжений на зажимах прибора. Анодно-сеточную характеристику выражают формулой разложения Тэйлора и выделяют *постоянные составляющие* тока и напряжений (пометим их символом $_$) и *малые переменные составляющие*: i_a , u_c , u_a . Приходим к виду:

$$I_a = I_{a=} + i_a, \quad V_c = V_{c=} + u_c,$$

$$V_a = V_{a=} + u_a .$$

Малосигнальные схемы, частотные свойства усилителя

Соотношению (1) соответствует эквивалентная малосигнальная схема триода для переменных токов (рис. 4, фрагмент в рамке). Здесь нет постоянных напряжений и токов, но рабочая точка косвенно учтена: она задает значения крутизны S и внутреннего сопротивления R_i . Отсутствует в схеме и сеточный ток – в исследуемой области частот он настолько мал, что проводимость между сеткой и катодом можно считать нулевой.

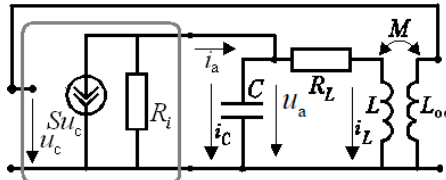


Рис. 4. Малосигнальная схема генератора

В анодную цепь триода встроен полосовой фильтр - колебательный контур в параллельном включении. Резонансная угловая частота контура $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. При тех частотах, на которых строится генератор, можно считать, что диссипативные потери в LC -контуре в основном сосредоточены в катушке. Их учитывают добавлением к индуктивности (идеальному элементу) сопротивления R_L . Полагаем его малым по сравнению с характеристическим сопротивлением $\rho = \sqrt{L/C} = \omega_0 L = 1/\omega_0 C$, то есть считаем, что добротность контура $Q = \rho/R_L$ высокая (десятки единиц).

К сетке триода подведено напряжение обратной связи от вторичной обмотки трансформатора. Отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках: M/L . Выводы вторичной обмотки подключены к сетке триода так, чтобы это отношение было отрицательным.

Если разорвем обратную связь, подведем к сетке триода переменное напряжение от внешнего источника и будем считать напряжение u_a выходным, получим схему резонансного усилителя (рис. 5, а). Его свойства в частотной области описывают комплексным коэффициентом усиления $\underline{K}^{(\omega)} = \dot{U}_a / \dot{U}_c$, величины \dot{U}_a и \dot{U}_c - комплексные амплитуды напряжений на выходе и входе усилителя соответственно. (Далее для краткости термин «комплексный» в ряде случаев будем опускать.)

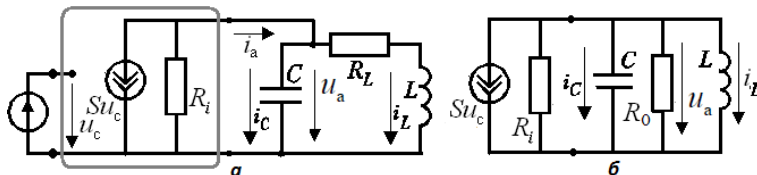


Рис. 5. Малосигнальные схемы усилителя: исходная (а), преобразованная (б)

Найдем $\underline{K}(\omega)$, воспользовавшись *приближением высокочастотного контура*. Такой контур вблизи резонансной частоты можно представить параллельным соединением трех идеализированных элементов: L , C , R_0 (рис. 5, б), причем сопротивление $R_0 = \rho Q$. Поскольку R_0 и R_i соединены параллельно, представляем их сопротивлением $R'_0 = R_i R_0 / (R_i + R_0)$. Получаем параллельный контур L , C , R'_0 с добротностью $Q' = R'_0 / \rho$.

Для вычисления $\underline{K}(\omega)$ перейдем к эквивалентной малосигнальной схеме замещения (рис. 6), на которой фигурируют импедансы элементов цепи $Z_L = j\omega L$, $Z_C = -j(\omega C)^{-1}$ и комплексные амплитуды токов и напряжений. Поскольку

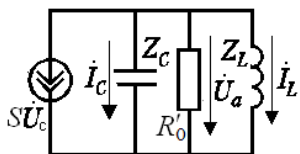


Рис. 6. Схема замещения резонансного усилителя

пряжений. Поскольку

$$\dot{U}_a = -S\dot{U}_c \left(\frac{1}{R'_0} + j\omega C - j\frac{1}{\omega L} \right)^{-1},$$

получаем

$$\underline{K}(\omega) = -\frac{SR'_0}{1 + jQ\Omega}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}. \quad (2)$$

Видим, что на резонансной частоте ω_0 коэффициент усиления имеет вещественное отрицательное значение $\underline{K}(\omega) = -SR'_0$. Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ) на резонансной частоте принимает максимальное значение.

Условие самовозбуждения автономной системы

Вернемся от усилителя (см. рис. 5, а) к автономной системе (см. рис. 4). Для этого отключим внешний источник сигнала и введем обратную связь, подав на сетку часть инвертированного выходного напряжения: $\beta \dot{U}_a$, $\beta = -|M|/L$. (Выводы вторичной обмотки трансформатора подключим к сетке и катоду так, чтобы $M = -|M|$.) Произведение коэффициента усиления $\underline{K}(\omega)$ на коэффициент обратной связи β называют *коэффициентом петлевого усиления*: $\kappa = \underline{K}(\omega)\beta$. Поскольку $\beta < 0$, а коэффициент усиления при резонансе вещественный и отрицательный ($-SR'_0$), констатируем: на частоте ω_0 реализована положительная обратная связь. В этом случае состояние равновесия системы (на электроды поданы напряжения $V_{c=}$ и $V_{a=}$) является потенциально неустойчивым. Из теории устойчивости известно условие самовозбуждения [4, с.354]: если существует частота ω' , на которой коэффициент петлевого усиления вещественный ($\text{Im}[\kappa(\omega')] = 0$), и его значение на этой частоте больше единицы, система выйдет из состояния равновесия. Очевидно, что в рас-

смаатриваемом случае частота ω' совпадает с резонансной частотой контура ω_0 (это вытекает из (2)). И условие самовозбуждения выглядит так:

$$|M|/L > 1/SR'_0 \quad (3)$$

Смысл формулы (3) прост: слева стоит величина, характеризующая уровень и знак обратной связи, справа в знаменателе – модуль коэффициента усиления резонансного усилителя на резонансной частоте. Чем больше по модулю коэффициент усиления при резонансе, тем при меньшей связи происходит самовозбуждение.

Получим условие самовозбуждения другим способом, базируясь на уравнениях для мгновенных значений токов и напряжений в системе. В приближении высокочастотного контура эквивалентную схему генератора (см рис. 4) можно упростить – привести к виду, показанному на рис. 7, а. Обратная связь отражена здесь посредством зависимого источника тока: на сетку триода по цепи обратной связи поступает напряжение $u_a M/L$, источник вырабатывает ток $S M/L u_a$, пропорциональный коэффициенту обратной связи и крутизне анодно-сеточной характеристики триода в рабочей точке.

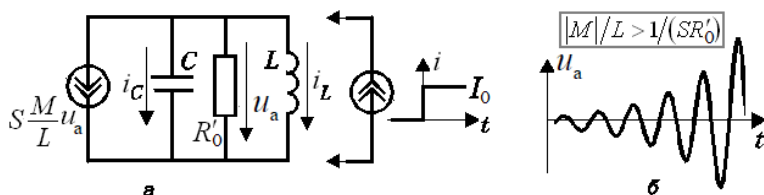


Рис. 7. Эквивалентная схема системы под воздействием толчка тока (а), поведение напряжения на контуре при выполнении условия самовозбуждения (б)

Для схемы на рис. 7, а справедливо уравнение для токов в узле:

$$C \frac{du_a}{dt} + u_a/R'_0 + \frac{1}{L} \int u_a(t') dt' + S M/L u_a = 0.$$

Оно удовлетворяется при $u_a = 0$. Имеем состояние равновесия - напряжение не меняется. Но устойчиво ли это состояние по отношению к малым флуктуациям, которые всегда существуют в реальной цепи вследствие теплового движения зарядов? Чтобы это проверить, выведем в момент $t = 0$ систему из равновесия, подключив к ней мысленно источник постоянного тока I_0 (показан на рис. 7, а). Значение I_0 при $t > 0$ может быть как угодно малым. Уравнение системы при $t > 0$ таково:

$$C \frac{du_a}{dt} + u_a/R'_0 + \frac{1}{L} \int u_a(t') dt' + S M/L u_a = I_0.$$

Дифференцируя его по t , получаем дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 u_a}{dt^2} + CR_0'^{-1} \frac{du_a}{dt} + S M/L \frac{du_a}{dt} + CL^{-1} u_a = 0.$$

Введение констант $\delta = 2CR_0'^{-1} + S M/L / (2C)$ и $\omega_0^2 = 1/(LC)$ придает ему форму известного дифференциального уравнения осциллятора:

$$\frac{d^2 u_a}{dt^2} + 2\delta \frac{du_a}{dt} + \omega_0^2 u_a = 0. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение второго порядка необходимо сопроводить двумя начальными условиями. Сформулируем их, используя свойства непрерывности напряжения на емкости и тока через индуктивность. Первое условие очевидное: $u_a(0) = 0$. На этом основании, а также, учитывая отсутствие тока через индуктивность при $t = 0$, получаем второе условие: $du_a/dt|_{t=0} = I_0/C$.

Общее решение уравнения (4) представим в виде $u_a = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}$. Коэффициенты λ_1 и λ_2 в показателях экспоненты — корни характеристического уравнения $\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega_0^2 = 0$. Они такие: $\lambda_{1,2} = -\delta \pm \gamma$, $\gamma = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$. Использование первого начального условия приводит к формуле $u_a = A(e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) = 2Ae^{-\delta t} \text{sh}(\gamma t)$. Из второго начального условия следует: $A = I_0/(2\gamma C)$. Таким образом, решение дифференциального уравнения (4) принимает вид

$$u_a(t) = I_0(\gamma C)^{-1} e^{-\delta t} \text{sh}(\gamma t).$$

Если $\omega_0^2 > \delta^2$ (интересен именно этот случай), $\gamma = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ - мнимое число. Удобно перейти к величине $\omega_k = -j\gamma = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ и представить решение в форме $u_a(t) = I_0(\omega_k C)^{-1} e^{-\delta t} \sin(\omega_k t)$. В приближении высокодобротного контура ω_0^2 существенно больше δ^2 , и с малой погрешностью можно считать, что частота синусоиды совпадает с резонансной частотой контура: $\omega_k = \omega_0 \sqrt{1 - \delta^2/\omega_0^2} \approx \omega_0$. Следовательно, при $t > 0$

$$u_a(t) = I_0(\omega_0 C)^{-1} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t). \quad (5)$$

Видим, что процесс в цепи развивается в форме гармонического колебания с изменяющейся амплитудой. Если показатель экспоненты положительный, амплитуда колебания, вызванного толчком тока, растет (рис. 7, б). Таким образом, условием самовозбуждения является неравенство $\delta < 0$, или $|M|/L > 1/SR_0'$. Оно совпадает с формулой (3).

Уравнение установившегося режима, баланс фаз

Выход анодного напряжения из состояния равновесия получен в малосигнальном приближении, - формула (5) дает адекватную картину развития колебаний пока их интенсивность остается настолько малой, что в окрестности рабочей точки допустимо считать триод линейным элементом. По мере роста интенсивности колебаний начинает проявляться нелинейность характеристик триода, и система приходит к установившемуся (стационарному) режиму. Формула (5) для этих условий не годится: из нее следует неограниченный рост амплитуды. Чтобы описать стационарный режим, нужно отказаться от линейного приближения и применить иную методику, которая учитывает зависимость коэффициента усиления \underline{K} от амплитуды сеточного напряжения: $\underline{K}(\omega, U_c)$.

Наличие в системе высокооборотной избирательной цепи дает основания полагать, что напряжение на контуре (и на аноде) в стационарном режиме представляет собой гармоническое колебание определенной частоты (ω_g) и амплитуды (U_{ag}). Воспользуемся этим и введем комплексные амплитуды напряжений на аноде и сетке: \dot{U}_a и \dot{U}_c . Эти напряжения

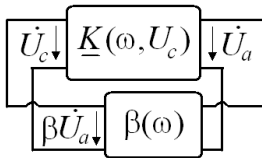


Рис. 8. Функциональная схема генератора

преобразуются усилителем (при разомкнутой обратной связи): $\dot{U}_a = \underline{K}(\omega, U_c)\dot{U}_c$, а также цепью обратной связи: $\dot{U}_c = \beta(\omega)\dot{U}_a$. Следовательно, при замкнутой цепи обратной связи (рис. 8) должно удовлетворяться уравнение установившегося режима:

$$\underline{K}(\omega, U_c)\beta(\omega) = 1. \quad (6)$$

Это происходит при значениях частоты и амплитуды стационарного режима генерации: ω_g и U_{cg} . В уравнении (6) фигурируют комплексные величины. Представим его двумя вещественными соотношениями - для модулей и аргументов комплексных чисел:

$$|\underline{K}(\omega, U_c)| |\beta(\omega)| = 1, \quad \arg \underline{K}(\omega, U_c) + \arg \beta(\omega) = 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (7)$$

Первое называют *уравнением баланса амплитуд*, второе - *уравнением баланса фаз*. Подчеркнем, что в отличие от случая малого сигнала (см. (2)) коэффициент усиления резонансного усилителя зависит здесь не только от частоты, но и от амплитуды напряжения на сетке. (О причинах и характере этой зависимости речь идет далее.)

Уравнение баланса фаз позволяет найти частоту автоколебаний. В нем фигурируют фазочастотные характеристики усилителя и цепи обратной связи. Для LC-генератора (см. рис. 2) коэффициент обратной связи ($\beta = -|M|/L$) не зависит от частоты и отрицательный: $\arg \beta = \pi$. Следовательно, решением уравнения баланса фаз (частотой генерации) будет значение ω_g , при котором $\arg \underline{K}(\omega_g, U_c) = \pi$, то есть генерация идет на

частоте, на которой \underline{K} - вещественное отрицательное число. Но таковой является резонансная частота контура ω_0 (см. (2)). Таким образом, частота стационарных колебаний $\omega_g = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Отметим, что в области частот, не превышающих единицы мегагерц, для рассматриваемой здесь схемы генератора $\arg \underline{K}$ практически не зависит от амплитуды напряжения на сетке – он равен π .

Примечание

Частота, на которой развиваются колебания (полученная в приближении малого сигнала) и частота генерации (решение уравнения баланса фаз) в общем случае отличаются. Иногда отличие пренебрежимо мало. Но нужно понимать, что совпадение частоты генерации и резонансной частоты контура является следствием ряда приближений - высокая добротность контура, независимость $\arg \underline{K}$ от амплитуды сигнала, пренебрежение проводимостью в цепи сетки и проч.

Колебательные характеристики, баланс амплитуд

Подстановка частоты ω_g в уравнение баланса амплитуд позволит найти амплитуду установившихся колебаний, если известен график модуля коэффициента усиления $|K(\omega_g, U_c)|$ для фиксированной частоты ω_g . Введем для этой функции – назовем ее *колебательной характеристикой* - обозначение $K_0(U_c)$. Предположим, что колебательная характеристика известна, тогда можно решить уравнение баланса амплитуд $K_0(U_c) = L/|M|$ графически: получить значение U_{cg} для точки пересечения графика $K_0(U_c)$ и прямой $1/|\beta| = L/|M|$. Пример показан на рис. 9. Далее находим амплитуду напряжения на аноде: $U_{ag} = K_0(U_{cg}) U_{cg}$.

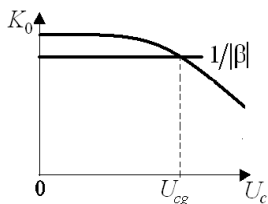


Рис. 9. Пример решения уравнения баланса амплитуд

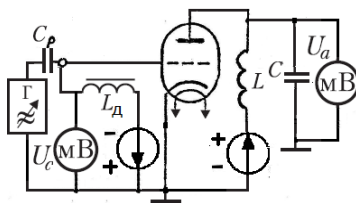


Рис. 10. Схема измерения амплитудной характеристики

Колебательную характеристику для заданной рабочей точки можно получить экспериментально. Для этого генератор преобразуют в усилитель: разрывают обратную связь и подают на вход усилителя синусоидальное напряжение (рис. 10) на частоте генерации ω_g . Здесь она совпадает с резонансной частотой контура ω_0 , поэтому на генераторе устанавливают частоту, при которой амплитуда напряжения на аноде макси-

мальна. Далее, измеряя амплитуды анодного и сеточного напряжений, строят амплитудную характеристику $U_a(U_c)$, параллельно для разных U_c вычисляют $K_0 = U_a/U_c$ и строят график $K_0(U_c)$.

Вид графика $K_0(U_c)$ зависит от режима, иными словами – от установленной рабочей точки. Кривая $K_0(U_c)$ – или монотонная (рис. 11, а), или имеет перегиб (рис. 11, б). Монотонное поведение $K_0(U_c)$ характерно для рабочей точки при малых по модулю напряжениях на сетке – в области высокой крутизны анодно-сеточной характеристики. Но если установить рабочую точку вблизи напряжения запираания триода, – там, где крутизна S мала, – получим немонотонную кривую $K_0(U_c)$. По мере роста U_c сначала наблюдаем подъем K_0 , затем падение. Важно, что при любом выборе рабочей точки, если амплитуду напряжения на сетке увеличить существенно, модуль коэффициента усиления монотонно падает.

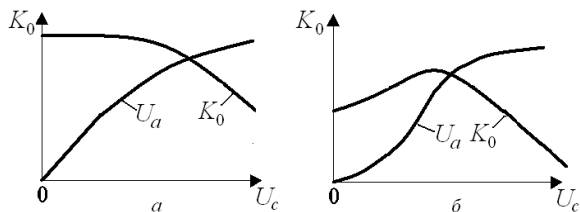


Рис. 11. Примеры амплитудных и колебательных характеристик для разных рабочих точек: при малом (по модулю) смещении (а), вблизи запираания (б)

Падение K_0 обусловлено нелинейностью характеристик триода, изменениями условий его работы. Одна из причин: при немалом синусоидальном напряжении на сетке триода ток анода искажается, отличается по форме от синусоиды. Спектр периодического колебания $i_a(t)$ состоит из синусоидального колебания на частоте $\omega_g \approx \omega_0$ с амплитудой I_{a1} и гармоник, частоты которых кратны частоте синусоидального напряжения на сетке ($2\omega_0, 3\omega_0, \dots$). В случае высокочастотного контура вклад в напряжение на контуре дает только первая (основная) гармоника тока – только ее частота попадает в полосу прозрачности контура. Частоты других гармоник тока оказываются в полосе подавления, поэтому их вклад в напряжение на контуре пренебрежимо мал. Получаем практически синусоидальное анодное напряжение $u_a(t)$ с амплитудой $U_a = I_{a1}R_0$. Амплитуда первой гармоники анодного тока зависит от амплитуды напряжения на сетке U_c , а значит, и коэффициент усиления на резонансной частоте (частоте генерации) зависит от U_c , причем, нелинейным образом: $K_0 = I_{a1}(U_c)R_0/U_c$. Начиная с некоторых значений U_c , по мере роста

интенсивности сеточного напряжения увеличение I_{a1} замедляется. Следствием является падение K_0 (см. рис. 11).

Примечание

Появление экстремума на графике $K_0(U_c)$ можно проследить, подав на сетку триода запирающее напряжение. В этом случае при малой амплитуде входного напряжения ток отсутствует (лампа закрыта). При увеличении амплитуды сеточного напряжения до уровней, открывающих лампу, потечет анодный ток, похожий по форме на усеченную синусоиду, – реализуется так называемый режим с *отсечкой*. В этом режиме амплитуда первой гармоники анодного тока I_{a1} растет вслед за увеличением амплитуды напряжения на сетке. Но затем, когда входное напряжение существенно увеличивается, рост I_{a1} замедляется – выходим на спадающую ветвь кривой $K_0(U_c)$.

Искажение анодного тока вследствие нелинейности анодно-сеточной характеристики - не единственная причина падения K_0 . Сказывается также влияние сеточного тока, который появляется при больших амплитудах сеточного напряжения - в те интервалы времени, когда $u_c(t)$ становится положительным. Сеточный ток детектируется входной цепью и добавляет отрицательное смещение к напряжению источника. Еще одна причина связана с появлением в эти интервалы времени заметной проводимости между сеткой и катодом. Увеличение входной проводимости влечет уменьшение добротности контура, эквивалентного сопротивления R_0 и, как следствие, значения K_0 .

Примечание

Детальный анализ причин падения K_0 выходит за рамки программы лабораторного практикума. Исследование стационарного режима базируется здесь на колебательных характеристиках, построенных по результатам измерения.

Жесткий и мягкий режимы возбуждения

Функциям $K_0(U_c)$ разного вида - монотонным и с экстремумом – соответствуют режимы генерации, отличающиеся характером зависимостей амплитуд напряжений (сеточного U_{cg} и анодного U_{ag}) от уровня обратной связи. Проследим эволюцию зависимостей $U_{cg}(|\beta|)$ при увеличении коэффициента обратной связи $|\beta|$. Амплитуду анодного напряжения для любого U_{cg} можно найти по формуле $U_{ag} = K_0(U_{cg})U_{cg}$.

Пусть кривая $K_0(U_c)$ монотонная (см. рис. 9 и 11, а). Если при увеличении $|\beta|$ выполняется условие самовозбуждения ($|\beta| > 1/K_0(0)$) возникают колебания. Амплитуду сеточного напряжения U_{cg} для разных $|\beta|$

находим графическим методом по пересечениям кривой $K_0(U_c)$ и прямой $1/|\beta| = L/|M|$. Если $|\beta|$ увеличивать, U_{cg} монотонно растет. Если идти в обратную сторону - уменьшать $|\beta|$, - амплитуда U_{cg} пройдет те же значения в обратной последовательности, вплоть до случая, когда модуль коэффициента обратной связи перейдет границу $1/K_0(0)$, и колебания сорвутся. Нужно отметить, что при монотонном характере $K_0(U_c)$ колебания возникают вследствие малых возмущений, а график $U_{cg}(|\beta|)$ теоретически не должен иметь разрывов, хотя при возбуждении наблюдают практически скачкообразное появление сеточного напряжения.

Если рабочая точка обеспечивает монотонность функции $K_0(U_c)$, говорят о *мягком режиме возбуждения*. Появление этого термина обусловлено существованием другого вида колебательного режима, которому отвечает кривая $K_0(U_c)$ с экстремумом. Его можно реализовать, установив рабочую точку в области анодно-сеточной характеристики триода вблизи напряжения запираения. Рассмотрим этот случай. При графическом решении уравнения баланса амплитуд обнаруживаем четыре характерные ситуации, показанные на (рис. 12):

- 1) касание прямой $1/|\beta| = L/|M|$ экстремума графика $K_0(U_c)$ (значение $|\beta|$, при котором это происходит, обозначим $|\beta''|$),
- 2) две точки пересечения при $|\beta''| < |\beta| < |\beta'|$ (два нетривиальных решения уравнения баланса амплитуд),
- 3) касание прямой $1/|\beta|$ точки $K_0(0)$ (для данного значения $|\beta|$ используем обозначение $|\beta'|$),
- 4) одна точки пересечения при $|\beta| > |\beta'|$ (единственное нетривиальное решение уравнения баланса амплитуд).

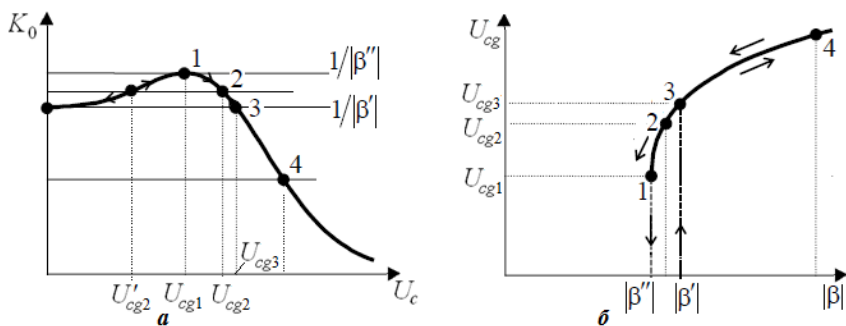


Рис. 12. Пример графического решения уравнения баланса амплитуд для колебательной характеристики с экстремумом (а) и результат решения (б)

Для последнего случая ситуация однозначная: генерация колебания с амплитудой U_{cg} , которую для каждого $|\beta|$ находим графически (см. рис. 12). Если теперь связь уменьшить так, что $|\beta''| < |\beta| < |\beta'|$, колебания сохранятся (рис. 12, б). Им будет соответствовать значение U_{cg} , отвечающее правой точке пересечения прямой $1/|\beta| = L/|M|$ и графика $K_0(U_c)$, - точке, в которой $dK_0/dU_c < 0$. (На рис. 12, а это - точка 2, решение в которой: U_{cg2} .) Левая точка пересечения графиков, для которой $dK_0/dU_c > 0$, не дает устойчивое решение уравнения баланса амплитуд. Иными словами, такой режим генерации гармонических колебаний (на рис. 12, а - с амплитудой U'_{cg2}) неустойчив, а значит, невозможен. Не может быть генерации и при слиянии левой и правой точек пересечения. Именно это происходит в экстремуме графика $K_0(U_c)$ - при $|\beta| = |\beta''|$. Следовательно, если при $|\beta''| < |\beta| < |\beta'|$ колебания существуют, они будут продолжаться и при уменьшении $|\beta|$ вплоть до значения $|\beta''|$, при достижении которого колебания сорвутся (точка 1 на рис. 12).

Предположим, что при $|\beta''| < |\beta| < |\beta'|$ колебания отсутствуют - система в равновесии. Малые возмущения не вызовут колебания, поскольку условие самовозбуждения $|\beta| > |\beta'|$ здесь не выполняется. Система устойчива по отношению к флуктуациям, и чтобы колебания при такой обратной связи возникли, требуется достаточно сильное («жесткое») воздействие. Для этой ситуации используют понятие *жесткий режим возбуждения*. На реализацию именно такого режима указывает гистерезис на графиках $U_{cg}(|\beta|)$ (см. рис. 12, б). Будет он и на графике амплитуды анодного напряжения $U_{ag}(|\beta|)$.

О неустойчивости колебательного движения

Неустойчивость стационарных колебаний с амплитудой, для которой имеем $dK_0/dU_c > 0$ (U'_{cg2} на рис. 12, а), можно пояснить, анализируя реакцию данного решения на малые возмущения. Если амплитуда U'_{cg} увеличится (сместится по оси абсцисс вправо), $K_0(U_c)$ вырастет и, как следствие, продолжится рост U'_{cg} . Система выйдет из точки, отвечающей данному решению уравнения баланса амплитуд и перейдет в режим устойчивого стационарного процесса (с амплитудой U_{cg2} на рис. 12). Очевидна реализация обратной ситуации: падение U'_{cg} при малом отклонении влево и, как итог, срыв колебаний.

Теоретический анализ устойчивости периодических колебаний для подобных ситуаций можно найти, например, в [4, с.375].

О транзисторной схеме автогенератора

Основы теории автогенераторов гармонических колебаний, объясняющие работу лампового генератора, применимы практически без коррекции к описанию LC -генератора на полевом n -канальном транзисторе с управляющим p - n переходом [3]. Схемы этих генераторов аналогичны (см. рис. 13, *a* и рис. 2), характеристики триода и полевого транзистора похожи (см. рис. 13, *б* и рис. 3), малосигнальные эквивалентные схемы (см. рис. 4) идентичны. Если используют p -канальный транзистор, инвертируют полярности напряжений питания, остальное – без изменений.

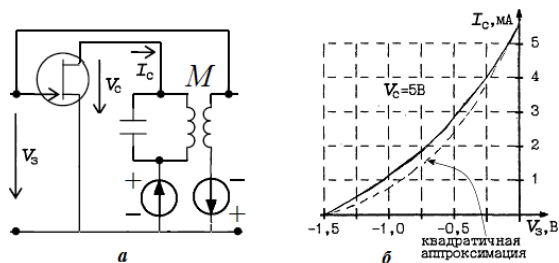


Рис. 13. Автогенератор на полевом транзисторе (*a*), передаточная характеристика полевого транзистора (*б*)

Литература

- 1) Исследование LC -генератора. Методическое пособие по лабораторной работе. Составители: Н. М. Золотухина, Н. О. Соколова. – Рукописный фонд кафедры радиофизики, СПбГПУ, 1984 г. – 18 стр.
- 2) Кацнельсон Б. В., Ларионов А. С. Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги, М.: Энергоиздат, 1981, с. 132.
- 3) Новиков Ю. Н., Усов В. С. Электроника и схемотехника. Полупроводниковые приборы: устройство, принцип действия, применение в усилителях : учеб. пособие /— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 92 с.
- 4) Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высш. шк., 2003. — 462 с.

Контрольные вопросы

1. Обратная связь настолько мала, что автоколебания в генераторе (см. рис. 1) отсутствуют. Почему нувистор горячий? Как оценить мощность, которую рассеивает триод в отсутствии генерации?
2. Объясните необходимость применения дросселя – катушки с большой индуктивностью – в цепи лабораторной установки (см. рис. 1).
3. Какую функцию выполняет конденсатор C_p , включенный в анодную цепь триода (см. рис. 1)?
4. Как измерить добротность колебательного контура?
5. На нувисторе 6С62Н строят LC-генератор (рис. 2). Характеристики триода $I_a(V_c, V_a)$ показаны на рис. 3. Уровни источников питания: $E_a = 120$ В, $E_c = 0,4$ В. Собственная добротность LC-контура $Q = 40$, емкость $C = 500$ пФ, индуктивность $L = 2,25$ мГн. При каком коэффициенте связи $|\beta|$ возможно самовозбуждение?
6. Как повлияет на выполнение условия возбуждения увеличение анодного напряжения при фиксированном напряжении на сетке?
7. Можно ли возбудить колебания в автогенераторе, если напряжение на сетке превышает по модулю напряжение запарирования?
8. Пусть при малом коэффициенте связи (генерации нет) установлена некоторая рабочая точка. Повышаем уровень обратной связи до возникновения колебаний. Как определить, какой режим возбуждения – мягкий или жесткий - обеспечивает данная рабочая точка?
9. Какой должна быть частота синусоидального напряжения внешнего генератора при снятии амплитудных (колебательных) характеристик?
10. По результатам измерений получили график $U_{ag}(|\beta|)$. Как он может измениться, если увеличить емкость конденсатора в анодной цепи?
11. Установлена рабочая точка, отвечающая режиму жесткого возбуждения. Вычислено условие самовозбуждения. До каких значений амплитуды U_c имеет смысл снимать колебательные характеристики резонансного усилителя, чтобы на рассчитанном графике $U_{ag}(|\beta|)$ стационарного режима получился гистерезис?
12. В каком режиме генерации – при мягком или жестком возбуждении – источник анодного напряжения тратит больше энергии?

Программа исследований

Ознакомление с лабораторной установкой: стендом, составом измерительных приборов, набором градуировочных графиков

Сопоставьте принципиальную схему (рис. 14) и лабораторный стенд: элементы цепи, измерительные индикаторы, переключатели, устройства регулировки. В опытах используют лабораторный генератор гармонических колебаний (стандартных сигналов) - ГСС. Частоту колебаний генератора измеряют частотомером, который следует подключить к выходным клеммам ГСС. Для наблюдения колебаний, измерения амплитуд напряжений на сетке и контуре используют двухканальный осциллограф. Им же измеряют частоту автоколебаний. Вход канала I осциллографа подключают к сетке триода, вход канала II – к конденсатору контура. Влияние осциллографа на параметры резонансной системы приходится учитывать. Это сделано при градуировке конденсатора - на градуировочном графике указана совокупная емкость контура при подключенном осциллографе.

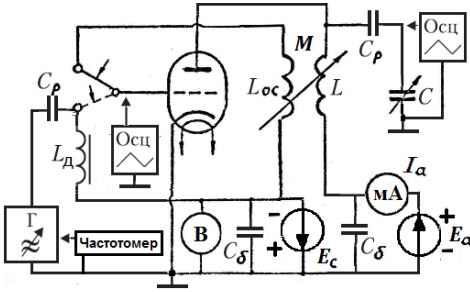


Рис. 14. Схема лабораторного макета LC-генератора

Анодную и сеточную цепи лампы питает встроенный в макет регулируемый источник постоянного напряжения. Предусмотрена подача на анод двух уровней напряжения: $V_{a1} = E_{a1}$ и $V_{a2} = E_{a2}$ ($E_{a1} < E_{a2}$). Сеточное смещение можно плавно регулировать. По ходу исследований потребуются установка двух уровней напряжения на сетке. Пусть $V_{c1} = -E_{c1}$ задает рабочую точку в области высокой крутизны анодно-сеточной характеристики (S), а $V_{c2} = -E_{c2}$ - в области низкой крутизны (очевидно, что $|V_{c1}| < |V_{c2}|$). Для удобства введем обозначения режимов работы триода (рабочих точек): p1 (V_{c1}, V_{a1}) и p2 (V_{c2}, V_{a1}).

Снятие анодно-сеточных характеристик триода, оценка крутизны в рабочих точках для разных режимов генерации

Разомкните обратную связь: переключатель режимов поверните влево (на рис. 14 – нижнее положение ключа). Переменное напряжение на вход не подавайте (контролируйте осциллографом форму напряжения на аноде).

1. Снимите и постройте статические характеристики триода $I_a(V_c)$ при двух значениях анодного напряжения V_a , устанавливая переключателем уровни питания анода E_{a1} и E_{a2} .

2. Вычислите по результатам измерения крутизну и внутреннее сопротивление триода при смещениях на сетке: $V_{c1} = -0,3 \text{ В}$ (рабочая точка p1) и $V_{c2} = -0,5 \text{ В}$ (рабочая точка p2).

Для оценки крутизны и внутреннего сопротивления триода (см. (1)) используйте отношение приращений тока и напряжений.

Исследование свойств резонансного усилителя

Основные цели эксперимента: (а) снять колебательные характеристики резонансного усилителя $K_0(U_c)$ для рабочих точек мягкого и жесткого режимов возбуждения, (б) измерить эквивалентную добротность резонансной системы усилителя, (в) выяснить условия самовозбуждения.

Рабочая точка p1 должна обеспечивать монотонно спадающую кривую $K_0(U_c)$ (мягкий режим), для p2 должна получиться кривая с экстремумом - случай жесткого режима (см. рис. 11). Если по результатам эксперимента данное качественное отличие кривых для выбранных рабочих точек не проявится, следует скорректировать рабочие точки.

3. Постройте резонансный усилитель (рис. 15)

Разомкните цепь обратной связи (переключатель режимов в левом положении), к входу цепи подключите ГСС и установите диапазон частот –

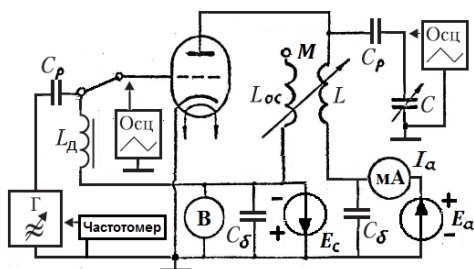


Рис. 15. Резонансный усилитель

сотни килогерц. Установите ручку настройки переменного конденсатора в определенное положение и сохраняйте его на протяжении всего исследования. Подайте питание и установите рабочую точку p1. Переменные напряжения наблюдайте на осциллографе, подавая сеточное напряжение на канал I, анодное – на канал II.

4. Снимите и постройте колебательную характеристику $K_0(U_c)$ для случая мягкого режима (рабочая точка p1).

Генератор настройте по максимальному уровню выходного напряжения на центральную частоту полосы пропускания усилителя. Амплитуду сеточного напряжения увеличивайте от 100 мВ до значений, при которых $K_0(U_c)$ упадет примерно на 20% значения, зафиксированного на левом краю графика (при малых U_c). По ходу измерений зафиксируйте уровень U_c , начиная с которого постоянное напряжение на сетке изменяется.

5. Измерьте полосу пропускания и центральную частоту АЧХ резонансного усилителя. Вычислите эквивалентную добротность резонансной системы усилителя.

Частотомер работоспособен, если обеспечена достаточная интенсивность колебаний на его входе. Однако измерения полосы пропускания (добротности) следует выполнять, соблюдая условия малосигнального приближения, - чтобы усилитель работал в линейном режиме (не искажал сигнал). Поэтому целесообразно, плавно регулируя мощность колебаний на выходе генератора, добиться состояния, при котором частотомер начинает адекватно реагировать на изменения частоты. После этого можно измерять полосу пропускания и центральную частоту АЧХ усилителя.

6. Снимите и постройте колебательную характеристику $K_0(U_c)$ для случая жесткого режима (рабочая точка р2).

7. Измерьте полосу пропускания и центральную частоту АЧХ резонансного усилителя. Вычислите эквивалентную добротность резонансной системы усилителя.

Исследование режимов автоколебаний

Основные цели эксперимента: реализовать генерацию в разных режимах (р1 и р2), выяснить форму, частоту, амплитуду автоколебаний при изменении глубины обратной связи, проверить условия самовозбуждения, сопоставить результаты решения уравнения баланса амплитуд с результатами измерений.

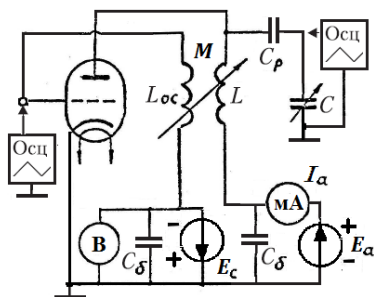


Рис. 16. LC-генератор

8. Постройте генератор (рис. 16).

Замкните цепь обратной связи (переключатель режимов поверните направо). Регулировку обратной связи установите в положение »0«. Подключите канал I осциллографа к сеточной цепи, канал II – к анодной. Подайте питание и установите рабочую точку р1.

9. Плавно изменяя глубину обратной связи, добейтесь возбуждения колебаний. Выясните по градуировочному графику для $|\beta|$ значение коэффициента обратной связи, при котором возникают автоколебания. Измерьте осциллографом их частоту. Снимите осциллограммы сеточного и анодного напряжений.

10. Снимите и постройте графики амплитуд сеточного и анодного напряжений от коэффициента обратной связи $|\beta|$ для случая мягкого режима (рабочая точка р1).

Амплитуды сеточного (U_{cg}) и анодного (U_{ag}) напряжений измеряйте осциллографом.

11. Установите для триода рабочую точку р2. Реализуйте генерацию в режиме жесткого самовозбуждения. Убедитесь, что авто-

колебания возникают и срываются при разных значениях коэффициента обратной связи $|\beta|$.

12. Снимите и постройте графики амплитуд сеточного и анодного напряжений от коэффициента обратной связи $|\beta|$ для случая жесткого режима (рабочая точка p2).

13. Сопоставьте ожидаемые (из условий самовозбуждения, колебательных характеристик) и экспериментальные значения коэффициентов обратной связи $|\beta|$, при которых возникают и срываются автоколебания для обоих режимов.

|| При вычислениях условий самовозбуждения пользуйтесь данными исследований резонансного усилителя для рабочих точек p1, p2 и параметрами цепи, приведенными на стенде.

14. Решите уравнения баланса амплитуд для нескольких значений коэффициента обратной связи и нанесите вычисленные значения амплитуд U_{cg} и U_{ag} на экспериментальные кривые для обоих режимов генерации.

На этом экспериментальная часть работы заканчивается. Протокол измерений включите в состав отчета. В отчете приведите результаты измерений и расчетов, объясните результаты исследования, изложите ваши выводы по итогам лабораторной работы.

НОВИКОВ Юрий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИОДНОГО ГЕНЕРАТОРА
ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Редактор *О. К. Чеботарева*

Технический редактор *А. И. Колодяжная*

Оригинал-макет подготовлен автором

Директор Издательства Политехнического университета *А. В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т.2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать __. __. 2013. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России. Адрес
университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.