

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

Кафедра Физики колебаний

СПЕЦПРАКТИКУМ

## **ГЕНЕРАТОР ТОМСОНА**

(Исследование автоколебательной системы  
томсоновского типа)

Описание задачи спецпрактикума для студентов 3-4 курсов

Составитель: В.Б.Волошинов

Москва - 2010

# ГЕНЕРАТОР ТОМСОНА

При выполнении задачи изучаются различные режимы работы автоколебательной системы томсоновского типа. Исследование проводится квазилинейным методом.

## 1. Введение

Генератором томсоновского типа является автоколебательная система, состоящая из добротного колебательного контура, источника энергии и механизма, регулирующего поступление энергии из источника в колебательную систему. Если затухание в системе мало, а убыль энергии за период незначительна по сравнению с полным запасом колебательной энергии, то и поступающая за период от источника энергия невелика по сравнению с энергией, запасенной в колебательной системе.

Автоколебательные системы, в которых выполняются указанные выше условия, генерируют колебания по форме и частоте мало отличающиеся от собственных колебаний в линейной консервативной системе. Поэтому они называются автоколебательными системами почти гармонических колебаний или *системами томсоновского типа*.

На Рис.1 изображена принципиальная схема генератора Томсона, использующего полевой транзистор. Как и в любой электрической цепи, в данной системе существуют случайные, хаотические процессы. Именно флуктуации возбуждают в контуре собственные колебательные движения. Возникающие из-за этого колебания тока стока транзистора, играющего роль усилителя, оказывают обратное воздействие на колебания в контуре. Такое воздействие обусловлено индуктивной связью между катушками индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ . В итоге, при правильном подборе знака коэффициента взаимоиנדукции  $M$  убыль колебательной энергии в контуре восполняется. Указанное обратное воздействие называется *обратной связью*. При этом наличие обратной связи является характерным свойством автоколебательных систем. Если величина обратной связи достаточно велика, то подкачка энергии в контуре может превысить потери в нем. В этом случае колебания, возникающие в контуре, нарастают. Однако, нарастание колебаний не может быть беспредельным, так как вольт-амперная характеристика транзистора линейна лишь на ограниченном участке. Иными словами, транзистор не может одинаково хорошо усиливать сигналы и с малой, и с большой амплитудой.

При непрерывном увеличении амплитуды напряжения на затворе транзистора, амплитуда колебаний тока стока растет все медленней. С

нарастанием амплитуды колебаний в контуре и усиление, обеспечиваемое транзистором, и величина энергии, поступающей в контур через обратную связь, неизбежно уменьшаются. В итоге, при достижении определенной амплитуды колебаний количество энергии, поступающей в контур из цепи стока, перестает компенсировать убыль энергии в нем. Поэтому дальнейшее возрастание колебаний в системе прекращается, и в генераторе устанавливается режим стационарных автоколебаний.

Амплитуда автоколебаний во всякой автоколебательной системе ограничивается нелинейным элементом. В генераторе Томсона подобным нелинейным элементом является транзистор. В зависимости от характера нелинейности может наблюдаться *мягкий* или *жесткий режим* генерации томсоновской системы. Целью данной задачи является теоретическое и экспериментальное исследование мягкого и жесткого режимов генерации, а также расчет этих режимов квазилинейным методом *колебательных характеристик*. В этом методе вводится понятие "*средней крутизны*" нелинейной характеристики. Принципиальным моментом является то, что средняя крутизна транзистора зависит от амплитуды колебаний.

## 2. Теоретическая часть

Уравнения Кирхгофа для колебательного контура с параметрами  $L_1$ ,  $C_1$  и  $R_1$ , включенного в цепь затвора полевого транзистора (Рис.1), имеет вид:

$$L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i + \frac{1}{C_1} \int i dt = V_H, \quad (1)$$

где  $i$  - ток в контуре,  $V_H$  - напряжение, наведенное в контуре цепью обратной связи. Это напряжение равно  $V_H = -M (dI / dt)$ , где  $M$  - коэффициент взаимной индукции,  $I$  переменная составляющая тока стока транзистора. Ток в контуре следующим образом связан с напряжением на конденсаторе  $i = C_1 (dV / dt)$ , поэтому соотношение (1) можно записать в виде:

$$\ddot{V} + \frac{R_1}{L_1} \dot{V} + \frac{V}{L_1 C_1} = - \frac{M}{L_1 C_1} \dot{I}, \quad (2)$$

где  $V$  - переменная составляющая напряжения на конденсаторе. Производная от тока в правой части соотношения (2) может быть записана в виде:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dV} \dot{V} \quad (3)$$

В связи с тем, что напряжение на конденсаторе  $V$  отличается от напряжения на затворе  $V_3$  лишь на постоянную величину  $V_=-$ , называемую напряжением *смещения*, т.е.  $V_3 = V + V_=-$ , то соотношение (3) можно представить в следующем виде:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI}{dV_3} \dot{V} \quad (4)$$

Вольтамперная характеристика транзистора  $I_=(V_=-)$  показана на Рис. 2. В соотношении (4) величина  $dI / dV_3$  определяет *крутизну* вольт-амперной характеристики транзистора и является нелинейной функцией напряжения на затворе:

$$\frac{dI}{dt} = S(V_3) \dot{V} \quad (5)$$

С учетом соотношения (5) уравнение (2) можно записать в виде

$$\ddot{V} + \frac{1}{L_1} \left[ R_1 - \frac{|M| S(V_3)}{C_1} \right] \dot{V} + \omega^2 V = 0, \quad (6)$$

где  $\omega^2 = \frac{1}{L_1 C_1}$  - квадрат собственной частоты контура. Это уравнение

отличается от уравнения линейного консервативного контура присутствием нелинейного члена:

$$\frac{1}{L_1} \left[ R_1 - \frac{|M| S(V_3)}{C_1} \right] \dot{V} = 2\delta \dot{V}, \quad (7)$$

который учитывает затухание в системе и действие обратной связи. Если исследуемый генератор относится к классу генераторов почти гармонических колебаний, то затухание контура и величина обратной связи мала. Поэтому член  $2\delta \dot{V}$  в соотношении (7) оказывается значительно меньше других слагаемых уравнения (6). В первом приближении это позволяет искать

решение уравнения (6) в виде гармонического колебания. Частота этого колебания равна собственной частоте колебательной системы генератора без затухания, т.е. частоте контура.

Уравнение (6) позволяет найти условие самовозбуждения автоколебательной системы, определить амплитуду стационарных колебаний, а также исследовать ее устойчивость. Для нахождения условия самовозбуждения следует рассмотреть вольт-амперную характеристику транзистора. В первом приближении эту характеристику можно аппроксимировать линейной зависимостью:

$$I = I_0 + S_0 V_3 . \quad (8)$$

В этом случае значение  $S$  определяется наклоном касательной к характеристике транзистора в рабочей точке, то есть  $S = S_0 = const$ . Если окажется, что

$$\delta < 0 \quad \text{т.е.} \quad R_1 < \frac{|M|}{C_1} S_0 , \quad (9)$$

то в соответствии с уравнением (6) в генераторе возникают нарастающие колебания. Таким образом, соотношение (9) является условием самовозбуждения генератора. Следует отметить, что это условие получено без учета нелинейности вольт-амперной характеристики транзистора.

Амплитуды автоколебаний находятся из решения нелинейного уравнения (6). Для решения этого уравнения можно использовать *квазилинейный метод*, получивший широкое распространение в радиофизике при расчете параметров генераторов электрических колебаний томсоновского типа.

Основное влияние на поведение автоколебательной системы оказывают лишь первая гармоническая составляющая тока стока транзистора. Это объясняется резонансными свойствами контура, имеющего высокую добротность и отсекающего сигналы на гармониках. Поэтому можно пренебречь всеми остальными гармоническими составляющими тока и ввести понятие *средней крутизны* вольт-амперной характеристики транзистора. Средняя крутизна определяется как отношение амплитуды первой гармонической составляющей тока стока  $I_0^1$  к амплитуде синусоидального напряжения на затворе  $V_0$ :

$$S = \frac{I_0^1}{V_0} . \quad (10)$$

Очевидно, что средняя крутизна  $\bar{S}$  является функцией только амплитуды  $V_0$ , а не мгновенного значения напряжения на затворе  $V_3$ . Введение понятия средней крутизны позволяет заменить нелинейное уравнение (6) квазилинейным уравнением следующего вида:

$$\ddot{V} + \frac{1}{L_1} \left[ R_1 - \frac{|M| \bar{S}(V_0)}{C_1} \right] \dot{V} + \omega^2 V = 0 . \quad (11)$$

Нелинейность уравнения (6) учтена в соотношении (11) зависимостью крутизны  $\bar{S}$  от амплитуды колебаний  $V_0$ . В стационарном режиме диссипативный член уравнения (11) равен нулю:

$$\left[ R_1 - \frac{|M| \bar{S}(V_0)}{C_1} \right] = 0 , \quad (12)$$

Таким образом, получено уравнение для определения стационарных амплитуд и анализа их устойчивости. Решение этого уравнения удобно искать графическим методом, нанося на один и тот же рисунок зависимость

$y = \bar{S}(V_0)$  и прямую  $y = \frac{R_1 C_1}{|M|}$ . Пересечение кривой линии и прямой,

параллельной оси напряжений определяет возможные стационарные амплитуды в автоколебательной системе.

Характер зависимости  $\bar{S}$  от  $V_0$  определяется выбором рабочей точки на вольт-амперной характеристике транзистора, т.е. величиной постоянного напряжения  $V_{\text{=}}$ .

### **1. Мягкий режим работы автоколебательной системы**

Если выбрать рабочую точку (постоянное напряжение смещения  $V_{\text{=}}$ ) в середине участка вольт-амперной характеристики с максимальной крутизной  $S$ , то зависимость  $\bar{S}(V_0)$  будет представлять монотонно убывающую функцию, как показано на Рис. 3,а. В этом случае при заданных параметрах

контура  $R_1$ ,  $C_1$  и  $|M|$  существует единственная стационарная амплитуда  $V_{01}$ . Легко показать, что эта амплитуда является устойчивой. Действительно, если по какой либо причине амплитуда колебаний возрастает, то разность слагаемых при производной  $\dot{V}$  в уравнении (11) становится положительной. Следовательно, колебания будут затухать до тех пор, пока не установится стационарное значение амплитуды  $V_{01}$ . При случайном уменьшении амплитуды колебаний коэффициент при члене  $\dot{V}$  в соотношении (11) становится отрицательным. Это приводит к нарастанию колебаний до установления стационарной амплитуды  $V_{01}$ .

При уменьшении коэффициента взаимоиנדукции  $M$  и прочих постоянных параметрах стационарная амплитуда плавно уменьшается до нуля. Это происходит при некотором значении  $M = |M_{\text{ср}}|$ . Если величина связи  $|M|$  увеличивается, то колебания возникают при  $|M_{\text{возб}}| = |M_{\text{ср}}|$ . Подобный режим работы автоколебательной системы называется *мягким режимом*.

## 2. Жесткий режим работы автоколебательной системы

При выборе рабочей точки в нелинейной части вольт-амперной характеристики зависимость крутизны  $\bar{S}(V_0)$  уже не является монотонной. При некоторой амплитуде  $V_{0\text{ср}}$  она имеет максимум, как показано на Рис. 3,б. Из этого рисунка видно, что при заданных параметрах  $R_1$ ,  $C_1$  и  $|M|$  может существовать две стационарные амплитуды. Можно показать, что амплитуда  $V_{01}$  неустойчива, в то время как колебания с амплитудой  $V_{02}$  являются устойчивыми.

Пусть в начальный момент времени в системе происходят колебания с Амплитудой  $V_{02}$ . Тогда при уменьшении связи  $|M|$  их амплитуда тоже уменьшается. Срыв колебаний имеет место при значении  $|M_{\text{ср}}|$ , соответствующем касанию прямой  $y = \frac{R_1 C_1}{|M|}$  и кривой  $\bar{S}(V_0)$ .

Амплитуда колебаний скачком падает от конечного значения  $V_{02} = V_{0\text{cp}}$  до нуля. В случае последующего увеличения  $|M|$  колебания возникнут не сразу, а лишь при достижении значения  $|M_{\text{возб}}| = \frac{R_1 C_1}{S(0)}$ , так как при этом значении коэффициента связи  $|M|$  становится неустойчивым состояние покоя системы. Следовательно, в рассматриваемом случае  $|M_{\text{cp}}|$  и  $|M_{\text{возб}}|$  различны. Возбуждение колебаний происходит с конечной амплитудой  $V_0 = V_{0\text{возб}}$ .

В области значений  $|M_{\text{cp}}| < |M| < |M_{\text{возб}}|$  наличие или отсутствие колебаний в системе зависит от предыстории. В этой области для возбуждения колебаний не достаточно малых флуктуаций в колебательной системе, так как состояние покоя  $V_0 = 0$  является устойчивым, то есть  $|M| < \frac{R_1 C_1}{S(0)}$ . Колебания могут быть возбуждены лишь относительно большим толчком, при котором напряжение  $V_0$  превышает значение  $V_{01}$ . Если такой толчок имеет место, то в системе устанавливается режим устойчивых колебаний с амплитудой  $V_{02}$ . Рассмотренный режим работы автоколебательной системы называется *жестким режимом*.

В заключение необходимо отметить, что информация о характере зависимости средней крутизны  $\bar{S}(V_0)$  является достаточной для определения основных параметров генератора, обеспечивающих устойчивые колебания с заданной амплитудой.

При выполнении данной задачи предлагается экспериментально получить *мягкий* и *жесткий режимы* генерации, определить параметры системы и проверить правильность изложенной выше теории.

### 3. Описание экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки показана на Рис. 4. Экспериментальная установка состоит из блока генератора (1), блока резонансного усилителя (2) и блоков эмиттерных повторителей (3), (4) и (5). Схема экспериментальной установки показана на Рис.5. Исследуемый

генератор собран на полевом транзисторе КП 302А (VT1). Колебательный контур  $L_1$  и  $R_1$  подключен к затвору полевого транзистора через разделительную емкость. Значения электрических параметров контура  $C_1 = 10000$  пФ и  $R_1 = 5$  Ом. Контур настроен на резонансную частоту, лежащую в пределах  $f = 120 - 170$  кГц. Он индуктивно связан с катушкой обратной связи  $L_2$ . С помощью переменного резистора  $R_2$  на затвор транзистора подается постоянное напряжение смещения, которое может регулироваться в пределах от нуля  $V_- = 0$  до  $V_- = -2,5$  В. Это напряжение измеряется с помощью вольтметра PV, размещенного в корпусе установки. Для измерения величины постоянного тока стока транзистора  $I_-$  используется миллиамперметр РА, расположенный на лицевой панели прибора рядом с вольтметром.

Величина обратной связи в схеме генератора изменяется следующим образом. В цепь стока транзистора включен переменный резистор  $R_3$ . Падение напряжения на этом резисторе равно  $U_1 = IR_3$ , где  $I$  - ток стока. Часть этого напряжения  $U_2 = \alpha I R_3$ , где  $0 \leq \alpha \leq 1$ , подается на вход эмиттерного повторителя (4) на транзисторе VT2 (см. Рис.4 и Рис.5). Так как коэффициент передачи повторителя близок единице, то напряжение на нагрузке повторителя приблизительно равно  $U_2$ .

Сопротивление резистора  $R_4$  выбирается равным  $R_3$ , поэтому ток эмиттерного повторителя при  $R_5 \ll R_4$  равен:

$$i_{\text{ЭМИТ. ПОВТ.}} \approx U_2 / R_4 .$$

Катушка связи включена таким образом, что через нее проходит ток  $i_{\text{ЭМИТ. ПОВТ.}}$ , поэтому ЭДС, наводимая на катушке индуктивности  $L_1$ , записывается в виде:

$$V_H = M \frac{di_{\text{ЭМИТ. ПОВТ.}}}{dt} = M \frac{d(\alpha I)}{dt} = \alpha M \frac{dI}{dt} .$$

Из последнего соотношения видно, что изменение параметра  $\alpha$  при перемещении движка переменного сопротивления  $R_3$  (см. Рис.5) эквивалентно изменениям коэффициента связи  $M$ . Ось переменного резистора  $R_3$  выведена на переднюю панель установки и снабжена лимбом, по которому отсчитывается значение  $\alpha$  (100 делений шкалы соответствуют  $\alpha = 1$ ). При расчете амплитуды колебаний во все формулы

вместо  $M$  необходимо подставить величину  $\alpha M$ . В свою очередь, величина связи  $M$  постоянна, и ее значение известно  $M = 0,03$  мГн.

Напряжение с контура генератора поступает на эмиттерный повторитель (3), собранный на транзисторе VT5. Это напряжение измеряется на выходе повторителя (клемма Ш3) осциллографом или вольтметром.

Величина первой гармоники переменной составляющей тока стока транзистора измеряется при использовании резонансного усилителя (2) на транзисторе VT3 (см. Рис.4 и Рис.5). Контур усилителя настроен на ту же частоту, что и контур генератора. На вход резонансного усилителя подается напряжение с сопротивления  $R_5 = 27$  Ом, пропорциональное току стока транзистора  $U_{вх} = \alpha I R_5$ . При измерениях переменной составляющей значение  $\alpha$  на движке переменного сопротивления следует установить равным  $\alpha = 1$  (100 делений шкалы). Усиленный резонансным усилителем сигнал поступает на вход эмиттерного повторителя (5), собранного на транзисторе VT4, и измеряется на его входе (клемма Ш4) осциллографом или вольтметром.

#### 4. Экспериментальное задание

1. Ознакомиться с установкой, используя схему на Рис.4 и Рис.5.
2. Измерить статическую вольт-амперную характеристику транзистора КП302А, т.е. зависимость постоянного тока стока транзистора  $I_{\underline{}}$  от постоянного напряжения смещения на затворе  $V_{\underline{}}$ . Контур при этих измерениях необходимо закоротить. Для этого переключатель П1 (см. схему установки на Рис.5) переводится в положение 3. Резонансный усилитель при проведении измерений должен быть отключен от генератора, для чего переключатель П2 устанавливается в положение 3. Характеристику транзистора представить в виде графика.
3. Измерить зависимость параметра  $\alpha M_{ср}$  и  $\alpha M_{возб}$  от положения рабочей точки  $V_{\underline{}}$  на характеристике полевого транзистора. Для этого необходимо зарегистрировать те значения параметра  $\alpha$  на лимбе движка переменного сопротивления  $R_3$ , при которых возникают или срываются автоколебания в системе. Определить области *мягкого* и *жесткого режимов* генерации. Экспериментальные кривые зависимости  $\alpha M_{ср}$  и  $\alpha M_{возб}$  нанести на один и тот же график. Возбуждение и срыв генерации регистрируется с помощью осциллографа, подключенного к выходу

эмиттерного повторителя (3), т.е. к клемме Ш3. Напряжение смещения на транзисторе  $V_{\text{э}}$  изменяется с шагом 0,1 В. При проведении измерений переключатель П1 устанавливается в положение 2.

4. Измерить зависимости амплитуды генерации  $V_0$  (клемма Ш3) от величины обратной связи  $\alpha M$  в *мягком* и *жестком* режимах генерации. Выбор двух рабочих точек на вольт-амперной характеристике транзистора провести с использованием результатов измерений в п.3. В *жестком* режиме генерации зарегистрировать гистерезисные области зависимости амплитуды генерации  $V_0$  от величины обратной связи  $\alpha M$ . Амплитуда генерации  $V_0$  на клемме Ш3 измеряется осциллографом или вольтметром.

5. Определить коэффициент усиления резонансного усилителя  $K$ . Для этого на вход усилителя (2), т.е. на клемму Ш2 подается сигнал от вспомогательного генератора с амплитудой сигнала не более 0,1 В. При измерениях ключ П2 устанавливается в положении 3, а контур должен быть закорочен (переключатель П1 переводится в положение 3). Сигнал на выходе резонансного усилителя (клемма Ш4) измеряется осциллографом. При выполнении упражнения определяется резонансная частота усилителя и на этой частоте измеряется коэффициент усиления.

6. Наблюдать форму тока стока полевого транзистора. Форма тока стока наблюдается с помощью осциллографа, подключенного к клемме Ш2. Переключатель П1 устанавливается в положение 3, а переключатель П2 переводится в положение 2. На вход транзистора (клемма Ш1) подается сигнал от вспомогательного генератора. При выполнении упражнения наблюдать изменение формы тока стока транзистора от напряжения смещения  $V_{\text{э}}$ , а также от величины амплитуды синусоидального сигнала, подающегося от вспомогательного генератора. Наблюдаемые осциллограммы необходимо зарисовать.

7. Измерить зависимость средней крутизны  $\bar{S}(V_0)$  от амплитуды колебаний на затворе транзистора. При измерениях выбрать те же рабочие точки на характеристике транзистора, которые были использованы в п.4 данного задания. Для выполнения упражнения на затвор транзистора (клемма Ш1) подается напряжение от вспомогательного генератора. Частота этого напряжения выбирается равной резонансной частоте усилителя. Контур генератора при этом должен быть закорочен (переключатель П1 устанавливается в положении 3), а переключатель П2 переводится в положение 2. Движок потенциометра  $R_3$  устанавливается в положение  $\alpha = 1$  (100 делений шкалы). Выходное напряжение  $U_4$  на клемме Ш4 измеряется катодным вольтметром. Амплитуда синусоидального сигнала от

вспомогательного генератора на клемме Ш1 изменяется в пределах от 0,1 В до 2,0 В с шагом 0,1 В.

Зная коэффициент усиления резонансного усилителя  $K$ , величину напряжения на его выходе  $U_4$  и значение сопротивления  $R_5 = 27$  Ом, по формуле  $I_0^1 = U_4 / KR_5$  можно найти величину первой гармонической составляющей тока стока транзистора. При известном токе стока легко рассчитывается средняя крутизна  $\bar{S}(V_0)$ .

8. На основании данных измерений средней крутизны построить зависимость амплитуды колебаний  $V_0$  в *мягком* и *жестком* режимах от величины параметра  $\alpha M$ . Эти две кривые необходимо сравнить с экспериментальными данными, полученными в п. 4 данного задания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С.П.Стрелков. Введение в теорию колебаний, "Наука", 1964 г.
2. В.В.Мигулин, В.И.Медведев, Е.Р.Мустель, В.Н.Парыгин. Основы теории колебаний, "Наука", 1988 г.
3. К.Ф.Теодорчик. Автоколебательные системы, ГТТИ, 1952 г.

#### Контрольные вопросы:

1. Какие автоколебательные системы называются системами томсоновского типа? Можно ли лазер рассматривать как автоколебательную систему?
2. Как объяснить существование при *жестком* режиме генерации гистерезисных областей на графике зависимости амплитуды автоколебаний от величины обратной связи? Почему при *мягком* режиме работы системы такая же зависимость является монотонной?
3. Каков механизм ограничения амплитуды автоколебаний генератора томсоновского типа? Каким образом эта амплитуда зависит от характеристик активного элемента, т.е. полевого транзистора?

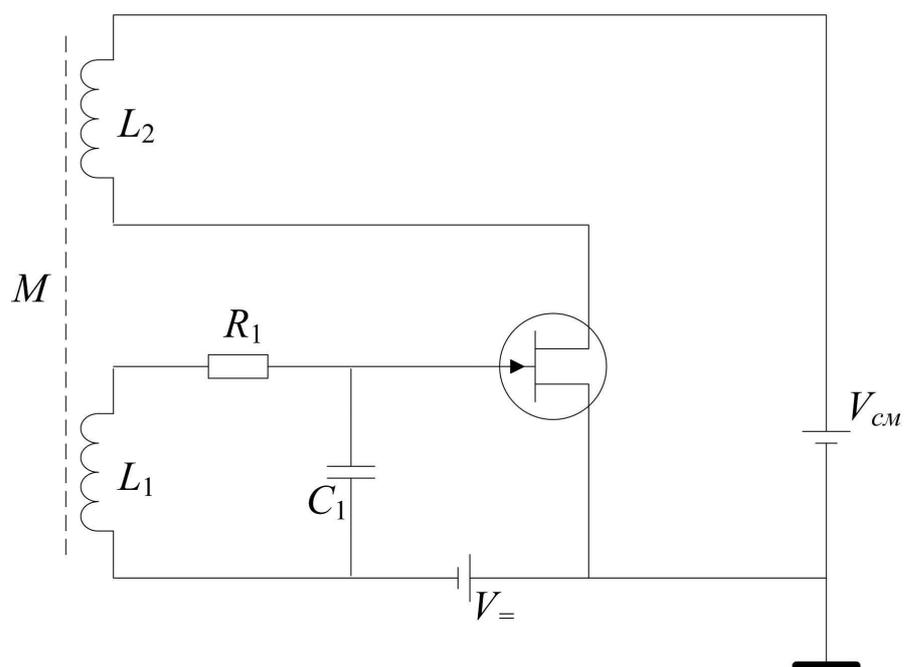


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

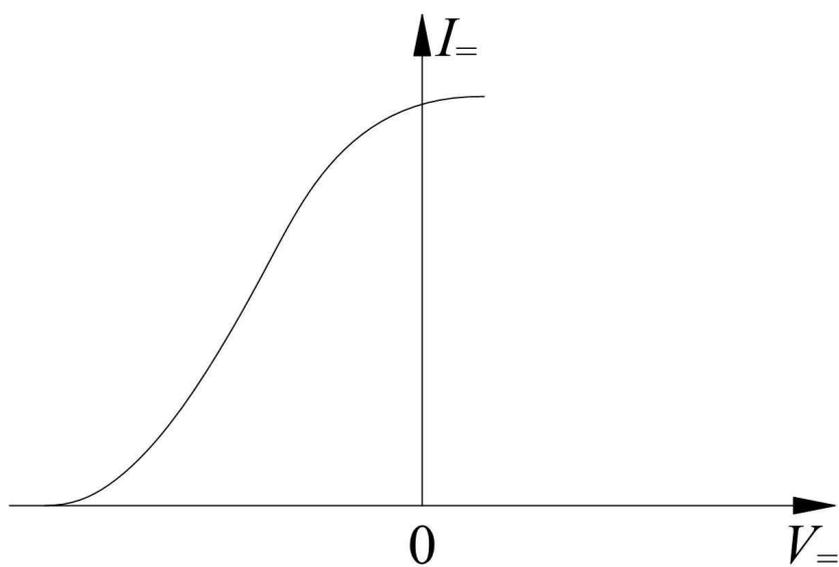


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика транзистора

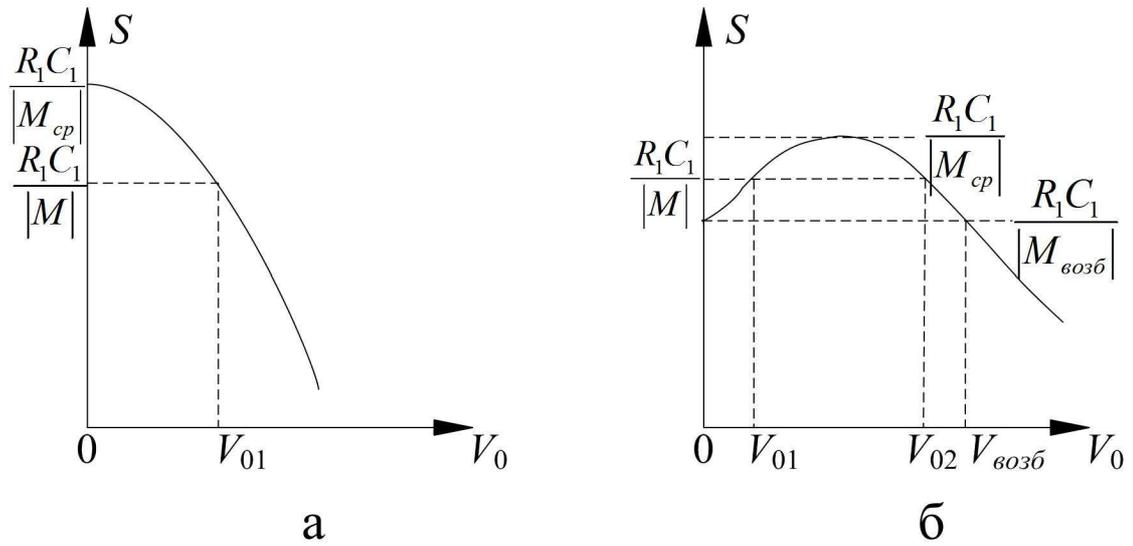


Рис. 3. Зависимость средней крутизны транзистора от амплитуды колебаний на его затворе: а - мягкий режим; б - жесткий режим

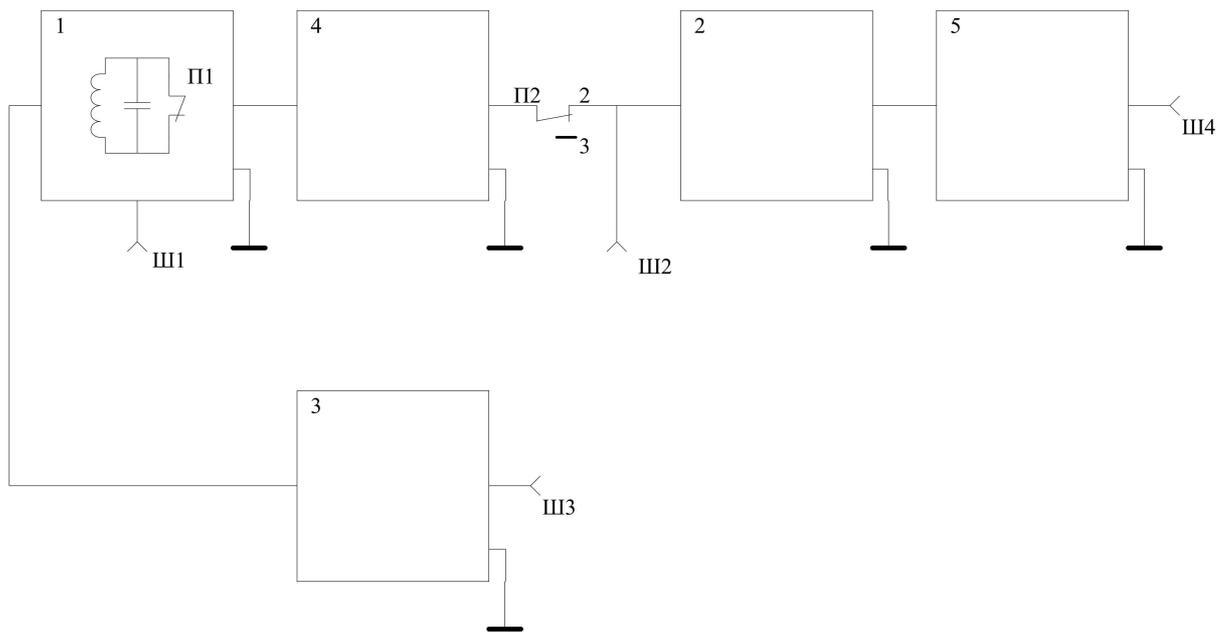


Рис. 4. Блок-схема установки

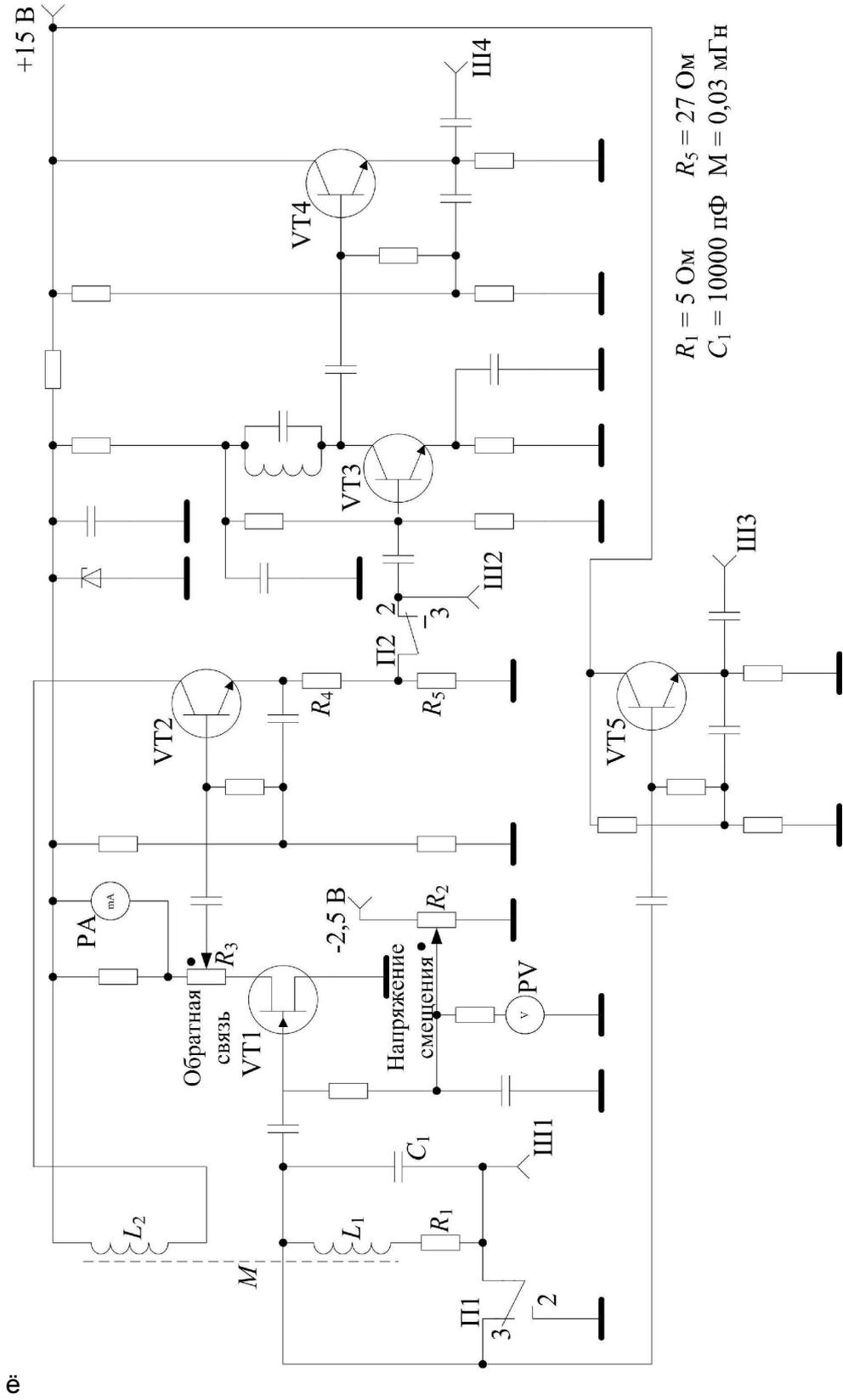


Рис.5 Электрическая схема установки

Ф: