

Лабораторная работа № 8

Исследование усилителя на полевом транзисторе в схеме с общим истоком

Цель работы: изучение полевых транзисторов; построение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевых транзисторов; определение параметров полевых транзисторов по построенным ВАХ; расчёт и исследование усилительного каскада на полевом транзисторе в схеме с общим истоком.

8.1. Краткие теоретические сведения

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем (отсюда и название – *полевой*). Действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности, поэтому полевые транзисторы называют также униполярными.

По способу создания проводящего канала различают полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом, имеющие объёмный канал, и со структурой металл – диэлектрик (окисел) – полупроводник (МДП- или МОП-транзисторы), имеющие приповерхностный канал (встроенный или индуцированный). В зависимости от электропроводности полупроводника проводящий канал может быть n -типа или p -типа.

Полевой транзистор с управляющим переходом (ПТУП) представляет собой пластину полупроводникового материала, в центральной части которой имеется область с проводимостью противоположной проводимости проводящего канала. Электрод, подключённый к этой области, называется затвором (Z). Между затвором и проводящим каналом образуется $p-n$ -переход, обеднённый слой которого расположен в основном в объёме проводящего канала, имеющего гораздо меньшую концентрацию примеси. На торцах проводящего канала расположены два электрода. Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют истоком (I), а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют стоком (C). На рисунке 8.1 показаны структура ПТУП с проводящим каналом n -типа и условные обозначения ПТУП с проводящими каналами разных типов.

В основе работы ПТУП лежит изменение площади поперечного сечения проводящего канала при подаче на $p-n$ -переход управляющего напряжения ($U_{ЗИ}$), смещающего его в обратном направлении. На рис. 8.1, а показаны полярности прикладываемых напряжений и направления токов соответствующие рабочему режиму работы транзистора. При $U_{ЗИ} = 0$ и $U_{СИ} \neq 0$ через проводящий канал протекает ток стока, называемый начальным: $I_{C\text{нач}}$. При увеличении обратного напряжения $U_{ЗИ}$ увеличивается ширина $p-n$ -перехода и соответственно уменьшается площадь поперечного сечения проводящего канала. Уменьшение площади поперечного сечения проводящего канала влечёт увеличение его сопротивления, что приводит к уменьшению тока стока I_C при неизменном и отличном нуля напряжении между стоком и истоком $U_{СИ}$. В цепи затвора при этом протекает малый обратный ток (входное сопротивление до $10^7 \dots 10^9$ Ом). При некотором обратном напряжении, называемом напряжением отсечки ($U_{ЗИ\text{отс}}$) канал может быть полностью перекрыт, и в цепях стока и истока начнут протекать малые обратные токи. При напряжении $U_{ЗИ} = 0$, площадь поперечного сечения проводящего канала мак-

симальна, а его сопротивление минимально. Прямое напряжение на $p-n$ -переход не подают, так как в этом случае теряется возможность управления током стока, появляется входной ток, что приводит к значительному уменьшению входного сопротивления.

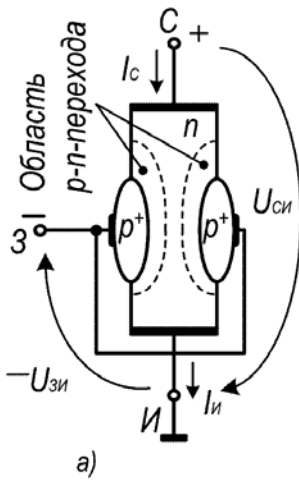


Рис.8.1 Структура (а) и УГО ПТУП с каналом n - (б) и p -типа (в)

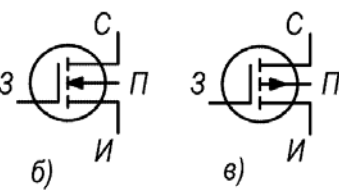
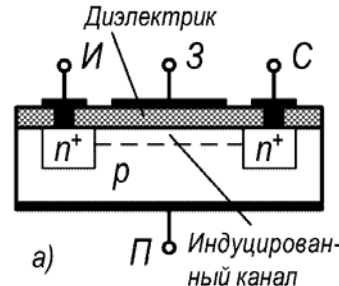
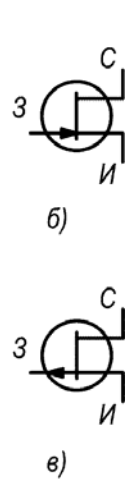


Рис.8.2 Структура (а) и УГО ПТИЗ с индуцированным каналом n - (б) и p -типа (в)

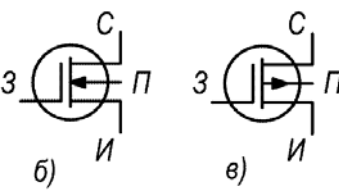
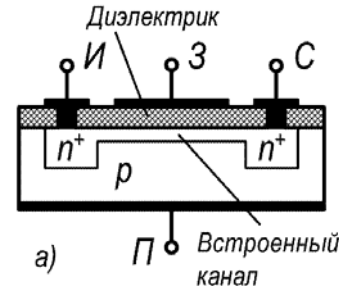


Рис.8.3 Структура (а) и УГО ПТИЗ со встроенным каналом n - (б) и p -типа (в)

МОП-транзисторы. В МОП-транзисторах электрод затвора изолирован от канала слоем диэлектрика (обычно это окисел – SiO_2), поэтому эти транзисторы называют также *полевыми транзисторами с изолированным затвором (ПТИЗ)*. Благодаря такой структуре входное сопротивление ПТИЗ достигает $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом. Различают две разновидности ПТИЗ – с *индуцированным* (наведённым полем) и со *встроенным* каналом.

ПТИЗ с индуцированным каналом n -типа (рис. 8.2, а) содержит две сильно легированные n^+ -области истока (И) и стока (С), созданные в исходной полупроводниковой пластине кремния p -типа, которая называется подложкой (П). Поверхность подложки покрыта слоем диэлектрика, поверх которого нанесена тонкая металлическая плёнка (обычно из алюминия), служащая затвором (З).

Так как высоколегированные n^+ -области истока и стока с полупроводником подложки p -типа образуют $p-n$ -переходы, то при любой полярности напряжения сток – исток один из этих переходов оказывается включенным в обратном направлении и препятствует протеканию тока канала, следовательно, между истоком и стоком отсутствует токопроводящий канал. При подаче на затвор положительного относительно истока напряжения к поверхности полупроводника притягиваются дополнительные электроны а дырки выталкиваются из этой области – подзатворная область *обогащается* электронами. При некотором положительном *пороговом напряжении* на затворе относительно истока ($U_{зи\ пор.} > 0$) в приповерхностной области подложки p -типа образуется (*индуцируется*) слой с инверсным типом проводимости (на рис. 8.2, а показан штриховой линией). Это слой соединяет n^+ -области истока и стока и формирует между ними токопроводящий канал n -типа.

ПТИЗ со встроенным каналом конструктивно отличается от транзистора с индуцированным каналом тем, что канал формируется на этапе изготовления транзистора путём легирования транзистора. На рис.8.3, а показана структура ПТИЗ с каналом n -типа. По

принципу действия этот транзистор аналогичен ПТИЗ с индуцированным каналом. Однако, ввиду наличия проводящего канала через транзистор будет протекать ток $I_{C \text{ нач.}}$ и при нулевой разности потенциалов между истоком и затвором. При отрицательном напряжении между истоком и затвором ($U_{ЗИ} < 0$) поле затвора выталкивает электроны из канала в подложку p -типа. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается и ток стока уменьшается. Такой режим называют *режимом обеднения*. Если на затвор подано напряжение $U_{ЗИ} > 0$, то подзатворная область *обогащается* электронами и ток стока увеличивается.

Подобно биполярным транзисторам полевой транзистор можно включить по одной из трёх схем: с общим истоком (ОИ – аналогична схеме с ОЭ), с общим стоком (ОС – аналогична схеме с ОК) и общим затвором (ОЗ – аналогична схеме с ОБ). Последняя схема (ОЗ) в усилительных устройствах практически не используется ввиду малости входного сопротивления и отсутствия усиления тока. Наибольшее усиление мощности обеспечивает схема с ОИ. Схема с ОС обладает повышенным входным сопротивлением и чаще всего применяется в качестве буферного каскада.

Статические вольт-амперные характеристики полевого транзистора.

Для анализа работы полевых транзисторов используют следующие характеристики:

– *проходные (стоко-затворные)* – зависимость выходного тока (I_C) от входного напряжения ($U_{ЗИ}$): $I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ}=\text{const}}$ при заданном напряжении $U_{СИ}$ между стоком и истоком;

– *выходные* – зависимость выходного тока (I_C) от выходного напряжения ($U_{СИ}$): $I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ}=\text{const}}$ при заданном напряжении $U_{ЗИ}$ между затвором и истоком.

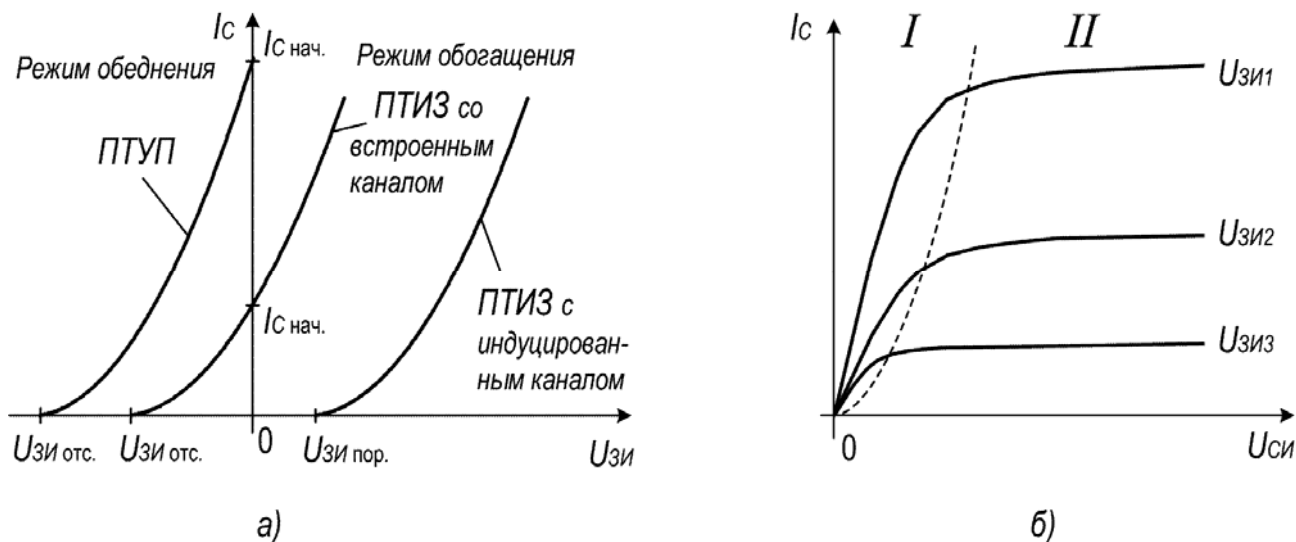


Рис.8.4 Стоко-затворная (а) и выходные (б) характеристики ПТ различных типов с n -каналом

На рис.8.4 приведены примерный вид вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с различными структурами с проводящим каналом n -типа. Из рисунка 8.4, а видно, что ПТУП может работать только в режиме обеднения проводящего канала носителями заряда, ПТИЗ с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения, а ПТИЗ со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения. Выходные ВАХ (рис.8.4, б) полевых транзисторов различных типов

по форме подобны. Отличие состоит в том, что для ПТУП $U_{зи1} = 0$, а $U_{зи3} = U_{зи\text{отс.}} < 0$; для ПТИЗ со встроенным каналом $U_{зи1} > 0$, $U_{зи2} = 0$, $U_{зи3} = U_{зи\text{отс.}} < 0$; для ПТИЗ с индуцированным каналом $U_{зи3} = U_{зи\text{пор.}} > 0$, $U_{зи1} > U_{зи2} > U_{зи3}$

В выходных ВАХ (рис.8.4б) можно выделить две рабочие области слева (**I**) и справа (**II**) от штриховой линии. Область **I** называют крутой областью характеристики; область **II** – пологой, или областью насыщения. В крутой области транзистор может быть использован как омическое управляемое напряжением сопротивление. В усилительных каскадах транзистор работает на пологом участке характеристики.

С помощью ВАХ можно определить дифференциальные параметры ПТ:

– крутизну характеристики, характеризующую управляющее действие затвора:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}} ; \quad (8.1)$$

– дифференциальное внутреннее сопротивление проводящего канала полевого транзистора:

$$r_{си} = \left. \frac{dU_{си}}{dI_C} \right|_{U_{зи}=\text{const}} ; \quad (8.2)$$

– коэффициент усиления, характеризующий усилительные свойства ПТ:

$$\mu = - \left. \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right|_{I_C=\text{const}} , \quad (8.3)$$

который связан с крутизной характеристики и дифференциальным внутренним сопротивлением проводящего канала полевого транзистора соотношением

$$\mu = -S r_{си} . \quad (8.4)$$

На рис. 8.5 показано, как определяются дифференциальные параметры ПТ с помощью ВАХ (на примере полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом).

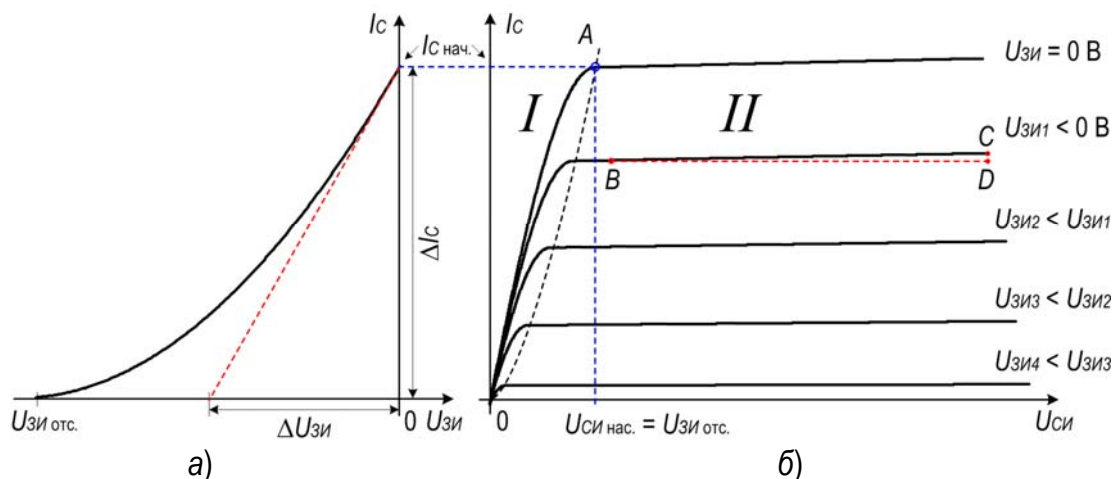


Рис.8.5 Стоко-затворная (а) и выходные (б) ВАХ ПТУП

Стоко-затворная характеристика (рис.8.5а) ПТУП достаточно хорошо описывается выражением

$$I_C = I_{C\text{нач.}} \left(1 - U_{зи}/U_{зи\text{отс.}} \right)^2 , \quad (8.5)$$

где $I_{C\text{нач.}}$ – начальный ток стока при $U_{зи} = 0$; $U_{зи\text{отс.}}$ – напряжение, при котором пере-

крывается проводящий канал. Дифференцируя в соответствии с (8.1) выражение (8.5), получаем

$$S = S_{\text{НАЧ.}} (1 - U_{\text{ЗИ}} / U_{\text{ЗИ отс.}}), \quad (8.6)$$

где $S_{\text{НАЧ.}} = 2I_{\text{С нач.}} / |U_{\text{ЗИ отс.}}|$ – начальное значение крутизны характеристики, которое можно определить по графику стокзатворной характеристики. Для этого в точке $(U_{\text{ЗИ}} = 0; I_{\text{С}} = I_{\text{С нач.}})$ к стокзатворной характеристике проводят касательную, отсекающую на оси напряжений отрезок $\Delta U_{\text{ЗИ}}$, а на оси токов – отрезок $\Delta I_{\text{С}}$ (рис.8.5а). Тогда

$$S_{\text{НАЧ.}} \approx \Delta I_{\text{С}} / \Delta U_{\text{ЗИ}}. \quad (8.7)$$

Напряжение, при котором транзистор переходит в режим насыщения, называется *напряжением насыщения* ($U_{\text{СИ нас.}}$). При напряжении $U_{\text{ЗИ}} = 0$ напряжение насыщения (на рис.8.5б – т.А) численно равно напряжению отсечки, при других напряжениях $U_{\text{ЗИ}} \neq 0$

$$U_{\text{СИ нас.}} |_{U_{\text{ЗИ}} \neq 0} = |U_{\text{ЗИ отс.}}| - |U_{\text{ЗИ}}|. \quad (8.8)$$

Дифференциальное внутреннее сопротивление проводящего канала полевого транзистора $r_{\text{СИ}}$ можно определить графическим способом, используя выходные ВАХ. Для этого на ветви выходной ВАХ, соответствующей заданному напряжению $U_{\text{ЗИ}}$, строят прямоугольный треугольник BCD (рис. 8.5б) и определяют разность напряжений $\Delta U_{\text{СИ}}$ (BD) и токов $\Delta I_{\text{С}}$ (CD), откуда

$$r_{\text{СИ}} \approx \frac{BD}{CD} = \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{С}}}. \quad (8.9)$$

Усилители на полевых транзисторах.

Достоинства усилительных каскадов на полевых транзисторах по сравнению с усилительными каскадами на биполярных транзисторах обеспечиваются следующими преимуществами полевых транзисторов перед биполярными:

- полевой транзистор управляется электрическим полем, что предполагает отсутствие тока во входной цепи, поэтому он имеет большое входное сопротивление, что упрощает согласование усилительного каскада с высокоомным источником сигнала;
- ПТ имеет, как правило, меньший коэффициент шума, что делает его более предпочтительным при усилении слабых сигналов;
- ПТ обладает большей собственной температурной стабильностью режима покоя.

Недостатком можно считать то, что усилительные каскады на ПТ обычно обеспечивают меньший коэффициент усиления по напряжению.

Принцип построения усилительных каскадов на ПТ тот же, что и каскадов на биполярных транзисторах. В зависимости от того, какой из выводов является общим для входной и выходной цепей, в усилительных каскадах различают три схемы включения полевого транзистора: с *общим истоком* (ОИ), с *общим стоком* (ОС) и *общим затвором*

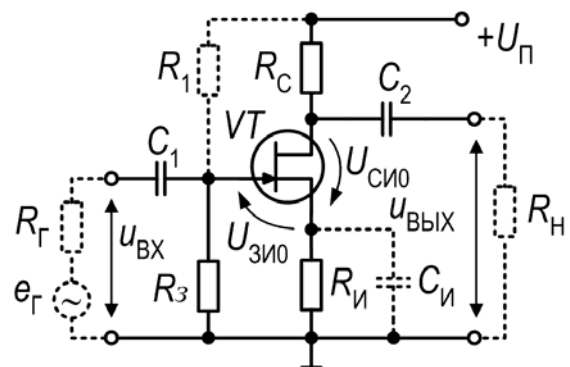


Рис. 8.6 Схема усилительного каскада с общим истоком

(ОЗ). Наиболее широкое применение на практике получила схема с ОИ. На рис. 8.6 представлена схема такого усилительного каскада на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом с каналом n -типа. В этой схеме, называемой *схемой с автоматическим смещением*, за счёт протекания через резистор $R_{И}$ истокового тока автоматически создаётся обратное смещение $p-n$ -перехода ПТ:

$$U_{зи} = U_3 - U_{и} = U_3 - I_{и}R_{и}, \quad (8.10)$$

где $I_{и}$ – ток истока, причём в ПТ ток истока равен току стока I_C ; $U_{и} = I_{и}R_{и}$ – потенциал истока; U_3 – потенциал затвора. Так как резистор R_3 обеспечивает связь затвора с общим проводом, то при бесконечно малом входном токе I_3 и отсутствии резистора R_1 можно считать $U_3 \approx 0$. Поэтому

$$U_{зи} \approx -I_C R_{и}, \quad (8.11)$$

Помимо функции автоматического смещения потенциала истока резистор $R_{и}$ выполняет также функцию термостабилизации режима работы усилителя по постоянному току (аналогично схеме с эмиттерной стабилизацией на БТ). Для повышения термостабильности и уменьшения зависимости начального режима работы усилительного каскада от разброса параметров ПТ в цепь затвора включают резистор R_1 . Для исключения проявления отрицательной обратной связи по переменному сигналу резистор $R_{и}$ шунтируют конденсатором $C_{и}$, в диапазоне рабочих частот сопротивление которого $X_{Cи} \ll R_{и}$. Динамический режим работы полевого транзистора обеспечивается резистором R_C в цепи стока, с которого снимается переменный выходной сигнал при наличии входного усиливаемого сигнала. Назначение разделительных конденсаторов C_1 и C_2 такое же, как и в усилительном каскаде на биполярном транзисторе.

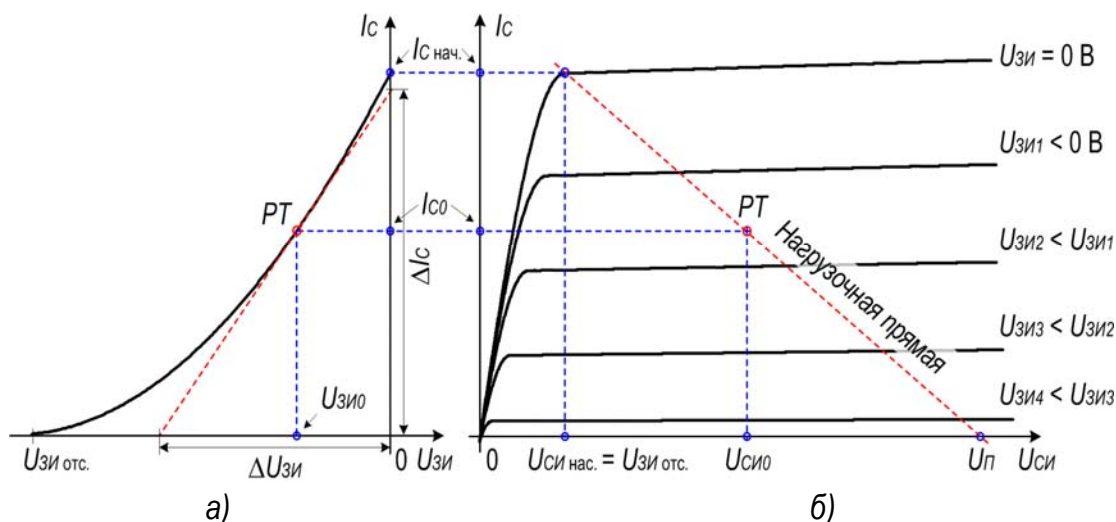


Рис. 8.7 К расчёту рабочей точки (PT) полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом: а – стоко-затворная ВАХ, б – выходные ВАХ

Начальный режим работы полевого транзистора обеспечивается постоянным током стока I_{C0} и соответствующим ему постоянным напряжением между стоком и истоком $U_{си0}$ (см. рис. 8.7), которые устанавливаются с помощью источника питания $U_{П}$ и начального напряжения смещения на затворе $U_{зи0}$.

Коэффициент усиления усилительного каскада на полевом транзисторе с общим ис-

током можно определить при отсутствии шунтирующего конденсатора в цепи истока по формуле

$$K_U = -\frac{S(r_{\text{СИ}} \parallel R_C \parallel R_H)}{1 + SR_{\text{И}}}, \quad (8.12)$$

а при его наличии – по формуле

$$K_U = -S(r_{\text{СИ}} \parallel R_C \parallel R_H), \quad (8.13)$$

где крутизна S и дифференциальное внутреннее сопротивление $r_{\text{СИ}}$ проводящего канала полевого транзистора определяются в рабочей точке.

Значения ёмкостей конденсаторов можно рассчитать по формулам:

$$C_1 = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{\text{Н.ГР.}} R_3}; \quad C_2 = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{\text{Н.ГР.}} (R_C \parallel R_H)}; \quad C_{\text{И}} = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{\text{Н.ГР.}} R_{\text{И}}}, \quad (8.14)$$

где $f_{\text{Н.ГР.}}$ – нижняя граничная частота.

8.2. Порядок выполнения работы

Задание 1: Получение статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов

- собрать схему (рис. 8.8) для получения статических ВАХ заданного типа полевого транзистора;
- получить стоко-затворную ВАХ транзистора, для этого выбрать команду меню **Analysis/DC...**, на экран будет выведено окно параметров моделирования, в котором следует задать необходимые параметры моделирования в соответствии с рис. 8.9;

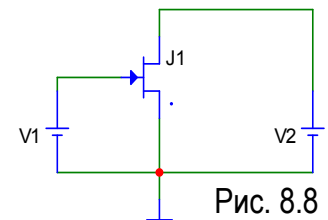


Рис. 8.8

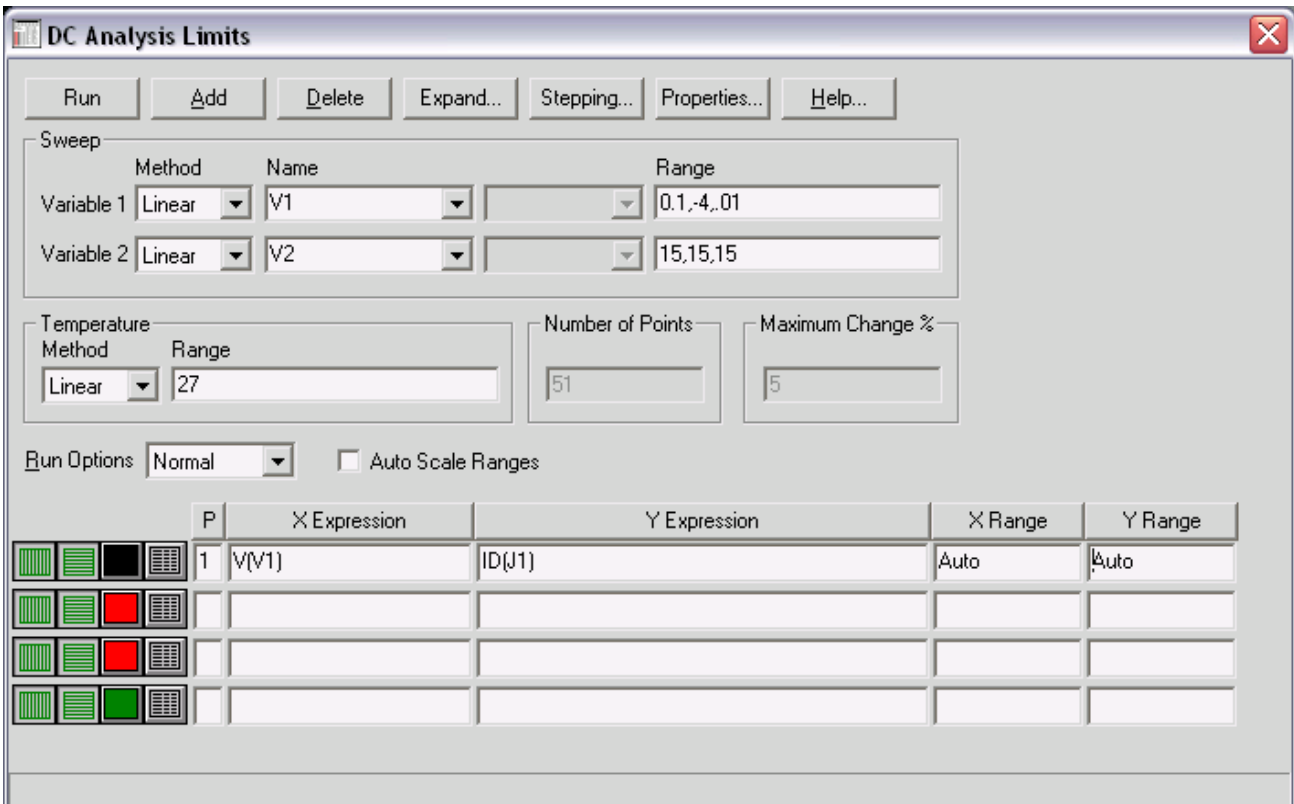


Рис. 8.9 Окно параметров моделирования для получения стокозатворной ВАХ

- получить выходные ВАХ транзистора, для этого выбрать команду меню **Analysis/DC...**, на экран будет выведено окно параметров моделирования, в котором

- следует задать необходимые параметры моделирования в соответствии с рис. 8.10;
- з) по полученным ВАХ рассчитать крутизну $S_{\text{нач.}}$ (8.7), дифференциальное сопротивление $r_{\text{си}}$ (8.9) и коэффициент усиления μ (8.4) полевого транзистора.

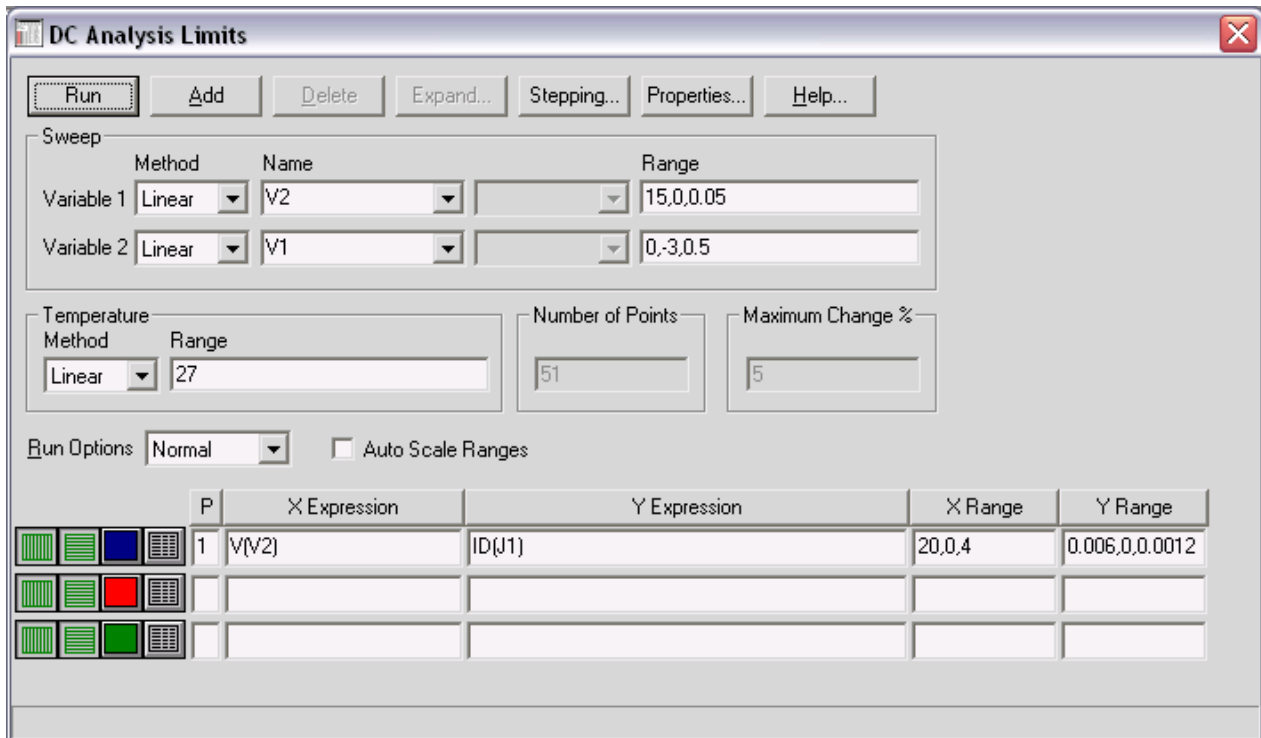


Рис. 8.10 Окно параметров моделирования для получения выходных ВАХ

Задание 2: Расчёт однокаскадного транзисторного усилителя с общим истоком

- а) построить статическую линию нагрузки на выходной ВАХ (рис.8.7б) и отметить положение рабочей точки $(U_{\text{си0}}; I_{\text{с0}})$, принимая $I_{\text{с0}} = (0,5 \dots 0,6) I_{\text{снач.}}$;
- б) используя стоко-затворную ВАХ (рис.8.7а) определить значение напряжения $U_{\text{зи0}}$;
- в) через рабочую точку на стоко-затворной ВАХ (рис.8.7а) провести касательную и определить крутизну $S = \Delta I_{\text{с}} / \Delta U_{\text{зи}}$, сравнить полученное значение с теоретическим, рассчитанным по формуле (8.6);
- г) рассчитать значения резисторов $R_{\text{и}} = \frac{U_{\text{зи0}}}{I_{\text{с0}}}$ и $R_{\text{с}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{си0}}}{I_{\text{с0}}} - R_{\text{и}}$;
- д) рассчитать значения ёмкостей конденсаторов C_1 , C_2 и $C_{\text{и}}$ по формулам (8.14), приняв значения сопротивлений резистора $R_3 = 1 \text{ МОм}$ и нагрузки $R_{\text{н}} = (7 \dots 10) R_{\text{с}}$;
- е) рассчитать коэффициенты усиления по напряжению K_U по формулам (8.12) и (8.13) соответственно при отсутствии и наличии в цепи истока конденсатора $C_{\text{и}}$.
- ж) построить динамическую линию нагрузки и оценить максимальную неискажённую амплитуду выходного напряжения $U_{\text{ввх. max}}$ на нагрузке;
- з) определить $U_{\text{вх. max}} = U_{\text{ввх. max}} / K_U$ при наличии конденсатора $C_{\text{и}}$;

Задание 3: Исследование однокаскадного транзисторного усилителя с общим истоком

- а) собрать схему усилительного каскада в соответствии с рис. 8.6;
- б) сравнить экспериментальные и расчётные токи и напряжения, соответствующие заданной исходной рабочей точке;

- в) подать на вход усилителя сигнал с амплитудой $U_{m \text{ ВХ.}} = (0,3 \dots 0,5) \times U_{\text{ВХ. max}}$, и частотой $f = 10 \text{ кГц}$; принять сопротивление источника сигнала $R_{\Gamma} = 0$;
- г) построить эюры входных и выходных токов и напряжений (**Analysis/Transient...**) при отсутствии и наличии конденсатора $C_{\text{И}}$;
- д) получить ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемой схемы в диапазоне частот $f = 1 \text{ Гц} \dots 1 \text{ ГГц}$ (**Analysis/AC...**) при отсутствии и наличии конденсатора $C_{\text{И}}$;
- е) при наличии конденсатора $C_{\text{И}}$, изменяя значения входного напряжения $U_{m \text{ ВХ.}}$ от 0 до $(1,2 \dots 1,5) \times U_{\text{ВХ. max}}$, измерить выходное напряжение $U_{m \text{ Вых.}}$.

Задание 4: Обработка результатов измерений

- а) по полученным ЛАЧХ определить нижние $f_{\text{Н}}$ и верхние $f_{\text{В}}$ граничные частоты (по уровню -3 дБ) и полосу пропускания Δf усилителя;
- б) определить по ЛАЧХ коэффициент усиления K_0 на частоте f_0 (см. [Л.р. № 6](#)), сделать выводы;
- в) по полученным эюрам входных и выходных напряжений определить коэффициенты усиления по напряжению; сравнить полученные значения с теоретическими, полученными в п. е) Задания 1; сделать выводы;
- г) по результатам измерений (Задание 2, п. д)) построить передаточную характеристику усилителя $U_{\text{Вых.}}(U_{\text{ВХ.}})$; по полученной характеристике определить K_U ;
- д) рассчитать коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U^2 (R_3/R_{\text{Н}})$ и к.п.д. усилителя

$$\eta = \frac{(U_{\text{Вых. max}}^2 / 2R_{\text{Н}})}{U_{\text{И}} I_{\text{C0}}} \times 100\% .$$

8.3. Контрольные вопросы

1. Что такое полевой транзистор?
2. Перечислите типы полевых транзисторов и поясните их принцип действия?
3. В чём отличие статических характеристик полевых транзисторов различных типов?
4. Перечислите схемы включения полевого транзистора, укажите особенности использования этих схем.
5. Какие достоинства и недостатки имеют усилительные каскады на полевых транзисторах по сравнению с усилительными каскадами на биполярных транзисторах?
6. Какие характеристики и параметры полевых транзисторов используются при расчёте усилителя?
7. Как задаётся рабочий режим полевых транзисторов различных типов по постоянному току?
8. Как осуществляется температурная стабилизация в усилителях на полевых транзисторах?
9. Пояснить назначение резисторов и конденсаторов в схеме усилителя (рис. 8.6).
10. Какое влияние оказывает шунтирующий конденсатор $C_{\text{И}}$ на параметры усилителя?