

Практическое занятие №4

ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Теоретические сведения

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

На рис. 1 показаны передаточные (проходные) вольт-амперные характеристики (ВАХ) полевых транзисторов (ПТ) с каналом n -типа. (Альтернативное название – сток-затворная характеристика.)

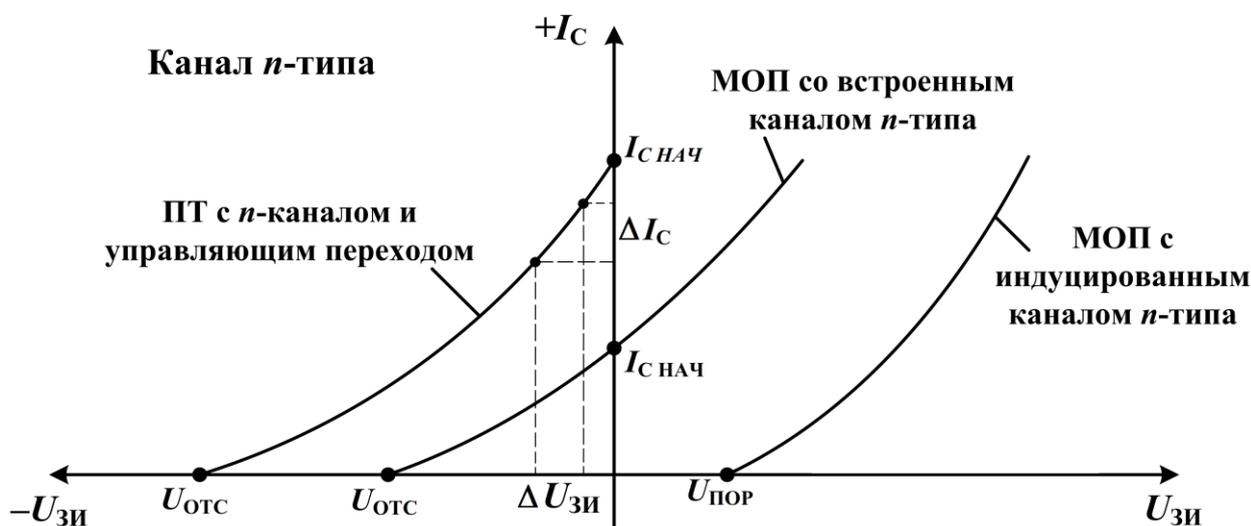


Рис. 1. Передаточные ВАХ различных ПТ с каналами n -типа

Для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и МОП-транзистора со встроенным каналом токопроводящий канал между стоком и истоком транзистора существует в транзисторе изначально, т.е. при подаче напряжения между стоком и истоком $U_{си}$ в транзисторе будет протекать ток и при отсутствии напряжения на затворе ($I_{с.нач}$ при $U_{зи} = 0$). Если к затвору приложить обратное напряжение $U_{зи} < 0$, ширина токопроводящего канала уменьшится, его сопротивление $r_{си}$ увеличится, ток стока $I_c = U_{си}/r_{си}$ уменьшится. При напряжении $U_{зи} = U_{отс}$ («отсечки») ширина канала и ток стока уменьшатся до 0.

Транзистор с управляющим p - n -переходом может работать только при обратных напряжениях на затворе $U_{зи} < 0$ (режим обеднения канала), тогда как МОП-транзистор со встроенным каналом может работать и при $U_{зи} > 0$ (режим обогащения канала), когда ширина канала с ростом $U_{зи}$ растет, а его сопротивление $r_{си}$ падает, что ведет к росту тока I_c .

В МОП-транзисторе с индуцированным каналом токопроводящий канал между стоком и истоком транзистора изначально отсутствует (а

значит, ток $I_c = 0$) и появляется лишь при подаче на затвор порогового напряжения $U_{пор}$. С дальнейшим ростом $U_{зи}$ ширина появившегося (индуцированного) канала растет, его сопротивление $r_{си}$ падает, что ведет к росту тока I_c .

Важнейшим параметром полевого транзистора является крутизна его передаточной характеристики S [мА/В]:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}}. \quad (1)$$

На рис. 1 для примера показано, как определяется крутизна S для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом. Аналогичным образом она определяется и для других полевых транзисторов.

Зависимость тока I_c от напряжения $U_{зи}$ для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, как видно из рис. 1, нелинейна и может быть описана выражением

$$I_c = I_{c.\text{нач}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^2 \quad \text{при } U_{зи} < 0. \quad (2)$$

Для МОП-транзистора со встроенным каналом левую часть передаточной ВАХ, при $U_{зи} < 0$ (второй квадрант), также можно описать выражением (2), а правую часть ВАХ, при $U_{зи} \geq 0$ (первый квадрант), которая более линейна, можно описать выражением

$$I_c = I_{c.\text{нач}} + S U_{зи} \quad \text{при } U_{зи} \geq 0. \quad (3)$$

Крутизна S , как видно из рис. 1, не является постоянной величиной, особенно если ВАХ находится во втором квадранте. Продифференцировав, согласно (1), выражение (2), получим

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}} = \frac{2I_{c.\text{нач}}}{-U_{отс}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right). \quad (4)$$

Значения $U_{отс}$ и $U_{зи}$ подставляются в выражение (4) со своими знаками.

Анализ выражения (4) показывает, что при $U_{зи} = 0$ у полевого транзистора с управляющим p - n -переходом значение S максимально:

$$S_{\text{max}} = \frac{2I_{c.\text{нач}}}{-U_{отс}}. \quad (5)$$

В случае МОП-транзистора со встроенным каналом для $U_{зи} \geq 0$ величина S , как видно из рис. 1, может быть и больше параметра S_{max} , измеренного при $U_{зи} = 0$.

МОДЕЛЬ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

При статическом анализе усилительных каскадов на полевых транзисторах транзистор можно заменить его моделью для данного вида анализа (рис. 2). В данном случае подразумевается схема включения транзистора с общим истоком (ОИ), когда входной величиной является $U_{зи}$, а выходными величинами – I_c и $U_{си}$.

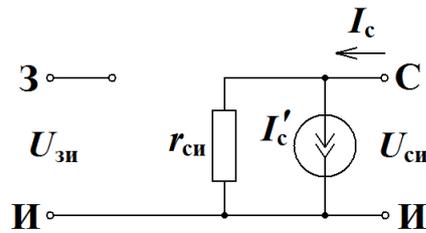


Рис. 2. Модель полевого транзистора для статического анализа

Входное сопротивление полевого транзистора очень велико – это или сопротивление утечки обратносмещенного p - n -перехода затвора (сотни килоом – мегаомы) или сопротивление диэлектрика, отделяющего в МОП-транзисторе затвор от полупроводника (еще больше). В большинстве случаев можно считать его бесконечным, поэтому на рис. 2 затвор электрически не связан с остальной частью транзистора.

Источник тока I'_c в модели описывается выражениями (2) или (3), либо может быть представлен более простой (и менее точной) кусочно-линейной аппроксимацией (рис. 3):

$$I'_c = 0 \text{ при } U_{зи} \leq U'_{отс}; \quad (6a)$$

$$I'_c = S(U_{зи} - U'_{отс}) \text{ при } U_{зи} > U'_{отс};$$

$$I'_c = 0 \text{ при } U_{зи} \leq U'_{пор}; \quad (6б)$$

$$I'_c = S(U_{зи} - U'_{пор}) \text{ при } U_{зи} > U'_{пор},$$

где $U'_{отс}$ и $U'_{пор}$ – параметры аппроксимации (отличаются от истинных значений напряжений отсечки $U_{отс}$ и порогового $U_{пор}$). Значение $U'_{отс}$ подставляется в выражение (6а) со своим знаком, т.е. с « \leftarrow ».

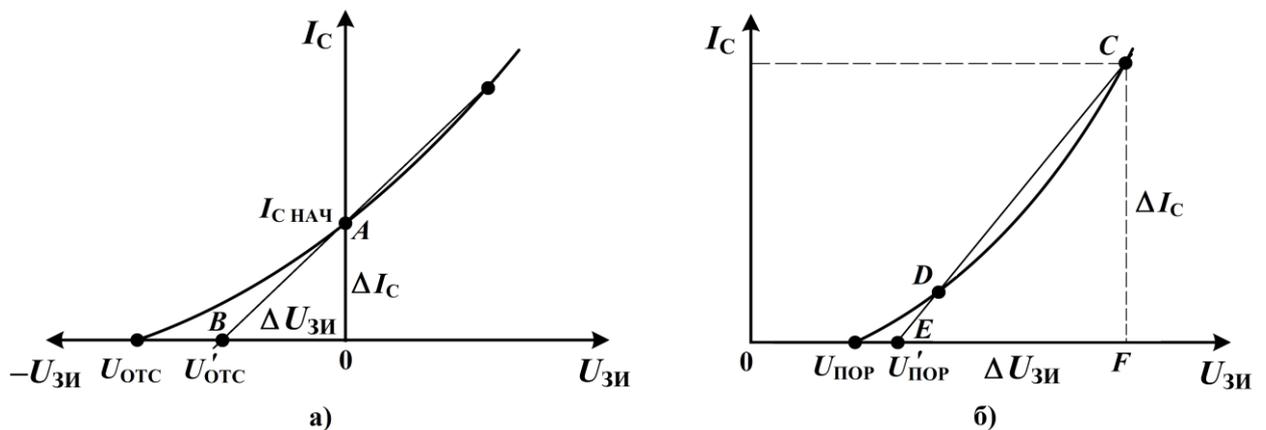


Рис. 3. К определению параметров кусочно-линейной модели полевого транзистора по передаточным ВАХ: для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и МОП-транзистора со встроенным каналом (а) и МОП-транзистора с индуцированным каналом (б)

Значения $U'_{отс}$ и $U'_{пор}$ находят как абсциссу точек пересечения секущей или касательной, проведенной к передаточной ВАХ (точки B и E на рис. 3, а

и 3, б, соответственно). Крутизна S определяется так же, как на рис. 1. Так, для рис. 3, а

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{AO}{OB}.$$

Для рис. 3, б

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{CF}{FE}.$$

Вторая составляющая тока стока I_c в схеме на рис. 2 зависит от выходного напряжения $U_{си}$ и определяется внутренним сопротивлением транзистора $r_{си}$. Сопротивление транзистора $r_{си}$ определяется по наклону касательной (или секущей), проведенной к линейному участку одной из ветвей выходных ВАХ транзистора:

$$r_{си} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c}. \quad (7)$$

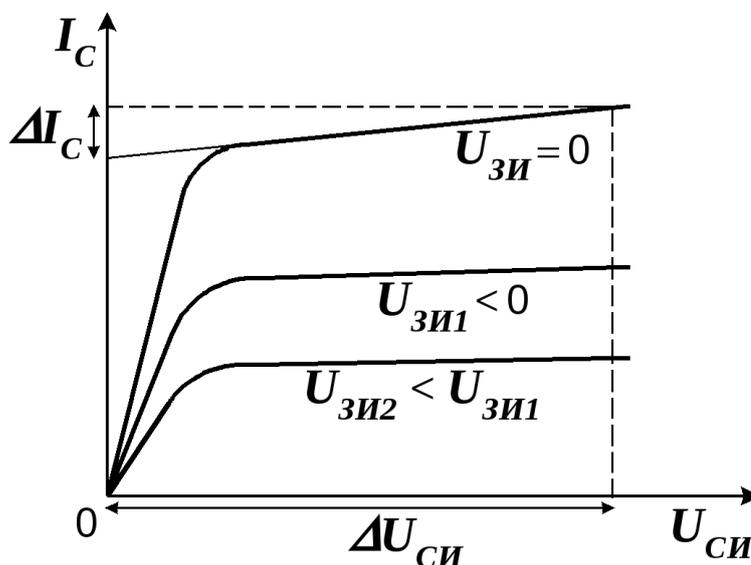


Рис. 4. К определению параметра $r_{си}$ статической модели полевого транзистора по выходным ВАХ

МАЛОСИГНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

При анализе работы усилителя на полевом транзисторе по переменному току (малосигнальный анализ) транзистор заменяют его малосигнальной моделью (рис. 5).

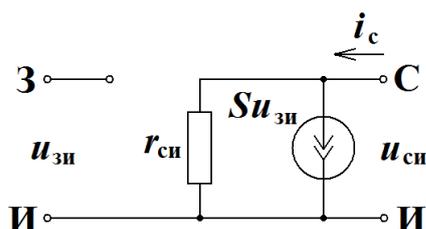


Рис. 5. Малосигнальная модель полевого транзистора

Параметры малосигнальной модели определяются в окрестностях ранее найденных точек покоя транзистора, т.е. после проведения статического анализа.

Крутизну S находят по формуле (1) в окрестностях точки покоя на передаточной ВАХ (рис. 6, а). Сопротивление $r_{си}$ находят в окрестностях точки покоя на ветви выходной ВАХ (рис. 6, б) в соответствии с выражением (7).

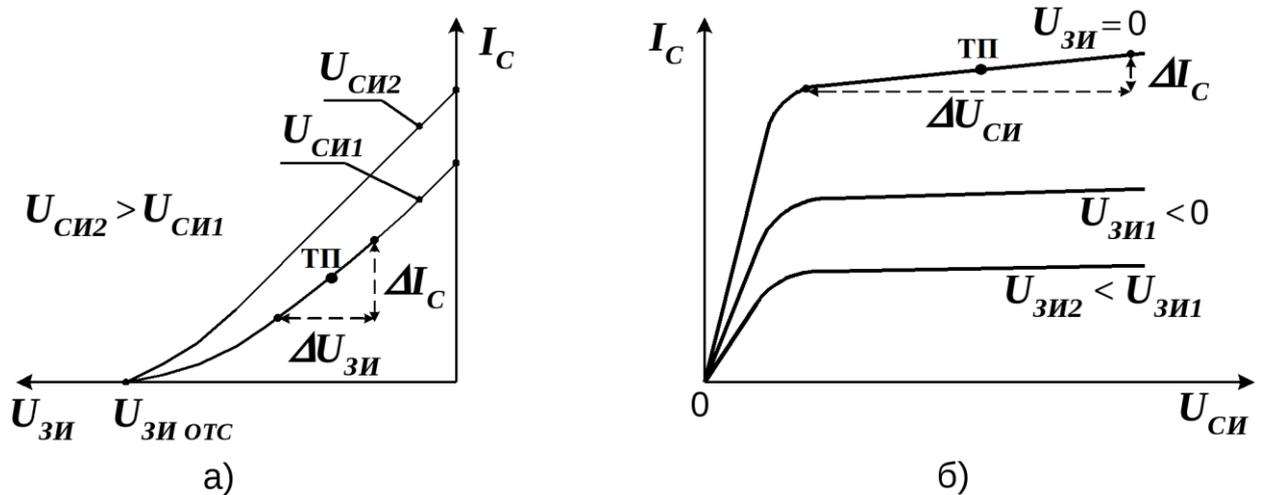


Рис. 6. К определению параметров малосигнальной модели полевого транзистора в окрестностях точек покоя (ТП): S из передаточных ВАХ (а) и $r_{си}$ из выходных ВАХ (б)

Значение крутизны S можно найти и из выходных ВАХ транзистора (рис. 7).

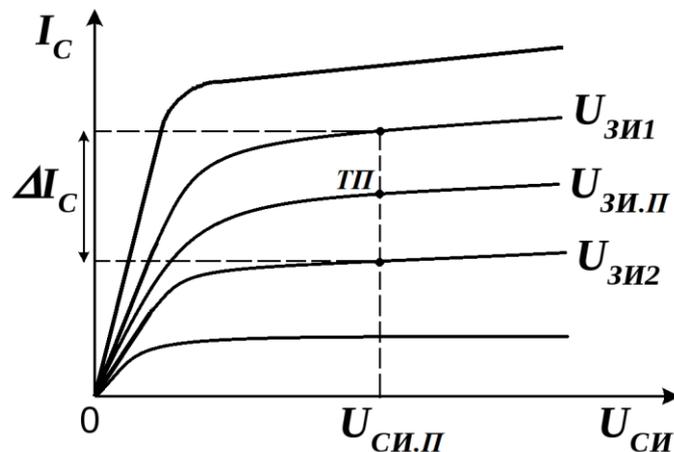


Рис. 7. К определению крутизны S по выходным ВАХ полевого транзистора

Для этого используют ветви ВАХ, соседние с ветвью, на которой находится точка покоя:

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = U_{си.п}} = \left. \frac{\Delta I_C}{U_{зи1} - U_{зи2}} \right|_{U_{си} = U_{си.п}}$$

Задачи для решения

Задача 1. Определить крутизну характеристики S полевого транзистора, если при изменении напряжения на затворе $U_{зи}$ на 1,5 В ток стока I_c изменился на 2,25 мА.

Задача 2. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом имеет $I_{c,нач} = 5$ мА и $U_{отс} = -3$ В. Определить ток стока I_c и крутизну S транзистора при напряжениях затвора $U_{зи}$, равных -3 В; -2 В; 0 .

Подсказка: по формулам (2) и (4).

Задача 3. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом имеет при нулевом напряжении $U_{зи}$ значения $I_{c,нач} = 4$ мА и $S_{max} = 2$ мА/В. Определить ток стока I_c и крутизну S транзистора при напряжениях затвора $U_{зи}$, равных -3 В; -2 В и -1 В.

Подсказка: сначала из выражения (5) определить $U_{отс}$, а затем по выражениям (2) и (4) определить ток и крутизну при указанных напряжениях затвора.

Задача 4. Определить параметры статической модели МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа, ВАХ которого представлены на рис. 8 и 9.

Подсказка: параметр S и $U'_{пор}$ определять с помощью кусочно-линейной аппроксимации передаточной характеристики на рис. 8 (провести касательную или секущую к линейному участку ВАХ). Параметр $r_{си}$ придется определять для ветви выходной ВАХ (рис. 9), соответствующей $U_{зи} = 2,5$ В – другие ветви в линейной части практически горизонтальны.

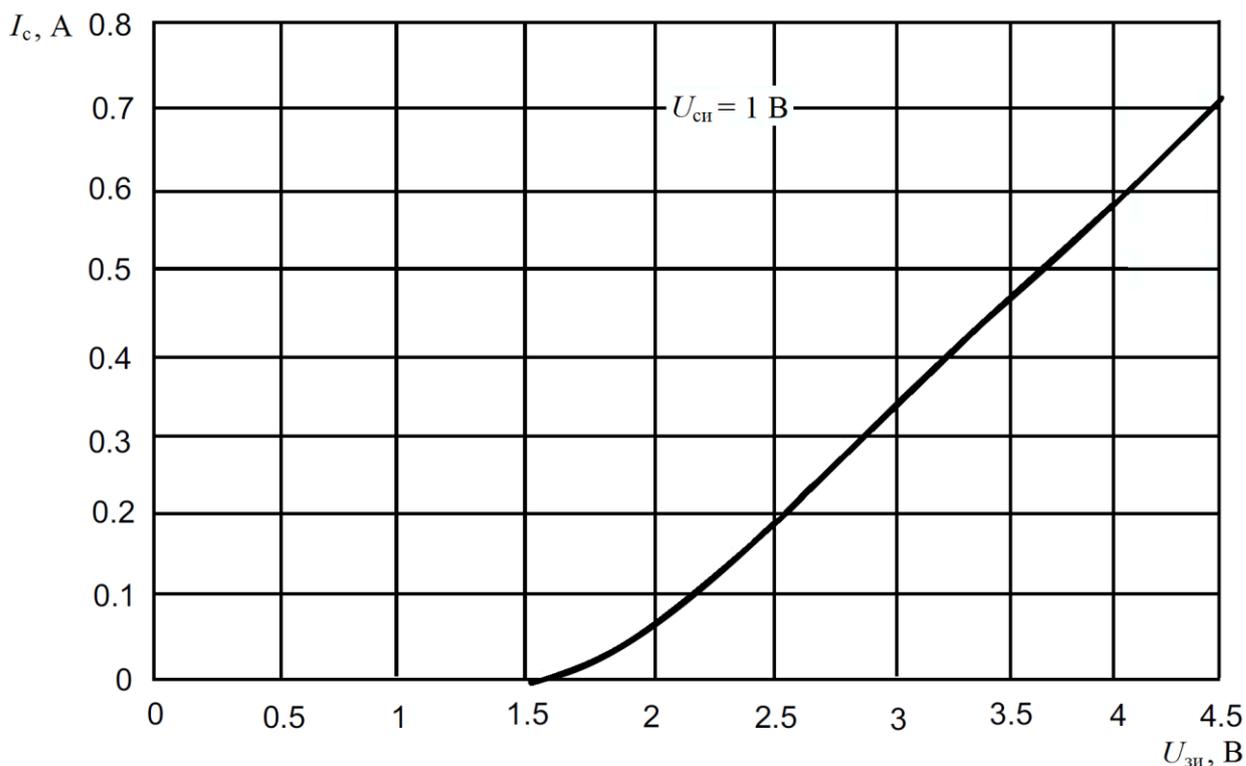


Рис. 8. Передаточная ВАХ МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа BSS138

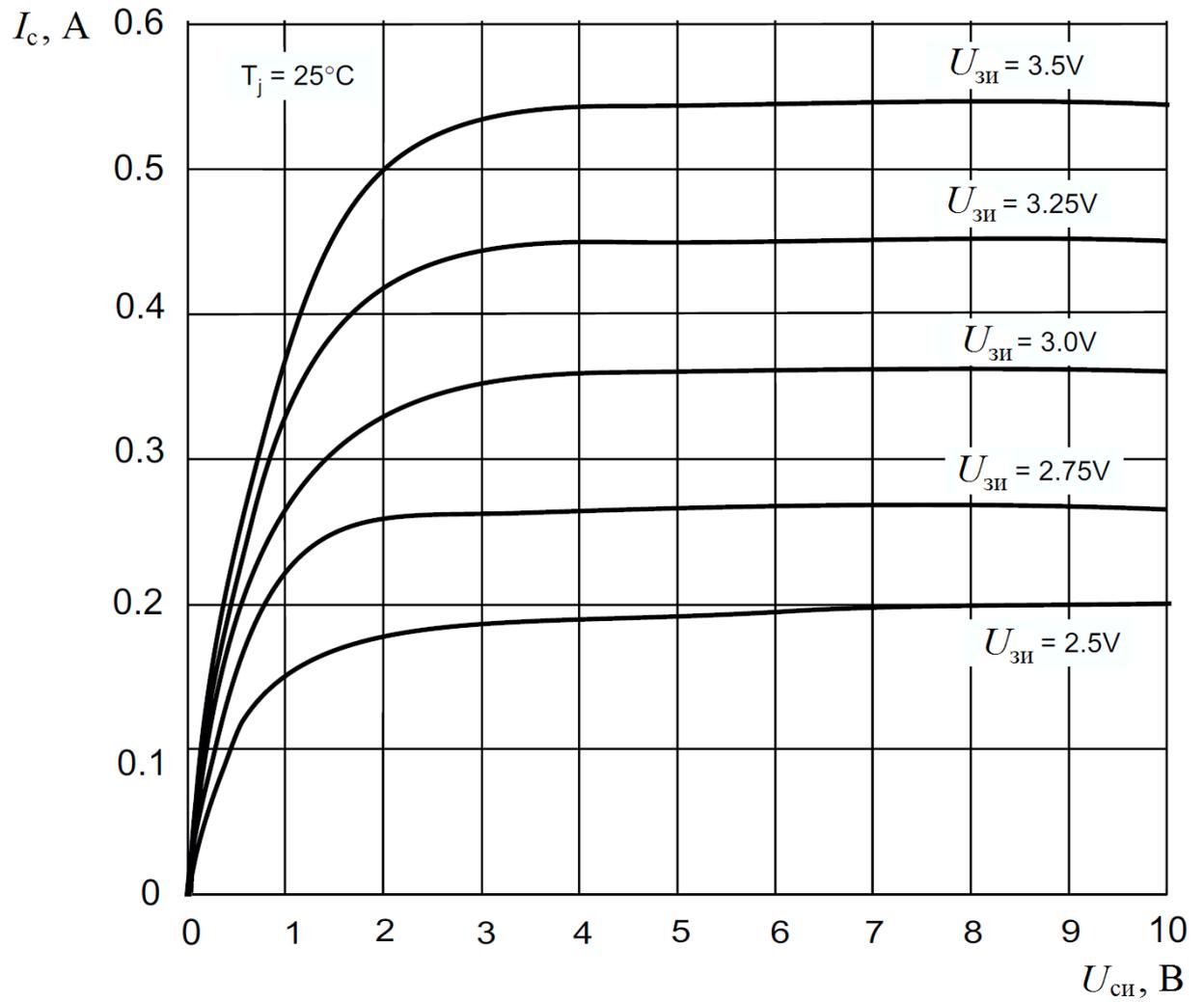


Рис. 9. Выходные ВАХ МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа BSS138