

УДК 621.372

И. Я. ЖУРАВЛЕВ, канд. техн. наук, *Ю. Н. ЗОЛОТОВЕРХИИ*

**ПОГРЕШНОСТЬ АППРОКСИМАЦИИ СИНУСОИДОЙ ИНВЕРСНОЙ
ВЕТВИ СТОКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА
В ТРИОДНОЙ ОБЛАСТИ**

Стокковая характеристика полевого транзистора в триодном режиме при нормальной полярности стокового напряжения, обуславливающей модуляцию сечения канала в сторону его уменьшения, описывается выражением [1]

$$\tilde{I}_c = K (2U_{c,н} U_{c,пер} + U_{c,н}^2) (1 + \eta), \quad (1)$$

где K — коэффициент пропорциональности (удельная крутизна характеристики); η — коэффициент влияния подложки; $U_{с. пер}$ — напряжение перекрытия канала, зависящее от типа транзистора, напряжения затвор—исток $U_{з. и}$ и напряжения отсечки $U_{отс}$ или порогового напряжения для МДП-транзисторов. У полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом $U_{с. пер} = U_{отс} - U_{з. и}$. Форма крутого участка стоковой характеристики, описываемого выражением (1), близка к синусоиде для углов $0 \leq \omega t \leq \pi/2$. Это обстоятельство обуславливает широкое применение полевых транзисторов для формирования синусоидального напряжения из треугольного в функциональных генераторах [2]. Для описания стоковой характеристики при обратной полярности стокового напряжения (инверсном режиме) выражение (1) неприемлемо, поскольку из-за модуляции сечения канала в сторону его возрастания I_c непропорционально увеличивается, а динамическое сопротивление стока имеет тенденцию к уменьшению с увеличением силы тока I_c . Кроме того, при $U_{з. и} = 0$ у транзисторов с управляющим p - n -переходом появляется экспоненциально нарастающий прямой ток перехода, дополнительно увеличивая скорость нарастания тока стока. Однако распределение потенциала вдоль канала приводит к постепенному открыванию p - n -перехода по его длине. Считая обратный ток насыщения перехода $I_{з. о}$ независимым от напряжения и принимая в первом приближении линейный закон распределения напряжения по длине канала l , получаем выражение для прямого тока перехода канал—затвор

$$I_{с. пр} = \frac{I_{з. о}}{l} \int_0^l \exp\left(\frac{U_{с. и} - U_{з. и}}{l\varphi_T} x\right) dx. \quad (2)$$

После интегрирования находим

$$I_{с. пр} = I_{з. о} \frac{\varphi_T}{U_{с. и} - U_{з. и}} \left[\exp\left(\frac{U_{с. и} - U_{з. и}}{\varphi_T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

где φ_T — температурный потенциал, $\varphi_T = 25$ мВ. Суммируя все составляющие тока стока и объединяя постоянные величины, получаем

$$I_c = S \left(U_{с. и} + \frac{U_{с. и}^2}{2U_{с. пер}} \right) + I_{з. о} \frac{\varphi_T}{U_{с. и} - U_{з. и}} \left[\exp\left(\frac{U_{с. и} - U_{з. и}}{\varphi_T}\right) - 1 \right]. \quad (4)$$

Здесь S — крутизна характеристики в начале координат, $S = 2KU_{с. пер}(1 + \eta)$. В результате быстрого роста I_c после открытия p - n -перехода характеристика приобретает форму, близкую к тангенсоиде

$$I_c = I_{с. и} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{U_{с. и}}{U_{с. пер}} \right), \quad (5)$$

где $I_{c.n}$ — сила тока стока, соответствующая режиму насыщения транзистора. Аппроксимация тангенсоидой дает хорошее совпадение кривых до углов $60-70^\circ$. Вместе с тем стоковая характеристика в инверсной области также близка к восходящей ветви синусоиды

$$U_{c.n} = U_{ct} \sin \left(\frac{I_c}{I_{c\pi/2}} \frac{\pi}{2} \right), \quad (6)$$

где U_{ct} , $I_{c\pi/2}$ — амплитудные значения напряжения и силы тока, соответствующие углу $\omega t = \pi/2$.

Общий вид семейства стоковых характеристик и аппроксимирующих их синусоид представлен на рис. 1. Синусоида на границах интервала $0 < \omega t \leq \pi/2$ вписывается в две прямые. В начале координат ($\omega t = 0$) она вырождается в прямую с угловым коэффициентом, равным 1, т. е. $\frac{d \sin \omega t}{d \omega t} = 1$, что отражает известное свойство синусоиды $\sin \omega t = \omega t$ при $\omega t \rightarrow 0$. Наклон касательной к синусоиде в этой области составляет 1 рад^{-1} . Постоянство наклона синусоиды в области малых углов легко моделируется характеристиками полевого транзис-

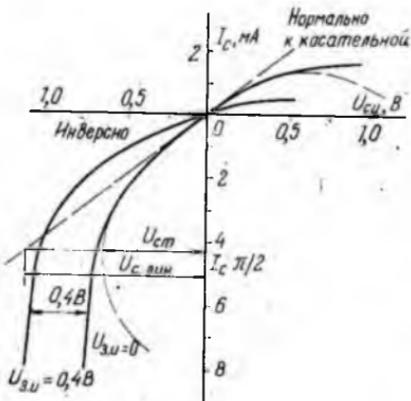


Рис. 1

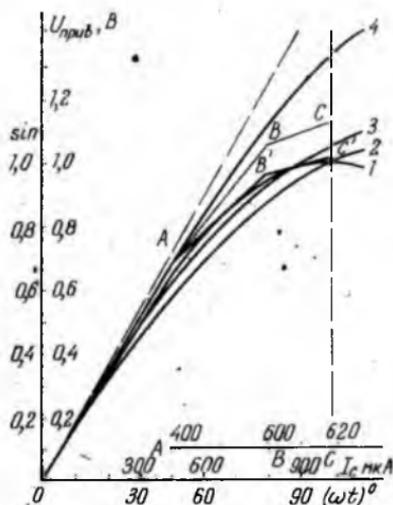


Рис. 2

тора в нормальном и в инверсном включении, так как при малых напряжениях стока преобладает омическая проводимость канала. Нулевой наклон в точке $\omega t = 0$ полевой транзистор не воспроизводит полностью, поэтому важным моментом аппроксимации является определение напряжения U_{ct} и соответствующей ему силы тока $I_{c\pi/2}$. Аппроксимация нормальной ветви стоковой характеристики базируется на определении силы тока насыщения $I_{c.n}$ путем исследования на экстремум выражения

(1). Инверсная кривая, описываемая выражением (4), не имеет точки экстремума. Для отыскания $I_{c\pi/2}$ проанализируем выражение (4), исходя из вклада отдельных составляющих в общее значение I_c . При малых напряжениях на стоке квадратичная $I_{c.кв}$ и экспоненциальная компоненты пренебрежимо малы, а, начиная с порядка 0,6 В и выше, для $U_{з.и}=0$ (рис. 1) прямой ток $p-n$ -перехода становится определяющим, обуславливая резкое изменение наклона характеристики. Напряжение $U_{ст}$ согласно рис. 1 имеет порядок 0,7 В. Для исследуемого транзистора КП 307Е, у которого $S=4$ мА/В, $U_{отс}=1$ В, $I_{з.о}=10^{-10}$ А, получаем $I_{c.лин}=2,8$ мА, $I_{c.кв}=0,7$ мА, $I_{c.пр}=5,1$ мА. Отклонение по току от линейного закона составляет 207,14 %. Для синусоиды отклонение от касательной в точке $\omega t = \pi/2$ составляет 57 %, следовательно, условно принятое напряжение $U_{ст}=0,7$ В велико. Его точное значение можно вычислить из условия $I_{c.кв} + I_{c.пр} = 0,57 I_{c.лин}$. Принимая $U_{з.и}=0$, находим

$$S \frac{U_{cm}^2}{2U_{отс}} + I_{з.о} \frac{\varphi_T}{U_{cm}} \exp\left(\frac{U_{cm}}{\varphi_T}\right) = 0,57 S U_{cm}. \quad (7)$$

Численное решение данного уравнения дает $U_{ст}=0,648$ В. Это соответствует согласно (4) силе тока $I_{c\pi/2}=4,18$ мА, что практически совпадает с аналогичными значениями на рис. 1. Вычисленные значения $U_{ст}$, $I_{c\pi/2}$, соответствующие углу $\omega t = \pi/2$, позволяют совместить после приведения характеристику с синусоидой в начале координат и в точке $\omega t = \pi/2$. Кривая 2 (рис. 2), построенная по экспериментальным данным, согласно этой методике касательна к синусоиде в начале координат и пересекает ее в точке $\omega t = \pi/2$. Зависимость процентного отклонения от синусоиды для данного коэффициента приведения дана в первой строке таблицы. Максимальное отклонение от синусоиды составляет 16,4 % и соответствует углу 45°. Очевидно, выбор точки, адекватной углу $\pi/2$ в более пологой области характеристики, нецелесообразен из-за невозможности согласования наклона и минимального отклонения. В результате увеличения наклона и соответствующего небольшого рассогласования в начале координат можно несколько снизить погрешность в области максимального расхождения кривых. Этот случай представлен во второй строке таблицы. Характерной его особенностью является пересечение кривых в двух точках и независимость рассогласования кривых от угла в начале координат вследствие их линейности. Отклонение характеристики от синусоиды нигде не превышает 10 %, что достаточно для многих технических применений. Почти аналогичный характер нелинейности имеет стоковая характеристика, снятая при нормальной полярности стокового напряжения. Для сравнения в третьей строке таблицы приведено ее процентное отклонение от синусоиды.

$\frac{U_{с\text{ лин}}}{U_{см}}$	Модуль отклонения от синусоиды, %										
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1,57	0	2,52	3,85	10,3	13,2	15,0	14,9	12,6	9,12	3,34	0
1,57	6,1	6,51	4,28	0	3,36	5,23	4,92	2,57	0	3,48	9,26
1,57	0	2,25	4,58	9,62	14,4	15,3	14,9	14,0	11,1	6,61	0,75
1,18	0	0,14	0,18	0,91	12,3	3,47	5,77	12,6	18,5	25,8	34,6
1,57	0	3,34	5, 8	10,4	16,8	18,5	18,2	16,2	12,8	6,72	0
$U_{з.и} = 0,48$											
1,18	0	0,14	0,18	0,91	1,23	3,47	0,8	0,2	11,6	0,15	1,4

Выбирая точку, соответствующую углу 90° в более крутой области, и допуская некоторое рассогласование вблизи вершины синусоиды, удается снизить погрешность в средней зоне при совпадении кривых в начале координат (четвертая строка таблицы). В пределе можно обеспечить непересекающийся характер кривых в случае их максимального согласования в начале координат. По экспериментальным данным, для транзистора КП 307Е при нулевом смещении на затворе непересекающийся ход кривых соответствует отклонению характеристики от синусоиды в точке $\omega t = \pi/2$ на 34,58 %, что недопустимо. Но именно этот режим наиболее приемлем для формирователей с предварительным ограничением входного сигнала треугольной формы. Зависимость отклонения от угла приведена в четвертой строке таблицы, а форма характеристики представлена кривой 4 на рис. 2. В нормальном режиме это отклонение больше и составляет 36,8 % для исследованного транзистора. Это свидетельствует о преимуществах формирователя на инверсной ветви стоковой характеристики полевого транзистора. Важно также, что схему с инверсно включенным полевым транзистором проще реализовать, так как в ней предусмотрено задание тока через этот транзистор. Последнее может быть легко выполнено с помощью современных операционных усилителей.

Как и в нормальном включении, запирающее напряжение на затворе увеличивает сопротивление канала, изменяет наклон стоковой характеристики в линейной области и наклон на пологом участке (рис. 1, кривая 2). Характер кривой в основном сохраняется, что позволяет регулировать амплитуду формируемой синусоиды, подавая на затвор запирающее напряжение, или симметризовать схему в случае, если полуволны синусоиды формируются различающимися по параметрам транзисторами, например комплементарными парами. Зависимость отклонения характеристики от синусоиды для указанного транзистора при подаче на затвор запирающего напряжения 0,4 В приведена в пятой строке таблицы.

Погрешность аппроксимации остается примерно такой же, однако напряжение в пологой области возрастает на значение запирающего напряжения на затворе. Аналогично, как и ранее при токах стока (5—10 мА), наклон в пологой области опреде-

ляется током открытого перехода канал — затвор и составляет 60 мВ на декаду тока, что характерно для $p-n$ -перехода вообще. Однако при напряжениях на затворе, близких к напряжению отсечки, переходная область недопустимо расширяется. Из анализа данных таблицы следует, что инверсная ветвь стоковой характеристики, как и нормальная, может быть использована для формирования синусоидального напряжения с невысокой степенью точности. Построение точных формирователей требует предварительной обработки входного сигнала или каскадного включения полевых транзисторов.

Оценим погрешность формирования синусоиды инверсной ветвью характеристики полевого транзистора для случая изменения наклона входного треугольного импульса при помощи двух делителей на стабилитронах, первый из которых включается в точке A (рис. 2), а второй — в точке B . В этих точках изменяется масштаб входного тока и соответственно наклон линии входного напряжения — ломанная ABC . Пересчитывая для нового масштаба тока напряжение на транзисторе с учетом кривой 4, можно получить ломанную $A'B'C'$, расположенную существенно ближе к синусоиде, чем исходная кривая 4. Вопрос об удачном выборе точек A , B , C и наклонов отрезков AB , BC представляет оптимизационную задачу. В силу сложности и неопределенности модели полевого транзистора в инверсной области ее аналитическое решение весьма затруднено.

Для оценки примем в точке A отклонение характеристики от синусоиды равным 3,5 %, что соответствует углу 40° на кривой 4. Варьируя положением точки B и наклоном отрезка BC , пересчитываем кривые AB' и $B'C'$ в соответствии с новым масштабом тока. Результаты приведены в шестой строке таблицы. Согласно этим данным отклонение скорректированной кривой от синусоиды не превышает 3,5 %. Вводя в делители нелинейные элементы, например полупроводниковые диоды, можно обеспечить плавное изменение линии наклона входного тока и дополнительно сблизить кривые.

Схемная реализация цепи предварительной обработки сигнала, как и устройства формирователя, в целом представляет самостоятельный интерес. Характер нелинейности полевого транзистора в инверсной области предполагает включение последнего в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, аналогично схемам логарифмических преобразователей [2, 3]. Полученные результаты также характерны для транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом КП 302, КП 103 и др. Измерения проводились цифровыми приборами классом точности 0,1 %, тем не менее разрешение последних недостаточно для точных измерений в милливольтном диапазоне, где расположены начальные линейные участки исследуемых кривых. Поэтому численные значения при малых углах (меньше 10°) следует рассматривать как оценочные.

Список литературы: 1. Агаханян Т. М. Интегральные микросхемы. М., 1983. 464 с. 2. Щербаков В. И., Грездов Г. И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. К., 1983. 213 с. 3. Declercq M. Low-distorsion triangle to sine conversion//Electronic Engineering.—1973.—N 10.—P. 19.

Поступила в редколлегию 08.07.85.