

ГЕНЕРАТОРЫ НА ЛАВИННОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Г. П. ТРОФИМОВ

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

При достаточно больших напряжениях коллекторные характеристики в схеме с заземленным эмиттером и базой обнаруживают ярко выраженный падающий участок [1]. Это позволяет создавать простые и компактные генераторы. Используемые в таких генераторах транзисторы называются лавинными, так как в основе пробоя (появление отрицательного сопротивления) лежит лавинное умножение носителей заряда.

В работах [2, 3, 4] исследованы статические и динамические свойства транзисторов при генерации релаксационных колебаний.

Изучение физических свойств и возможностей лавинного транзистора привело к созданию генераторов, рабочая частота которых составляет десятки гигагерц [5]. Однако лавинный транзистор может с успехом использоваться и для генерации низкочастотных колебаний.

В данной статье рассмотрены некоторые схемы таких генераторов.

Генератор пилообразного напряжения

Схема генератора представлена на рис. 1, а. После включения напряжения E происходит заряд емкости C и параллельно соединенной емкости коллекторного перехода C_k . При приближении напряжения на кол-

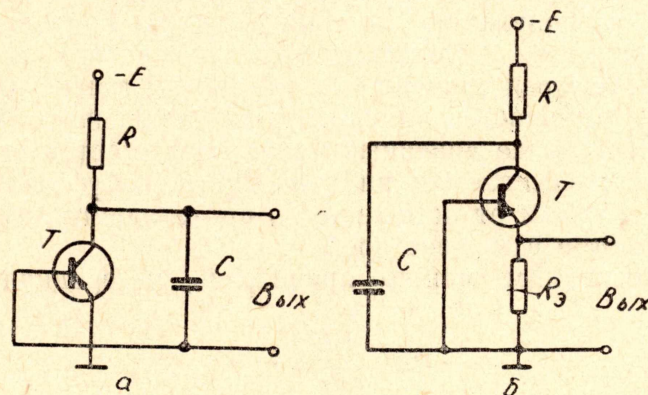


Рис. 1а, б

лекторе к напряжению пробоя происходит умножение носителей заряда. Возрастающий коллекторный ток создает на объемном сопротивлении базы падение напряжения, отпирающее эмиттерный переход.

Лавинообразный процесс умножения носителей приводит к пробое транзистора и быстрому разряду емкости. В базе накапливается значительный избыточный заряд, поддерживающий открытое состояние транзистора. После разряда емкостей и рассасывания избыточного заряда транзистор запирается и процесс повторяется.

Таблица 1

Тип транзистора	П12	П15	П13	П16Б	П403	П16	П103
Напряжение пробоя	43	63	84	81	51	87	64

Напряжение на емкости возрастает по закону.

$$U_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC'}} \right), \quad (1)$$

где $C' = C + C_k$ — суммарная зарядная емкость. В генераторах низкой частоты можно считать $C' \approx C$. Поскольку время разряда емкости мало, период колебаний можно определить из (1)

$$T = RC \ln \left(\frac{E}{E - U_n} \right), \quad (2)$$

где U_n — напряжение пробоя, которое значительно изменяется от образца к образцу и зависит от ряда факторов.

При увеличении напряжения E , повышении частоты колебаний и при повышенных температурах возрастает роль теплового пробоя и напряжение U_n уменьшается. Поэтому, при точном определении частоты колебаний его следует определить экспериментально.

Для получения достаточно линейного нарастания напряжения следует отбирать транзисторы с малым коллекторным током в предпробойной области и увеличивать величину E , как и в тиратронном генераторе. Существенного улучшения линейности можно достичь, используя в цепи заряда емкости токостабилизирующие элементы (диоды типа Д-305 в обратном включении или высоковольтные транзисторы с током $I_k (U_{1k}) = \text{const}$ в широком диапазоне значений U_k).

Время разряда емкости [2, 3] не зависит от величины емкости при изменении ее в широких пределах. Однако при малых значениях емкости C повышается рабочая частота колебаний, что ведет к разогреву транзисторов и появлению дополнительного количества свободных носителей. Последнее увеличивает ток транзистора и время разряда уменьшается. Разогрев транзистора уменьшает также напряжение пробоя. При этом улучшается линейность пилообразного напряжения, так как используется более линейный начальный участок экспоненты.

Мощность, рассеиваемая на транзисторе, обусловлена током разряда емкости и током от источника E , протекающим через сопротивление R и транзистор в момент пробоя.

Однако последним можно пренебречь, и средняя рассеиваемая мощность

$$P = \frac{CU_n^2}{2T}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) значение T из (2), получим

$$P = \frac{U_n^2}{2R \ln \frac{E}{E - U_n}}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет определить параметры R и E , при которых мощность рассеяния меньше допустимой при заданной температуре, т. е.

$$P + P_0 < P_{\text{доп}}, \quad (5)$$

где P_0 — мощность рассеяния на транзисторе за счет теплового тока I_{K_0} при максимальной рабочей температуре. Кроме того, из (4) следует, что мощность рассеяния не зависит от величины емкости.

Величина емкости может быть найдена из (2) по заданному значению периода колебаний.

Амплитуду тока разряда емкости можно определить [4] из выражения

$$I_m = \frac{Q_{\text{бм}} \cdot D_e}{W_{\text{бм}}}, \quad (6)$$

где D_e — эффективный коэффициент диффузии;

$W_{\text{бм}}$ — ширина базы транзистора в момент максимума тока через транзистор;

$Q_{\text{бм}}$ — заряд, накопленный в базе к моменту максимума тока через транзистор.

При напряжении на коллекторе U_K в базе накапливается заряд

$$Q_{\text{бм}} = \frac{C + C_K}{n + 1} \left[\left(\frac{U_K}{U_n} \right)^{n+1} - \left(\frac{U_n}{U_n} \right)^{n+1} \right], \quad (7)$$

где U_n — напряжение на коллекторе транзистора в момент возникновения лавинного процесса, обычно $U_n \leq |0,8 \div 0,9| U_n$;

$C_{\text{кн}}$ — емкость коллекторного перехода при напряжении;

$n = 3$ — для транзисторов типа р-п-р;

$n = 5$ — для транзисторов типа п-р-п.

Ширина базы с учетом модуляции определяется выражением

$$W_{\text{бм}} = W_{\text{б0}} - l_0 \sqrt{\frac{U_{\text{км}}}{\Delta \varphi_0}}, \quad (8)$$

где $W_{\text{б0}}$ — начальное значение ширины базы;

l_0 — ширина р-п перехода, $l_0 \simeq 6$ мк;

$\Delta \varphi_0$ — высота равновесного потенциального барьера, $\Delta \varphi_0 \simeq 0,35$ в.

$$U_{\text{км}} = U_n (1 - \gamma)^{1/n}, \quad (9)$$

где γ — эффективность эмиттера.

Малое время разряда емкости позволяет создать генератор коротких импульсов (рис. 1, б). При $R_9 = 33$ ом, $C = 680$ пф амплитуда выходных импульсов составляет 12 в. Недостатком такого релаксационного генератора является малый коэффициент использования напряжения источника питания

$$m = \frac{U_{\text{вых м}}}{E}, \quad (10)$$

где $U_{\text{вых м}}$ — амплитуда выходных импульсов. Практически m не превышает 25% по любому выходу.

Генератор пилообразного напряжения работает лишь на высокоомную нагрузку. При емкости $C = 2000$ пф ($R = 56$ ком, $E = 300$ в) минимальная подключаемая нагрузка составляет ~ 70 ком (при снижении амплитуды колебаний на 15%).

Генератор синусоидальных колебаний

Добавление в рассмотренную схему индуктивности L (рис. 2) с достаточной добротностью (15 и более) позволяет создать простой генератор синусоидальных колебаний звукового диапазона частот.

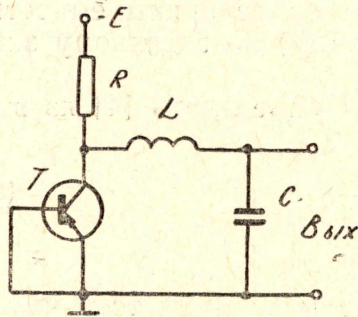


Рис. 2.

Во время заряда емкости транзистор практически заперт и схему рис. 2 можно рассматривать как последовательную цепь $R-L-r-C$, включаемую под постоянное напряжение.

Составляя уравнение цепи и дифференцируя его по времени, получим

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + (R + r) \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0. \quad (11)$$

Решая уравнение (11), находим мгновенное значение амплитуды напряжения на емкости

$$U_{cm} = -E + E \frac{\omega_0}{\omega'} \cos(\omega' t - \beta') e^{-\delta' t}, \quad (12)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — собственная угловая частота колебаний контура;

$\delta' = \frac{R+r}{2L}$ — коэффициент затухания;

r — активное сопротивление индуктивности;

$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - (\delta')^2}$ — угловая частота колебаний;

$$\beta' = \arctg \frac{\delta'}{\omega'}, \quad 0 < \beta' < \frac{\pi}{2}.$$

Так как напряжение на коллекторе транзистора не может превысить напряжения пробоя U_n , то можно рассматривать включение под это напряжение часть $L-r-C$ всей цепи. При этом уравнение (12) примет вид

$$U_{cm} = -U_n + U_n \frac{\omega_0}{\omega} \cos(\omega t - \beta) e^{-\delta t}, \quad (13)$$

где $\delta = \frac{r}{2L}$ — коэффициент затухания в цепочке

$$r-L-C;$$

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — угловая частота колебаний;

$$\beta = \arctg \frac{\delta}{\omega}, \quad 0 < \beta < \frac{\pi}{2}.$$

Уравнение разряда емкости аналогично (13). Таким образом, схема генерирует незатухающие синусоидальные колебания

$$U_{cm} = -U_n + U_n \frac{\omega_0}{\omega} \cos(\omega t - \beta), \quad (14)$$

где напряжение U_n меняет знак через полупериод колебаний.

В данной схеме при разряде емкости C происходит многократный пробой транзистора из-за наличия емкости C_k . Период релаксацион-

ных колебаний T_k является непостоянным, так как уменьшается ток разряда емкости C и изменяется реакция индуктивности на этот ток. Поэтому в середине времени разряда период минимален.

Рассеиваемая на транзисторе мощность в случае генератора синусоидальных колебаний возрастает

$$P_{\sim} = \frac{CU_{\pi}^2}{2T} \cdot \frac{1}{2} \frac{T}{T_k} = P \cdot \kappa, \quad (15)$$

где κ — количество пробоев транзистора за время разряда емкости C ;
 T — период колебаний синусоидального напряжения. Минимальная подключаемая нагрузка

$$R_H > 10X_c, \quad (16)$$

где $X_c = \frac{1}{\omega C}$ — реактивное сопротивление емкости на генерируемой частоте ω .

Мощность, выделяемая на нагрузке,

$$P_H = \frac{U_{\pi}^2}{4R_H}. \quad (17)$$

Так как R_H велико, то мощность в нагрузке не превышает нескольких десятков мвт.

Коэффициент использования напряжения питания в рассматриваемом генераторе

$$m = \frac{U_{\pi}}{E}. \quad (18)$$

Так как для получения малого коэффициента нелинейных искажений κ_2 величину E необходимо увеличивать, то коэффициент m практически не превышает 20—25%.

К. п. д. генератора

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{ист}}}, \quad (19)$$

где $P_{\text{ист}} = \frac{E^2}{R}$ — мощность, потребляемая схемой от источника питания.

Подставляя в (19) значения P_H и $P_{\text{ист}}$ и учитывая (18), получим

$$\eta = \frac{1}{4} \frac{R}{R_H} \cdot m.$$

Обычно $R_H = (2 \div 4) R$. Поэтому величина η не превышает (1,5÷3%).

Добавление в цепь базы внешних сопротивлений $R_6 = (300 \div 800)$ ом позволяет уменьшить величину E в 2 раза при неизменном коэффициенте нелинейных искажений κ_2 .

Результаты эксперимента

а) Генератор пилообразного напряжения. Осциллограмма пилообразного напряжения, полученного в схеме на транзисторе П12, представлена на рис. 3. Экспериментальные кривые на рис. 4 и 5 подтверждают ранее описанные зависимости, которые являются типичными для всех исследованных транзисторов. В табл. 1 приведены усредненные значения напряжений пробоя для некоторых типов транзисторов. В за-

висимости от параметров схемы может иметь место [1] первичный или вторичный пробой.

Приведенные выше зависимости можно использовать для расчета схемы с необходимыми параметрами выходных импульсов. Увеличение E улучшает форму выходного напряжения; значительное же увеличение E , не давая существенного выигрыша в улучшении формы колебаний, требует лишь создания специального источника питания. Рекомендуется выбирать величину

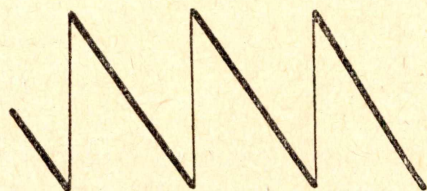


Рис. 3.

$$E = (3 \div 5) U_n.$$

Сопротивление R выбирается исходя из допустимой мощности рассеяния (5).

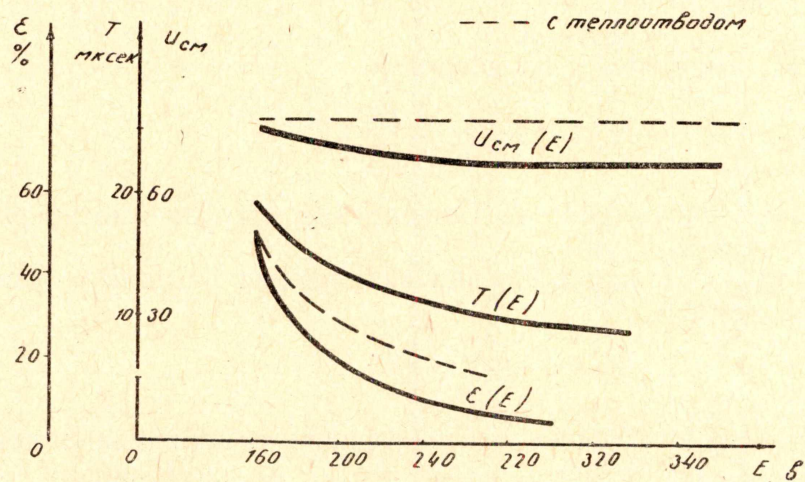


Рис. 4. Зависимости параметров пилообразного напряжения от напряжения источника E (транзистор П16, $R = 30$ ком, $C = 680$ пф), ε — коэффициент нелинейности.

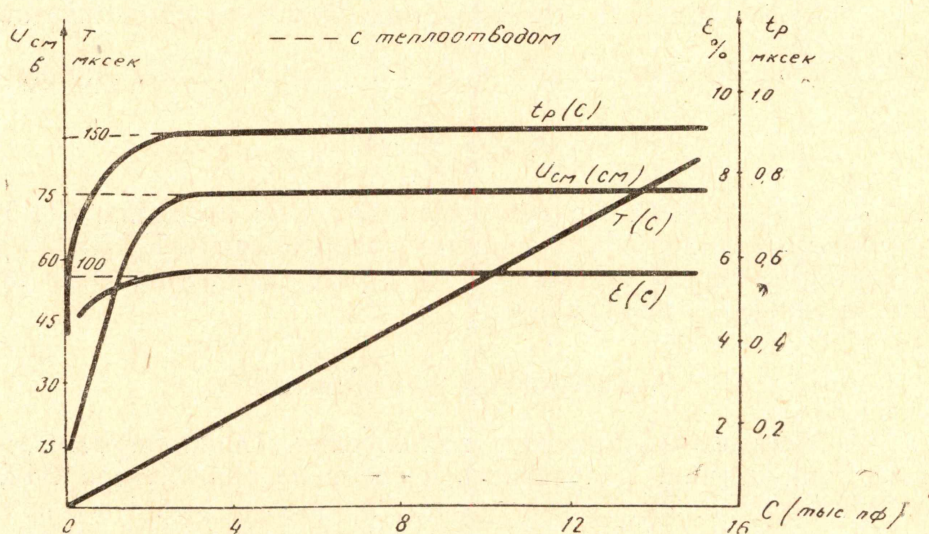


Рис. 5. Зависимости параметров пилообразного напряжения от емкости (транзистор П16, $R = 30$ ком, $E = 300$ в).

Величина емкости C выбирается исходя из заданного значения периода колебаний и со стороны максимума ограничена током необратимого пробоя. Критическая величина емкости для исследованных типов транзисторов лежит в пределах $20 \div 40$ тыс. пф.

Величина сопротивления R , не должна превышать $70 \div 80$ ом, так как иначе искажается форма импульсов и увеличивается время разряда.

Вследствие малой средней рассеиваемой мощности верхний предел рабочей температуры составляет $45 \div 50^\circ\text{C}$.

Параметры выходного напряжения определялись с помощью осциллографа ИО-4.

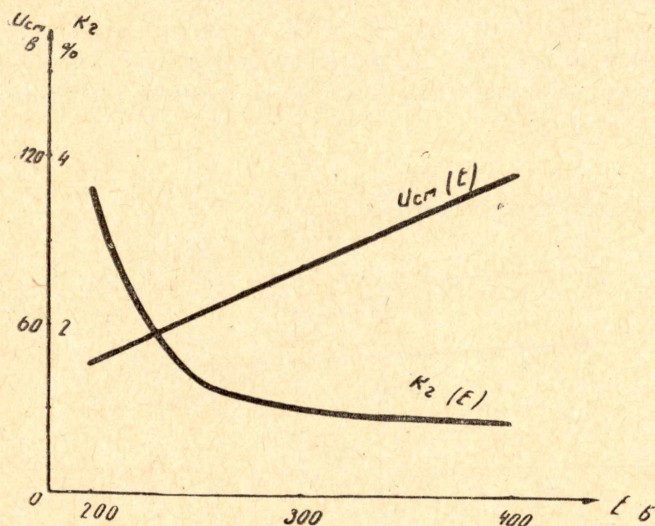


Рис. 6. Зависимости параметров синусоидального напряжения от напряжения источника E (транзистор П12, $R = 39$ ком, $L = 290$ мГн, $C = 680$ пф).

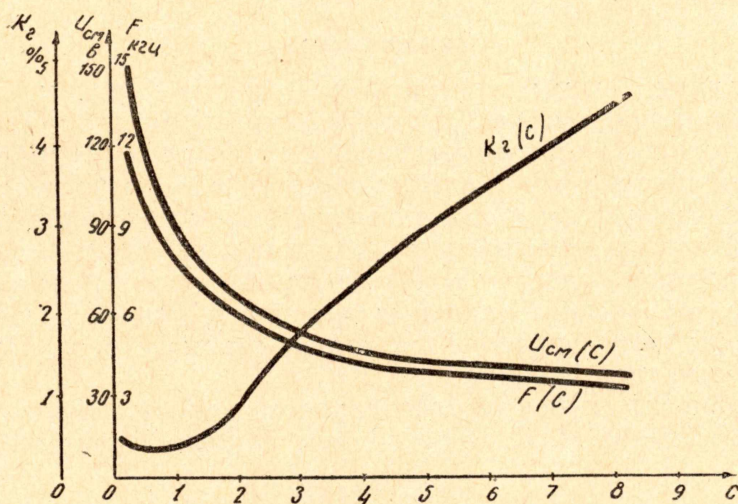


Рис. 7. Зависимости параметров синусоидального напряжения от емкости (транзистор П12, $R = 39$ ком, $L = 290$ мГн, $E = 220$ в).

б) Генератор синусоидальных колебаний. На рис. 6, 7 приведены экспериментальные зависимости параметров выходного напряжения от C и E .

Увеличение R приводит обычно к уменьшению (рис. 6 и 7) амплитуды и частоты колебаний и к увеличению K_2 (при $E = \text{const}$). Коэффициент нелинейных искажений определялся с помощью измерителя нелинейных искажений С6-1, частота контролировалась частотомером ИЧ-6.

Частота генерируемых колебаний весьма стабильна во времени и при изменении величины напряжения E на $\pm 10\%$. Повышение частоты возможно при уменьшении величины L с соответствующим сокращением диапазона применяемых величин емкостей. Так, при $L = 25$ мкн и $C = 100$ пф частота колебаний составила 50 кГц при $U_{\text{см}} = 22$ в и $K_2 < 2\%$.

В схеме с параметрами $E = 180$, $C = 2000$ пф, $L = 290$ мкн и $R = 39$ кОм подключение активной нагрузки $R_n = 82$ ком приводит к уменьшению амплитуды колебаний на 20% при неизменном коэффициенте K_2 .

Температурная зависимость параметров синусоидального напряжения представлена на рис. 8.

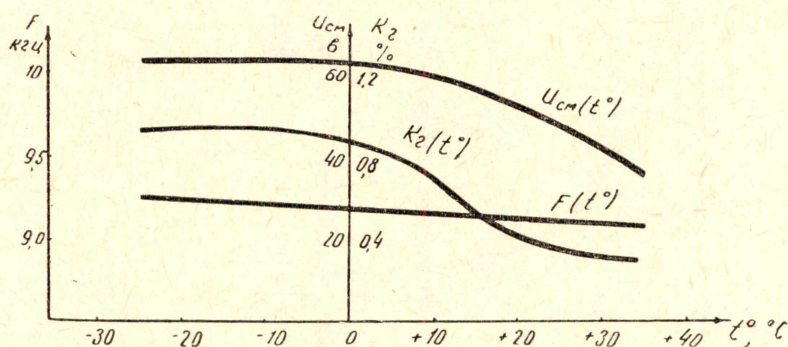


Рис. 8. Зависимости параметров синусоидального напряжения от температуры (транзистор П12, $R = 39$ ком, $L = 290$ мкн, $C = 680$ пф, $E = 150$ в).

Расчет схемы проводится аналогично расчету генератора пилообразного напряжения.

Заключение

Рассмотренные схемы генераторов обладают рядом достоинств (простота схемы при большой амплитуде колебаний, стабильность параметров выходного напряжения, надежность и др.). Генераторы пилообразного напряжения могут найти применение в качестве генераторов горизонтальной развертки в осциллографах, схемах измерения времени, в импульсной технике. Генераторы синусоидальных колебаний в сочетании с катодным повторителем могут использоваться в качестве лабораторных генераторов синусоидальных колебаний низкой частоты.

Генераторы легко управляются напряжением по базе. Напряжение запаривания составляет 1—1,5 в.

Автор приносит глубокую благодарность доценту, кандидату технических наук Ройтману М. С. за оказанную помощь и консультацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Николаевский. Эксплуатационные параметры и особенности применения транзисторов. Связьиздат, 1963.
2. J. R. A. Beale, W. L. Stephenson. E. Wolfendale PIRE, v. 104, part B, № 16, 1957.
3. D. J. Hamilton, J. F. Gibbons, W. Shocley PIRE, v47, № 6, 1959.
4. В. Г. Пикулик, С. Я. Шац. Релаксатор на лавинном транзисторе с заземленными эмиттером и базой. Радиотехника, т. 18. № 11. 1963.
5. Вилмур, Корью Ишин. Генерирование сверхвысоких частот транзистором в состоянии лавинного пробоя. Электроника, № 43, 1963. Русский перевод.