

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

## ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ

Методические указания  
к лабораторным работам

Куйбышев 1990

Составитель В.В.Фадеев

УДК 621.37/39(075)

Генераторы сигналов: Метод. указ. к лаб. работам  
/Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. В.В.Фадеев. Куйбышев,  
1990. 24 с.

Приведено описание двух лабораторных установок, позволяющих исследовать особенности генераторов синусоидального и пилообразного напряжений. В теоретической части особое внимание уделено особенностям схемотехнического построения генераторов. Для закрепления материала дан список контрольных вопросов.

Предназначены для студентов спец. 23.03, изучающих курс "Основы радиоэлектроники".

Составлены на кафедре "Радиотехнические устройства".

Печатается по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензенты: В.В.Мотов, Ю.С.Быховский

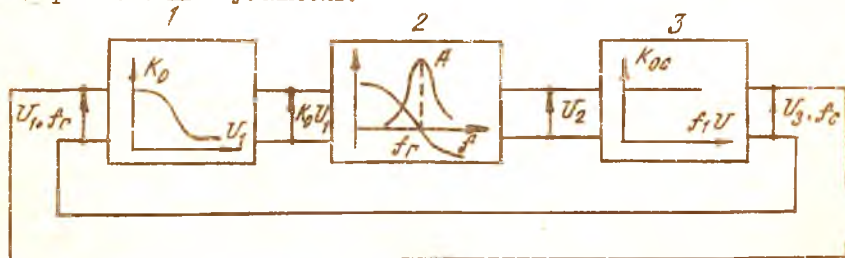
# ИССЛЕДОВАНИЕ $\angle C$ - ГЕНЕРАТОРА С ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СВЯЗЬЮ (ШИФР 87Л-01/28)

Ц е л ь р а б о т н : ознакомление с принципом действия и особенностями работы автогенератора с  $\angle C$  - контуром.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

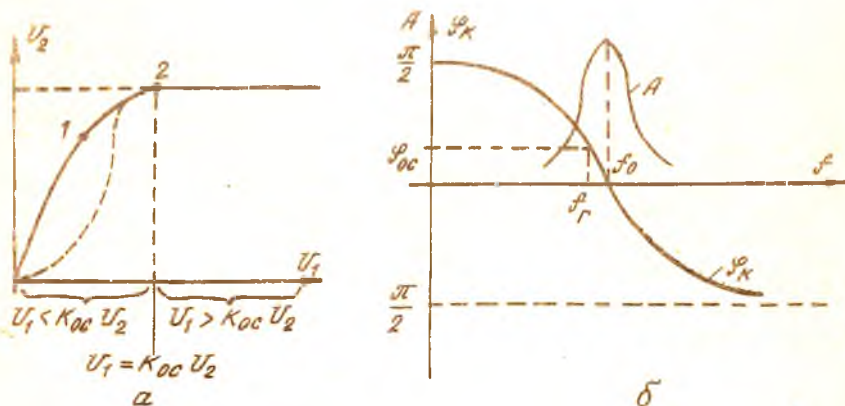
Простейшим методом формирования синусоидальных колебаний является метод компенсации потерь в  $\angle C$  - колебательном контуре при помощи усилителя.

Физические процессы в автогенераторе. Любой автогенератор в стационарном (установившемся) режиме может быть представлен структурной схемой (рис. I,  $f_p$  - частота генерации). Автогенератор изображен в виде замкнутого контура, составленного из трех последовательно соединенных четырехполюсников - одного нелинейного и двух линейных. Нелинейный четырехполюсник I представляет собой усилительный каскад, усиление которого зависит от амплитуды входного напряжения. Первым из линейных четырехполюсников является частотно-избирательное звено 2 (колебательное или апериодическое), вторым - цепь положительной обратной связи 3. Частотно-избирательное звено характеризуется частотой  $f_p \neq 0$ , на которой модуль коэффициента передачи имеет максимальное значение, а фазовый сдвиг равен нулю. Коэффициент передачи цепи обратной связи от частоты не зависит. В некоторых схемах автогенераторов первое и второе звено объединены в однорезонансный усилитель.



Р и с. I. Структурная схема автогенератора

Механизм возникновения и поддержания в автогенераторе незатухающих колебаний может быть пояснен следующим образом. В момент запуска автогенератора, например при включении напряжения питания, в схеме возникает свободные колебания, обусловленные броском напряжений или токов, электрическими флуктуациями и т.д. Благодаря положительной обратной связи эти первоначальные колебания усиливаются усилителем I. Пока амплитуды малы, усилитель работает в линейном режиме и за один период колебаний сообщает контуру энергии больше, чем за это же время расходуется в нем. С ростом амплитуды начинает проявляться нелинейность характеристик усилителя, и усиление снижается. Увеличение амплитуды колебаний в контуре полностью прекращается при снижении усиления до уровня, при котором только компенсируется затухание колебаний в контуре, т.е. когда энергия, отдаваемая усилителем в контур за один период, равна энергии, расходуемой в нем за это же время. Математически это записывается в виде уравнения баланса амплитуд  $K_{yc} K_{oc} = 1$ , где  $K_{yc} = U_2/U_1$  - коэффициент передачи резонансного усилителя;  $K_{oc} = U_3/U_2$  - коэффициент передачи четырехполосника обратной связи.



Р и с. 2. Амплитудная характеристика усилителя (а), частотная и фазовая характеристики избирательной цепи (б) автогенератора

На рис.2,а показана результирующая амплитудная характеристика резонансного усилителя. Имеется начальный (левее точки I) участок линейного усиления при  $K_{yc} = const$  и участок нелинейного уси-

ния. Точка 2 на последнем участке соответствует режиму установившихся колебаний. Приведенная характеристика соответствует режиму мягкого возбуждения, при котором колебания в автогенераторе возникают самостоятельно. Возможен режим так называемого жесткого возбуждения, когда усиление на начальном участке характеристики, показанном пунктирной линией на рис. 2,а, недостаточно и требуется внешний "толчок", чтобы помочь автогенератору "выйти" на участок, на котором  $K_{\text{уст}} K_{\text{ос}} > 1$ .

Частота колебаний автогенератора. Частота колебаний определяется фазовыми соотношениями в автогенераторе. Причины этому следующие. Для нормальной работы генератора необходимо, чтобы колебания, сделав путь, например, от входа усилителя к выходу, затем вернулись по цепи обратной связи на его вход в той же фазе. Иными словами, при полном обходе замкнутой системы автогенератора суммарный фазовый сдвиг должен быть равен 0 ( $2\pi$ ,  $4\pi$  и т.д.).

В самом общем случае возможно появление следующих фазовых сдвигов между токами и напряжениями в цепях автогенератора. Электронный прибор в усилительном каскаде может переворачивать фазу сигнала на некоторую постоянную величину  $\varphi_{\text{эл}}$  (например,  $\varphi_{\text{эл}} = 180^\circ$  при включении транзистора по схеме с общим эмиттером). Кроме этого, из-за инерционных свойств электронного прибора возможно появление паразитного фазового сдвига  $\varphi_{\text{эл}}$  между входным и выходным напряжениями. Величина  $\varphi_{\text{эл}}$  тем больше, чем ближе частота генерации к максимально допустимой частоте электронного прибора. Несовпадение по фазе колебательного напряжения на входе частотно-избирательного звена с током первой гармоники обозначим через угол  $\varphi_{\text{к}}$ . Зависимость  $\varphi_{\text{к}}$  от частоты для колебательного LC-контура приведена на рис. 2,б. Цепь обратной связи также вносит фазовый сдвиг между напряжениями  $u_3$  и  $u_2$ . Он содержит постоянную составляющую  $\varphi_{\text{ос}}$  и случайную  $\varphi_{\text{ос}}$ . Автогенераторы обычно проектируют так, что  $\varphi_{\text{эл}} + \varphi_{\text{ос}} = 0$ . Поэтому выражение для баланса фаз автогенератора запишется в следующем виде:

$$\varphi_{\text{эл}} + \varphi_{\text{к}} + \varphi_{\text{ос}} = 0 \quad (2\pi, 4\pi \dots).$$

Фазовое равновесие в автогенераторе автоматически поддерживается колебательным контуром, входящим в состав звена 2, в результате самопроизвольного изменения угла  $\varphi_{\text{к}}$ . Если допустить, что  $\varphi_{\text{эл}} = 0$

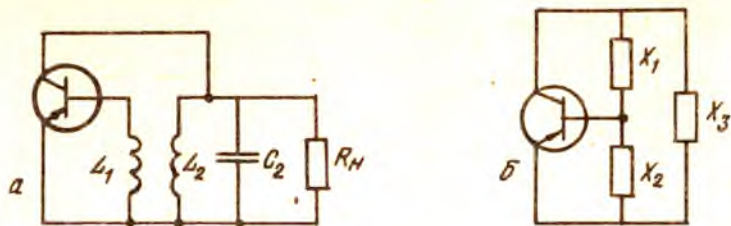
и  $Y_{oc} = 0$ , то и  $Y_K = 0$ . В таком случае в автогенераторе возможно существование колебаний, частота которых  $f_r$  совпадает с собственной частотой контура  $f_a$ . В реальном же устройстве фазовые сдвиги между током и напряжением внутри электронного прибора и цепи обратной связи отличны от нуля ( $|Y_{in} + Y_{oc}| \neq 0$ ). Для их компенсации контур должен обеспечить фазовый сдвиг между током и напряжением первой гармоники:  $Y_K = -(Y_{in} + Y_{oc})$ .

Это становится возможным только в том случае, если частота генерации будет определенным образом отличаться от собственной частоты колебательного контура  $f_0$ . Всякое изменение  $Y_{in}$  или (и)  $Y_{oc}$  неизбежно влечет за собой возникновение переходного процесса, заканчивающегося установлением в автогенераторе колебаний с некоторой новой частотой  $f_{r2}$  в соответствии с требуемым значением  $Y_{K2}$ , обеспечивающим выполнение условия баланса фаз. Конечно, такие изменения  $Y_K$  не должны превышать пределов  $\pm \pi/2$ , иначе компенсирующие возможности колебательного контура окажутся исчерпанными. Свойство колебательного контура ослаблять воздействие дестабилизирующих факторов на частоту  $f_r$  называется его **фи к с и р у ю щ е й** **с п о с о б н о с т ь ю**.

На нестабильность генерируемой частоты действуют и любые изменения амплитудных соотношений в автогенераторе. Они влияют на внутреннее сопротивление электронного прибора и динамические емкости, что в свою очередь приводит к непостоянству эквивалентной добротности контура и собственной его частоты.

Схематехника автогенераторов гармонических колебаний. На частотах до 100 МГц транзисторные автогенераторы выполняют, как правило, либо по схеме с трансформаторной обратной связью (рис. 3,а), либо по типу трехточечных схем. Наибольшее распространение получили трехточечные автогенераторы. Они относительно просты в схемотехническом исполнении и позволяют обеспечить высокую стабильность частоты генерации. В простейшем случае такой автогенератор содержит параллельный колебательный контур, к трем точкам которого активный элемент присоединен тремя своими основными электродами. Обобщенная эквивалентная схема такой трехточки представлена на рис. 3,б. Здесь колебательный контур образован тремя реактивными сопротивлениями  $X_1, X_2, X_3$ . Условие резонанса для него может быть записано в следующем виде:





Р и с. 3. Эквивалентные схемы автогенераторов с трансформаторной обратной связью (а) и трехточечного (б) типа

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0, \quad (1)$$

т.е. по крайней мере одно из реактивных сопротивлений должно иметь обратный знак по отношению к остальным.

Цепь положительной обратной связи ( $X_1$  и  $X_2$ ) представляет собой делитель напряжения и является неотъемлемой частью колебательного контура. Коэффициент обратной связи может быть выражен как

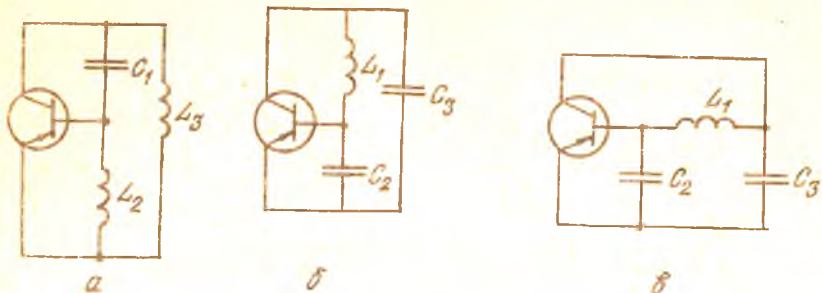
$$K_{oc} = X_2 / (X_1 + X_2). \quad (2)$$

При соблюдении условия (2) выражение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$K_{oc} = - (X_2 / X_3). \quad (3)$$

Таким образом, для получения положительной обратной связи ( $K_{oc} < 0$ ) сопротивления  $X_2$  и  $X_3$  должны иметь одинаковый знак, т.е. оба должны носить либо индуктивный, либо емкостный характер. Тогда для выполнения условия (1) необходимо, чтобы оставшееся сопротивление контура  $X_1$  было противоположного знака. Нетрудно доказать, что этим требованиям удовлетворяют только две схемы трехточечных (рис. 4, а и б). Первая из них получила название *и н д у к т и в н о й*, а вторая — *е м к о с т н о й*. Оба варианта имеют идентичные механизмы возбуждения и равное число радиоконпонентов.

Длительное время автогенераторы строились как на основе индуктивной, так и емкостной трехточечки, поскольку считалось, что ни одна из них не имеет сколь-нибудь заметного преимущества над другой. По мере развития теории автогенераторов выяснялось, что вторая схема

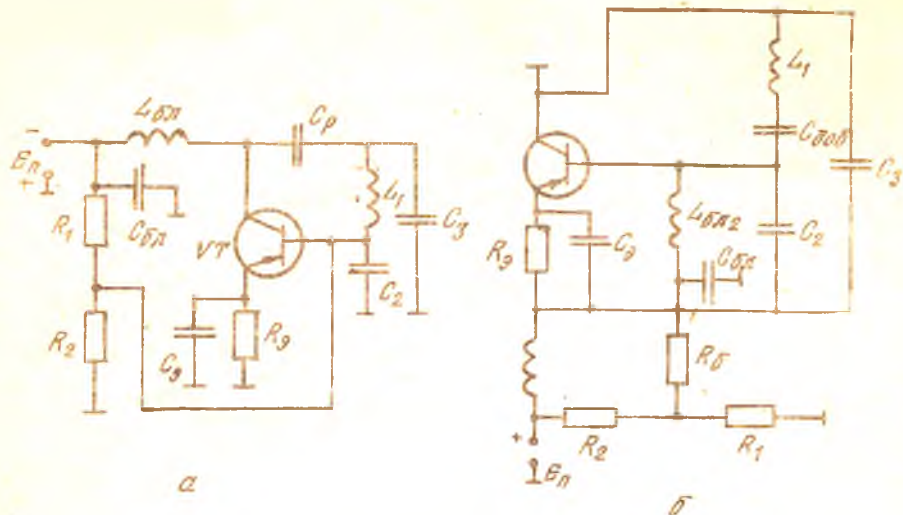


Р и с. 4. Эквивалентные схемы индуктивной (а) и емкостной (б, в) трехточек

обладает рядом достоинств по сравнению с первой. Во-первых, емкостная трехточка имеет в своем составе П-образный контур, в чем нетрудно убедиться, расположив ее реактивные элементы так, как показано на рис. 4, в. Такая частотно-избирательная цепь обладает наилучшими фильтрующими способностями, а снижение уровня гармоник, поступающих с выхода на вход автогенератора уменьшает фазовый сдвиг при прохождении колебаний через электронный прибор. В итоге емкостная трехточка (при прочих равных условиях) позволяет обеспечить более высокую стабильность генерируемой частоты, чем индуктивная. Во-вторых, ее колебательная система содержит только одну катушку индуктивности. Известно, что данный реактивный элемент по своим эталонным свойствам уступает конденсатору. К тому же заменить одну катушку высокоэталонной индуктивностью кварцевого резонатора всегда проще, чем две в индуктивной трехточке, поэтому транзисторные автогенераторы чаще всего выполняются по схеме емкостной трехточки. В ней благодаря наличию конденсаторов  $C_2$  и  $C_3$  удается снизить влияние собственных емкостей транзистора  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  на частоту генерируемых колебаний.

На рис. 5 приведены примеры схем трехточечных автогенераторов.





Р и с. 5. Ёмкостные трехточечные автогенераторы:  
 а - с параллельной схемой питания; б - с заземленным коллектором

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

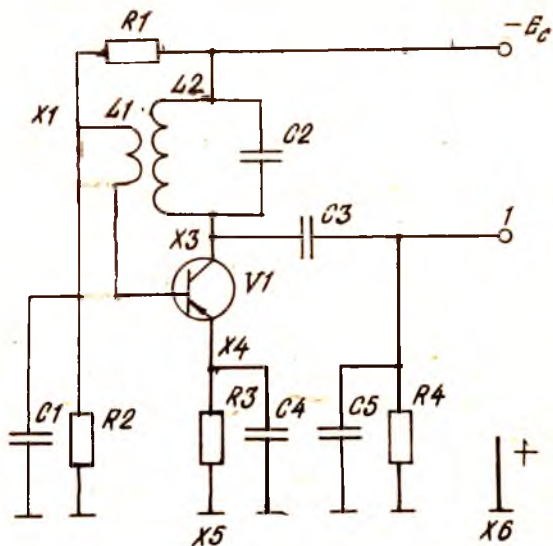
В работе исследуется  $LC$  - генератор с трансформаторной обратной связью. Генератор собран на транзисторе  $V1$ , в коллекторную цепь которого включен колебательный контур  $L2C2$ . Нагрузка  $C5R4$  связана с контуром через ёмкость связи  $C3$ . Элементом положительной обратной связи служит катушка  $L1$ , размещенная таким образом, что ее витки частично пронизывают магнитный поток, создаваемый катушкой  $L2$ .

#### ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА

Лабораторная работа проводится на стенде 87Л-01, где установлена сменная панель № 21 (см. рис. 6). При выполнении работы используются следующие элементы:

|            |                     |         |
|------------|---------------------|---------|
| транзистор | $V1$ (КТ361, ГТ309) | - 1 шт. |
| резисторы  | $R1$ (18 кОм)       | - 1 шт. |

|              |   |        |
|--------------|---|--------|
| резисторы    | $R2$ (6,8 кОм)                              | -1 шт. |
|              | $R3$ (2,4 кОм)                              | -1 шт. |
|              | $R4$ (10 кОм, 5,1 кОм, 2,4 кОм,<br>1,2 кОм) | -4 шт. |
| конденсаторы | $C1$ (0,01 мкФ)                             | -1 шт. |
|              | $C2$ (100 пФ; 510 пФ; 680 пФ;<br>1000 пФ)   | -4 шт. |
|              | $C3$ (510 пФ)                               | -1 шт. |
|              | $C4$ (0,033 мкФ)                            | -1 шт. |
|              | $C5$ (100 пФ)                               | -1 шт. |
| фильтр       | $E2$ ( $L1 = 160$ мкГн; $L2 = 0,5$ мГн)     | -1 шт. |



Р и с. 6. Принципиальная схема лабораторной установки

В работе также используют: электронный осциллограф С1-73; регулируемый источник напряжения - ГН2.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Пользуясь принципиальной схемой, изображенной на передней панели лабораторного стенда, собрать схему генератора. При сборке использовать элементы  $C2 = 510$  пФ,  $R4 = 10$  кОм.

2. Установить напряжение источника питания ГН2, равным 10 В. Для контроля напряжения использовать измеритель выхода ИВ, смонтированный в правой стойке лабораторного стенда.

3. Подать в соответствующей полярности напряжение с источника ГН2 на схему.

4. Добиться самовозбуждения генератора (выполнить условия самовозбуждения) и зарисовать форму колебаний на выходе.

5. С помощью осциллографа измерить частоту и амплитуду выходного напряжения автогенератора для различных емкостей в колебательном контуре  $C2 = 100; 510; 680; 1000$  пФ.

Частота определяется как  $f = 1/T$ , где  $T$  - период колебаний.

6. Снять зависимость амплитуды и частоты выходного напряжения от сопротивления нагрузки  $R4 = 10; 5,1; 2,4; 1,2$  кОм.

7. Снять зависимость амплитуды и частоты выходного напряжения от величины напряжения питания (4-5 точек) для  $C2 = 510$  пФ и  $R4 = 10$  кОм.

Напряжение питания уменьшать до полного прекращения генерации.

8. Рассчитать зависимость частоты выходного напряжения генератора от емкости  $C2 = 100; 510; 680; 1000$  пФ и построить график этой зависимости.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование лабораторной работы, Ф.И.О. студента.
2. Принципиальная схема генератора.
3. Расчетные и экспериментальные зависимости, осциллограммы.
4. Выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается физический смысл баланса фаз и амплитуд в автогенераторе?
2. По каким причинам коэффициент усиления усилительного каскада зависит от амплитуды входного напряжения?
3. Почему несмотря на ограничение сигнала в усилительном элементе выходное напряжение автогенератора имеет синусоидальную форму?
4. Почему при повышении добротности колебательного контура возрастает стабильность частоты колебаний автогенератора?
5. Почему в трехточечных генераторах для коэффициента обратной связи должно выполняться условие  $K_{обс} < 0$ ?
6. Назначение элементов и принцип действия схемы генератора (см. рис. 5,а).
7. Назначение элементов и принцип действия схемы генератора (см. рис. 5,б).
8. В автогенераторе (см. рис. 5,б) в колебательный контур введена емкость  $C_{доб}$  (так называемая схема Клаппа), позволяющая повысить добротность контура. На каких физических явлениях основано действие этой емкости?
9. Чем достигается выполнение условий баланса фаз и амплитуд в автогенераторе с трансформаторной обратной связью?
10. Какие элементы в исследуемой схеме автогенератора обеспечивают мягкий режим возбуждения?
11. Какие изменения произойдут в работе исследуемой схемы при отказе (обрыв или пробой) конденсатора  $C1$ ?
12. Какие изменения произойдут в работе исследуемой схемы при отказе (обрыв или пробой) конденсатора  $C4$ ?
13. Какие факторы влияют на нестабильность частоты автогенератора и каковы способы стабилизации этой частоты?
14. Принцип действия автогенераторов с отрицательным сопротивлением.

### Библиографический список

- Манаев Е.И. Основы радиозлектроники. М.: Радио и связь, 1985.  
Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1983.  
Радиопередающие устройства /Л.А.Белов, М.В.Благовещенский, В.М.Богачев и др. М.: Радио и связь, 1982.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТРАНЗИСТОРАХ (ШИФР 87Л-01/26)

Цель работы: ознакомление с принципом действия и особенностями работы ждущего генератора линейно изменяющегося напряжения с компенсирующей ЭДС.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

В радиоэлектронных устройствах часто используются линейно изменяющееся напряжение, которое называют также пилообразным. Устройства, формирующие такие напряжения, называют генераторами линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) или генераторами пилообразного напряжения (ПН).

Выходное напряжение ГЛИН (рис. 1) в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному (или близкому к нему) закону. Время нарастания напряжения от начального уровня  $U_0$  до максимального значения  $U_1$  называется длительностью прямого (рабочего) хода  $t_{пр}$ . Время убывания напряжения от значения  $U_1$  до значения  $U_0$  называется длительностью обратного хода (стадии восстановления). Во время обратного хода напряжение изменяется по закону, в общем случае отличному от линейного, например экспоненциальному.

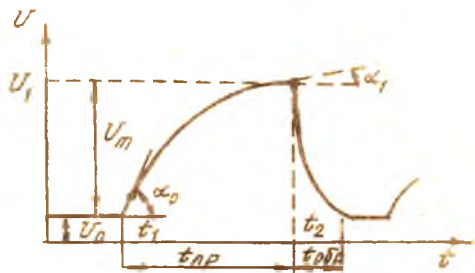


Рис. 1. Выходное напряжение ГЛИН

Важнейшим дополнительным параметром является коэффициент нелинейности пилообразного напряжения  $K_H$ . Он характеризует изменение скорости нарастания напряжения за время прямого хода:

$$K_H = \frac{\frac{du}{dt}|_{t=t_1} - \frac{du}{dt}|_{t=t_2}}{\frac{du}{dt}|_{t=t_1}}$$

Поскольку графическим смыслом производной функции является тангенс угла наклона касательной, то

$$K_H = 1 - \frac{tg \alpha_1}{tg \alpha_0},$$

где  $\alpha_0$  - угол наклона касательной к функции  $u(t)$  в точке с абсциссой  $t = t_1$ ;  $\alpha_1$  - угол наклона касательной к функции в точке  $t = t_2$ . Коэффициент нелинейности  $K_H$  - величина безразмерная; иногда его выражают в процентах. Для идеального линейного прямого хода  $K_H = 0$ .

Эффективность ГЛИН оценивается коэффициентом использования напряжения источника питания  $\eta$  :

$$\eta = U_m / E.$$

Линейно изменяющееся напряжение применяется в радиоизмерениях, телевидении, радиолокации, радиотелеметрии и в других областях. Например, зная скорость изменения пилообразного напряжения, можно с высокой точностью проводить отсчет промежутков времени. Эта идея реализуется в устройствах временной развертки луча электроннолучевых приборов. Линейно изменяющееся напряжение находит также применение в каскадах сравнения, где фиксируется момент достижения напряжением заданного уровня (преобразователи аналог - код), в устройствах задержки импульсов на калиброванное время и т.д.

Параметры ГЛИН, используемых в радиоэлектронной аппаратуре, имеют следующий порядок величин:

рабочий перепад  $U_m$  - от единиц до сотен вольт;

длительность прямого хода - от нескольких микросекунд до долей секунды;

длительность стадии восстановления  $t_{обр} = (0,05 \dots 0,2) t_{пр}$ ;

коэффициент нелинейности  $K_H$  : в осциллографии - до 10%; в телевидении - до 5%; в преобразователях аналог - код - от 0,1 до 0,2%;

коэффициент использования  $\eta$  - от 0,01 (у простейших ГЛИН) до 0,92 (у наиболее современных ГЛИН).



## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГЛИН

Для создания линейно изменяющегося напряжения в настоящее время в основном применяют принцип зарядки (разрядки) конденсатора током, неизменным в течение времени прямого хода. Математически эта идея записывается следующим образом:

$$u = u(t) = u_0 \pm \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \quad (1)$$

где  $i$  — ток, протекающий через конденсатор емкостью  $C$ ;  $u_0 > 0$  — начальное напряжение; знак перед интегралом зависит от направления тока  $i$ .

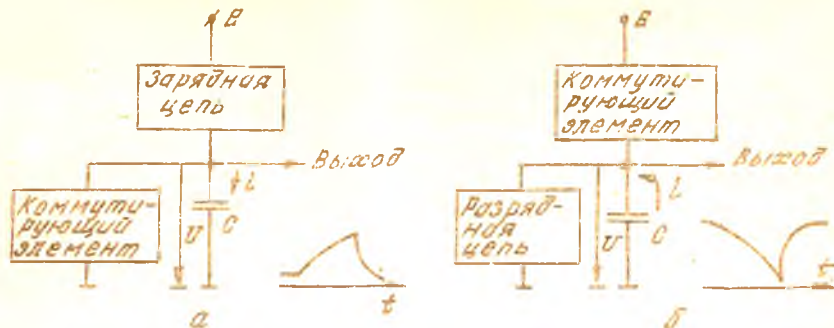
Из формулы (1) следует, что если  $i = I = \text{const}$ , то

$$u = u(t) = u_0 \pm \frac{I}{C} t. \quad (2)$$

Следовательно, основными элементами ГЛИН являются интегрирующий конденсатор  $C$  и зарядная (разрядная) цепь, формирующая зарядный (разрядный) ток конденсатора в рабочей стадии. Восстановление же исходного напряжения на конденсаторе после окончания рабочей стадии обеспечивается коммутирующим элементом.

Применяются две схемы построения ГЛИН: с параллельным (рис. 2, а) и последовательным (рис. 2, б) включением коммутирующего элемента. В обеих схемах коммутирующий элемент разомкнут в рабочей стадии и замкнут в стадии восстановления. В первой схеме конденсатор в рабочей стадии заряжается от источника  $E$ , и напряжение на нем изменяется от  $u_0$  до  $u_f$ ; в стадии же восстановления конденсатор быстро разряжается до напряжения  $u_0$ . Во второй схеме в рабочей стадии конденсатор разряжается через разрядную цепь, а в стадии восстановления он заряжается через коммутирующий элемент.

В качестве коммутирующего элемента обычно используются различные полупроводниковые приборы: транзисторы, однопереходные транзисторы, тиристоры и др. Коммутирующий прибор работает в ключевом режиме и управляется импульсами, внешними или внутренними, вырабатываемыми самой схемой ГЛИН. Соответственно этому генераторы могут быть ждущими и автоколебательными. Кроме того, различают ГЛИН с внешним и внутренним стробом. В первых длительность внешнего запускающего импульса (внешнего строба) определяет время прямого хода.



Р и с. 2. Функциональные схемы ГЛИ

Генераторы с внутренним стробом вырабатывают соответствующий прямоугольный импульс за счет действия собственных внутренних связей; при каждом режиме работы для запуска требуется лишь короткий запускающий импульс. Генераторы с внутренним стробом (ждущие и автоколебательные) называются еще фантастропами.

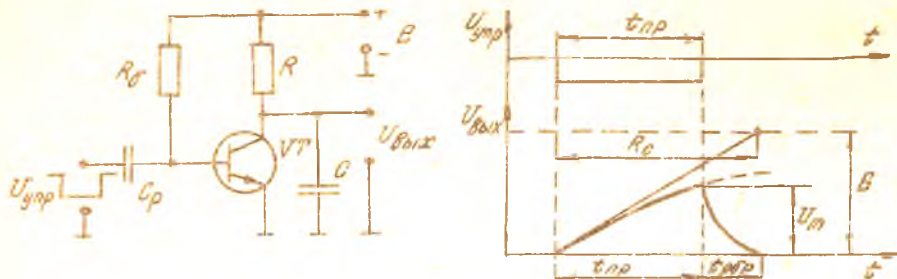
#### ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ СХЕМ ГЛИ

Различные практические схемы генераторов линейно изменяющегося напряжения отличаются только способами стабилизации зарядного тока конденсатора. Рассмотрим некоторые из них.

ГЛИ с интегрирующей RC - цепью. При невысоких требованиях к линейности напряжения специальных мер для стабилизации тока конденсатора не применяют. Зарядку конденсатора  $C$  производят через резистор  $R$ , имея в виду, что в начале зарядки (разрядки) ток, проходящий через конденсатор меняется мало.

Схема генератора (рис. 3,а) включает в себя интегрирующую RC-цепь, ключевой транзистор  $VT$  с базовым резистором  $R_B$  и разделительный конденсатор  $C_p$ , связывающий генератор с источником управляющих сигналов  $U_{уп}$ .

При отсутствии входных импульсов транзистор  $VT$  насыщен, поскольку его база связана с источником питания  $+E$  через резистор  $R_B$ , задающий прямой ток базы, достаточный для насыщения:  $I_B = E/R_B$ . Ток коллектора насыщенного транзистора  $I_{KH} = E/R$ .



Р и с. 3. ПЛИН с интегрирующей  $RC$  -цепью

Условие насыщения имеет вид  $R_B \leq \beta R$  ( $\beta$  - коэффициент усиления базового тока в схеме с ОБ). При выполнении указанного условия напряжение на коллекторе транзистора и конденсатора  $C$  мало:  $U_0 \approx 0$ .

Отрицательный входной импульс, поступая через конденсатор  $C_p$  на базу транзистора  $VT$ , выводит последний из режима насыщения. Через малый интервал времени, соответствующий процессу рассасывания, транзистор  $VT$  оказывается запертым. Конденсатор  $C$  заряжается от источника питания  $E$  через резистор  $R$  за время, соответствующее длительности входного импульса. Предельный уровень, к которому стремится напряжение на конденсаторе, равен  $E$  (рис. 3, 5). Постоянная времени цепи зарядки конденсатора  $\tau = RC$ . Начальный ток, которым осуществляется зарядка конденсатора, близок к  $E/R$ .

Линейность выходного напряжения можно обеспечить только в том случае, когда за время  $t_{нар}$  ток зарядки мало изменяется и остается близким к начальному значению. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы  $\tau \gg t_{нар}$ . Однако оказывается, что  $K_H = \gamma = U_m/E$ , т.е. коэффициенты нелинейности и использования напряжения источника питания численно равны. Отсюда можно сделать следующие выводы:

при повышении линейности напряжения ухудшается степень использования напряжения питания, уменьшается амплитуда выходного импульса;

при заданном  $K_H$  получение выходного импульса значительной амплитуды возможно только, если использован высоковольтный источник питания  $E$ .

По окончании действия входного импульса транзистор  $VT$  отпирается, и в цепи его базы начинает протекать прямой ток  $I_B = E/R_B$ .

Разряд конденсатора  $C$  происходит в основном через транзистор, так как значение резистора  $R$  велико и ток, проходящий через него, мал. Можно считать на этом этапе, что резистор  $R$  отсутствует, транзистор находится в активном режиме, и разряд конденсатора осуществляется коллекторным током  $I_K = \beta I_B$ , не зависящим от напряжения коллектор - эмиттер. Поэтому напряжение на конденсаторе уменьшается по линейному закону до тех пор, пока разрядный ток не станет меньше  $\beta I_B$  вследствие попадания рабочей точки на граничную линию выходных характеристик транзистора. После насыщения транзистора разрядка конденсатора завершается с постоянной времени  $\tau_{нас} C$  ( $\tau_{нас}$  - сопротивление насыщенного транзистора). Поскольку на последнем этапе напряжение на конденсаторе мало и изменяется незначительно, можно считать, что формирование обратного хода определяется первым этапом разрядки, т.е. при активном режиме работы транзистора. Отсюда время обратного хода

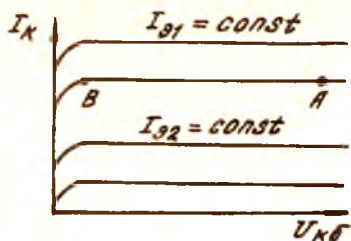
$$t_{обр} = C \frac{U_m}{\beta I_B} = CR_0 \frac{\beta}{\beta}$$

К недостаткам данной схемы, кроме отмеченных, относится также невысокая температурная стабильность амплитуды выходного напряжения, связанная с тем, что обратный ток коллектора закрытого транзистора  $I_{KO}$  может создавать на резисторе  $R$  заметное падение напряжения. Вследствие этого напряжение на конденсаторе стремится к меньшему предельному значению  $(E - I_{KO} R)$ .

Рассмотренную схему используют в тех случаях, когда допустима относительно большая нелинейность ( $K_N \approx 10...20\%$ ) или если в распоряжении имеется источник с напряжением, гораздо большим требуемой амплитуды пилообразного напряжения.

ГЛИН с токостабилизирующим элементом. Весьма распространенными токостабилизирующими устройствами являются биполярные и полевые транзисторы, выходные вольт-амперные характеристики которых имеют пологий участок. Стабилизирующее действие биполярного транзистора особенно заметно в схеме с общей базой, у которой выходные характеристики  $I_K = f(I_{KO})$  при  $I_B = const$  (рис. 4) имеют в  $\beta$  раз меньший наклон, чем в схеме с общим эмиттером.

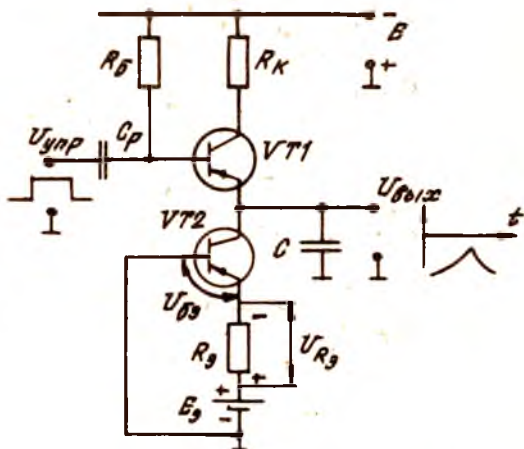
Токостабилизирующий элемент включается последовательно с конденсатором вместо резистора, через который в предыдущей схеме прохо-



Р и с. 4. Выходные ВАХ транзистора

для зарядный (разрядный) ток. По мере зарядки напряжение на конденсаторе увеличивается, а на транзисторе - уменьшается. Если  $I_g = const$ , то рабочая точка перемещается на участке  $A-B$  одной из выходных характеристик (см. рис. 4). При этом ток транзистора (конденсатора) на значительном участке характеристики меняется сравнительно мало.

На рис. 5 изображена схема ГЛИН, реализующая изложенный принцип. На транзисторе  $VT2$ , постоянно работающем в усилительном режиме, собран стабилизатор тока, а на транзисторе  $VT1$  - коммутирующий каскад. В исходном состоянии транзистор  $VT1$  насыщен и  $U_{облз} = U_c \approx E$  (при малом сопротивлении  $R_H$ ).



Р и с. 5. ГЛИН с токостабилизирующим транзистором и последовательным ключом

С-поступлением входного управляющего импульса транзистор  $VT1$  запирается, и конденсатор  $C$  начинает разряжаться через стабилизатор на транзисторе  $VT2$ .



Необходимое постоянство эмиттерного тока  $I_E$  обеспечивается отрицательной обратной связью, обусловленной наличием резистора  $R_E$ . При уменьшении напряжения  $U_{кб}$  транзистора  $VТ2$  (по мере разрядки конденсатора  $C$ ) ток  $I_E$  уменьшается, напряжение  $U_{кэ}$  становится меньше, смещение  $U_{бэ}$  на базовом переходе сказывается более отрицательным, и в результате  $I_E$  уменьшается в значительно меньшей степени. Благодаря этому при достаточно большом значении  $R_E$  стабилизатор ведет себя аналогично транзистору в схеме с общей базой при  $I_E = const$ . В результате ток коллектора изменяется незначительно — разрядка конденсатора  $C$  осуществляется почти неизменным током, т.е. линейно.

Напряжение на резисторе  $R_E$  прикрывает переход  $э-к$  эмиттер транзистора  $VТ2$ . Поэтому без источника  $E_B$  транзистор работал бы при малых токах и без должного усиления. Величина  $E_B$  определяется требуемым током разрядки, т.е. током  $I_E = (E_B - U_{бэ}) / R_E \approx E_B / R_E$  (обычно  $E_B \gg U_{бэ}$ ). Источник смещения можно включить и в базовую цепь, изменив при этом его полярность.

Достоинством ГЛИН с токостабилизирующим элементом является возможность получения высоких значений коэффициента использования по напряжению:  $\eta = 0,8 \dots 0,9$ .

ГЛИН компенсационного типа. Идея построения таких генераторов заключается в следующем. Ток зарядки конденсатора  $C$  окажется неизменным, если в его цепи будет действовать некий источник, напряжение которого "следит" за напряжением  $U_C$  и в любой момент времени компенсирует его (рис. 6). Действительно, в этом случае ток зарядки не меняется во времени:

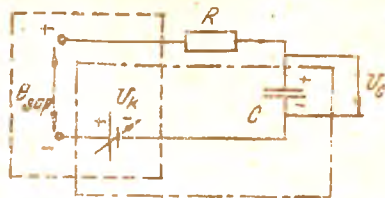
$$I_{зар} = (E_{зар} - U_C + U_K) / R = E_{зар} / R = const.$$

Как следует из схемы (см. рис. 6), напряжение  $U_K$  действует согласно с зарядным напряжением  $E_{зар}$  и встречно к напряжению  $U_C$ . В соответствии с этим в основу принципиальных схем ГЛИН положено либо согласное включение  $U_K$  и  $E_{зар}$  (оно достигается наличием в схеме положительной обратной связи), либо встречное включение  $U_K$  и  $U_C$  (за счет наличия в схеме отрицательной обратной связи).

Можно считать, что в схеме ГЛИН с положительной обратной связью действует (создан) некоторый эквивалентный источник (обведенный



пунктиром на рис. 6), напряжение которого ( $E_{зар} + U_k$ ) увеличивается при зарядке конденсатора по такому же закону, как и  $U_0$ . В таких генераторах выходное напряжение снимается с конденсатора, одна обкладка которого соединяется с "землей" — поэтому ни один зажим источника  $E_{зар}$  не должен соединяться с "землей".



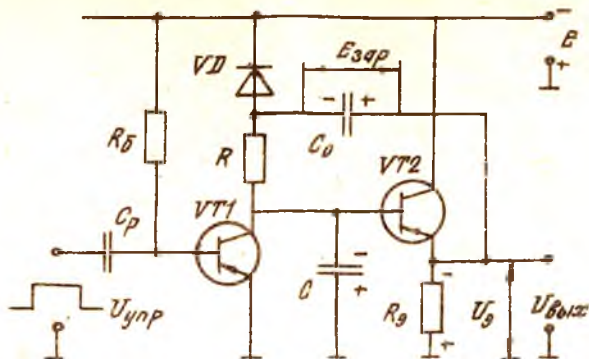
Р и с. 6. Включение компенсирующего источника

В схеме ГЛИН с отрицательной обратной связью можно мысленно объединить компенсирующий источник и конденсатор  $C$  (на рис. 6 они обведены штрих-пунктирной линией) и считать, что источник  $E_{зар}$  обеспечивает неизменный ток в цепи, содержащий только резистор  $R$ . В таком генераторе один зажим источника  $E$  (например, отрицательный в схеме рис. 6) можно соединить с "землей", а напряжение снимать с компенсирующего источника.

Одна из возможных схем ГЛИН с положительной обратной связью приведена на рис. 7. На транзисторе  $VТ1$  собран коммутирующий каскад, переключающий конденсатор  $C$  с разрядки на зарядку. Роль компенсирующего источника выполняет эмиттерный повторитель на транзисторе  $VТ2$  с коэффициентом усиления  $K \approx 1$ . Конденсатор  $C_0$  является источником питания схемы при зарядке конденсатора  $C$ ; его выбирают из условия  $C_0 \gg C$ , так что за время зарядки конденсатора  $C$  напряжение на  $C_0$  остается практически неизменным. Дiode  $VД$  обеспечивает отключение источника  $E$  от схемы во время зарядки конденсатора  $C$ .

До прихода управляющего импульса транзистор  $VТ1$  насыщен, благодаря чему конденсатор  $C$  разряжен. В это время конденсатор  $C_0$  заряжается по цепи:  $(+E) - \text{"земля"} - \text{резистор } R_2 - C_0 - \text{диод } VД - (-E)$  и в конце зарядки  $E_{зар} \approx E$ .

С приходом управляющего импульса транзистор  $VТ1$  запирается, и конденсатор  $C$  начинает заряжаться через резистор  $R$ . Благодаря этому напряжение  $U_3$  на выходе эмиттерного повторителя возрастает по абсолютному значению. Теперь сумма согласно включенных напряжений  $E_{зар} + U_3$  превышает  $E$ , и диод  $VД$  запирается. Схема отключается от внешнего источника  $E$  и начинает питаться от заряженного конденсатора  $C$ . Так как коэффициент передачи пов-



Р и с. 7. ГЛИН с положительной обратной связью

торителя  $K \approx 1$ , то  $U_9 \approx U_C$ , т.е. напряжение на выходе повторителя "следит" за напряжением на конденсаторе  $C$ . В результате с увеличением напряжения  $U_C$  почти так же возрастает сумма  $E_{30p} + U_9$ , и ток в зарядной цепи остается практически постоянным.

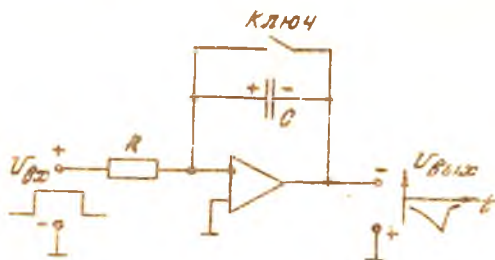
С окончанием действия на входе схемы управляющего импульса транзистор  $VT1$  входит в насыщение, конденсатор  $C$  через него быстро разряжается, и схема возвращается в исходное состояние.

Погрешности генератора при формировании линейно изменяющегося напряжения обусловлены некоторым уменьшением напряжения на конденсаторе  $C_0$ , а также ошибкой "слежения" эмиттерного повторителя, т.е. неточным выполнением условия  $K=1$  во всем диапазоне входных напряжений.

ГЛИН с отрицательной обратной связью строятся на основе активных интеграторов, т.е. усилителей, охваченных емкостной отрицательной обратной связью (рис. 8). Она представляет собой интегратор на основе операционного усилителя. На элементах схемы для случая положительного входного импульса указаны полярности напряжений. Входное напряжение играет роль  $E_{30p}$ . Роль компенсирующего играет напряжение  $U_{901x}$  (оно включено встречно с напряжением на конденсаторе  $U_C$ ). Поскольку разность потенциалов между входами операционного усилителя очень мала, значения  $U_C$  и  $U_{901x}$  практически одинаковы, они взаимно компенсируются, и через конденсатор течет ток  $I = U_{901x} / R = \text{const}$ .

Благодаря этому на конденсаторе формируется линейно изменяющееся напряжение:

$$U_{\text{вых}} \approx -U_c = -\frac{1}{C} \int_0^t i dt = -\frac{U_{\text{вх}}}{RC} t.$$



Р и с. 8. ЛИИ на основе интегратора

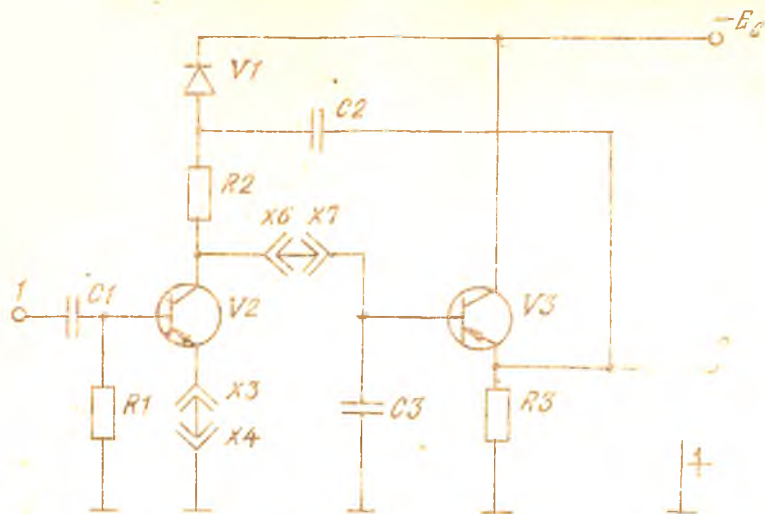
Таким образом, интегратор при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$  работает как ЛИИ компенсационного типа, с отрицательной обратной связью. Роль компенсирующего источника в схеме выполняет операционный усилитель. Чем больше его коэффициент усиления, тем точнее  $U_{\text{вх}}$  компенсирует  $U_c$ .

Обратный ход пилообразного импульса формируется в процессе быстрой разрядки конденсатора  $C$  после замыкания ключа. Ключ обычно выполняется на одном или нескольких транзисторах и управляется импульсом сброса.

Достоинством ЛИИ на основе интегратора является высокая линейность напряжения.

#### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

В работе исследуется модуль ЛИИ компенсационного типа (рис. 9), несколько отличающийся от уже рассмотренного. Поэтому для успешного выполнения лабораторной работы необходимо уяснить принцип действия исследуемого генератора и нарисовать возможную форму экспериментальных кривых напряжения в различных точках схемы.



Р и с. 9. Принципиальная схема лабораторной установки

#### ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА

Лабораторная работа проводится на стенде 87Л-01, где установлена сменная панель № 26. При выполнении работы используются следующие элементы:

|              |                           |         |
|--------------|---------------------------|---------|
| транзисторы  | $V2, V3$ (МП40)           | - 2 шт. |
| диод         | $V1$ (Д220)               | - 1 шт. |
| резисторы    | $R1$ (15 кОм)             | - 1 шт. |
|              | $R2$ (7,5 кОм)            | - 1 шт. |
|              | $R3$ (1,6 кОм)            | - 1 шт. |
| конденсаторы | $C1$ (0,1 мкФ)            | - 1 шт. |
|              | $C2$ (5 мкФ)              | - 1 шт. |
|              | $C3$ (0,033 мкФ; 0,1 мкФ) | - 2 шт. |
| перемычки    |                           | - 2 шт. |

В работе также используют электронный осциллограф  $СХ - 73$ ; регулируемый источник напряжения - ГН2; измеритель тока и напряжения - АВМ; генератор прямоугольных импульсов - ГПИ; генератор низкой частоты - ГНЧ.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные параметры линейно изменяющегося напряжения?
2. Принципиальная схема и принцип действия ГЛИН с интегрирующей  $RC$ - цепью.
3. От чего зависит время восстановления в схеме рис. 3?
4. В схеме рис. 3, а для повышения температурной стабильности амплитуды выходного напряжения иногда используют малые значения  $R$ . К каким последствиям может привести такой прием?
5. Чем ограничена максимально допустимая амплитуда выходного напряжения в схеме рис. 5?
6. От чего зависит длительность обратного хода в схеме рис. 5?
7. Из каких соображений должно выбираться сопротивление  $R_2$  в схеме рис. 5?
8. Предложите схему ГЛИН с питанием от одного источника напряжения (по схеме рис. 5).
9. Предложите схему ГЛИН с полевым транзистором в качестве токостабилизирующего двухполосника.
10. Какие изменения произойдут в работе схемы на рис. 7 при выходе из строя (обрыве или пробое) диода  $V_{D1}$ ? По каким причинам может наступить отказ диода?
11. Чем определяется время восстановления схемы рис. 7?
12. Как изменяется напряжение на резисторе  $R$  во время прямого хода в схеме рис. 7?
13. Объясните принцип действия ГЛИН, исследуемого в лабораторной работе.
14. Какие изменения надо произвести в схеме лабораторной установки, чтобы длительность "пили" определялась входным сигналом?
15. Как можно регулировать амплитуду выходного напряжения в схеме рис. 8?

## Библиографический список

- Гольденберг Л.М. Импульсные устройства. М.: Радио и связь, 1981.
- Ерофеев Ю.Н. Импульсная техника. М.: Выш.шк., 1984.
- Браммер Ю.А., Папук И.Н. Импульсная техника. М.: Выш. шк., 1985.



## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Пользуясь принципиальной схемой, изображенной на передней панели лабораторного стенда, собрать схему ГЛИН. При сборке использовать элементы  $C3 = 0,033$  мкФ;  $C2 = 5$  мкФ. Клеммы  $X5, X4$  и  $X8, X7$  соединить перемычками.

2. Установить напряжение источника питания ГН2, равным 10 В. Для контроля напряжения использовать измерительные блоки АВМ1 или ИВ, смонтированные в правой стойке лабораторного стенда.

3. Подать в соответствующей полярности напряжение с источника ГН2 на схему.

4. Установить на выходе ГПИ длительность импульсов  $T_{имп} = 3$  мкс, частоту повторения  $f = 1000$  Гц, амплитуду  $U = 3$  В. При установке требуемых параметров импульсной последовательности следует помнить, что ГПИ управляется от генератора низких частот (ГНЧ). Поэтому частота следования импульсов регулируется органами управления в ГНЧ. Для устранения сбоев в работе ГПИ длительность импульсов рекомендуется устанавливать, начиная с малых значений. Длительность и частота следования импульсов определяется с помощью осциллографа.

5. Подать на вход схемы (точка 1) импульсы нужной полярности.

6. Для трех частот следования импульсов  $f = 1000$ ,  $f = 600$ ,  $f = 300$  Гц зарисовать осциллограммы напряжений в точке 2.

7. Убрать из схемы конденсатор  $C2$  и повторить п. 6.

8. Заменить конденсатор  $C3 = 0,033$  мкФ на  $C3 = 0,1$  мкФ.

9. Установить частоту следования импульсов  $f = 300$  Гц и зарисовать осциллограммы в точке 2 (при убранном конденсаторе  $C2$ ).

10. Поставить в схему конденсатор  $C2$  и повторить п. 9.

11. Определять по осциллограммам, полученным в пп. 9 и 10, коэффициент нелинейности.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование лабораторной работы, Ф.И.О. студента.

2. Принципиальная схема ГЛИН.

3. Осциллограммы напряжений, необходимые расчеты.

4. Выводы по работе.



## ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ

Составитель Ф а д е е в Владимир Васильевич

Редактор Е.Д.А н т о н о в а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ъ к  
Корректор Н.Д.Ч а й н и к о в а

Подписано в печать 05.12.90. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага оберточная. Печать оперативная.  
Усл.п.л.1,4. Усл.кр.-отт. 1,5. Уч.-изд.л. 1,3. .  
Тираж 250 экз. Заказ № 6696 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева.  
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Областная типография имени В.П.Мяги Куйбышевского  
полиграфического объединения. 443099 Куйбышев,  
ул. Венцека, 60.