

Глава 5

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С УСИЛИТЕЛЯМИ

§ 5.1. Релаксационные генераторы. Общие замечания

Релаксационными генераторами называются электронные устройства, создающие колебания, которые состоят из участков со сравнительно медленным изменением тока или напряжения и их производных и участков, где они меняются очень быстро, «скачками» (например, рис. 5.3). При этом форма колебаний на отдельных участках определяется в основном не воздействием на релаксационный генератор внешних колебаний, а параметрами самого генератора. Ограничитель (§ 2.3) или электронное реле (§ 4.2), которые могут также давать колебания с участками медленного и очень быстрого изменения тока или напряжения, релаксационными генераторами не называют, поскольку форма колебаний, даваемых этими схемами, определяется подводимым к ним извне напряжением.

Колебания в релаксационных генераторах называют релаксационными колебаниями.

Релаксационные генераторы обычно делят на *релаксационные автогенераторы*, могущие давать периодические колебания без воздействия на них извне каких-либо колебаний, и *ждущие релаксационные генераторы*, которые каждый раз после воздействия на них внешнего импульса совершают один или иногда несколько циклов колебаний вполне определенной, зависящей от параметров генератора, формы.

Релаксационные генераторы широко используются в телевидении, радиолокации, при радиоизмерениях и в других областях для создания периодической последовательности импульсов или отдельных импульсов определенной формы, а также для создания пилообразных колебаний тока или напряжения.

Релаксационные генераторы имеют много общего с электронными реле. В них при одних и тех же значениях внешних напряжений и энергии в инерционных элементах, т. е. при одних и тех же значениях напряжений на конденсаторах (не считая паразитных) и токов в катушках индуктивности, возможно существование нескольких (обычно двух) различных режимов. В определенные моменты схема переходит из одного режима в другой, что дает скачкообразные участки в колебаниях.

Релаксационные генераторы, как и электронные реле, создаются либо путем использования усилителей постоянного или переменного напряжения, либо путем использования нелинейных сопротивлений, имеющих спадающий участок на вольтамперной характеристике. В этой главе рассматриваются релаксационные генераторы с усилителями.

§ 5.2. Релаксационные генераторы с усилителями

Как было показано в гл. 4, для переброса электронного реле из одного состояния равновесия в другое необходимо путем воздействия на него извне смещать либо прямую обратной связи, либо кривую u_{2y} ¹⁾. Используя вместо внешней эдс инерционные элементы — конденсаторы или катушки индуктивности, — можно добиться того, что смещение будет происходить автоматически, без внешнего воздействия, и схема будет генерировать периодические колебания.

Рассмотрим сначала простейший случай, который, однако, охватывает большое число разновидностей, — случай, когда для создания периодических колебаний используется конденсатор в цепи обратной связи, а усилитель не содержит инерционных элементов (кроме паразитных). Соответствующая общая схема приведена на рис. 5.1.

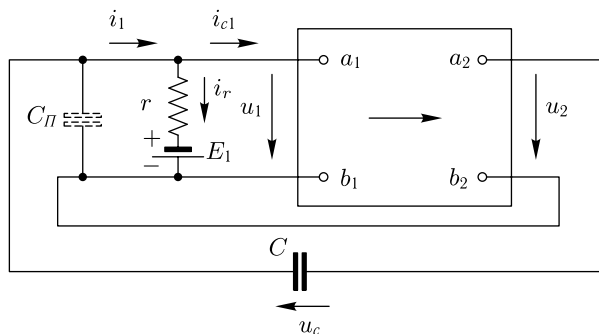


Рис. 5.1

Эта схема принципиально отличается от схемы электронного реле (рис. 4.1) тем, что в цепи обратной связи вместо эдс e стоит конденсатор C , напряжение u_C на котором управляет схемой. Таким образом, вместо ур-ния (4.2) имеем

$$u_2 = u_1 + u_C. \quad (5.1)$$

Прямая обратной связи отсекает на оси ординат отрезок u_C .

В схеме рис. 5.1 параллельно входу усилителя подключено сопротивление r и постоянная эдс E_1 . Ток i_1 , протекающий по цепи обратной

¹⁾ Для краткости записи в дальнейшем вместо u_{2y}^* принято обозначение u_{2y} .

связи при медленном изменении напряжений, когда можно пренебречь токами через паразитные емкости, является суммой двух токов: тока i_r , протекающего через сопротивление r и равного

$$i_r = \frac{u_1 - E_1}{r}, \quad (5.2)$$

и тока сетки первой лампы усилителя i_{c1} .

Ток i_1 заряжает и разряжает конденсатор C и этим управляет колебаниями. Поэтому

$$C \frac{du_C}{dt} = i_1. \quad (5.3)$$

На рис. 5.2а изображена кривая u_{2y} и на рис. 5.2б — кривая i_1 .

Все, что было сказано в § 4.2 относительно процессов в схеме рис. 4.1, остается справедливым и для схемы рис. 5.1. Разница состоит лишь в том, что в схеме рис. 4.1 эдс e зависела от внешних условий и могла меняться произвольно, а заменяющее ее напряжение u_C зависит от процессов в самой схеме.

Пусть в первый момент $u_1 = 0$, $u_C = 0$ и $u_2 = u_1 + u_C = 0$. Тогда рабочая точка (u_1, u_2) находится в положении 0 (рис. 5.2а), т. е. лежит под кривой u_{2y} . В соответствии со сказанным в § 4.2 u_2 и u_1 при этом должны скачком нарастать по прямой обратной связи 0–1, определяемой ур-нием (5.1) (считаем, что емкость C настолько велика, что за время скачка напряжение u_C на конденсаторе существенно не изменяется). Скачок закончится, когда точка (u_1, u_2) дойдет до положения 1. В этом положении, как видно из рис. 5.2б, $i_1 > 0$, поэтому конденсатор C заряжается и u_C растет [ур-ние (5.3)], а прямая обратной связи, определяемая ур-нием (5.1), поднимается. Рабочая точка последовательно занимает положения 2, 3, 4 и 5, передвигаясь сравнительно медленно (мы условились, что емкость C достаточно велика). Из положения 5 рабочая точка, как это следует из § 4.2, скачком перейдет в положение 6, где u_1 таково, что ток i_1 отрицателен. С этого момента конденсатор начнет разряжаться и прямая опускается. Рабочая точка последовательно занимает положения 7 и 8. Из положения 8 она скачком перейдет в положение 3, где ток i_1 станет положительным и конденсатор C опять начнет заряжаться, прямая подниматься, рабочая точка перемещаться в положения 4 и 5. Из положения 5 она скачком перейдет в положение 6, потом в 7 и 8 и т. д.

Таким образом, в схеме рис. 5.1 возникнут колебания. Временные диаграммы этих колебаний изображены на рис. 5.3. На рис. 5.2 и 5.3 точки, соответствующие одинаковым режимам, обозначены одинаковыми цифрами.

На рис. 5.2 указан порядок перехода рабочей точки из одного положения в другое. Тремя стрелками обозначен скачкообразный переход, одной — сравнительно медленный переход.

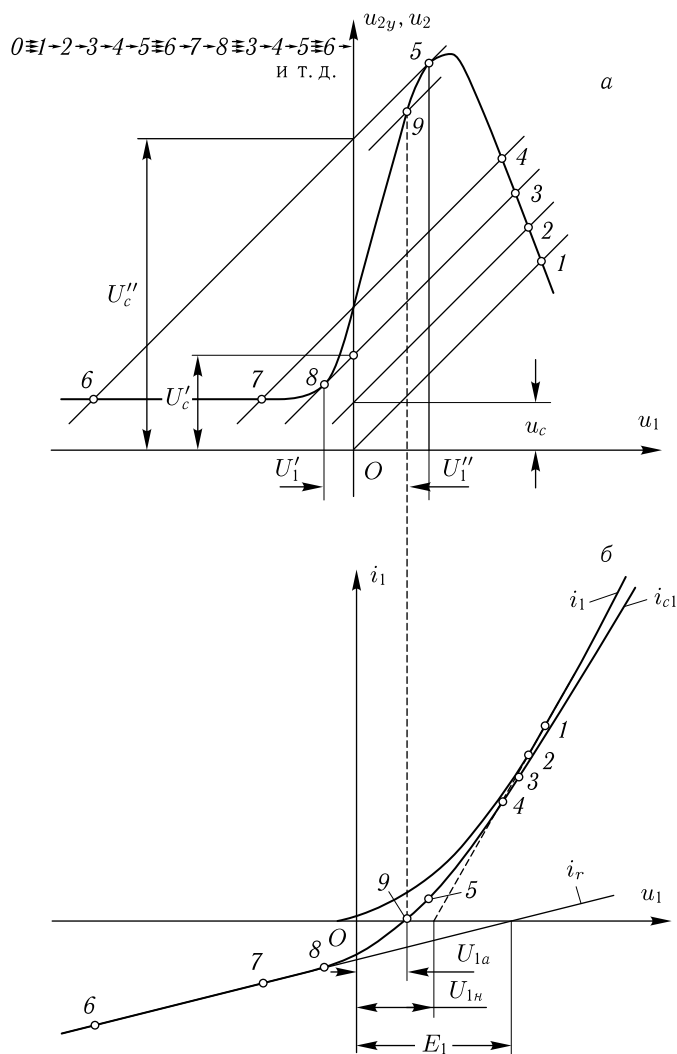


Рис. 5.2

Для релаксационного автогенератора необходимо, чтобы ток, заряжающий и разряжающий конденсатор C , ни при одном из значений u_1 , лежащем на участках медленного изменения, не был равен нулю, иначе при этом значении u_1 напряжение u_C перестанет меняться и установится равновесие. Для случая, изображенного на рис. 5.2, на участках медленного изменения 3–5 и 6–8 $i_1 \neq 0$.

Участок медленного изменения, соответствующий положительным значениям u_1 (участок 3–5 рис. 5.2), проходится быстрее, чем участок

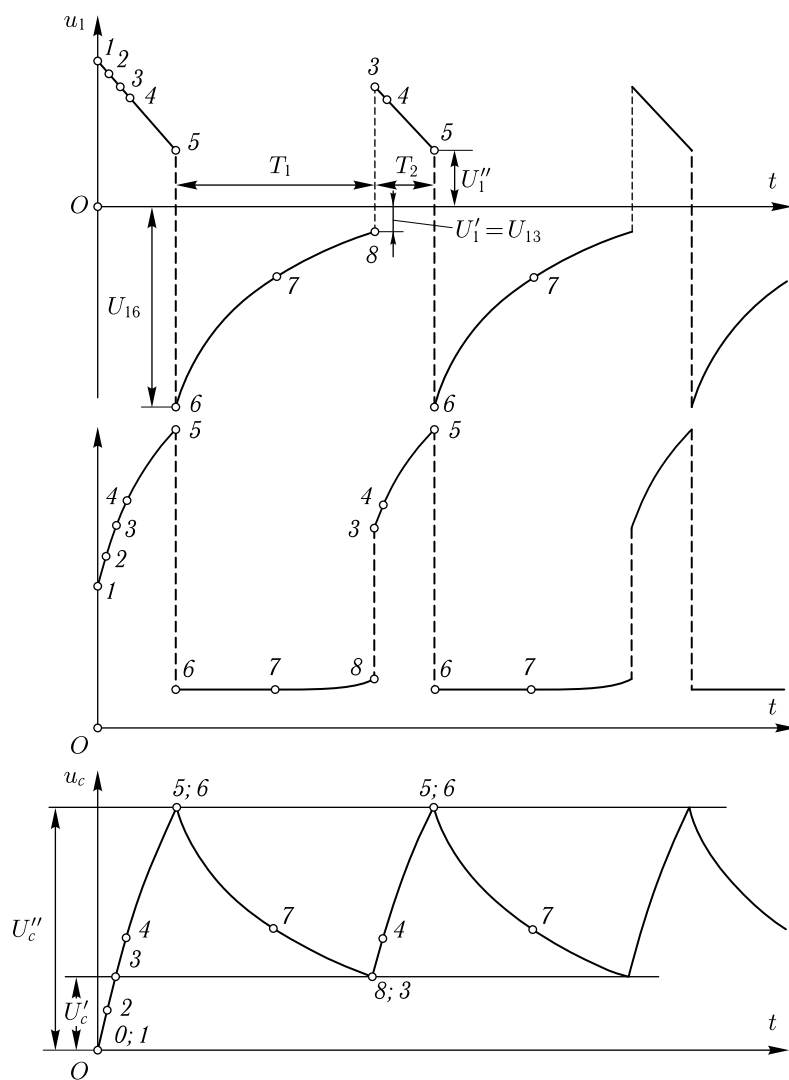


Рис. 5.3

медленного изменения $6-8$, соответствующий отрицательным значениям u_1 , так как ток i_1 на участке $3-5$ больше, чем на участке $6-8$.

Если усилитель содержит переходные конденсаторы или трансформаторы, то в сравнительно больших промежутках времени между скачками заряды на этих конденсаторах и токи намагничивания трансформаторов могут меняться, что вызовет изменение зависимости u_{2y} от u_1 .

Таким образом, в этом случае двигается не только прямая обратной связи, но и кривая u_{2y} . Такие случаи мы рассмотрим в §§ 5.6 и 5.7.

Обычно можно считать, что за время скачка напряжение на переходном конденсаторе C релаксационного генератора (но не на паразитных емкостях) не успевает изменяться. При этом прямая обратной связи не смещается и процесс скачка проходит так же, как в электронном реле (см. § 4.3). Поэтому повторно рассматривать его не будем.

§ 5.3. Процессы в релаксационных генераторах на участках медленного изменения. Период колебания

Найдем количественную зависимость u_1 от времени t . Для этого определим из (5.1) величину $\frac{du_C}{dt}$ и подставим ее в (5.3):

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{d}{dt}(u_2 - u_1) = \left(\frac{du_2}{du_1} - 1\right) \frac{du_1}{dt} = \frac{t_1}{C}$$

или, поскольку $i_1 = f_1(u_1)$, то

$$\left(\frac{du_2}{du_1} - 1\right) \frac{du_1}{dt} = \frac{f_1(u_1)}{C},$$

откуда путем разделения переменных получим:

$$C \int \frac{\frac{du_2}{du_1} - 1}{f_1(u_1)} du_1 = \int dt.$$

Отметим, что на рассматриваемых участках медленного изменения $u_2 = u_{2y}$. Поэтому величина $\frac{du_2}{du_1} = \frac{du_{2y}}{du_1}$ и может быть найдена из кривой зависимости u_{2y} от u_1 .

Обозначим значение u_1 в некоторый момент времени t_a через U_{1a} и проинтегрируем левую часть равенства от U_{1a} до некоторого u_1 , а правую часть соответственно от t_a до t :

$$C \int_{U_{1a}}^{u_1} \frac{\frac{du_{2y}}{du_1} - 1}{f_1(u_1)} du_1 = t - t_a.$$

Величина, стоящая под интегралом, является известной функцией u_1 . Поэтому полученная формула дает зависимость u_1 от t . Эту зависимость всегда можно найти графическим интегрированием.

Если приближенно на некотором участке принять

$$\frac{du_2}{du_1} = \frac{du_{2y}}{du_1} = b$$

и

$$i_1 = f_1(u_1) = \frac{1}{r_1}(u_1 - U_{1н}),$$

где b , r_1 и $U_{1н}$ — постоянные величины, то

$$t - t_a = C \int_{U_{1a}}^{u_1} \frac{(b-1)r_1}{u_1 - U_{1н}} du_1 = r_1 C (b-1) \int_{U_{1a}}^{u_1} \frac{du_1}{u_1 - U_{1н}}.$$

Принимая во внимание, что

$$\int \frac{dx}{x-a} = \ln(x-a),$$

получим

$$t - t_a = r_1 C (b-1) \ln \frac{u_1 - U_{1н}}{U_{1a} - U_{1н}}, \quad (5.4)$$

откуда

$$u_1 = U_{1н} + (U_{1a} - U_{1н}) e^{\frac{t-t_a}{r_1 C (b-1)}}.$$

Таким образом, на рассмотренном участке u_1 меняется по экспоненте.

Исходя из полученной формулы, найдем время T_1 , в течение которого рабочая точка переходит из положения 6 в положение 8 (рис. 5.2 и 5.3) и напряжение u_1 изменяется от U_{16} до $U_{18} = U_1$.

На участке $6-8$ можно считать $b = \frac{du_{2y}}{du_1} = 0$, так как на нем с изменением u_1 напряжение u_{2y} не меняется.

Кроме того, на основании рис. 5.2 можно считать, что на участке $6-8$:

$$f_1(u_1) = i_1 = \frac{u_1 - E_1}{r},$$

откуда

$$r_1 = r; \quad U_{1н} = E_1.$$

Поэтому ф-ла (5.4) дает

$$T_1 = t_8 - t_6 = rC \ln \frac{U_{16} - E_1}{U_{18} - E_1}. \quad (5.5)$$

Аналогично можно определить время T_2 (рис. 5.3).

При этом величины b , r_1 и $U_{1н}$ имеют другие значения, соответствующие участку $3-5$, рис. 5.2.

Полный период колебаний равен

$$T = T_1 + T_2.$$

Выясним, чем определяется наименьший возможный период релаксационных колебаний.

Для уменьшения периода следует уменьшать емкость C . Однако при уменьшении этой емкости до величины, соизмеримой с паразитной емкостью C_{Π} , напряжение в соответствии с ур-нием (5.3) меняется настолько быстро, что его уже нельзя считать неизменным за время скачка. Также нельзя пренебрегать током $C_{\Pi} \frac{du_1}{dt}$ в течение большей части периода, как это мы делали раньше.

Вследствие этого рабочая точка в этом случае движется так, как показано на рис. 5.4, а не так, как было на рис. 5.2а. Временные диаграммы для этого случая изображены на рис. 5.5. На них видно, что скорости изменения напряжений во время скачка и в промежутках между скачками соизмеримы, и колебания приближаются к синусоидальным. При дальнейшем уменьшении C колебания еще больше приблизятся к синусоидальным и, наконец, прекратятся совсем, так как через конденсатор C на вход усилителя будет подаваться слишком малое переменное напряжение. В этом случае напряжение u_1 установится таким, что ток заряда конденсатора станет равным нулю, и рабочая точка займет положение 9 (рис. 5.2).

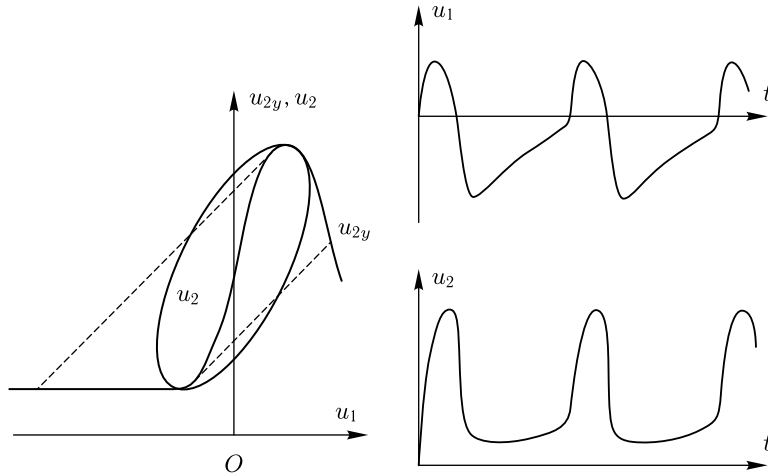


Рис. 5.4

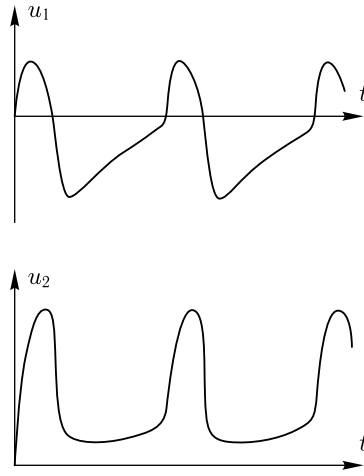


Рис. 5.5

Пример 5.1

Подобрать величину r для релаксационного автогенератора, изображенного на рис. 5.1 и имеющего характеристики, приведенные на рис. 4.9 (характеристика a для u_{2y}), так, чтобы время T_1 (рис. 5.3) было равно 200 мкс. Определить также, какова при этом длительность T_2 положительного импульса напряжения u_1 .

Дано: $C = 300$ пФ; $E_1 = 0$.

Решение

1. На основании ф-лы (5.5) и рис. 4.9

$$T_1 = rC \ln \frac{U_{13}}{U_{17}},$$

где U_{13} — напряжение u_1 в точке 3, U_{17} — напряжение u_1 в точке 7, откуда

$$r = \frac{T_1}{C \ln \frac{U_{13}}{U_{17}}} = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{300 \cdot 10^{-12} \ln \frac{65}{5}} = 260\,000 \text{ Ом.}$$

2. Проводим в координатах рис. 4.9 прямую $t_r = \frac{u_1}{r}$ и строим зависимость $i_1 = f_1(u_1)$. При заряде конденсатора C напряжение u_1 изменяется от U_{18} (в точке 8) до U_{12} (в точке 2). Кривую тока i_1 на этом участке заменяем линейной зависимостью (пунктирная линия на рис. 4.9):

$$i_1 = f_1(u_1) = \frac{u_1 - U_{1n}}{r_1},$$

где $U_{1n} = 11$ В; $r_1 = 3450$ Ом.

На участке $U_{18} \div U_{12}$

$$b = \frac{du_{2y}}{du_1} \approx -10.$$

На основании ф-лы (5.4)

$$\begin{aligned} T_2 &= r_1 C (b - 1) \ln \frac{U_{12} - U_{1n}}{U_{18} - U_{1n}} = r_1 C (1 - b) \ln \frac{U_{18} - U_{1n}}{U_{12} - U_{1n}} = \\ &= 3450 \cdot 300 \cdot 10^{-12} \cdot (1 + 10) \cdot \ln \frac{20 - 11}{13 - 11} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 17 \text{ мкс.} \end{aligned}$$

§ 5.4. Ждущие релаксационные генераторы

В ждущих релаксационных генераторах колебания возникают лишь при воздействии на них импульсов извне. Ждущие релаксационные генераторы отличаются от автогенераторов лишь режимом.

Обратимся к схеме рис. 5.1. Обозначим значение напряжения u_1 , при котором $i_1 = 0$, через U_{10} (рис. 5.2) и значения u_1 , при которых $K = 1$ и наступают скачки через U'_1 и U''_1 .

Тогда при

$$U_{10} < U'_1 < U''_1 \quad (5.6)$$

или

$$U'_1 < U''_1 < U_{10} \quad (5.7)$$

релаксационный генератор станет ждущим.

Если

$$U'_1 < U_{10} < U''_1 \quad (5.8)$$

(этот случай рассматривался в § 5.2), то получим *релаксационный автогенератор*.

Для доказательства этого рассмотрим сначала случай, соответствующий условию (5.6) и рис. 5.6.

Рассуждая аналогично § 5.2, можно показать, что после включения релаксационного генератора рабочая точка последовательно занимает положения 0, 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

В положении 6 $u_1 = U_{10}$, $i_1 = 0$, а следовательно, и $\frac{du_C}{dt} = 0$. В этом положении прямая обратной связи остановится, и рабочая точка останется в нем до тех пор, пока на генератор не подействует внешняя сила.

Пусть в цепи обратной связи последовательно с напряжением на конденсаторе u_C появится импульс эдс e (рис. 5.7).

Тогда

$$u_2 = u_1 + u_C + e. \quad (5.9)$$

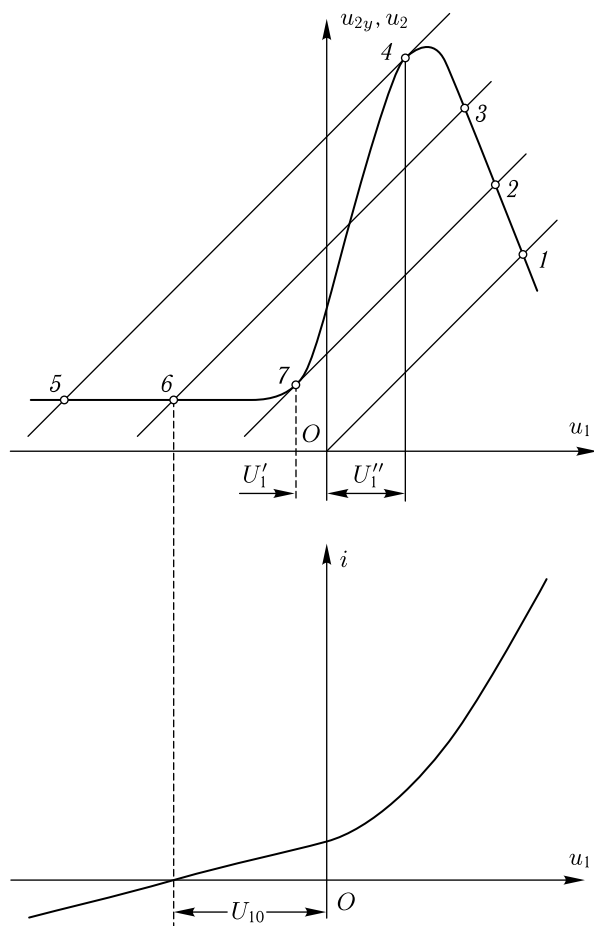


Рис. 5.6

Если импульс эдс e отрицательный, то прямая обратной связи сдвинется вниз. Когда рабочая точка достигнет положения 7, то произойдет скачок в положение 2, ток i_1 станет больше нуля, прямая обратной связи начнет подниматься, и рабочая точка последовательно будет занимать положения 3, 4, а затем 5 и 6. Это движение сохранится и тогда, когда импульс эдс e после скачка рабочей точки в положение 2 станет равным нулю.

Если к моменту возвращения рабочей точки в положение 6 эдс e станет равной нулю, то рабочая точка останется в этом положении до появления следующего импульса эдс (схема будет «ждать»).

Таким образом, под действием импульса эдс в релаксационном генераторе произойдет один период колебания. Длительность импульса

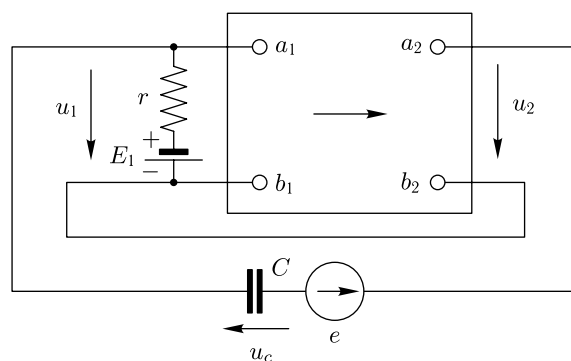


Рис. 5.7

этого колебания в случае, если импульс эдс короткий, определяется параметрами генератора и может быть вычислена на основе указаний, данных в § 5.3.

Если режим схемы такой, что выполняется условие (5.7) (рис. 5.8), то рабочая точка после включения будет занимать положения 0, 1, 2 и 3. В положении 3 $u_1 = U_{10}$, $i_1 = 0$, следовательно, $\frac{du_C}{dt} = 0$. Поэтому рабочая точка останется в нем до тех пор, пока на генератор не подействует внешний импульс. При воздействии внешнего положительного импульса эдс e прямая поднимется, рабочая точка переместится в положение 4 и оттуда скачком в положение 5, где $i_1 < 0$ и $\frac{du_C}{dt} < 0$. Начиная с положения 5, прямая обратной связи будет смещаться вниз, а рабочая точка последовательно занимать положения 6, 7, 2. Из положения 2 рабочая точка возвратится в положение 3, где и останется, «ожидая» появления следующего положительного импульса эдс e .

Заметим, что из состояния ожидания релаксационный генератор может быть выведен также импульсами, действующими на характеристику усилителя. Например, при подаче короткого положительного импульса на сетку лампы L_2 усилителя, изображенного на рис. 2.37, характеристика сдвинется в положение, показанное на рис. 5.8 пунктиром. Рабочая точка займет положение 3' и затем скачком — положение 6'. После прекращения действия импульса она перейдет в положение 6 (если за время импульса напряжение u_C не успеет заметно измениться), потом через положения 7 и 2 возвратится в положение «ожидания» 3. Аналогичный процесс может быть осуществлен и для случая, изображенного на рис. 5.6.

Пример 5.2

Подобрать для релаксационного генератора (рис. 5.1), содержащего усилитель с катодной связью, характеристики которого приведены на рис. 4.9, сопротивление r так, чтобы релаксационный генератор был ждущим и запускался импульсом на сетку второй лампы, равным +5 В.

Дано $E_1 = 150$ В (используется источник анодного питания).

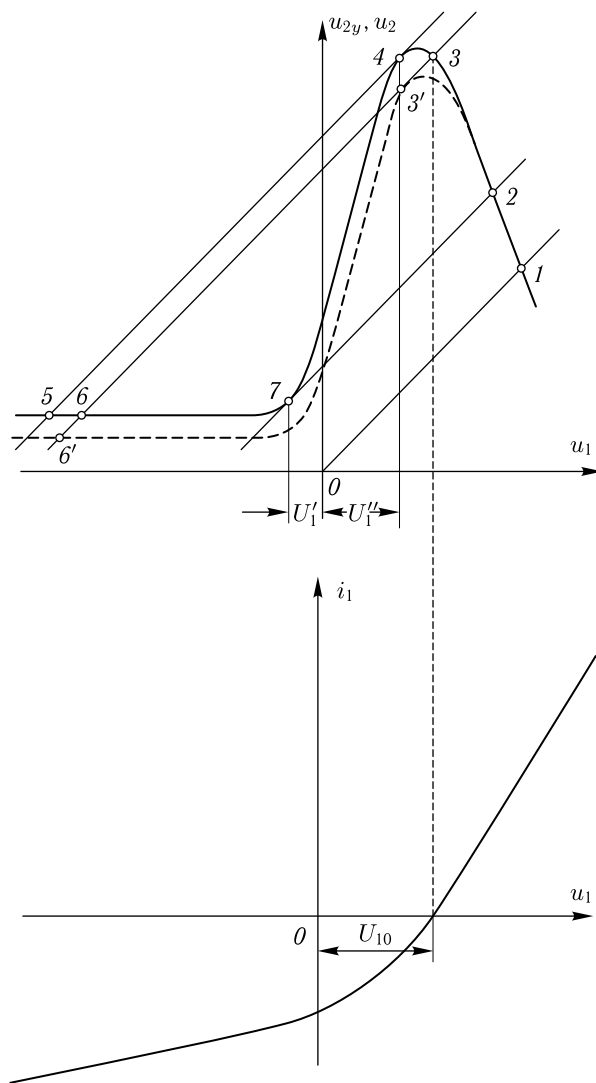


Рис. 5.8

Решение

Для того, чтобы скачок начинался при импульсе $e_2 = +5$ В, прямая обратной связи в положении ожидания должна занимать положение $1-2-5-4-3$ (рис. 4.9). Для этого точка 1 должна быть точкой ожидания и U_{10} должно равняться $+15$ В. При этом напряжении U_{10} ток $i_{c1} = 0,3$ мА и ток через сопротивление r должен быть равен $i_r = -0,3$ мА, откуда

$$-0,3 \cdot 10^{-3} r = U_{10} - E_1 = 15 - 150 = -135 \text{ В}$$

и

$$r = \frac{-135}{-0,3 \cdot 10^{-3}} = 450\,000 \text{ Ом.}$$

Такое значение сопротивления обеспечивает требуемый ждущий режим.

§ 5.5. Схемы релаксационных генераторов с усилителями постоянного напряжения

Релаксационные генераторы, выполненные по схеме рис. 5.1, могут быть собраны с использованием любого усилителя постоянного напряжения. Ниже рассматриваются два релаксационных генератора такого типа.

Двухламповый релаксационный генератор с катодной связью.

Этот релаксационный генератор получил большое распространение. В нем используется усилитель постоянного напряжения с катодной связью, описанный в § 2.7. Схема этого генератора изображена на рис. 5.9.

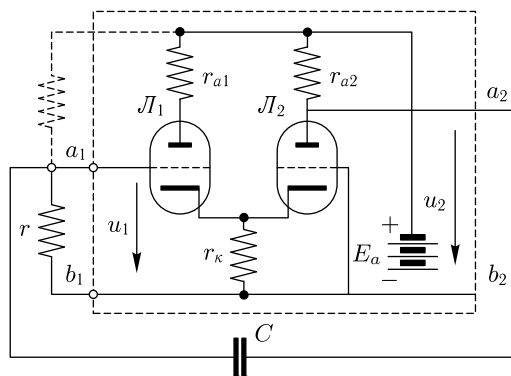


Рис. 5.9

Характеристики такого усилителя аналогичны характеристикам рис. 5.2 и 4.9.

Для получения ждущего релаксационного генератора сопротивление r присоединяется обычно к плюсу источника анодного питания, как показано на рис. 5.9 пунктиром. Это смещает точку, в которой $i_1 = 0$, вправо. Запускающие импульсы даются на сетку лампы L_2 , что смещает кривую u_{2y} (рис. 5.8).

Релаксационный генератор с катодной связью на пентагриде (фантастрон). В этом релаксационном генераторе используется усилитель постоянного напряжения на пентагриде, рассмотренный в § 2.7. Схема генератора приведена на рис. 5.10.

Для получения ждущего режима сопротивление r и напряжение на третьей сетке подбираются так, чтобы выполнялось условие (5.7). Запускающие импульсы подаются обычно на третью сетку лампы.

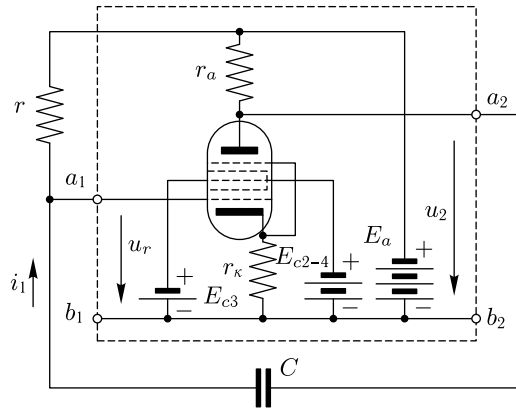


Рис. 5.10

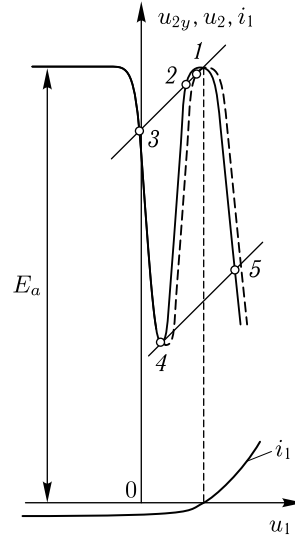


Рис. 5.11

На рис. 5.11 изображена кривая u_{2y} для этого генератора и кривая i_1 . Особенностью данного релаксационного генератора является большая линейность изменения u_2 и u_C на участке медленного спада (участок 3–4 на рис. 5.11). Это объясняется тем, что на этом участке u_1 и i_1 меняются мало, и скорость изменения $\frac{du_C}{dt} = \frac{i_1}{C} \approx \frac{du_2}{dt}$ почти постоянна.

§ 5.6. Симметричный релаксационный генератор

В этом и следующем параграфе рассматриваются релаксационные генераторы, содержащие усилители с инерционными элементами. В таких релаксационных генераторах в промежутках между скачками смещается не только прямая обратной связи, но и кривая u_{2y} . Эти генераторы рассмотрим общим методом, изложенным в § 5.2.

В генератор, описываемый в данном параграфе и называемый *симметричным*, входит усилитель с переходным конденсатором. Симметричный релаксационный генератор изображен на рис. 5.12. Обычно $C_1 = C_2$, $r_{c1} = r_{c2}$, $r_{a1} = r_{a2}$.

Зависимость напряжения на выходе усилителя u_{2y} от напряжения на его входе u_1 здесь изменяется с изменением напряжения u_{C1} на конденсаторе C_1 . При постоянной величине напряжения u_1 и уменьшении u_{C1} напряжение u_{c2} на сетке лампы L_2 возрастает, анодный ток ее увеличивается и напряжение u_{2y} на выходе уменьшается. На рис. 5.13 приведены две зависимости u_{2y} от u_1 для $u_{C1} = E_a$ и $u_{C1} = U'_C$, где U'_C — некоторое постоянное напряжение, меньшее E_a . Эти кривые

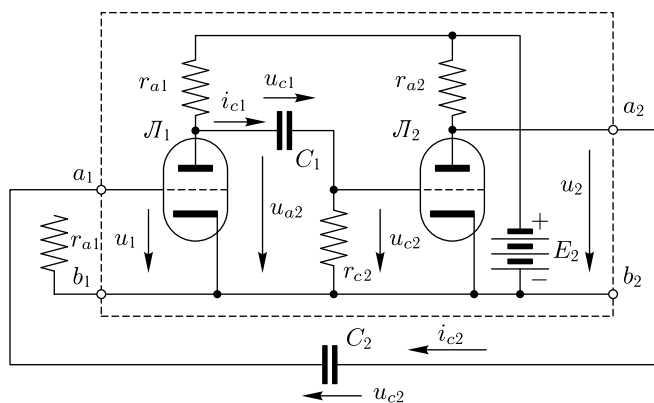


Рис. 5.12

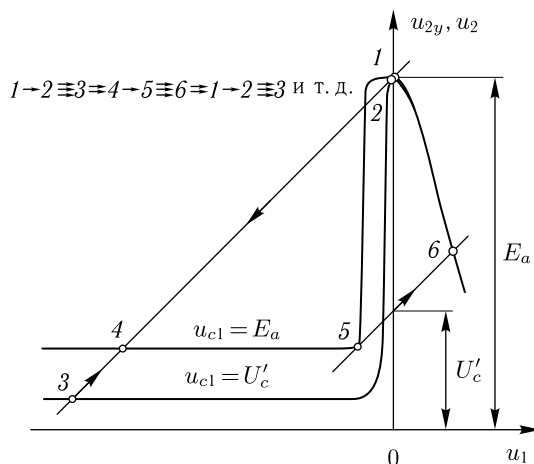


Рис. 5.13

построены способом, изложенным в примере 2.4. Роль батареи E_c в рассматриваемой схеме выполняет конденсатор C_1 .

Так как положение кривой u_{2y} определяется напряжением u_{C1} , а положение прямой обратной связи — напряжением u_{C2} на конденсаторе обратной связи C_2 , то этими же напряжениями определяется и режим релаксационного генератора.

Предположим вначале, что $u_{C1} = u_{C2} - E_a$. Тогда рабочая точка может занимать положение 4 или положение 1. Допустим, что она занимает положение 1. В этом режиме лампа L_1 открыта ($u_1 = 0$), а лампа L_2 закрыта, что видно из того, что напряжение u_{2y} на аноде L_2 равно E_a , т.е. падения напряжения на сопротивлении r_{a2} нет. Лампа L_2 закрыта за счет падения напряжения на r_{a1} и большого

напряжения на конденсаторе C_1 , по условию равно $u_{C1} = E_a$, что создает на сетке L_2 отрицательное напряжение u_{c2} .

Изменение режима в схеме может произойти лишь при изменении напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 . Проследим эти изменения (рис. 5.14). Поскольку вначале $u_1 = 0$, ток i_{C2} , протекающий через конденсатор C_2 , равен нулю, так как равны нулю сеточный ток лампы L_1 и ток через сопротивление r_{c1} . Поэтому u_{C2} не меняется и прямая обратной связи остается на месте.

Как указывалось выше, напряжение u_{c2} на сетке L_2 отрицательно, что вызывает ток i_{C1} через сопротивление r_{c2} , разряжающий конденсатор C_1 . Напряжение u_{C1} уменьшается и кривая u_{2y} опускается. Этот процесс длится до тех пор, пока напряжение u_{C1} не станет равным U'_C и кривая u_{2y} не опустится до положения 3, 2, 6. При этом рабочая точка займет неустойчивое положение 2, наступит скачок, и она перейдет в положение 3. За время скачка напряжения u_{C1} и u_{C2} не меняются (считаем, что конденсаторы C_1 и C_2 достаточно велики) и поэтому скачок протекает так, как описывалось в § 4.3.

Рассмотрим состояние, соответствующее положению 3. Напряжение $u_1 < 0$, лампа L_1 закрыта. Это видно из того, что изменение u_1 не сказывается на u_{2y} (рис. 5.13). Напряжение u_{c2} на сетке лампы L_2 положительно, поскольку лампа L_1 закрыта и $u_{C1} = U'_C < E_a$. Поэтому лампа L_2 открыта.

Дальнейший процесс опять связан с изменением напряжений u_{C1} и u_{C2} . В точке 3 $u_1 < 0$, ток, текущий через сопротивление r_{c1} , разряжает конденсатор C_2 , u_{C2} уменьшается и прямая обратной связи опускается. Так как $u_{c2} > 0$, сеточный ток лампы L_2 и ток через сопротивление r_{c2} заряжают конденсатор C_1 , напряжение u_{C1} растет и кривая u_{2y} поднимается. Изменение u_{C1} прекратится, когда конденсатор C_1 зарядится до E_a . Действительно, при закрытой лампе L_1 и $u_{C1} = E_a$ напряжение $u_{c2} = E_a - u_{C1} = E_a - E_a = 0$ и ток i_{C1} , заряжающий конденсатор C_1 , также равен нулю. Кривая u_{2y} занимает при этом положение 4, 5, 1, 6. Обычно сеточный ток значительно больше тока, текущего через сопротивление r_{c1} , поэтому напряжение u_{C1} меняется значительно быстрее, чем u_{C2} , и кривая u_{2y} движется быстрее, чем прямая обратной связи. Кривая u_{2y} достигает положения 4, 5, 1, 6 за время, пока прямая обратной связи не успеет существенно сдвинуться. При этом рабочая точка переходит в положение 4. Конденсатор C_2 продолжает разряжаться, так как напряжение u_1 остается отрицательным, напряжение u_{C2} уменьшается и прямая обратной связи опускается. Наконец, рабочая точка доходит до положения 5, откуда скачком переходит в положение 6.

Положению 6 соответствует следующий режим. Напряжение $u_1 > 0$, лампа L_1 открыта. Напряжение на ее аноде $u_{a1} < E_a$, $u_{C1} = E_a$ (как и до скачка) и напряжение на сетке L_2 $u_{c2} = u_{a1} - E_a$ отрицательно. Лампа L_2 закрыта. В этом положении режимы ламп L_1 и L_2 меняются местами по сравнению с положением 3.

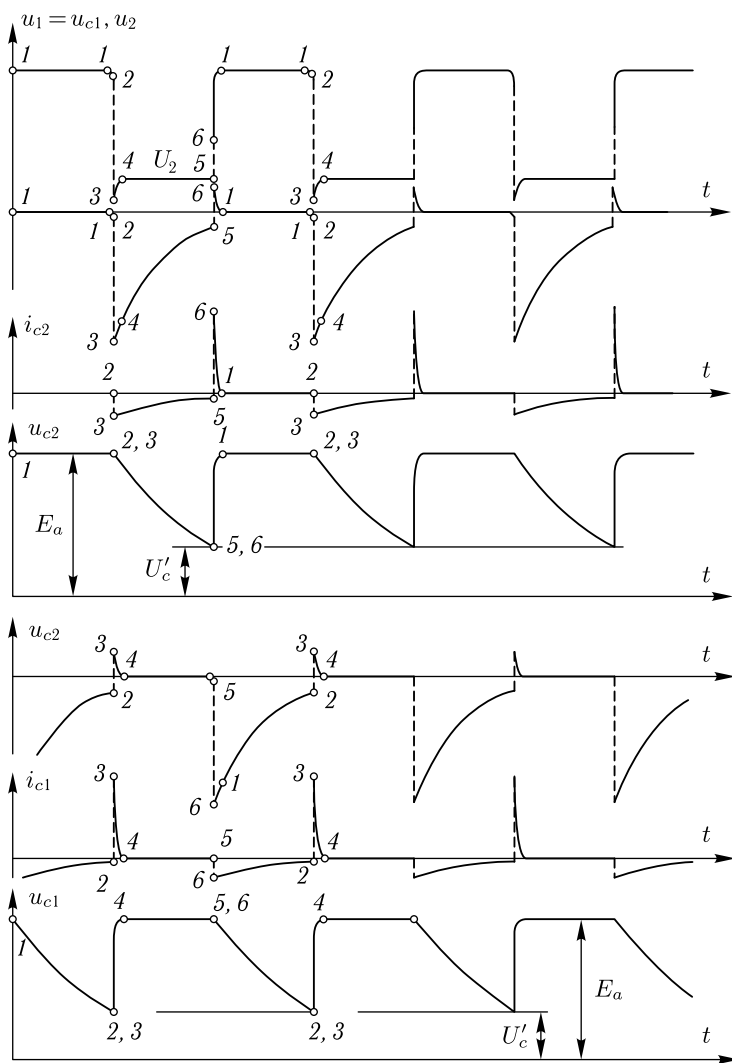


Рис. 5.14

Дальнейшее изменение режима опять связано с изменением u_{C1} и u_{C2} . Поскольку $u_1 > 0$, сеточный ток и ток через сопротивление r_{c1} быстро заряжают конденсатор C_2 , и прямая обратной связи быстро поднимается, пока не дойдет до положения 3-1, в котором останавливается. При этом рабочая точка займет положение 1, напряжение u_1 станет равным нулю, ток i_{C2} прекратится. В точке 6 напряжение на сетке L_2 отрицательно и напряжение u_{C1} сравнительно медленно уменьшается, что приводит к сравнительно медленному опусканию

кривой u_{2y} . Так как это движение происходит медленно, прямая обратной связи успеет дойти до положения 3-1 и напряжение u_{C2} успеет стать равным E_a , прежде чем u_{C1} существенно уменьшится. Таким образом, окажется $u_{C1} = u_{C2} = E_a$, т.е. режим генератора вернется к исходному состоянию. Далее процессы будут повторяться.

Поскольку схема симметрична, напряжения на электродах лампы L_2 повторяют напряжения на электродах L_1 со сдвигом на полпериода. Это видно из рис. 5.14. Пользуясь этим, величину U'_C , соответствующую напряжению на конденсаторе C_1 или C_2 , при котором наступает скачок, легко определить из кривой u_{2y} для $u_{C1} = E_a$, проводя через точку 5 прямую обратной связи (рис. 5.13). Зная U'_C , можно построить кривую u_{2y} для $u_{C1} = U'_C$, которую мы использовали для анализа.

Симметричные релаксационные генераторы применяют в тех случаях, когда желают получить релаксационные колебания с равными промежутками T_1 и T_2 между скачками.

Пример 5.3

Подобрать емкость конденсаторов C_1 и C_2 так, чтобы симметричный релаксационный генератор с данными, приведенными на рис. 5.12, имел частоту генерации, равную f Гц.

Решение

Поскольку релаксационный генератор симметричен, время, в течение которого закрыта первая лампа, равно времени, в течение которого закрыта вторая лампа. Это время равно

$$T_1 = T_2 = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}.$$

За время, в течение которого закрыта первая лампа, рабочая точка переходит из положения 3 в положение 5 или, что почти то же, из положения 4 в положение 5 (рис. 5.13 и 5.14). Это время определяется ф-лой (5.5), которая для данного случая будет иметь вид

$$\frac{T}{2} = r_{c1} C_2 \ln \frac{U_{14}}{U_{15}},$$

где U_{14} — напряжение u_1 в точке 4, U_{15} — напряжение u_1 в точке 5.

Отсюда

$$C_2 = C_1 = \frac{T}{2r_{c1} \ln \frac{U_{14}}{U_{15}}}.$$

§ 5.7. Блокинг-генератор

Широкое распространение получил релаксационный генератор, называемый *блокинг-генератором*. Схема блокинг-генератора, как и ранее рассмотренных генераторов, соответствует рис. 5.1, но усилитель, входящий в него, содержит переходной трансформатор (рис. 5.15).

Рассмотрим работу блокинг-генератора общим методом, изложенным в § 5.2. Построим зависимость напряжения на выходе u_{2y}

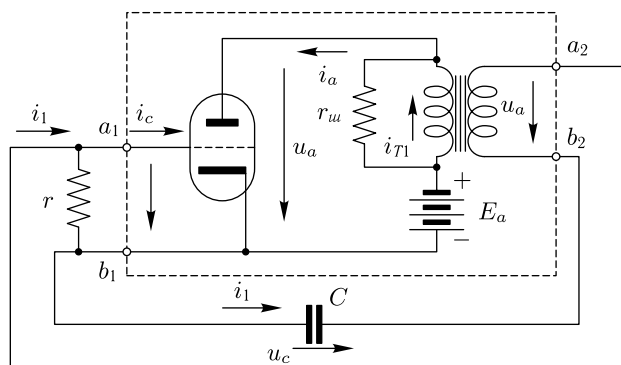


Рис. 5.15

от напряжения на входе u_1 . При этом не будем учитывать напряжений на индуктивностях рассеяния трансформатора. Они обычно сказываются лишь во время скачков.

Составим уравнения, характеризующие работу блокинг-генератора. Ток через первичную обмотку трансформатора равен

$$i_{T1} = i_a - \frac{E_a - u_a}{r_w}, \quad (5.10)$$

где $\frac{E_a - u_a}{r_w}$ — ток, текущий через сопротивление шунта r_w . Остальные обозначения даны на рис. 5.15.

Ток через вторичную обмотку трансформатора выражается так:

$$i_1 = i_c + \frac{u_1}{r}, \quad (5.11)$$

где $\frac{u_1}{r}$ — ток, текущий через сопротивление r .

Магнитный поток трансформатора создается не только током первичной обмотки i_{T1} , но и током вторичной обмотки i_1 , действующим навстречу. При этом магнитный поток трансформатора будет таким, как если бы он создавался током намагничивания

$$i_\mu = i_{T1} - k_T i_1, \quad (5.12)$$

текущим только через первичную обмотку¹⁾. Здесь k_T — коэффициент трансформации трансформатора.

Напряжение на первичной обмотке трансформатора, созданное изменением магнитного потока, равно

$$E_a - u_c = L_1 \frac{dt_\mu}{dt} = \frac{u_{2y}}{k_T}, \quad (5.13)$$

где L_1 — индуктивность первичной обмотки.

¹⁾ См. также § 3.4.

Из равенства (5.13) видно, что ток i_μ , связанный с магнитным потоком и магнитной энергией, запасенной в трансформаторе, скачком меняться не может и что скорость его изменения тем меньше, чем больше L_1 .

Найдем на основании полученных уравнений зависимость u_{2y} от u_1 . Сначала получим зависимость u_a от u_1 , подставляя значения (5.10) и (5.11) в уравнение (5.12). Будем иметь:

$$i_a - k_T i_c = \frac{E_a - u_a}{r_{ш}} + \frac{k_T u_1}{r} + i_\mu. \quad (5.14)$$

Если в этом равенстве задаться напряжением на сетке лампы $u_1 = u_c$ и i_μ , а также учесть, что i_a и i_c — известные функции u_a и u_c , то в нем окажется одна неизвестная — u_a , которую можно найти графически. Зная u_a , нетрудно определить u_{2y} , так как

$$u_{2y} = k_T(E_a - u_a).$$

Построим искомую зависимость, задаваясь конкретными данными. Это не ограничит общности рассуждений.

На рис. 5.16 приведены статические характеристики лампы 6Н8С. С помощью этих характеристик нетрудно построить зависимость левой части равенства (5.14) от u_a , задаваясь определенными значениями u_1 и находя для этих значений величины i_a , i_c и $i_a - k_T i_c$ как функции u_a . Зависимость $i_a - k_T i_c$ от u_a для разных u_1 и $k_T = 1$ дана на рис. 5.17.

Например, при $u_1 = +10$ В и $u_a = 400$ В имеем $i_a - i_c = 112 - 12 = 100$ мА.

Построим далее зависимость правой части равенства (5.14) от u_a , считая вначале $i_\mu = 0$. Током $\frac{k_T u_1}{r}$ можно пренебречь из-за его малости (r имеет обычно порядок сотен килоом). Тогда зависимость правой части от u_a будет характеризоваться нагрузочной прямой, отсекающей на оси абсцисс отрезок $u_a = E_a$, а на оси ординат отрезок $\frac{E_a}{r_{ш}}$. Нагрузочная прямая на рис. 5.17 проведена в предположении, что $E_a = 200$ В, $r_{ш} = 5$ кОм.

Задаваясь значениями u_1 , находим по точкам пересечения кривых $i_a - k_T i_c$ с прямой $\frac{E_a - u_a}{r_{ш}}$ соответствующие им значения u_a (рис. 5.17) и строим зависимость u_a от u_1 (рис. 5.18). Затем на основании кривой рис. 5.18 строим кривую $u_{2y} = k_T(E_a - u_a)$, которая приведена на рис. 5.19.

Объясним эту зависимость. При больших отрицательных значениях u_1 лампа закрыта, все токи равны нулю и $u_{2y} = 0$. Если теперь увеличивать u_1 , то лампа откроется, появится падение напряжения на сопротивлении $r_{ш}$, первичной и вторичной обмотках трансформатора. Вначале эти напряжения растут с ростом u_1 , а затем начинают падать из-за увеличивающегося тока сетки i_c и i_1 , что в соответствии

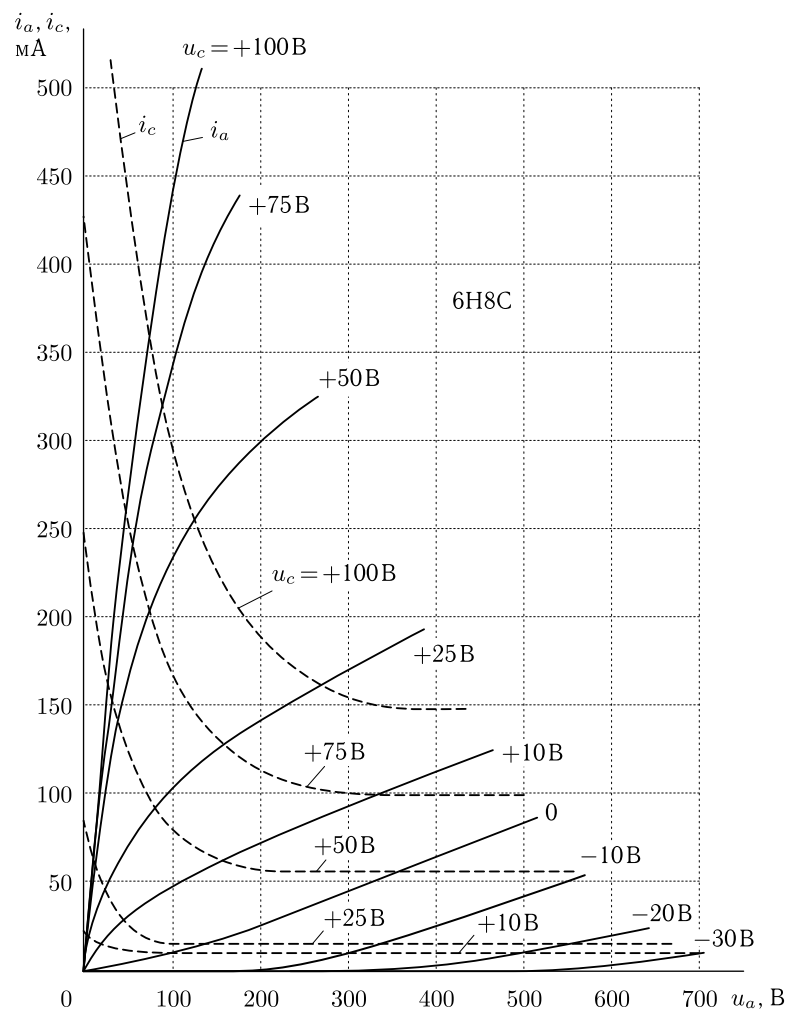


Рис. 5.16

с ф-лой (5.12) увеличивает ток $i_{T1} = k_T i_1$. Увеличение этого тока уменьшает ток через сопротивление r_w , равный $i_a - i_{T1}$, напряжение на r_w , первичной обмотке трансформатора и u_{2y} . Если уменьшать u_1 , то ток i_1 начнет уменьшаться, напряжение u_{2y} возрастать, а затем уменьшаться вследствие уменьшения анодного тока лампы.

Как только лампа откроется и появится напряжение u_{2y} , ток i_μ в соответствии с ф-лой (5.13) начнет расти. Поэтому полученная зависимость u_{2y} от u_1 и приведенные рассуждения справедливы, если за время, в течение которого лампа открыта, ток i_μ нарастет

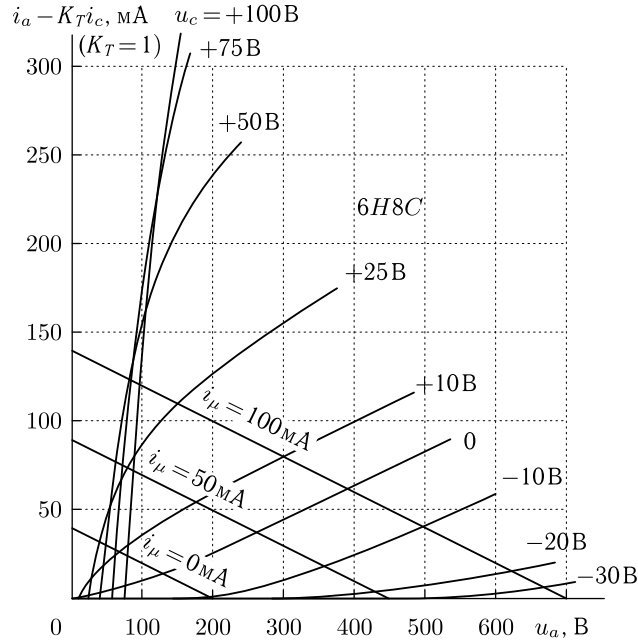


Рис. 5.17

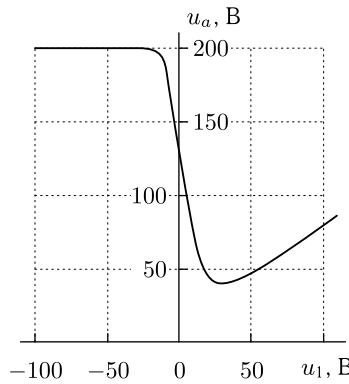


Рис. 5.18

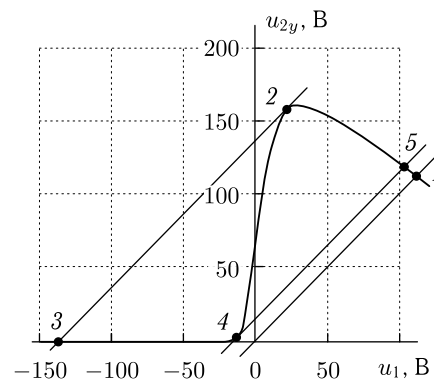


Рис. 5.19

до незначительной величины, что будет, если это время достаточно мало, а индуктивность L_1 достаточно велика.

Рассмотрим работу блокинг-генератора, предполагая, что индуктивность L_1 очень велика.

В первый момент после включения напряжение на конденсаторе $u_C = 0$. Поэтому прямая обратной связи проходит через начало

координат и рабочая точка занимает положение 1 (рис. 5.19). При этом лампа открыта. В положении 1 течет большой сеточный ток, так как напряжение на сетке весьма велико (+110 В). Сеточный ток быстро заряжает конденсатор C , прямая обратной связи поднимается, и рабочая точка быстро достигает положения 2, откуда скачком переходит в положение 3 — лампа закрывается. Затем начинается медленный разряд конденсатора C через сопротивление r и вторичную обмотку трансформатора, что вызывает опускание прямой обратной связи. Когда рабочая точка достигнет неустойчивого положения 4, произойдет скачок в положение 5, лампа откроется, появится большой сеточный ток и снова начнется быстрый процесс заряда конденсатора. Далее процессы повторяются.

Конденсатор разряжается гораздо медленнее, чем заряжается, так как сопротивление r обычно велико. Поэтому большую часть времени лампа закрыта.

Приведенные рассуждения справедливы, если за время импульса ток i_μ не успеет нарасти до существенной величины и можно считать $i_\mu = 0$. Это будет при коротких импульсах и большой индуктивности L_1 . Обычно индуктивность бывает не настолько большой, чтобы можно было пренебрегать током i_μ .

Построим несколько кривых u_{2y} , задаваясь различными значениями тока i_μ . Если $i_\mu \neq 0$, то нагрузочная прямая, соответствующая правой части ур-ния (5.14), поднимается на величину i_μ , оставаясь параллельной самой себе. На рис. 5.17 проведены нагрузочные прямые для $i_\mu = 0, 50$ и 100 мА, а на рис. 5.20 изображены зависимости u_{2y} от u_1 , построенные на основании рис. 5.17 для $i_\mu = 0, 50$ и 100 мА. Объясним эти кривые. Ток $i_{T1} = k_T i_1 + i_\mu$ при заданном u_1 и, следовательно, i_1 увеличиваются с ростом i_μ , что приводит к уменьшению тока через сопротивление $r_{ш}$. Это в свою очередь уменьшает падения напряжения на $r_{ш}$, на трансформаторе и величину u_{2y} . При закрытой лампе ($i_a = 0$) и наличии тока i_μ (т. е. наличии магнитного потока трансформатора) ток через $r_{ш}$ равен $i_a - i_{T1} = -i_{T1} = -i_\mu$, т. е. отрицателен, что вызывает отрицательное значение u_{2y} , которое образуется за счет спадания тока i_μ , и магнитного потока [ф-ла (5.13)].

На рис. 5.21 приведена зависимость i_1 от u_1 , построенная по характеристикам рис. 5.16 для $r = 100$ кОм. Величины u_a для разных u_1 брались из рис. 5.17. Следует отметить, что на рис. 5.21 масштабы для положительных и отрицательных значений i_1 разные.

Рассмотрим теперь работу блокинг-генератора. В первый момент после включения $i_\mu = 0$ и напряжение на конденсаторе $u_C = 0$. Поэтому рабочая точка занимает на рис. 5.20 положение 1, и ток i_1 имеет величину порядка 300 мА. В результате сразу после включения напряжение u_C быстро растет и прямая обратной связи двигается вверх.

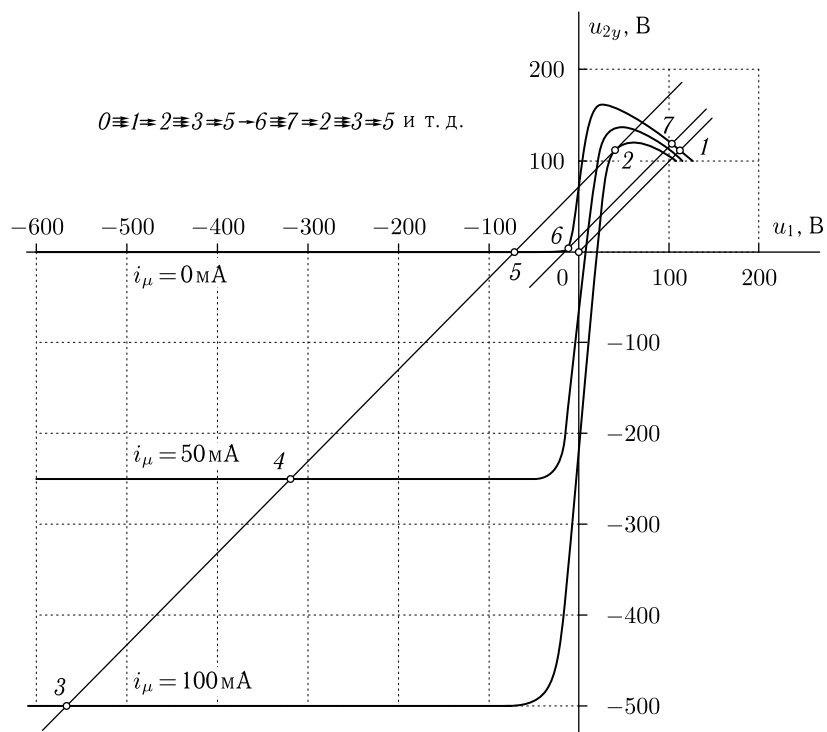


Рис. 5.20

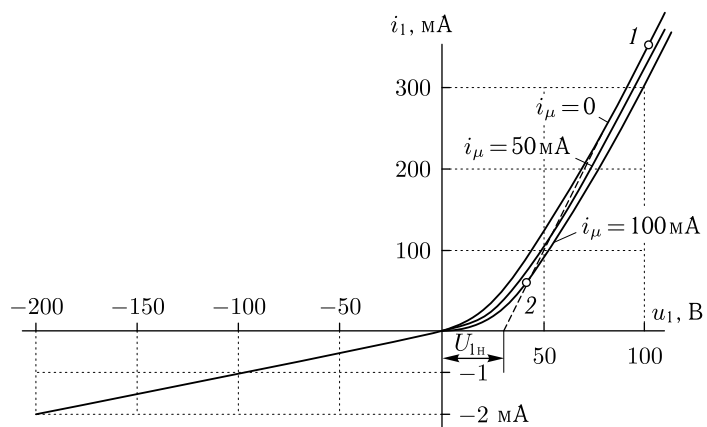


Рис. 5.21

Одновременно с этим растет i_μ в соответствии с ф-лой (5.13), поскольку напряжение u_{2y} положительно. Рост i_μ вызывает смещение кривой u_{2y} вниз.

Этот процесс продолжается, пока прямая обратной связи не коснется кривой u_{2y} и рабочая точка делается неустойчивой. Пусть это произойдет в положении 2. Из положения 2 рабочая точка скачком переместится в положение 3. За время скачка ток i_μ измениться не успеет, и поэтому кривая u_{2y} не сместится. Ток i_1 станет отрицательным. Конденсатор начнет разряжаться, u_C уменьшаться и прямая обратной связи опускаться. Однако вследствие малого тока i_1 , текущего в этом случае, движение прямой вниз будет гораздо более медленным, чем движение вверх. Напряжение u_{2y} станет отрицательным, что вызовет [ф-ла (5.13)] уменьшение тока i_μ . Обычно через непродолжительное время, за которое прямая обратной связи почти не успеет сдвинуться, ток i_μ становится практически равным нулю, и рабочая точка переходит в положение 4 и затем 5. После этого рабочая точка сравнительно медленно движется вправо вследствие медленного опускания прямой обратной связи (i_1 становится меньше 1 мА). Наконец, рабочая точка дойдет до неустойчивого положения 6, из которого сделает скачок в положение 7, и процесс начнет повторяться: рабочая точка перейдет в положение 2 и т. д.

На рис. 5.22 приведены временные диаграммы напряжений u_1 , u_2 и u_C . Нумерация точек та же, что и на рис. 5.20.

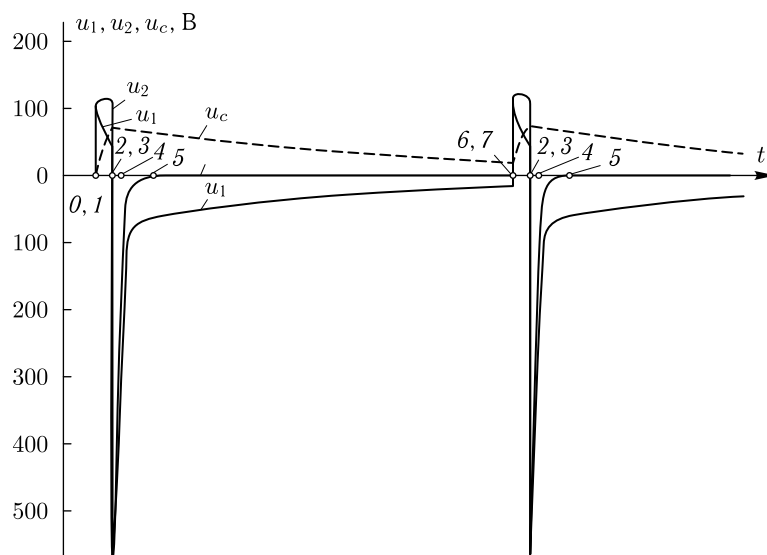


Рис. 5.22

С уменьшением L_1 кривая u_{2y} опускается быстрее и уменьшается напряжение u_{2y} , при котором начинается скачок и которое определяется ординатой точки 2 на рис. 5.20. Значение напряжения u_{2y} после открывания лампы (ордината точки 7 на рис. 5.20) от величины L_1 не зависит. Если при большой индуктивности L_1 напряжение u_2 во время импульса нарастает (рис. 5.19), то при меньших значениях L_1 оно может оставаться почти неизменным (рис. 5.20) или даже спадать. Обычно величину L_1 выбирают так, чтобы вершины импульсов были по возможности горизонтальными.

Сопrotивление $r_{ш}$ иногда не ставится. Однако оно всегда существует в неявном виде, как пересчитанное сопротивление, вызванное вихревыми токами в стали магнитопровода трансформатора. Вихревые токи в стали магнитопровода можно рассматривать как токи, текущие по некоторой третьей обмотке, сопротивление которой может быть пересчитано обычным способом в сопротивление, включенное параллельно первичной обмотке и входящее, таким образом, в $r_{ш}$. Иногда трансформатор имеет еще одну обмотку, с которой снимаются импульсы. Пересчитанное сопротивление нагрузки этой обмотки также должно входить в $r_{ш}$.

Необходимую длительность импульсов обычно устанавливают подбором емкости C . Длительность промежутка между импульсами устанавливается выбором сопротивления r , через которое разряжается конденсатор. Изменение r почти не влияет на форму и длительность импульсов, так как при $u_1 > 0$ ток i_1 в основном течет через сетку лампы.

Индуктивности рассеяния трансформатора, как было показано в § 3.4, влияют так же, как и паразитные емкости, замедляя процессы нарастания и спадания напряжения. Поэтому в блокинг-генераторе с целью укорочения времени скачков эти индуктивности стремятся делать возможно меньшими.

Лампа в блокинг-генераторе дает во время импульса, под действием большого положительного напряжения на сетке, большие токи. Эти токи обеспечиваются благодаря импульсной эмиссии оксидного катода. Характеристики лампы при импульсной эмиссии зависят от длительности импульсов и от промежутка между импульсами, в течение которых катод «отдыхает». Поэтому для точного расчета необходимо пользоваться характеристиками, снятыми в условиях, близких к режиму, в котором работает лампа.

Блокинг-генератор потребляет анодный ток лишь во время импульсов. Поэтому он используется обычно тогда, когда необходимо получить мощные короткие импульсы при малой затрате энергии.

Напряжение импульсов обычно снимается с обмоток трансформатора. Если необходимо получить пилообразное напряжение, то оно снимается с конденсатора C .

Для получения ждущего режима на сетку лампы через сопротивление r подается такое отрицательное смещение, что после импульса

лампа сама отпереться не может (рабочая точка не доходит до положения 6 рис. 5.20).

Пример 5.4

Требуется подобрать в блокинг-генераторе L_1 , C и r так, чтобы u_2 в начале и конце импульса было примерно одинаково, длительность импульса равнялась 1 мкс и частота генерации $f = 1$ кГц.

Дано: лампа 6Н8С; $k_T = 1$, $r_{ш} = 5$ кОм, $E_a = 200$ В.

Решение

Согласно рис. 5.20, для того, чтобы в конце импульса u_2 было таким же, как и в начале импульса, т. е. как в точке 7, где $u_2 \approx 120$ В, необходимо, чтобы к концу импульса ток i_μ был равен 100 мА. Следовательно, индуктивность L_1 должна быть такой, чтобы к концу импульса i_μ увеличился до 100 мА. Поскольку за время импульса u_2 почти постоянно, можно положить, что di_μ/dt за это время постоянно и равно

$$\frac{di_\mu}{dt} = \frac{i_\mu}{T_2} = \frac{0,1}{10^{-6}} = 10^5 \text{ А/с},$$

где i_μ — ток в конце импульса, T_2 — длительность импульса.

Отсюда, исходя из равенства (5.13),

$$L_1 = \frac{u_2}{k_T \frac{di_\mu}{dt}} = \frac{120}{1 \cdot 10^5} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,2 \text{ мГн}.$$

Выбираем C для обеспечения заданной длительности импульса. Пользуясь ф-лой (5.4), получим:

$$C = \frac{t - t_a}{r_1(b-1) \ln \frac{u_1 - U_{1н}}{U_{1а} - U_{1н}}}.$$

В нашем случае длительность импульса $T_2 = t - t_a = 10^{-6}$ с. Как видно из рис. 5.20, в начале импульса $u_1 = U_{1а} = 100$ В (напряжение в точке 7), в конце $u_1 \approx 42$ В (напряжение в точке 2). Учитывая, что в начале импульса $i_\mu = 0$, а в конце импульса $i_\mu = 100$ мА, получим, что зависимость между i_1 и u_1 будет приближенно соответствовать пунктирной кривой рис. 5.21, из которой находим:

$$\frac{1}{r_1} = \frac{di_1}{du_1} = \frac{i_{1а} - i_1}{U_{1а} - u_1} = \frac{350 \cdot 10^{-3} - 60 \cdot 10^{-3}}{100 - 42} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ А/В},$$

где $i_{1а}$ — ток i_1 в точке 7 и $U_{1н} = 30$ В.

Поскольку в течение импульса $u_2 \approx \text{const}$, можно принять

$$b = \frac{du_{2н}}{du_1} = 0.$$

На основании сказанного

$$C = \frac{T_2}{r_1 \ln \frac{U_{1а} - U_{1н}}{u_1 - U_{1н}}} = \frac{10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{70}{12}} = 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 28 \text{ нФ}.$$

Выбираем r так, чтобы обеспечить заданное время разряда конденсатора, приблизительно равное $T_1 = t' - t'_a = \frac{1}{f} = 10^{-3}$ с.

Учитывая, что при разряде

$$r_1 = r,$$

из ф-лы (5.4) получим

$$r = \frac{T_1}{C(1-b) \ln \frac{U'_{1a} - U'_{1n}}{u'_1 - U'_{1n}}},$$

где U'_{1a} — напряжение u_1 в точке 5 и u'_1 — напряжение u_1 в точке 6.

При разряде $u_{2y} = 0$, $b = 0$. Далее, в соответствии с рис. 5.20, $U'_{1a} = -70$ В, $u'_1 = -10$ В. Кроме того, при разряде $i_1 = \frac{u_1}{r}$ и, следовательно, $U'_{1n} = 0$.

Таким образом, получаем

$$r = \frac{10^{-3}}{28 \cdot 10^{-9} \ln \frac{70}{10}} = 18\,300 \text{ Ом.}$$

§ 5.8. Синхронизация релаксационных генераторов

В релаксационных автогенераторах напряжение U_C на конденсаторе обратной связи растёт, пока не достигнет порога срабатывания U'_C (рис. 5.2 и 5.3), затем уменьшается, пока не достигнет порога срабатывания U''_C , потом снова растёт до порога U'_C и т. д. Вводимые извне в генератор импульсы напряжения могут изменять порог срабатывания и этим момент переброса, что вызовет изменение периода колебаний.

Этим способом можно заставить релаксационный генератор генерировать колебания с периодом, точно в целое число раз большим, чем период напряжения, подаваемого на него извне, или, как говорят, синхронизировать генератор внешним напряжением.

Пусть, например, на сетку лампы L_2 генератора с катодной связью (рис. 5.9), характеристики которого приведены на рис. 4.9, подаются отрицательные импульсы с амплитудой 5 В. Тогда, как видно из рис. 4.9, порог срабатывания U''_C во время импульса увеличится на $\Delta U''_C = 4$ В, а U'_C на $\Delta U'_C = 21$ В.

Временные диаграммы U'_C , U''_C и u_C для случая, когда на релаксационный генератор подаются импульсы, приведены на рис. 5.23. Как видно из этих диаграмм, период колебаний под действием импульсов немного сократится (кривая 1, пунктиром показано колебание, которое было бы в отсутствие импульсов) и станет равным $3T_c$, где T_c — период внешнего синхронизирующего напряжения. Из рисунка видно также, что небольшое изменение параметров генератора, например, изменение скорости заряда и разряда конденсатора обратной связи, приведет к некоторому изменению временной диаграммы генерируемого колебания (при уменьшении скорости получится кривая 2), но период колебания останется тем же.

При значительном увеличении скорости заряда и разряда конденсатора обратной связи можно добиться, чтобы период колебаний был равен $2T_c$ и T_c .

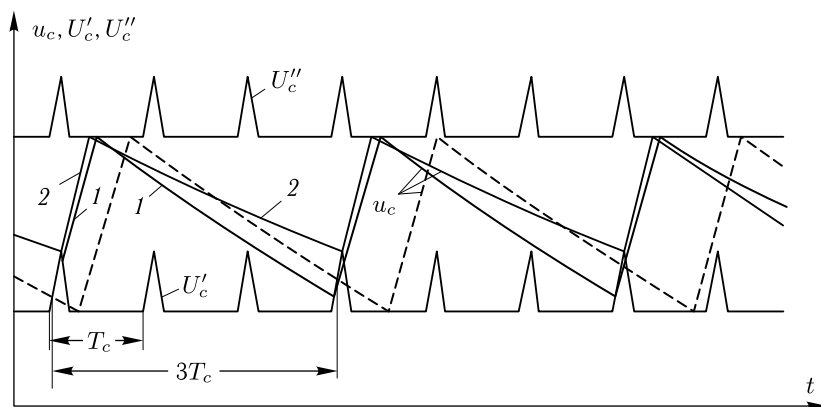


Рис. 5.23

При значительном уменьшении скорости заряда и разряда конденсатора обратной связи можно добиться, чтобы период колебаний генератора был равен $4T_c$, $5T_c$, ..., nT_c . Однако при большом значении n небольшие изменения параметров ведут уже к изменению периода колебаний — нарушению синхронизации. Поэтому обычно значение n не превышает 10. Осуществить синхронизацию можно, воздействуя на генератор не только импульсами, но и плавно меняющимся напряжением. На рис. 5.24 приведена временная диаграмма для такого случая. Кривая 1 изображает изменение u_c при условии, что синхронизация установилась и период колебаний точно равен $2T_c$. Кривые 2 и 3 наглядно показывают, что при отклонении от кривой 1 период колебаний вначале отличается от $2T_c$, затем колебания стремятся к колебанию 1, а период их к $2T_c$.

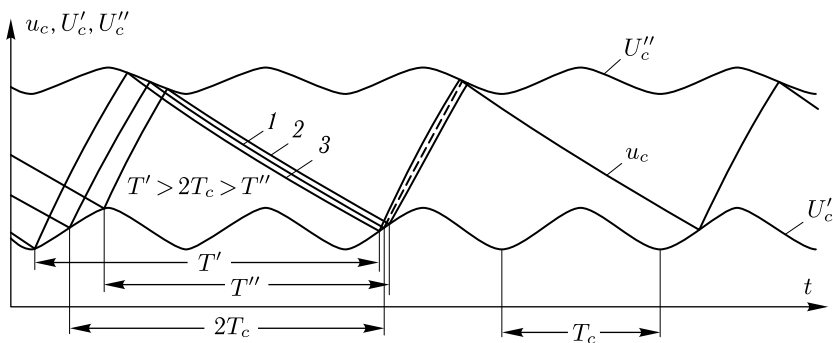


Рис. 5.24

При изменении в некоторых пределах параметров генератора период его колебаний и в этом случае останется постоянным. Сказанное

иллюстрирует рис. 5.25. На этом рисунке скорость изменения u_C для кривой 1 больше, чем для кривой 2, а период колебаний релаксационного генератора для обеих кривых один и тот же.

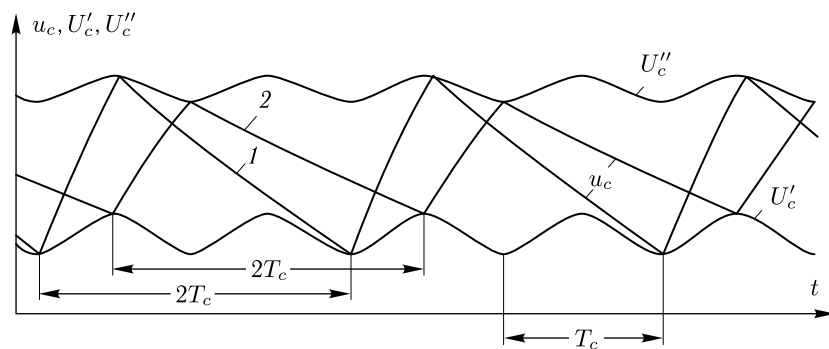


Рис. 5.25