

Фотографии расположены в порядке уменьшения L . Характер периодического процесса, изображенного на этих фотографиях, в общем

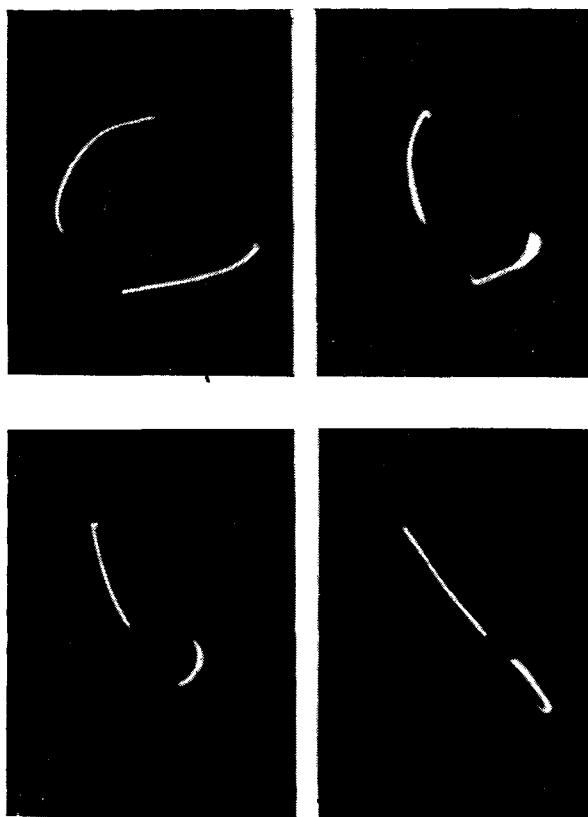


Рис. 560.

совпадает с той картиной, которую мы получили при теоретическом рассмотрении.

§ 10. «Универсальная» схема

Рассмотренные выше (в этой главе) системы могут совершать только разрывные автоколебания. Существуют, однако, такие системы, в которых возможны как непрерывные, так и разрывные автоколебания, переходящие друг в друга при изменениях того или иного параметра системы (при переходе этого параметра через некоторое критическое, бифуркационное значение). Такова, например, так называемая «универсальная» схема [125], приведенная на рис. 561 (характер

ее состояния равновесия был уже рассмотрен в § 4, гл. V). Эта схема является «промежуточной» между генератором квазисинусодальных (и следовательно, непрерывных) колебаний с двухзвенной RC -цепочкой (см. § 12, гл. V и § 5, гл. VIII) и мультивибратором с одним RC -звеном: в первую схему «универсальная» схема превращается при нижнем положении движка потенциометра r (при $\beta = \frac{r_1}{r} = 0$) и во вторую — при верхнем положении этого движка (при $\beta = \frac{r_1}{r} = 1$), когда емкость C_a оказывается подсоединеной параллельно емкости C_1 . Поэтому можно ожидать, что при перемещении движка потенциометра от нижнего положения к верхнему (при изменении β от 0 к 1) в схеме будет иметь место переход от непрерывных автоколебаний к разрывным. Исследование схемы это подтверждает.

Уравнение колебаний «универсальной» схемы при пренебрежении сеточными токами и анодной реакцией, а также всеми паразитными параметрами схемы кроме малой паразитной емкости C_a (она изображена на рис. 561 пунктиром) могут быть записаны на основании законов Кирхгофа (в обозначениях рис. 561) следующим образом:

$$\frac{E_a - u_a}{R} = i_a(u) + C_a \frac{du_a}{dt} + i_1 + i_2,$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = i_1, \quad C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_2,$$

$$u = r(i_1 + \beta i_2), \quad u_a = u + v_1, \quad v_2 = v_1 + (1 - \beta)r i_1,$$

или в переменных u , v_1 и $z = ri_1$ (при $C_a \ll C_1, C_2$):

$$\left. \begin{aligned} \mu \dot{u} &= E_a - R i_a(u) - (1 + \frac{R}{\beta r}) u + (1 - \beta) \frac{R}{\beta r} z - v_1, \\ \dot{v}_1 &= z, \quad (1 - \beta) \dot{z} = \frac{C_1}{\beta C_2} u - (1 + \frac{C_1}{\beta C_2}) z, \end{aligned} \right\} \quad (10.48)$$

где $\mu = \frac{RC_a}{rC}$ — малый положительный параметр, характеризующий малость паразитной емкости C_a ($0 < \mu \ll 1$), а точкой сверху обозначено дифференцирование по безразмерному времени $t' = \frac{t}{rC_1}$. Характеристика ламповой группы $i_a = i_a(u)$ изображена на рис. 561; мы будем

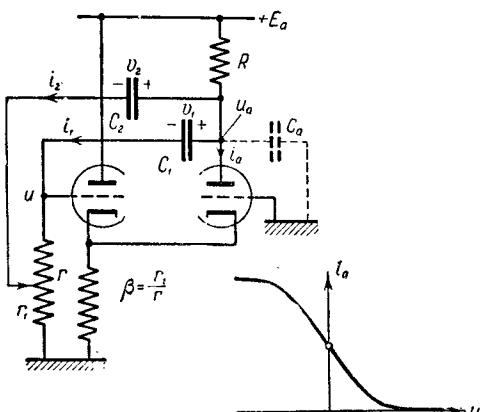


Рис. 561.

полагать ниже для большей определенности, что абсолютное значение крутизны характеристики

$$S(u) = -\frac{di_a}{du}$$

имеет наибольшее значение ($= S_0$) в состоянии равновесия схемы (при $u=0$) и монотонно убывает, стремясь к нулю, при увеличении $|u|$.

Если пренебречь малой паразитной емкостью C_a , т. е. положить в уравнениях (10.48) $\mu=0$, то множество состояний такой системы будет составлять в пространстве u, z, v_1 поверхность F :

$$\left. \begin{aligned} F(u, z, v_1) &= 0, \\ \text{где } F(u, z, v_1) &= E_a - Ri_a(u) - \left(1 + \frac{R}{\beta r}\right) u + (1 - \beta) \frac{R}{\beta r} z - v_1 \end{aligned} \right\} \quad (10.49)$$

— правая часть первого уравнения (10.48) — уравнения с малым коэффициентом μ при производной. Поверхность F в пространстве u, z, v_1 гомеоморфна координатной плоскости u, z ; поэтому «медленные» движения системы мы можем отображать траекториями на этой плоскости. В соответствии с (10.19) имеем следующее условие несущественности малой паразитной емкости C_a :

$$\frac{\partial F}{\partial u} = RS(u) - 1 - \frac{R}{\beta r} < 0. \quad (10.49a)$$

Здесь, очевидно, возможны два случая.

При $RS_0 < 1 + \frac{R}{\beta r}$ или, иначе, при

$$\beta < \beta_{kp} = \frac{R}{r} \frac{1}{RS_0 - 1}$$

условие (10.49a) будет выполнено на всей фазовой поверхности F системы с $C_a = 0$. В этом случае малая паразитная емкость C_a не является существенной для колебательных процессов в схеме, ее можно пренебречь и рассматривать колебания «универсальной» схемы как колебания системы с одной степенью свободы, описываемой уравнением (10.49) и двумя последними из уравнений (10.48). Это связано, очевидно, с тем, что при $\beta < \beta_{kp}$ все траектории «быстрых» движений изображающей точки, которые имеются при малых C_a (при $\mu \rightarrow +0$) в фазовом пространстве u, z, v_1 вне поверхности F , идут к этой поверхности (рис. 562). Исключая из этих уравнений одно из переменных, например v_1 , мы получим для переменных u, z систему двух дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= \frac{\frac{RC_1}{\beta r \beta C_2} u - \left[1 + \frac{R}{\beta r} \left(1 + \frac{C_1}{\beta C_2}\right)\right] z}{1 + \frac{R}{\beta r} - RS(u)}, \\ \dot{z} &= \frac{C_1}{\beta(1-\beta)C_2} u - \left(1 + \frac{C_1}{\beta C_2}\right) \frac{z}{1-\beta} \end{aligned} \right\} \quad (10.50)$$

с регулярными правыми частями (знаменатель правой части первого уравнения всюду положителен). Эти уравнения позволяют проследить

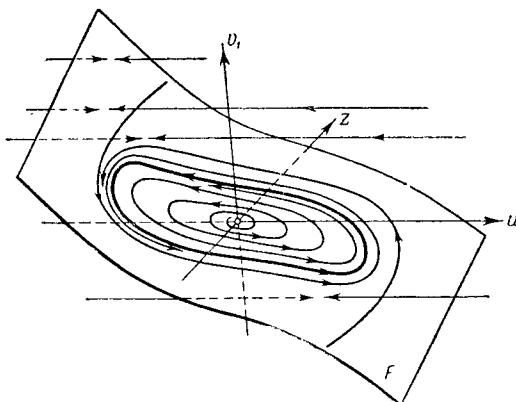


Рис. 562.

за поведением рассматриваемой схемы и сделать заключения о ее колебаниях.

Если условие самовозбуждения

$$RS_0 > 1 + \frac{R}{r} \frac{C_1 + C_2}{C_1 + \beta C_2} \quad (10.51)$$

не выполнено, то единственное состояние равновесия ($u = 0, z = 0$) является устойчивым фокусом или узлом, к которому идут все фазовые траектории. В этом случае при любых начальных условиях схема приходит к состоянию равновесия, т. е. не совершает ни непрерывных, ни разрывных автоколебаний.

Если же условие самовозбуждения (10.51) выполнено (но по-прежнему $RS_0 < 1 + \frac{R}{\beta r}$), то единственное состояние равновесия ($0, 0$) будет неустойчивым фокусом или узлом, и при сделанных нами предположениях относительно вида характеристики ламповой группы $i_a = i_a(u)$ на плоскости u, z будет существовать единственный и устойчивый предельный цикл, к которому будут идти все остальные фазовые траектории (рис. 563 и 564). Разбиения плоскости u, z на траектории, изображенные на рис. 563 и 564, построены путем графического интегрирования (методом изоклин) уравнений (10.50). Первое

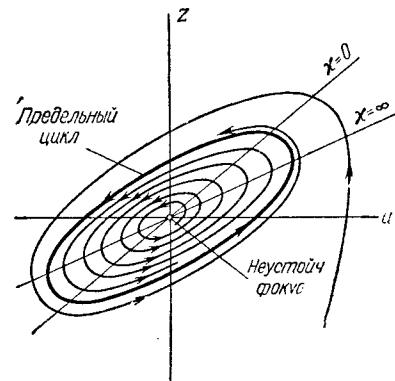


Рис. 563.

из них дано для случая, когда состояние равновесия является неустойчивым фокусом, второе — для случая, когда это состояние равновесия — неустойчивый узел. В схеме, таким образом, при любых начальных условиях будут устанавливаться *непрерывные* автоколебания, поскольку скорости движения изображающей точки по предельному циклу, равно как и на всей плоскости u, z , всюду ограничены (и при сколь угодно малой паразитной емкости C_a).

Иная картина получается

$$\text{при } RS_0 > 1 + \frac{R}{\beta r}, \text{ т. е. при}$$

$$\beta > \beta_{kp} = \frac{R}{r} \frac{1}{RS_0 - 1}. \quad (10.52)$$

При выполнении этого условия в силу непрерывности и монотонности изменения $S(u)$ от S до 0 при увеличении $|u|$, очевидно, существует такое значение u^* напряжения u на сетке левого триода, что $RS(\pm u^*) = 1 + \frac{R}{\beta r}$, а при

$|u| < u^*$ $RS(u) > 1 + \frac{R}{\beta r}$ и, следовательно, условие несущественности малой паразитной емкости C_a (условие (10.49а)) не выполнено. Поэтому фазовые траектории «быстрых» движений (скачков) в фазовом пространстве u, z, v_1 отходят от полосы $|u| \leq u^*$ поверхности F — фазовой поверхности системы без паразитной емкости C_a , т. е. при $|u| \leq u^*$ в рассматриваемой схеме возможны только «быстрые» движения изображающей точки — скачки напряжения u , не подчиняющиеся, конечно, уравнениям (10.50), составленным при пренебрежении малой паразитной емкостью C_a . Наоборот, на остальной части поверхности F (при $|u| > u^*$) условие (10.49а) выполнено, там траектории «быстрых» движений подходят к поверхности F , и следовательно, вблизи ее движение изображающей точки (колебания схемы) может быть удовлетворительно отображено уравнениями «медленных» движений (10.50), если только емкость C_a действительно мала.

Таким образом, при $\beta > \beta_{kp}$ мы получаем разбиение фазового пространства u, z, v_1 на траектории, приведенное на рис. 565 и соответствующее уже разрывным колебаниям схемы. На части F^+ поверхности $F: |u| > u^*$, имеют место «медленные» (с конечной скоростью при $\mu \rightarrow \pm 0$) движения изображающей точки по траекториям, определяемым при достаточно малых C_a (при $\mu \rightarrow \pm 0$) уравнениями (10.50). Вне F^+ при $\mu \rightarrow \pm 0$ $\dot{u} \rightarrow \infty$, но \dot{z} и v_1 остаются

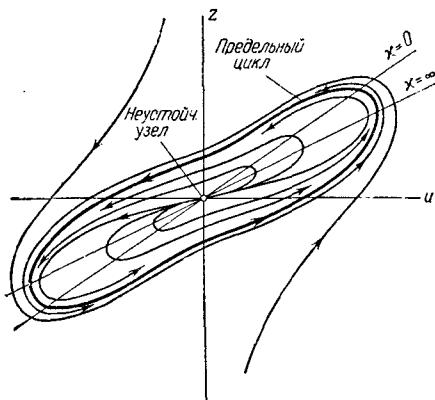


Рис. 564.

конечными, поэтому там имеют место «быстрые» движения изображающей точки (скакки) по траекториям «быстрых» движений $z = \text{const}$, $v_1 = \text{const}$ ¹⁾. Так как над поверхностью F^- $\dot{u} \rightarrow -\infty$ (при $r \rightarrow +0$) и под ней $\dot{u} \rightarrow +\infty$, то все траектории «быстрых» движений идут к поверхности F^+ , где переходят в траектории «медленных» движений. В свою очередь все траектории «медленных» движений переходят в траектории скачков при $u = +u^*$ или при $u = -u^*$. Из этих чередующихся друг с другом кусков траекторий «быстрых» и «медленных» движений и «сшиваются» траектории движения изображающей точки — фазовые траектории рассматриваемой схемы в

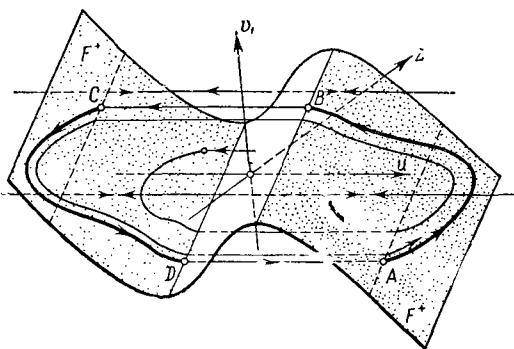


Рис. 565.

пространстве u, z, v_1 . Можно показать, что все фазовые траектории стремятся (при $t \rightarrow +\infty$) к единственному и устойчивому предельному циклу. Таким образом, при $\beta > \beta_{kp}$ в схеме устанавливаются при любых начальных условиях разрывные автоколебания.

На рис. 566 приведена проекция на координатную плоскость u, z этого разбиения пространства u, z, v_1 на траектории. Траектории «медленных» движений, идущие в областях $|u| > u^*$, построены путем графического интегрирования уравнений (10.50); траектории скачков являются прямые $z = \text{const}$, причем концевые точки $(\pm u^{**}, z_2)$ траекторий скачков, начинающихся в точках $(\pm u^*, z_1)$, определяются, очевидно, соотношениями:

$$z_2 = z_1, R i_a (\mp u^{**}) \mp \left(1 + \frac{R}{\beta r}\right) u^{**} = R i_a (\pm u^*) \pm \left(1 + \frac{R}{\beta r}\right) u^*$$

¹⁾ Условия неизменности z и v_1 при скачке напряжения u получаются и из дополнительного (физического) предположения об ограниченности токов и напряжений в схеме. Если токи в схеме ограничены (не могут быть бесконечно большими), то напряжения v_1 и v_2 на конденсаторах C_1 и C_2 не могут изменяться скачком (\dot{v}_1 и \dot{v}_2 должны быть ограниченными). Тогда во время мгновенного скачка должны оставаться неизменными v_1 и v_2 — $v_1 = (1 - \beta) r i_1 = (1 - \beta) z_1$, т. е. z .

(множество концевых точек траекторий скачков образуют, таким образом, прямые $u = -u^{**}$ и $u = +u^{**}$). Как видим, все траектории асимптотически приближаются (при $t \rightarrow +\infty$) к предельному циклу $ABCDA$, состоящему из двух кусков траекторий «медленных» движений AB и CD и двух отрезков траекторий «быстрых» движений BC и DA ¹⁾.

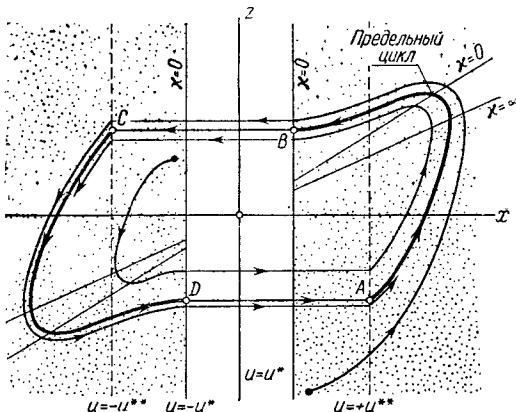


Рис. 566.

Заметим, что сам переход непрерывных автоколебаний в разрывные при $\beta = \beta_{kp}$ совершается непрерывно: при β , приближающихся к β_{kp} со стороны меньших значений ($\beta < \beta_{kp}$), скорость изменения напряжения u на прямой $u = 0$ неограниченно возрастает и при $\beta = \beta_{kp}$ становится бесконечно большой; с другой стороны, изменение напряжения u в результате скачка ($= u^{**} + u^*$) при $\beta > \beta_{kp}$ монотонно растет при увеличении β , начиная с нулевого значения при $\beta = \beta_{kp}$.

§ 11. Блокинг-генератор

В современной радиотехнике для генерирования коротких импульсов напряжения часто применяется так называемый блокинг-генератор [65, 71, 91], одна из схем которого приведена на рис. 567.

Блокинг-генератор представляет собой генератор с индуктивной обратной связью, в котором лампа заперта в течение почти всего периода автоколебаний. При отпирании лампы в сеточной обмотке

¹⁾ Строгое доказательство существования предельного цикла и стремления к нему всех остальных траекторий может быть сделано, например, для кусочно-линейной характеристики ламповой группы путем построения и исследования точечного преобразования прямой $u = +u^*$ в прямую $u = -u^*$, осуществляемого траекториями системы.