

**РЕЛЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
С НЕЛИНЕЙНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ,
ИМЕЮЩИМИ СПАДАЮЩИЙ УЧАСТОК
НА ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ**

**§ 6.1. Нелинейные сопротивления, имеющие
спадающий участок на вольтамперной характеристике**

В этой главе рассмотрены реле и релаксационные генераторы, в которых используются нелинейные сопротивления, имеющие *спадающий участок* на вольтамперной характеристике, т. е. участок, на котором $\frac{di}{du} < 0$.

Таковыми нелинейными сопротивлениями являются газоразрядные лампы, тиратроны, а также двухсеточные лампы в динатронном режиме. Их вольтамперные характеристики изображены на рис. 6.1 и 6.2 (*ab* — спадающий участок).

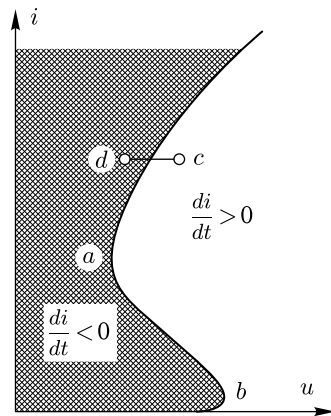


Рис. 6.1

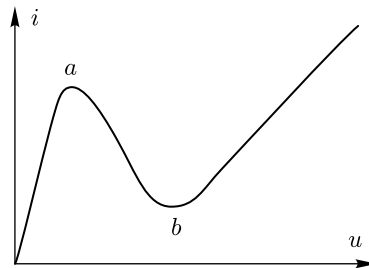


Рис. 6.2

Вольтамперные характеристики со спадающим участком имеют некоторые сложные двухполюсники, содержащие в себе усилители

постоянного напряжения. Эти двухполюсники могут также рассматриваться как нелинейные сопротивления.

Как было показано в § 3.1, для малых приращений токов и напряжений неуправляемые нелинейные сопротивления могут быть заменены линейным сопротивлением, величина которого вычисляется следующим образом:

$$r_i = \frac{1}{\frac{di}{du}},$$

где $\frac{di}{du}$ берется в рабочей точке вольтамперной характеристики. Следовательно, если рабочая точка лежит на спадающем участке, то r_i — отрицательно. Отрицательные сопротивления позволяют получить от схем ряд новых свойств.

При подаче напряжения Δu на положительное сопротивление r_i последнее отбирает энергию от источника напряжения, причем отбираемая мощность равна $\frac{(\Delta u)^2}{r_i}$. При отрицательном r_i эта мощность отрицательна, т. е. сопротивление r_i отдает энергию источнику напряжения Δu . Эта энергия берется от эдс, смещающих рабочую точку на спадающий участок характеристики, или иногда от эдс, содержащихся в двухполюснике, представляющем нелинейное сопротивление.

Схемы, содержащие нелинейные сопротивления со спадающими участками, могут иметь несколько различных состояний равновесия, причем состояния равновесия, соответствующие рабочим точкам на спадающем участке, в ряде случаев неустойчивы.

Характеристики нелинейных сопротивлений со спадающим участком бывают двух типов. Характеристики типа *S* имеют до трех значений тока, соответствующих одному значению напряжения (рис. 6.1). К ним относятся, например, характеристики газоразрядных ламп и тиратронов. Характеристики типа *N* имеют до трех значений напряжения, соответствующих одному и тому же току (рис. 6.2). К ним относятся, например, динатронные характеристики двухсеточных ламп. В соответствии с этим реле и релаксационные генераторы с нелинейными сопротивлениями бывают двух типов: реле и релаксационные генераторы с сопротивлениями, имеющими характеристики типа *S*, и реле и релаксационные генераторы с сопротивлениями, имеющими характеристики типа *N*.

§ 6.2. Реле с газоразрядной лампой

Газоразрядная лампа состоит из баллона, наполненного обычно инертным разреженным газом, в котором находятся два электрода. Вольтамперная характеристика газоразрядной лампы в установившемся режиме изображена на рис. 6.1.

В неустановившемся режиме из-за инертности ионов напряжение на газоразрядной лампе при заданном токе через нее может быть больше или меньше величины, определяемой характеристикой.

Опыт показывает, что если при заданном токе через лампу напряжение на ней соответствует точке, лежащей справа от характеристики (например, точке c), то ионизация и ток нарастают, если слева (например, в точке d), то уменьшаются. Это объясняется тем, что увеличение напряжения увеличивает скорость движения ионов и их количество, а уменьшение — уменьшает.

Таким образом, если ток i через лампу и напряжение на ней таковы, что рабочая точка (u, i) лежит слева от кривой, то напряжение недостаточно для поддержания постоянного тока и

$$\frac{di}{dt} < 0,$$

если справа, то напряжение больше, чем необходимо для поддержания постоянного тока, и

$$\frac{di}{dt} > 0,$$

если на кривой, — то напряжение равно значению, необходимому для поддержания постоянного тока и

$$\frac{di}{dt} = 0.$$

Пусть газоразрядная лампа включена в схему, изображенную на рис. 6.3. Тогда установившиеся значения u и i соответствуют рабочим точкам 1, 2, 3 (рис. 6.4), являющимися точками пересечения характеристики $i = f(u)$ и нагрузочной прямой 1-3:

$$i = \frac{E - u}{r}.$$

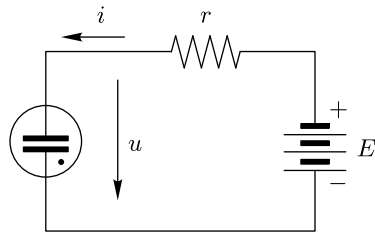


Рис. 6.3

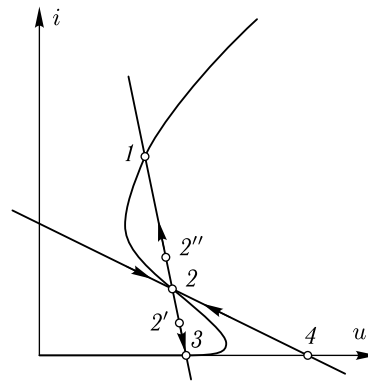


Рис. 6.4

Режим, соответствующий точке 2, *неустойчив*. Действительно, пусть напряжение u несколько увеличится по сравнению с его значением в точке 2, и режим будет соответствовать, скажем, точке 2' [рабочая точка (u, i) , характеризующая режим, должна всегда лежать на нагрузочной прямой 1-3, так как u и i связаны уравнением (6.1)]. Поскольку точка 2' лежит в области, где $\frac{di}{dt} < 0$, т.е. где напряжение недостаточно для поддержания данной ионизации, ток через газоразрядную лампу будет уменьшаться и рабочая точка станет перемещаться по прямой 1-3 до тех пор, пока не дойдет до положения 3. Время этого перемещения равно времени деионизации и имеет порядок десятков или сотен микросекунд.

Если напряжение несколько уменьшится по сравнению с его значением в точке 2 и рабочая точка перейдет в положение 2'', лежащее в области, где $\frac{di}{dt} > 0$, то она будет перемещаться по прямой вверх до положения 1.

Таким образом, самые небольшие изменения напряжения приводят к тому, что схема выходит из состояния равновесия, соответствующего положению 2, и поэтому такой режим продолжительное время существовать не может.

Рассуждая аналогично, мы приходим к выводу, что режимы, соответствующие точкам 1 и 3, *устойчивы*.

Следовательно, в рассмотренном случае возможны два устойчивых режима: в одном из них (точка 1) лампа горит, в другом (точка 3) погашена.

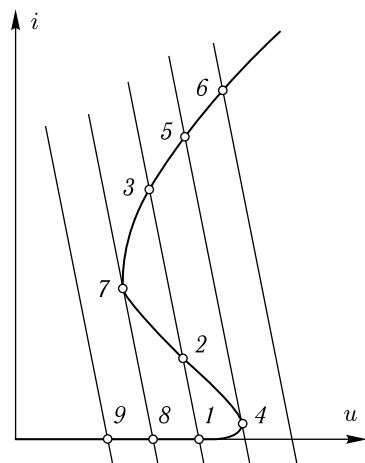


Рис. 6.5

Если взять достаточно большую эдс E и достаточно большое сопротивление r , скажем, такие, чтобы нагрузочная прямая проходила через точки 4 и 2, то, как легко видеть, точка 2 устойчива.

Если снова выбрать сопротивление r и эдс E такими, чтобы нагрузочная прямая занимала положение 1-2-3 (рис. 6.5), а затем увеличивать эдс E , то рабочая точка перемещается по характеристике из положения 1 в 4, которое неустойчиво. Из этого положения она скачком перейдет в положение 5, лампа загорится. При дальнейшем увеличении E рабочая точка перемещается в положение 6 и далее по характеристике.

Таким образом, как только E превысит некоторое значение, и напряжение u на лампе станет настолько большим, что даже при малом начальном токе ионизация будет

увеличиваться ($\frac{fi}{dt} > 0$), лампа загорится и при дальнейшем увеличении E будет продолжать гореть.

Если теперь уменьшить E до первоначального значения, то рабочая точка займет положение 3, и лампа будет продолжать гореть. Для того, чтобы погасить лампу, необходимо уменьшить E настолько, чтобы рабочая точка заняла неустойчивое положение 7. Из него рабочая точка скачком перейдет в положение 8 — лампа погаснет. При возвращении E к первоначальному значению рабочая точка займет положение 1. Таким образом, изменяя эдс E (добавляя, например, к постоянному напряжению импульсы), можно переводить схему из одного состояния равновесия в другое.

§ 6.3. Релаксационные генераторы с газоразрядной лампой

Рассмотрим схему релаксационного генератора с газоразрядной лампой (рис. 6.6).

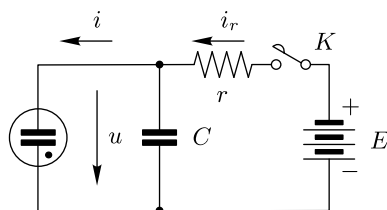


Рис. 6.6

Пусть i — ток, текущий через лампу, и u — напряжение на лампе и конденсаторе. Ток i_r , текущий через сопротивление r , равен

$$i_r = \frac{E - u}{r}. \quad (6.2)$$

Ток, текущий через конденсатор, выражается так:

$$i_r - i = C \frac{du}{dt}. \quad (6.3)$$

Таким образом, если $i_r > i$, то $\frac{du}{dt} > 0$ и конденсатор заряжается; если $i_r < i$, то $\frac{du}{dt} < 0$ и конденсатор разряжается.

Сопротивление r и эдс E выберем так, чтобы нагрузочная прямая (уравнение 6.2) и характеристика лампы, выраженная уравнением

$$i = f(u), \quad (6.4)$$

пересекались на спадающем участке характеристики (рис. 6.7).

После замыкания ключа K потечет ток i_r , который заряжает конденсатор C . Пока напряжение u на конденсаторе мало, лампа не горит.

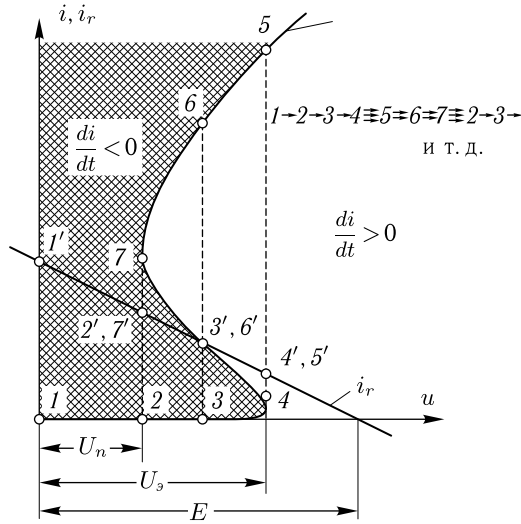


Рис. 6.7

Рабочая точка (u, i) перемещается по характеристике, занимая последовательно положения 1, 2, 3.

Рабочая точка (u, i_r) перемещается по нагрузочной прямой, занимая соответственно положения 1', 2', 3'. Во всех этих положениях $i_r > i$, и в соответствии с (6.3) конденсатор заряжается ($\frac{du}{dt} > 0$).

Так продолжается до тех пор, пока рабочие точки (u, i) и (u, i_r) не достигнут положений 4 и 4'. Положение 4 неустойчиво, так как при увеличении тока точка (u, i) попадает в область, где $\frac{di}{dt} > 0$, и ток i начинает быстро (скачком) расти (лампа загорается). Рабочая точка за короткое время, двигаясь по вертикали, попадает в устойчивое положение 5. Движение из положения 4 в положение 5 происходит по вертикали, если емкость конденсатора настолько велика, что напряжение u на нем за время скачка не изменяется.

Начиная с положения 5, ток через лампу i становится больше тока через сопротивление i_r и конденсатор начинает разряжаться ($\frac{du}{dt} < 0$). Через некоторое время рабочая точка (u, i) сместится в положение 6, а рабочая точка (u, i_r) — в положение 6'. При этом сохраняется соотношение $i_r < i$ и конденсатор продолжает разряжаться. Процесс разряда длится до тех пор, пока рабочие точки не придут в положения 7 и 7'. Точка 7 — неустойчива, поэтому ток i сделает быстрый скачок вниз, в устойчивую точку 2, и лампа погаснет. С этого момента $i = 0$, т.е. меньше i_r , и конденсатор начнет заряжаться; рабочая точка (u, i) снова пройдет положения 3-4, а точка (u, i_r) — положения 3'-4'. В точке 4 снова произойдет скачок тока i , лампа загорится

и конденсатор начнет разряжаться. Этот процесс повторяется до тех пор, пока замкнут ключ K .

Соответствующие временные диаграммы токов и напряжения приведены на рис. 6.8. Обозначения на нем соответствуют рис. 6.7.

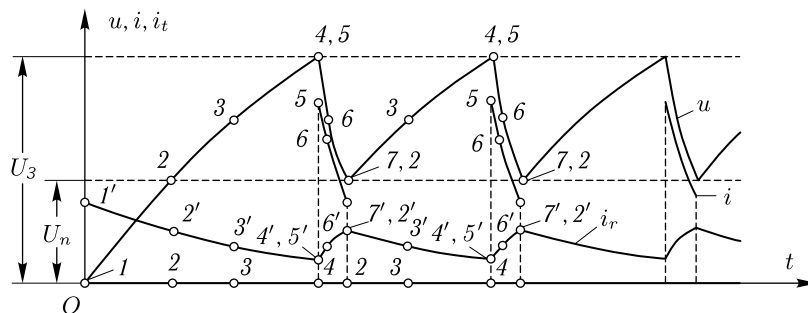


Рис. 6.8

Период релаксационного колебания можно найти, определив закон изменения напряжения u во времени при заряде и разряде конденсатора. Это можно сделать, исключив в дифференциальном уравнении (6.3) i и i_r с помощью ф-л (6.2) и (6.4). Полученное уравнение решается методом разделения переменных, однако результат получается в виде интеграла, который, вследствие того, что характеристика обычно задается графически, приходится вычислять численным интегрированием. Выведем приближенную формулу для периода, пренебрегая при выводе временем разряда и считая, что при заряде конденсатора ток через лампу равен нулю.

При погашенной лампе, как известно, напряжение на конденсаторе должно меняться по закону:

$$u = E + Ae^{-\frac{t}{\tau C}}, \quad (6.5)$$

где A — постоянная, зависящая от начальных условий.

Обозначим через t_1 момент начала заряда конденсатора. В этот момент напряжение u соответствует точкам 2 и 7 (рис. 6.7 и 6.8). Назовем это напряжением *напряжением погасания* и обозначим его через U_{Π} . Тогда из ф-лы (6.5) получим:

$$U_{\Pi} = E + Ae^{-\frac{t_1}{\tau C}}.$$

Обозначим через t_2 момент окончания заряда конденсатора. В этот момент напряжение u соответствует точкам 4 и 5. Назовем это напряжением *напряжением зажигания* и обозначим его через U_3 . Тогда

$$U_3 = E + Ae^{-\frac{t_2}{\tau C}}.$$

На основании этих уравнений период колебаний, приблизительно равный времени заряда, определяется формулой:

$$T \approx t_2 - t_1 = -rC \ln \frac{U_3 - E}{A} + rC \ln \frac{U_{II} - E}{A}$$

или

$$T \approx rC \ln \frac{E - U_{II}}{E - U_3}. \quad (6.6)$$

Как видно из формулы, период колебаний зависит от U_3 и U_{II} , а эти величины обычно меняются во времени из-за изменения давления газа и состояния поверхности электродов лампы. Кроме того, в формулу входит величина напряжения источника питания E , сделать которую постоянной также затруднительно. По этим причинам *период колебаний рассмотренного генератора сильно меняется в процессе работы*, что является одним из наиболее существенных его недостатков.

Другим недостатком рассмотренного генератора является *невозможность получения больших частот генерации* (десятки килогерц и выше). Из ф-лы (6.6) следует, что если уменьшать r и C , то период колебаний можно сделать сколь угодно малым, а, следовательно, частоту сколь угодно большой. Однако величину r *нельзя сильно уменьшать*, иначе пересечение нагрузочной прямой с характеристикой произойдет за пределами спадающего участка характеристики. В этом случае, как легко видеть, генерации не будет (лампа загорится и будет гореть).

Величину емкости конденсатора C *уменьшать сильно также нельзя*. При этом конденсатор сможет заряжаться и разряжаться настолько быстро, что инерционностью ионных процессов в лампе пренебречь нельзя, и за время нарастания тока после зажигания лампы, а также за время спада тока при погасании лампы (эти процессы мы раньше считали мгновенными) напряжение на конденсаторе успеет измениться. При малой емкости рабочая точка (u, i) вместо цикла I (рис. 6.9) будет совершать цикл II , при этом углы на временных диаграммах будут закругленными. При дальнейшем уменьшении емкости рабочая точка после включения будет перемещаться по траектории III , попадая в конце траектории в точку пересечения a характеристики и нагрузочной прямой, которая теперь будет устойчивой. Действительно, при нарастании тока i напряжение на конденсаторе u падает настолько быстро, что рабочая точка переходит из положения a в положение b , лежащее в области, где $\frac{di}{dt} < 0$; поэтому ток i начнет падать, напряжение расти, и рабочая точка вернется в положение a . При большой емкости конденсатора напряжение на нем с нарастанием тока измениться не успеет, и рабочая точка переходит в положение b' , лежащее в области, где $\frac{di}{dt} > 0$, и оттуда в положение b'' .

Аналогично при уменьшении тока i рабочая точка перейдет вследствие быстрого заряда конденсатора в положение c (вместо $c' - c''$

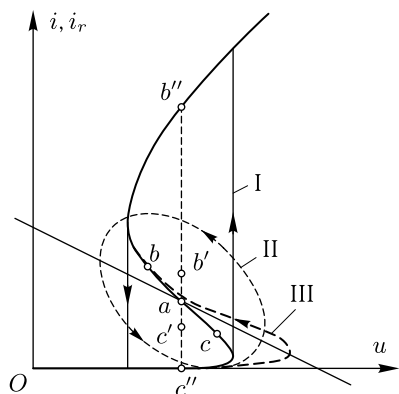


Рис. 6.9

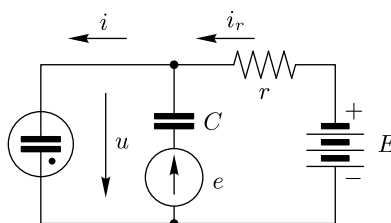


Рис. 6.10

при большой емкости). В положении c имеем $\frac{di}{dt} > 0$, и рабочая точка из него вернется в положение a .

Если сопротивление r и эдс E (рис. 6.10) выбрать так, чтобы нагрузочная прямая $i_r = \frac{E-u}{r}$ заняла положение ab (рис. 6.11), то получается *ждущий* релаксационный генератор.

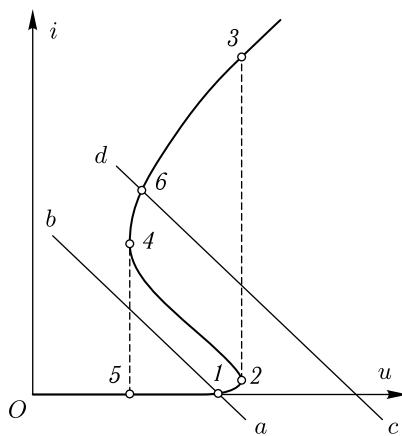


Рис. 6.11

Действительно, после включения схемы, если эдс $e = 0$, конденсатор заряжается, пока режим не станет соответствовать устойчивой точке 1. При воздействии положительного импульса эдс e напряжение на лампе увеличится на величину этой эдс и, если оно станет больше потенциала зажигания (точка 2), лампа загорится и рабочая точка перейдет в положение 3. Лампа продолжает гореть и когда импульс исчезнет. При горении лампы $i_r < i$ и конденсатор разряжается, пока

напряжение на лампе не упадет до потенциала погасания (точка 4). Затем лампа погаснет (точка 5), и конденсатор заряжается до рабочей точки 1 (если эдс e к этому моменту перестанет действовать). На этом процесс остановится до появления нового положительного импульса эдс e .

Таким образом, рассмотренный генератор генерирует один период после каждого воздействия положительного импульса эдс e .

Если E и r выбраны так, что нагрузочная прямая $i_r = \frac{E - u}{r}$ занимает положение cd (рис. 6.11), то схема также является *ждуцим* релаксационным генератором, который «ждет» в точке 6. Такой релаксационный генератор запускается отрицательным импульсом эдс e .

Все рассмотренные в этом параграфе генераторы могут быть построены также с использованием *тиратронов*, поскольку тиратроны обладают аналогичными вольтамперными характеристиками.

Релаксационные генераторы с газоразрядными лампами и тиратронами можно синхронизировать внешним напряжением, которое должно изменять моменты возникновения скачков (т.е. моменты зажигания и погасания лампы). Процессы, происходящие при этом, аналогичны рассмотренным в § 5.8.

§ 6.4. Электронные реле и релаксационные генераторы, использующие динатронный эффект

Если двухсеточную лампу включить в схему, изображенную на рис. 6.12, то, как известно, из-за динатронного эффекта *статическая* зависимость анодного тока от напряжения u на аноде такова, как изображено на рис. 6.13. Этот ток (обозначим его через i_y) равен электронному току, текущему через лампу.

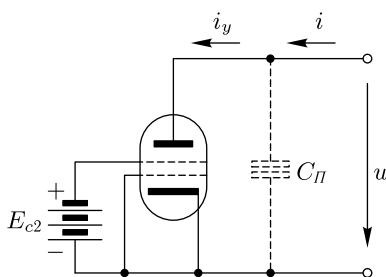


Рис. 6.12

В общем случае анодный ток равен:

$$i = i_y + C_{\Pi} \frac{du}{dt}, \quad (6.7)$$

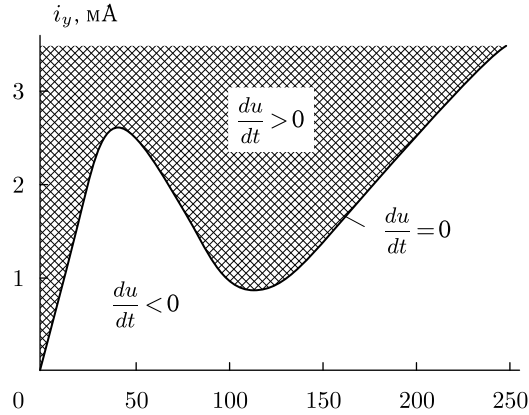


Рис. 6.13

где C_{Π} — паразитная емкость анод–катод (инерцией электронов обычно можно пренебречь).

Из выражения (6.7) следует, что если $i > i_y$, то $\frac{du}{dt} > 0$.

При этом ток i , подводимый к лампе, частично проходит через нее в виде электронного тока i_y , а частично идет на заряд паразитной емкости C_{Π} , увеличивая напряжение u .

Если $i < i_y$, то $\frac{du}{dt} < 0$. В этом случае подводимого тока i не хватает для компенсации электронного тока i_y , емкость C_{Π} разряжается и напряжение u уменьшается.

Таким образом, точка (u, i) на рис. 6.13 может лежать как над кривой i_y , так и под кривой. В области над кривой $\frac{du}{dt} > 0$, под кривой $\frac{du}{dt} < 0$ и на кривой $\frac{du}{dt} = 0$.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 6.14. Для нее зависимость тока i от напряжения u определяется уравнением нагрузочной прямой:

$$i = \frac{E - u}{r}. \quad (6.8)$$

Пусть эта прямая проходит через точки 1, 2, 3 (рис. 6.15), которые соответствуют установившимся режимам в схеме. В точках 1 и 3 режимы *устойчивы*, в точке 2 режим *неустойчив*. Это легко показать, если учесть, что на участках нагрузочной прямой правее точки 1 и между точками 2 и 3, т.е. на участках, лежащих в области, где $\frac{du}{dt} < 0$, рабочая точка должна двигаться влево, а на участках левее точки 3 и между точками 1 и 2 — двигаться вправо.

Вводя последовательно с источником анодного питания импульсную эдс e , можно перебрасывать рабочую точку из положения 1

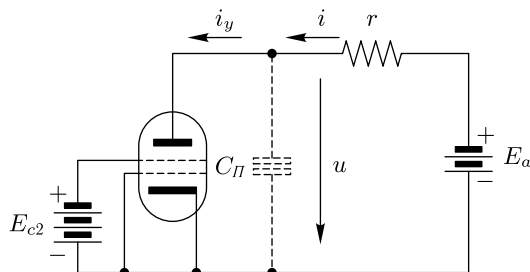


Рис. 6.14

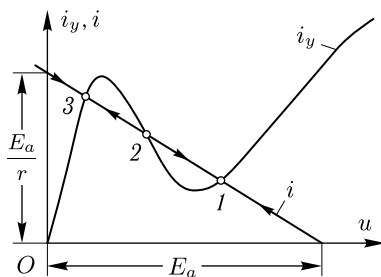


Рис. 6.15

в положение 3 и наоборот. Таким образом, рассмотренная схема может использоваться как электронное реле.

Как релаксационный автогенератор работает схема, изображенная на рис. 6.16. В ней последовательно с лампой включен дроссель с индуктивностью L и активным сопротивлением r (на схеме индуктивность и сопротивление условно изображены раздельно).

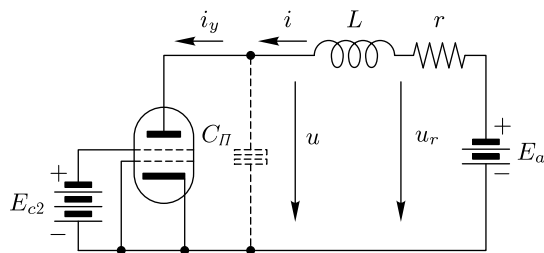


Рис. 6.16

Для этой схемы имеем следующие соотношения:

$$i = \frac{E - u_r}{r}, \tag{6.9}$$

$$L \frac{di}{dt} = u_r - u. \tag{6.10}$$

Обозначения в этих формулах применены те же, что и на рис. 6.16. Кроме того, при медленных изменениях u

$$i = i_y.$$

Зависимости i от u_r и i_y от u приведены в графической форме на рис. 6.17.

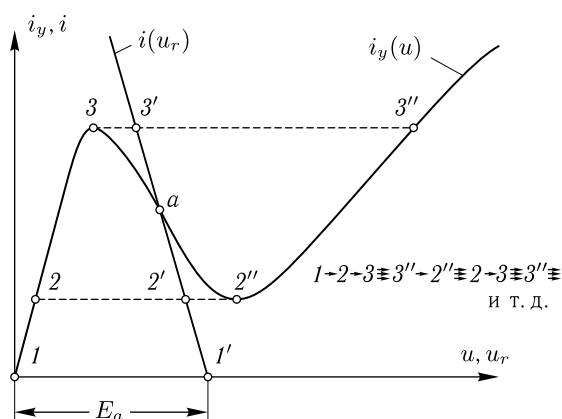


Рис. 6.17

В начальный момент времени, после включения схемы, ток $i = 0$, и при наличии достаточно большой индуктивности L быстро измениться не может [это следует из ур-ния (6.10)]; точка (u, i) занимает положение 1 , а точка (u_r, i) — положение $1'$. При этом, как видно из рис. 6.17, $u = 0$ и $u_r = E_a$. Разность $u_r - u > 0$, и поэтому ток нарастает. Если индуктивность L достаточно велика, то изменения u и i будут настолько медленными, что окажется возможным считать $i = i_y$. Спустя некоторое время ток i несколько возрастет, точка (u, i) займет положение 2 , а точка (u_r, i) — положение $2'$. Разность $u_r - u$ по-прежнему остается положительной и ток продолжает расти. Так будет продолжаться до тех пор, пока точки (u, i) и (u_r, i) не займут, соответственно, положения 3 и $3'$. Положение 3 — неустойчивое. Действительно, при смещении из него вправо точка (u, i) попадает в область, где $\frac{du}{dt} > 0$, и напряжение u начинает быстро расти. Ток i при этом не успевает изменяться, и рабочая точка (u, i) скачком перемещается по прямой $3-3'-3''$ в положение $3''$, которое устойчиво. Напряжение u во время скачка быстро возрастает, ток i остается постоянным, а электронный ток лампы i_y меняется по кривой $3-2''-3''$. Разность токов $i - i_y$ идет на заряд паразитной емкости.

Такого скачка не могло быть, пока точка (u, i) не дошла до положения \mathcal{Z} , так как при ее смещении вправо от кривой $i_y = f(u)$ она попадала бы в область, где $\frac{du}{dt} < 0$, и возвращалась обратно.

После скачка напряжение u соответствует абсциссе точки \mathcal{Z}'' , а напряжение u_r — абсциссе точки \mathcal{Z}' , разность $u_r - u$ делается отрицательной и ток i начинает уменьшаться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока точка (u, i) не займет положение \mathcal{Z}'' , а точка (u_r, i) — положение \mathcal{Z}' . Положение \mathcal{Z}'' неустойчивое, так как при смещении из него влево точка (u, i) попадает в область, где $\frac{du}{dt} < 0$, напряжение u скачком уменьшается и, поскольку ток i быстро измениться не может, точка (u, i) скачком перемещается по прямой $\mathcal{Z}'' - \mathcal{Z}' - \mathcal{Z}$ в устойчивое положение \mathcal{Z} , а точка (u_r, i) остается в положении \mathcal{Z}' . Разность $u_r - u$ делается положительной, и ток начинает нарастать, пока точка (u, i) не дойдет до положения \mathcal{Z} , а точка (u_r, i) — до положения \mathcal{Z}' . Затем происходит скачок точки из положения \mathcal{Z} в положение \mathcal{Z}'' , ток i начинает уменьшаться, и процесс периодически повторяется.

Для уменьшения периода колебаний необходимо уменьшить индуктивность L , так как это в соответствии с ф-лой (6.10) увеличит скорость нарастания и спадания тока. Однако при очень малых значениях индуктивности L изложенная теория станет несправедливой, поскольку изменения u будут настолько быстрыми, что окажется невозможным считать $i = i_y$ [ур-ние (6.7)] и полагать, что во время скачка $i = \text{const}$. По этим причинам при малой индуктивности L временные диаграммы напряжений и токов будут округляться, а при дальнейшем уменьшении L колебания прекратятся совсем.

Воздействуя внешним переменным напряжением на релаксационный генератор, использующий динатронный эффект, можно синхронизировать его так же, как и другие виды релаксационных генераторов.

Выбирая соответствующим образом значения E и r , можно сделать рассмотренный релаксационный генератор ждущим.

Электронные реле и релаксационные генераторы, использующие динатронный эффект, не нашли широкого применения, так как динатронная характеристика ламп обычно очень нестабильна, что приводит к нестабильной работе таких генераторов.

§ 6.5. Схемы с усилителями, аналогичными нелинейным сопротивлениям со спадающим участком

Рассмотрим схему рис. 6.18, где внешнее напряжение u включается в разрыв цепи обратной связи усилителя постоянного напряжения.

В этой схеме зависимость u_1 от u (рис. 6.19а) такая же, как зависимость u_1 от $(-e)$, полученная в § 4.2 (рис. 4.5), так как схема рис. 6.18 отличается от схемы рис. 4.1 лишь тем, что в ней вместо $(-e)$ имеется u .

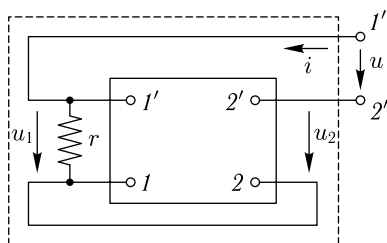


Рис. 6.18

Учитывая зависимость i_1 от u_1 , приведенную на рис. 5.2б, получим на основании рис. 6.19а зависимость $i = i_1$ от u , приведенную на рис. 6.19б.

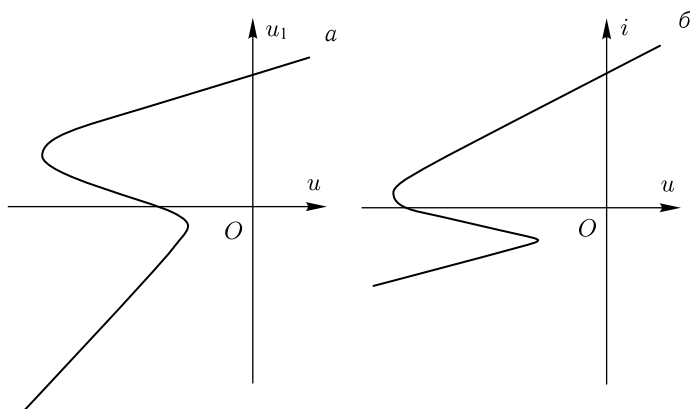


Рис. 6.19

Таким образом, двухполюсник, изображенный на рис. 6.18, имеет характеристику типа S со спадающим участком.

Если к этому двухполюснику присоединен конденсатор, то полученная схема генерирует релаксационные колебания. Процесс генерации аналогичен процессу, происходящему в генераторе с газоразрядной лампой (рис. 6.6), причем в данном случае можно положить $r = \infty$ и $i_r = 0$. С другой стороны, полученная схема ничем не отличается от схемы релаксационного генератора с усилителем напряжения (рис. 5.1).

Этот пример показывает, что одна и та же схема иногда может рассматриваться и как генератор с усилителем и как генератор с отрицательным сопротивлением.