

**Литература:** 1. Пашицкий Э. А., Черноусенко В.М. О плазменном механизме сверхпроводимости в вырожденных полупроводниках и металлах // ЖЭТФ. 1971. Т.60. Вып.4. С. 1483-1491. 2. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости / Под ред. В.Л. Гинзбурга и Д.А. Киржница. М.: Наука, 1977. 404 с. 3. Моисеев С.С., Карась В.И. О преобразовании ядерной энергии в электрическую на основе неравновесных распределений // УФЖ. 1979. Т.24, С. 1724-1728. 4. Батракин Е.Н., Залюбовский И.И. С.С. Моисеев и др. Экспериментальные исследования энергетического спектра вторичных электронов, возникающих при прохождении  $\alpha$ -частиц через тонкие плёнки // Поверхность, 1986. №12. С. 82-86. 5. Кац А.В., Моисеев С.С., Кантарович В.М. Точные кинетические уравнения для частиц // ЖЭТФ. 1976. Т.71. Вып. 1. С.177-192. 6. Кац А.В. Моисеев С.С., Кантарович В.М. Неравновесные стационарные распределения частиц в твердотельной плазме // ЖЭТФ. 1976. Т.71. Вып.4. С.1421-1423. 7. Романов Ю.А., Ерухимов М.Ш. Акустические плазменные волны в тонких плёнках // ЖЭТФ. 1968. Т.55. Вып.4. С. 1561-1564. 8. Моисеев В.Е. Новиков В.П. Семиноженко В.В. О возможности индуцирования плазменных колебаний в неравновесных полупроводниках // ФТП. Т.14 Вып.2. С.402-403.

Поступила в редколлегия 13.03.2001

Рецензент: д-р техн. наук Седышев Ю.Н.

**Моисеев Семён Самойлович**, д-р физ.-мат. наук, начальник лаб. Института космических исследований, Москва. Научные интересы: теория турбулентности, физика плазмы. Хобби: туризм. Адрес: Россия, 117810, Москва, ул. Кировоградская, 20, корп.1, кв. 14.

**Новиков Валентин Евгеньевич**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр. лаборатории электродинамических исследований, ЭНРАН, Киев. Научные интересы: теория электромагнетизма, кинетическая теория, нелинейные явления. Хобби: туризм. Адрес: Украина, 61108, Харьков, просп.Курчатова, 10, кв.34, тел. 35-32-01.

**Фык Александр Ильич**, канд. техн. наук, преподаватель ХВУ. Научные интересы: электродинамика, защита аппаратуры от проникновения электромагнитных воздействий. Хобби: шахматы. Адрес: Украина, 61144, Харьков, ул. Ком. Уборевича, 8-б, кв. 121, тел. 65-56-46

УДК 537.862

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БИСТАБИЛЬНОГО ТЕРМОИОННОГО РАЗРЯДНИКА

ОГИЕНКО А.А., КИРИЧЕНКО Л.О., МЕЛЬНИК И.Л.

Рассматривается проблема моделирования и качественного исследования автоколебательной системы. На основе анализа физических процессов, протекающих в термоионном разряднике, получено аналитическое выражение для изменения потенциала в разряднике, а также система дискретных разностных уравнений, описывающих поведение цепи. Определены параметры, обеспечивающие генерацию в заданном режиме, получены основные динамические зависимости.

### 1. Введение. Релаксационные генераторы с нелинейными сопротивлениями, имеющими спадающий участок на вольтамперной характеристике

Газоразрядные лампы, тиратроны, а также двухсеточные лампы в динадронном режиме имеют внутренние нелинейные сопротивления со спадающим участком вольтамперной характеристики, на котором  $\frac{di}{du} < 0$ . Их вольтамперные характеристики изображены на рис. 1 и 2.

Вольтамперные характеристики со спадающим участком имеют некоторые сложные двухполюсники, содержащие в себе усилители постоянного напряжения. Эти двухполюсники могут рассматриваться как нелинейные сопротивления.

Дифференциальное сопротивление  $r = \frac{du}{di}$  такой цепи на участке а-б отрицательное. Оно позволяет получить от схемы ряд новых свойств.

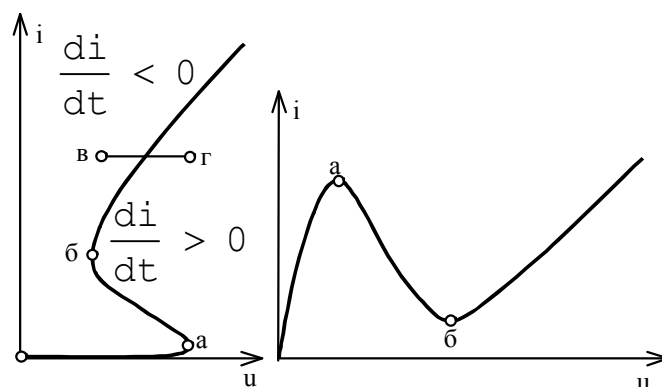


Рис. 1

Рис. 2

При подаче напряжения  $\Delta u$  на положительное сопротивление  $r$  происходит рассеивание энергии источника питания, причем отбираемая мощность

равна  $\frac{(\Delta u)^2}{r}$ . При отрицательном сопротивлении

она отрицательна, т.е. сопротивление  $r$  отдает энергию источнику питания. Эта энергия берется от ЭДС, смещающих рабочую точку на спадающий участок характеристики, или иногда от ЭДС, содержащихся в двухполюснике, который представляет 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  $\mathcal{S}$  имеют до трех значений тока, соответствующих одному значению напряжения (рис.1). К ним относятся, например, характеристики газоразрядных ламп и тиратронов. Характеристики типа  $\mathcal{N}$  имеют до трех значений напряжения, соответствующих одному и тому же току (рис.2). К

ним относятся, например, динаatronные характеристики двухсеточных ламп.

В соответствии с этим реле и релаксационные генераторы бывают двух типов: с характеристиками типа  $N$  и  $S$ .

### 1.1. Газоразрядная лампа. Анализ на устойчивость

Газоразрядная лампа состоит из баллона, наполненного обычно инертным разреженным газом, в котором находится два электрода.

Вольтамперная характеристика газоразрядной лампы в установившемся режиме приведена на рис. 1. В неустановившемся режиме из-за инертности ионов напряжение на газоразрядной лампе при заданном токе, протекающем через нее, может быть больше или меньше величины, определяемой характеристикой.

Опыт показывает, что если при заданном токе, который протекает через лампу, напряжение на ней соответствует точке, лежащей справа от характеристики (например, точке  $\Gamma$ ), то ионизация и ток нарастают; если слева (например, в точке  $\nu$ ), то уменьшаются. Это объясняется тем, что увеличение напряжения повышает скорость движения ионов и их количество, а уменьшение – понижает.

Если рабочая точка лежит слева от кривой, то напряжения 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 оно равно значению, необходимому для поддержания постоянного тока, и  $\frac{di}{dt} = 0$ .

Пусть газоразрядная лампа включена в схему, изображенную на рис. 3. Точки равновесия для такой системы можно определить как пересечение характеристики  $i = f(u)$  и нагрузочной кривой 1-3 (рис. 4).

$$3 \quad i = \frac{E - u}{R} \quad (\text{рис. 4}).$$

Режим, соответствующий точке 2, неустойчив. Действительно, пусть напряжение  $u$  несколько увеличится. Тогда мы попадем в область  $\frac{di}{dt} < 0$ , где напряжения недостаточно для поддержания данной ионизации, следовательно, ток будет уменьшаться, пока мы не перейдем в точку 3. Если напряжение уменьшится, то мы перейдем в точку 1. Рассуждая аналогично, можно прийти к выводу, что режимы, соответствующие точкам 1 и 3, устойчивы. Итак, падение напряжения и ток, протекающий через лампу, имеют по два возможных значения, соответствующих режиму горения лампы и ее исходному режиму, которые будут определяться начальными условиями. В том случае, когда мы сдвинем нагрузочную прямую параллельно линии 1-3, мы перейдем в режим с одним возможным устойчивым состоянием.

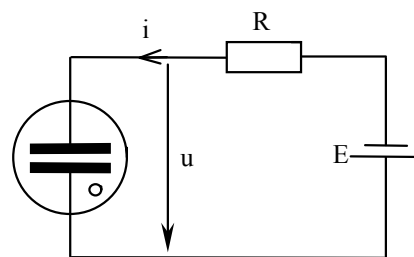


Рис. 3

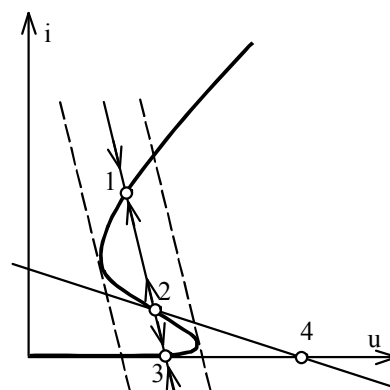


Рис. 4

Если взять достаточно большое напряжение питания  $E$  и достаточно большое сопротивление  $R$ , так чтобы нагрузочная характеристика проходила через точки 1-4, то точка 2 становится устойчивой.

### 1.2. Релаксационный генератор

Схема релаксационного генератора приведена на рис. 5.

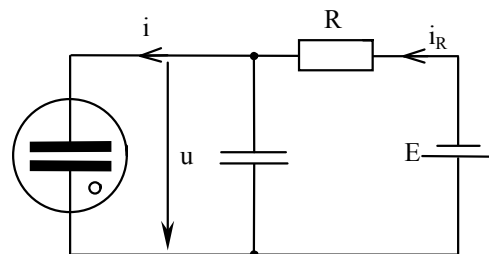


Рис. 5

Пусть  $i$  – ток, текущий через газоразрядную лампу,  $u$  – напряжение, падающее на лампе и конденсаторе. Тогда ток, текущий через сопротивление  $R$ :

$$i_R = \frac{E - u}{R}, \quad (1)$$

ток, текущий через конденсатор:

$$i_R - i = C \frac{du}{dt}. \quad (2)$$

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.

Выберем сопротивление  $R$  и напряжение  $E$  так, чтобы нагрузочная прямая 1 и характеристика лампы  $i = f(u)$  пересекались на спадающем участке (линия 1-4 на рис. 6).

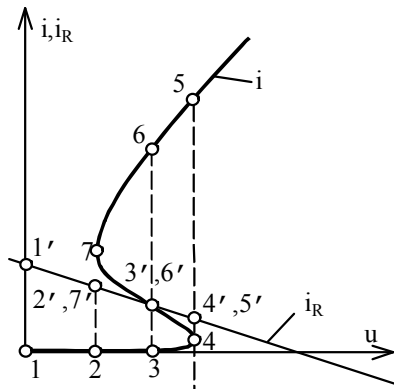


Рис.6

В момент подачи напряжения в цепи нагрузки начинает течь ток  $i_R$ , который заряжает емкость  $C$ . Пока напряжение  $u$  на конденсаторе мало, лампа не горит. 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 (2), конденсатор заряжается ( $\frac{du}{dt} > 0$ ).

Так продолжается, 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 начинает быстро (скачком) расти (лампа загорается). В результате рабочая точка попадает в устойчивое положение 5. Если емкость достаточно велика, то за время скачка напряжение на емкости не изменяется. В положении 5 ток через лампу меньше  $i_R$ , поэтому конденсатор начинает разряжаться ( $\frac{du}{dt} < 0$ ). Таким образом, рабочая точка  $(u, i)$  перемещается через точки 6, 7. Точка 7 вновь оказывается неустойчивой, ток  $i$  делает быстрый скачок вниз (точка 2) и лампа гаснет. С этого момента  $i_r > i$  и конденсатор начинает заряжаться вновь. На рис. 7 приведены выходные вольтамперные характеристики релаксационного генератора (схема автоколебательного режима).

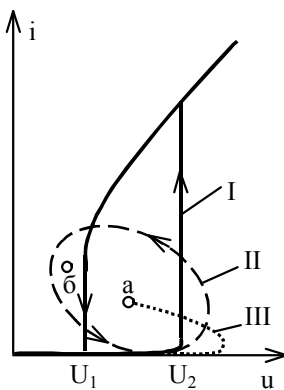


Рис.7

Период таких автоколебаний зависит от  $U_1$  и  $U_2$ , а эти величины обычно меняются во времени из-за изменения давления газа и состояния поверхности электродов лампы. Кроме того, в формулу входит напряжение источника питания  $E$ , которое трудно сделать стабильным. По этим причинам период колебаний релаксационного генератора сильно меняется в процессе работы. Частота таких генераторов, как правило, не достигает и 10 кГц, так как сильно уменьшать сопротивление  $R$  нельзя, иначе пересечение нагрузочной прямой с характеристикой произойдет за пределами спадающего участка. Сильно уменьшить емкость  $C$  также нельзя: при этом конденсатор может заряжаться и разряжаться настолько быстро, что инерционность ионных процессов в лампе окажется велика, и за время нарастания и спада тока напряжение на конденсаторе успеет измениться. При малой емкости рабочая точка  $(u, i)$  (рис. 7) будет совершать цикл II, при этом углы на временных диаграммах будут закругленными.

С дальнейшим уменьшением емкости рабочая точка после включения будет перемещаться по траектории III, для которой точка а (точка пересечения нагрузочной прямой и характеристики) будет устойчива. Действительно, при нарастании тока  $i$  напряжение на конденсаторе падает настолько быстро, что рабочая точка переходит из положения а в положение б, лежащее в области, где  $\frac{di}{dt} < 0$ , поэтому ток начинает падать и рабочая точка вернется в положение а.

Рассмотрим работу ждущего релаксационного генератора (рис. 8). Его характеристики представлены на рис. 9 (нагрузочная линия а-б). После включения схемы конденсатор заряжается, пока система не перейдет в устойчивую точку 1, где и будет оставаться, пока  $e = 0$ . При подаче положительного импульса больше критического значения лампа загорится и погаснет, пройдя последовательно 2, 3, 6, 4, 5, 1 положения. И если к этому моменту снова  $e = 0$ , процесс остановится до появления нового положительного импульса. Таким образом, схема генерирует один период после каждого воздействия положительного импульса.

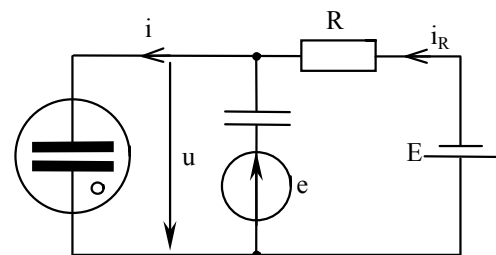


Рис.8

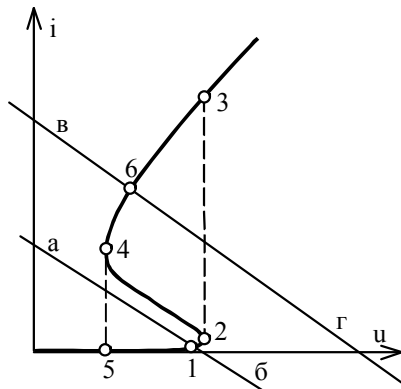


Рис.9

Если нагрузочная линия в-г, то такая схема ждет в точке б и запускается отрицательным импульсом.

Релаксационные генераторы можно синхронизировать внешним напряжением, которое должно менять моменты возникновения скачков.

## 2. Описание бистабильного термоионного разрядника

Разрядники с катодом - нитью накала и внутренним давлением приблизительно  $10^{-1}$  Па (рис.10) широко применяются в магнитных устройствах, в приспособлениях для удвоения плазменных, или ионных сигналов. Свойственный им гистерезис характеристики  $I(U)$  вызвал большой интерес с точки зрения теории катастроф и нелинейной динамики [1].

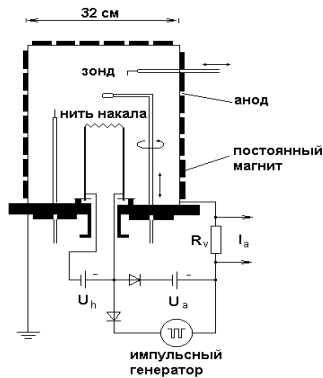


Рис. 10

При определенных условиях термоионные разрядники совершают низкочастотные колебания, которые могут перейти в хаотические при изменении параметров разряда и при использовании внешней модуляции. В работе [1] идентифицировалось детальное взаимодействие плазменных процессов, которые ведут к переходу при удвоении периода к хаосу. Предметом данной работы является составление динамической модели системы, представленной на рис. 10, и аналитическое исследование ее в автоколебательном режиме.

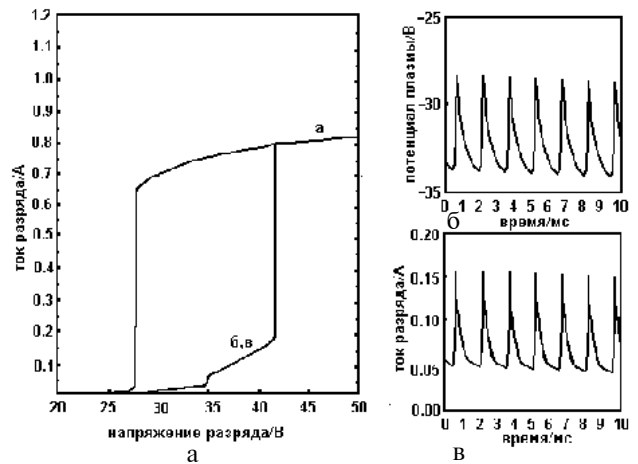


Рис. 11

Разряд происходит в аргоне при  $P=0,03-0,3$  Па, но анодное напряжение можно модулировать, дополнительно применяя периодические импульсы с частотой несколько кГц. В работе [1] измерялась пространственно-временная эволюция параметров плазмы и плазменного потенциала. Общие характеристики поведения этого разрядника представлены на рис.11. Зависимость  $I(U)$  (рис. 11,а) показывает хорошо известную петлю гистерезиса. Верхняя ветвь представляет в классической терминологии для термоионных разрядов “режим предельной температуры” (TLM); нижняя ветвь - “режим анодного свечения” (AGM). Автоколебания тока разряда с большой амплитудой (рис. 11,в) наблюдаются в AGM близко к правой точке гистерезиса. Их типичная частота находится между 1-2 кГц и зависит от деталей параметров разряда. Потенциал плазмы возрастает во время выброса тока (рис. 11,б,в). Потенциал и выбросы тока имеют быстрый нарастающий край и более медленный спад.

## 3. Моделирование автоколебательной системы

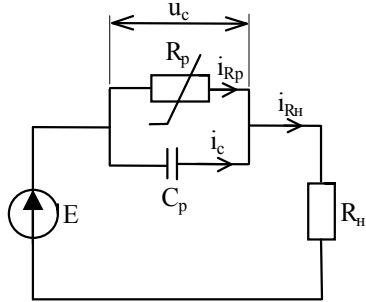
Автоколебательную систему, изображенную на рис. 10, с заданными характеристиками  $I(U)$  можно представить в виде эквивалентной схемы замещения (рис. 12): а - электрическая схема замещения цепи разрядника с нелинейным внутренним сопротивлением; б - электрическая схема замещения разрядника в исходном режиме (цепь заряда); в - электрическая схема замещения в режиме пробоя (цепь разряда). Комплексное электрическое сопротивление разрядника представлено в виде параллельного соединения внутреннего активного сопротивления  $R_p$  и межэлектродной емкости  $C_p$ . Напряжение питания катод-анод подается с источника постоянного напряжения  $E$  через сопротивление нагрузки  $R_n$ , ограничивающее режим по току.

Согласно первому и второму закону Кирхгофа для цепи, представленной на рис.3, можно записать следующие соотношения:

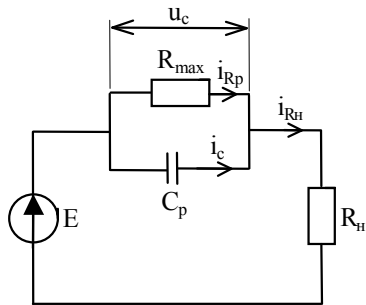
$$i_{R_n} = i_C + i_{R_p}, \quad (3)$$

$$E = u_C + R_n i_{R_n}, \quad (4)$$

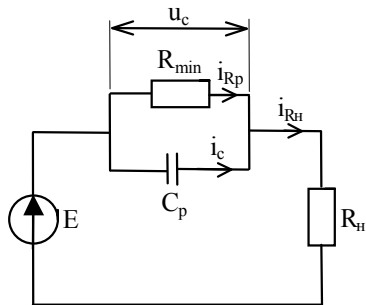
где  $i_{R_n}$  – ток, протекающий в цепи нагрузки;  $i_C = C \frac{du_C}{dt}$  – ток емкостной цепи;  $i_{R_p} = f(u_C)$  ток, протекающий через сопротивление  $R_p$ ;  $u_C$  – падение напряжения на емкости.



а



б



в

Рис. 12.

Нелинейную зависимость для тока  $i_{R_p}$  представим в виде отношения напряжения, падающего на емкости, к внутреннему нелинейному сопротивлению разрядника:

$$i_{R_p} = \frac{u_C}{R_p(u_C)}. \quad (5)$$

Зависимость внутреннего сопротивления разрядника от  $u_C$  представлена на рис.13. Сопротивление  $R_{max}$  соответствует случаю, когда межэлектродная среда является диэлектриком. Сопротивление  $R_{min}$  соответствует внутреннему сопротивлению разрядника в момент пробоя, когда внутренняя среда ионизирована. Напряжение  $U_2$  соответствует потенциалу лавинообразного пробоя и ионизации

плазмы, что сопровождается резким падением внутреннего сопротивления, а напряжение  $U_1$  соответствует моменту конца горения разряда. Таким образом, разрядник выступает в роли ключа.

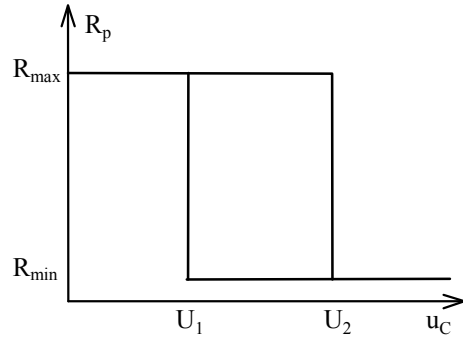


Рис. 13

В общем случае величина напряжения питания является функцией времени  $E(t)$ . Временная зависимость  $E(t)$  приведена на рис. 14.

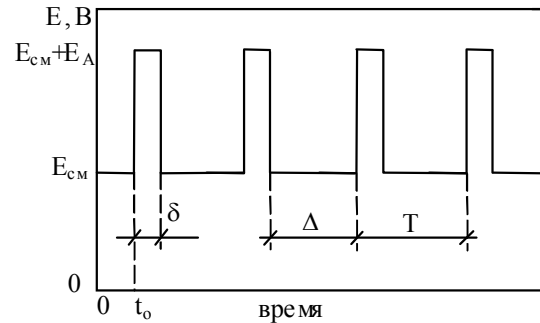


Рис. 14

Подставляя выражение (1) в выражение (2), получаем систему уравнений, описывающую динамику автоколебательной системы:

$$\begin{cases} R_n C \frac{du_C}{dt} + \left(1 + \frac{R_n}{R_p(u_C)}\right) u_C = E(t); \\ R_p(u_C) = \begin{cases} R_{max}, & \text{при } u_C < U_1; \\ R_{min}, & \text{при } u_C > U_2; \\ R_{max}, & \text{при } U_1 < u_C < U_2 \text{ и } R_p = R_{max}; \\ R_{min}, & \text{при } U_1 < u_C < U_2 \text{ и } R_p = R_{min}; \end{cases} \\ E(t) = \begin{cases} E_{cm} + E_A, & \text{при } t_0 < t < t_0 + \delta; \\ E_{cm}, & \text{при } t_0 + \delta < t < T. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $E(t) = E(t + T)$  на интервале  $-\infty < t < \infty$ .

Решение дифференциального уравнения (6) будем искать в виде:

$$u_C = u_{C_{св}} + u_{C_{пр}}, \quad (7)$$

где  $u_{C_{св}}$  – напряжение свободных колебаний системы;  $u_{C_{пр}}$  – напряжение принудительных колебаний системы при условии, что  $E = \text{const}$ .

Напряжение  $u_{C_{св}}$  находят при условии, что  $E = 0$ . Тогда характеристическое уравнение принимает вид:

$$R_n C \cdot p + 1 + \frac{R_n}{R_p} = 0, \quad (8)$$

здесь  $p$  – корень характеристического уравнения:

$$p = -\frac{R_p + R_n}{R_p} \frac{1}{R_n C}. \quad (9)$$

Тогда  $u_{C_{св}}$  принимает вид:

$$u_{C_{св}} = A e^{pt}, \quad (10)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Напряжение  $u_{C_{пр}}$  определяется выражением

$$u_{C_{пр}} = E \frac{R_p}{R_p + R_n} \quad (11)$$

в установившемся режиме, когда реактивное сопротивление емкости равно бесконечности.

Таким образом,

$$u_C = A e^{pt} + E \frac{R_p}{R_p + R_n}. \quad (12)$$

Для нахождения коэффициента  $A$  воспользуемся вторым законом коммутации:

$$u_C(0-) = u_C(0+). \quad (13)$$

Рассмотрим три возможных варианта.

В первом случае падение напряжения на емкости в начальный момент времени  $t_0$  равно  $u_C(t_0) = 0$ .

Таким образом, при  $t_0 = 0$  находим, что

$$A = -E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}, \quad (14)$$

где  $R_p = R_{\max}$ .

Во втором случае в момент времени  $t_1$   $u_C(t_1) = U_2$ , а сопротивление  $R_p = R_{\min}$ , так что

$$A = U_2 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}. \quad (15)$$

В третьем случае, когда  $t = t_2$   $u_C(t_2) = U_1$ , сопротивление  $R_p$  вновь возрастает, так что

$$A = U_1 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}. \quad (16)$$

На рис. 15,б,в,г изображены эпюры падения напряжения на емкости для первого, второго и третьего случая соответственно. Результирующая реализация автоколебательного процесса приведена на рис. 15,д.

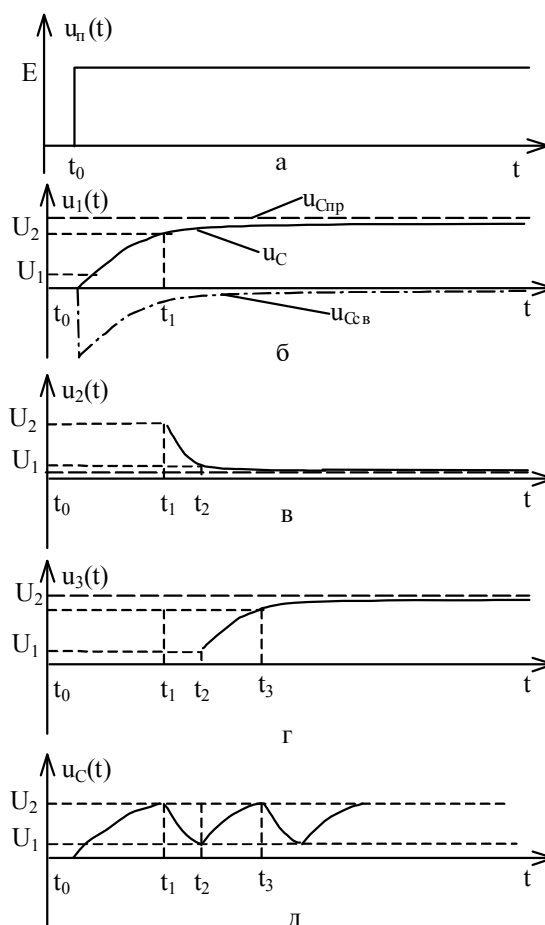


Рис. 15

Для возбуждения хаотических колебаний нелинейной динамической системы необходимо, чтобы последняя имела, как минимум, полторы степени свободы. Поэтому в приведенном аналитическом решении без дополнительных условий возбудить хаотический процесс невозможно. Однако при численном моделировании такой системы в виде разностных уравнений для выражения (6) возможно возникновение хаотического режима. В реальных автоколебательных системах на термоионных разрядниках удается возбудить хаотический режим [1].

Постоянная времени цепи определяется выражением

$$\tau = -\frac{1}{p} = \frac{R_n C}{R_p + R_n} R_p. \quad (17)$$

Емкость  $C_p$  заряжается, пока  $R_p = R_{\max}$ . Таким образом, постоянная времени заряда емкости

$$\tau_{зар} = \frac{R_n C}{R_{\max} + R_n} R_{\max}. \quad (18)$$

Если  $R_p = R_{\min}$ , то емкость разряжается с постоянной времени:

$$\tau_{раз} = \frac{R_n C}{R_{\min} + R_n} R_{\min}. \quad (19)$$

Также является очевидным тот факт, что ток заряда течет через сопротивление  $R_n$ , а ток разряда - через

сопротивление  $R_p = R_{\min}$ . При любом выборе параметров цепи выполняется неравенство  $\tau_{раз} < \tau_{зар}$ . Для построения разностного уравнения введем следующие замены переменных:  $x_i = u_c(t_0 + \Delta t \cdot i)$ ,  $z_i = E(t_0 + \Delta t \cdot i)$ ,  $y_i = R_p(x_i)$ .

Тогда (6) можно свести к системе дискретных разностных уравнений:

$$\begin{cases} x_{i+1} = \frac{z_{i+1} \cdot \Delta t}{R_n C} - \left[ \left( 1 + \frac{R_n}{y_{i+1}} \right) \frac{\Delta t}{R_n C} - 1 \right] x_i; \\ y_{i+1} = \begin{cases} R_{\max}, & \text{при } x_i < U_1; \\ R_{\min}, & \text{при } x_i > U_2; \\ R_{\max}, & \text{при } U_1 \leq x_i \leq U_2 \text{ и } y_i = R_{\max}; \\ R_{\min}, & \text{при } U_1 \leq x_i \leq U_2 \text{ и } y_i = R_{\min}; \end{cases} \\ z_{i+1} = \begin{cases} E_{см} + E_A, & \text{при } t_0 \leq \Delta t \cdot i \leq t_0 + \delta; \\ E_{см}, & \text{при } t_0 + \delta < \Delta t \cdot i < T. \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

#### 4. Расчет параметров динамической системы

Рассчитаем и определим параметры динамической системы, приведенной на рис. 12, для автоколебательного режима. Одним из условий возникновения автоколебаний в цепи разрядника является выполнение неравенства  $E > U_1$ . Для определенности выберем  $E = 45\text{ В}$ .

Внутреннее сопротивление термоионного разрядника в исходном состоянии

$$R_p = R_{\max} = U_1 / I_{\min} \approx 28 / 0.01 = 2.8 \text{ кОм},$$

где  $I_{\min}$  – ток, протекающий в цепи разрядника в случае, когда приложено межэлектродное напряжение  $U_1$ .

Внутреннее сопротивление термоионного разрядника в режиме горения плазменного разряда

$$R_p = R_{\min} = U_2 / I_{\max} \approx 43 / 0.8 = 54 \text{ Ом},$$

где  $I_{\max}$  – ток, протекающий в цепи разрядника в момент горения разряда.

При нахождении значений параметров  $C_p$  и  $R_n$  воспользуемся системой уравнений для  $t_{зар}$ ,  $t_{раз}$  времен нарастания и спада потенциала на электродах разрядника соответственно. Из рис. 16 видно, что  $t_{зар} = 0.125 \text{ мс}$ ,  $t_{раз} = 1.6 \text{ мс}$ .

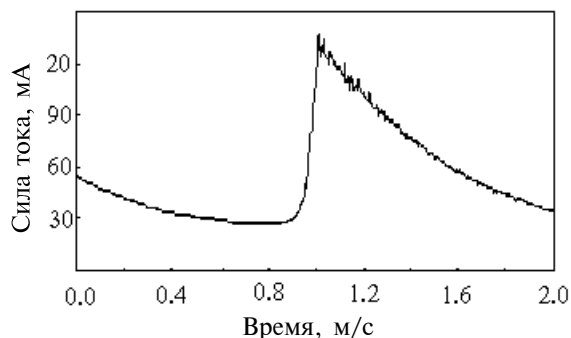


Рис. 16

Приравнявая выражение (12)  $u_c(t) = U_2$  и  $u_c(t) = U_1$  записываем следующую систему:

$$\begin{cases} t_{зар} = -\tau_{зар} \ln \left( \frac{U_2 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}}{U_1 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}} \right); \\ t_{раз} = -\tau_{раз} \ln \left( \frac{U_1 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}}{U_1 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}} \right). \end{cases} \quad (21)$$

Подставляя в первое уравнение системы (21) выражение (18), находим выражение для емкости разрядника:

$$C = - \frac{t_{зар} (R_{\max} + R_n)}{R_{\max} R_n \ln \left( \frac{U_2 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}}{U_1 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}} \right)}. \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) во второе уравнение системы (21), находим соотношение  $\frac{t_{раз}}{t_{зар}}$ , как функцию сопротивления нагрузки  $R_n$ :

$$\frac{t_{раз}}{t_{зар}} = \frac{R_{\min} (R_{\max} + R_n)}{R_{\max} (R_{\min} + R_n)} \frac{\ln \left( \frac{U_1 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}}{U_2 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}} \right)}{\ln \left( \frac{U_2 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}}{U_1 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}} \right)}. \quad (23)$$

Проведем функциональный анализ зависимости  $\frac{t_{раз}}{t_{зар}}(R_n)$ . Для этого введем следующие обозначения:

$$M_1 = \frac{R_{\min} (R_{\max} + R_n)}{R_{\max} (R_{\min} + R_n)}, \quad M_2 = \frac{U_1 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}}{U_2 - E \frac{R_{\min}}{R_{\min} + R_n}},$$

$$M_3 = \frac{U_2 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}}{U_1 - E \frac{R_{\max}}{R_{\max} + R_n}},$$

так что  $\frac{t_{раз}}{t_{зар}} = M_1 \frac{\ln(M_2)}{\ln(M_3)}$ .

На рис. 17 качественно представлены функциональные зависимости  $M_1, M_2, M_3$  от сопротивления  $R_n$ . Из диаграммы (рис. 17) видно, что автоколебания существуют на интервале  $R_{n2} < R_n < R_{n3}$ . Выражения для  $R_{n1}, R_{n2}, R_{n3}, R_{n4}$  определяются из условия равенства нулю числителей и знаменателей выражений для  $M_2$  и  $M_3$ :

$$R_{н1} = \frac{(E - U_2)}{U_2} R_{\min} = 2,5 \text{ Ом};$$

$$R_{н2} = \frac{(E - U_1)}{U_1} R_{\min} = 32,78571428571 \text{ Ом};$$

$$R_{н3} = \frac{(E - U_2)}{U_2} R_{\max} = 130 \text{ Ом};$$

$$R_{н4} = \frac{(E - U_1)}{U_1} R_{\max} = 1,7 \text{ кОм}.$$

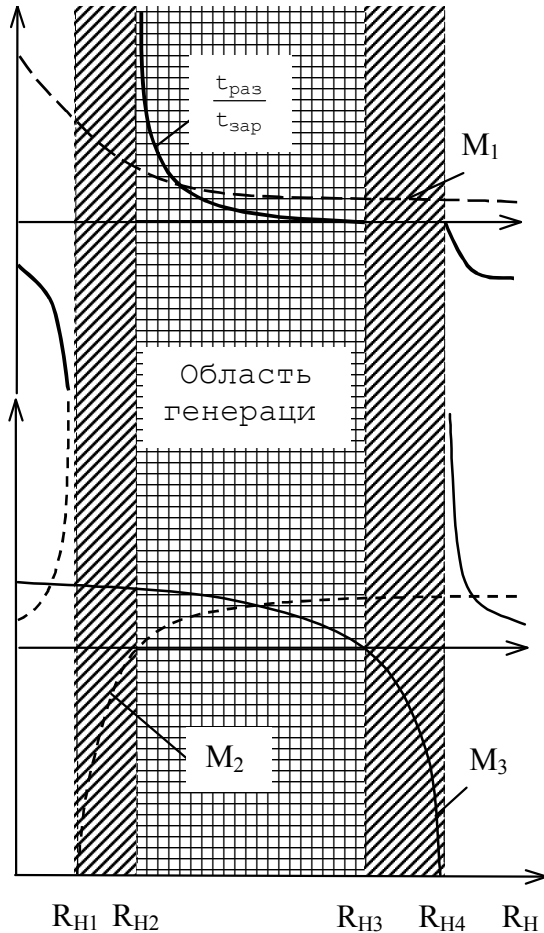


Рис. 17

По мере приближения значения  $R_n$  к величине  $R_{н2}$  справа отношение (23) стремится к бесконечности, поскольку время падения потенциала до величины  $U_1 - t_{\text{раз}}$  уходит на бесконечность, так как  $u_C$  асимптотически стремится к  $u_{C_{\text{нп}}} = U_1$ . С другой стороны, по мере приближения  $R_n$  к величине  $R_{н3}$  отношение (23) стремится к нулю, так как  $t_{\text{зар}} \rightarrow \infty$ . Согласно диаграмме (рис. 17) можно записать дополнительное условие существования автоколебаний:

$$R_{\min} \frac{E - U_1}{U_1} < R_n < \frac{E - U_2}{U_2} R_{\max}. \quad (24)$$

Задавшись соотношением  $\frac{t_{\text{раз}}}{t_{\text{зар}}} = 12,8$ , мы можем определить значение величины  $R_n = 32,78571429 \text{ Ом}$ . Подставляя рассчитанное значение  $R_n$  в выражение (22), находим номинал емкости  $C = 4 \text{ мкФ}$ .

Определенный интерес представляет зависимость частоты автоколебаний от  $R_n$  (рис. 18).

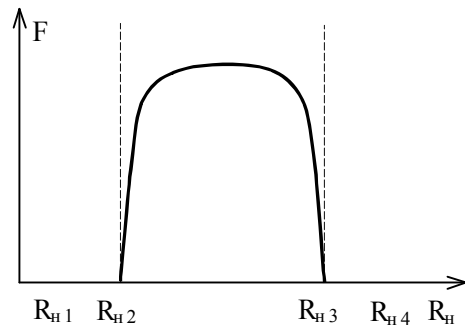


Рис. 18

При изменении напряжения питания изменяется условие (24) таким образом, что область существования автоколебаний расширяется и смещается в сторону увеличения  $R_n$  (рис. 19). Как видно из рис. 19, в окрестности точки  $U_2$  справа существует особая точка  $U' = \frac{(R_{\min} - R_{\max}) U_1 U_2}{R_{\min} U_2 - R_{\max} U_1}$ , в которой область генерации вырождается.

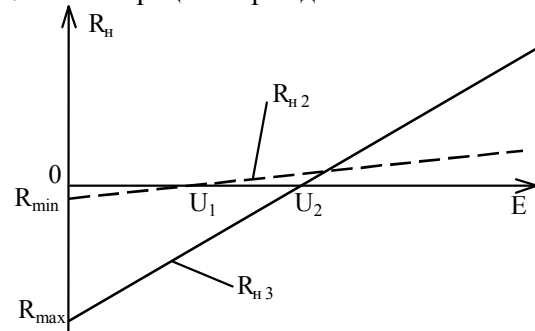


Рис. 19

На интервале  $U_1 < E < U'$  условие (24) не выполняется, поэтому критерий возникновения автоколебаний  $E > U_2$  должен быть модифицирован:

$$E > \frac{(R_{\min} - R_{\max}) U_1 U_2}{R_{\min} U_2 - R_{\max} U_1}, \text{ где } U' = 43,457 \text{ В}.$$

Все теоретически полученные результаты подтверждены с помощью численного моделирования вытравления (20).

Авторы благодарят начальника лаборатории Национального научного центра Харьковского физико-технического института д-ра физ.-мат. наук Вячеслава Александровича Буца за постоянное внимание и поддержку.

**Литература:** 1. F. Greiner, T. Klinger, H. Klostermann, A. Piel Experiments and particle-in-cell simulation on self-oscillations and period doubling in thermionic discharges at low pressure // Phys. Rev. Letters, 1993, Vol. 70, № 20 P. 3071-3074.

Поступила в редколлегия 16.07.2001

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Лагутин М.Ф.

**Огиенко Александр Александрович**, аспирант кафедры РЭП ХНУРЭ. Научные интересы: синергетика и хаотическая динамика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.40-91-13.

**Кириченко Людмила Олеговна**, канд. техн. наук, ассистент кафедры ПМ ХНУРЭ. Научные интересы: детерминированный хаос. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел.40-94-36, e-mail: ludmila@kture.kharkov.ua.

**Мельник Игорь Леонидович**, зав. сектором ЗАО НИИ лазерных технологий. Научные интересы: радиоэлектронные устройства. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина 14, тел.40-93-30.