

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер В.К.СЕРИКОВ

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
С ПОЗИСТОРАМИ

Специальность 05.276 – теоретические  
основы электротехники

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук

профессор И.Ф. ВОЛОШИН

чл.-корр. АН БССР, доктор  
технических наук, профессор

А.Г.ШАШКОВ

Работа выполнена в лабораториях теплоэлектрических изме-  
рений и теплофизики Ордена Трудового Красного Знамени Институ-  
та тепло- и массообмена АН БССР.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор И.Ф. Волошин,  
член-корреспондент АН БССР,  
доктор технических наук,  
профессор А.Г. Шашков.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Н.П. Удалов,  
кандидат технических наук  
В.Н. Станищевский.

Ведущее учреждение - Ленинградский агрофизический институт

Автореферат разослан "22" октября 1971 года.

Защита диссертации состоится "26" ноября 1971 года  
на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энерге-  
тическим специальностям Белорусского Ордена Трудового Красного  
Знамени политехнического института.

Отзыв на прилагаемый автореферат просим выслать по адресу:  
г. Минск, Ленинский проспект, 85, Белорусский политехнический  
институт.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета  
по энергетическим специальностям  
канд. техн. наук

Л.Л. Червинский

В настоящее время в технике измерения, управления и автоматики с успехом применяются терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Появление позисторов - терморезисторов с положительным ТКС значительно расширяет возможности этого класса элементов. Высокий ТКС и варисторный эффект у позисторов дают возможность не только улучшить конструкции многих устройств на термисторах, но и разработать ряд принципиально новых.

Особенно интересны устройства в которых используются динамические свойства позисторов. Сюда относятся различные схемы для получения выдержек времени, схемы задержки, генераторы автоколебаний, мультивибраторы и т.д. Однако, ввиду сложной зависимости сопротивления позистора от температуры и напряжения, построение таких схем до сих пор осуществлялось экспериментальным путем, что является довольно кропотливым и трудоемким делом. Разработанные методы расчета переходных процессов в цепях с термисторами в данном случае по указанным причинам оказываются непригодными.

Целью данной работы является исследование динамических характеристик электрических цепей с позисторами, а также разработка методов расчета переходных процессов возникающих при воздействии различных возмущающих факторов. В заключение дано описание принципа действия некоторых устройств основанных на использовании динамических свойств позисторов.

Работа содержит четыре главы.

## I

Первая глава посвящена анализу статических характеристик позистора, исследование которых является необходимым этапом при

изучении динамических свойств позисторов и электрических цепей с ними, ибо влияние варисторного эффекта, отсутствие удобной аппроксимации температурной характеристики, сложный характер зависимости коэффициента относительной чувствительности по мощности от напряжения  $D = K(U)$  значительно затрудняют решение поставленной задачи.

В отличие от термистора, позистор имеет довольно сложную температурную зависимость сопротивления, в связи с чем ее аналитического выражения, удобного для расчетов, до сих пор не имеется.

В данной работе на примере позистора типа СТ5-1 делается попытка выразить эту зависимость в широком диапазоне температур.

Известно, что для температур ниже  $65 \div 70^\circ\text{C}$  температурная характеристика позистора имеет отрицательный ТКС. По мнению некоторых авторов, этот участок можно описать уравнением

$$R_n = R_{n\infty} \exp \frac{1}{T} \quad (1)$$

где  $R_n$  - сопротивление позистора при температуре  $T$  ;  
 $R_{n\infty}$  - условное значение сопротивления позистора при  $T = \infty$  ;  
 $B$  - коэффициент, зависящий от материала, из которого изготовлен терморезистор и его конструктивного оформления.

Если использовать функцию

$$f(T, A) = \frac{1}{\exp\left(\frac{T_{пер} - T}{A}\right) + 1} ,$$

где  $T_{пер}$  - температура, соответствующая точке перегиба

температурной характеристики позистора, а  $A$  - коэффициент, характеризующий изгиб кривой  $f(T, A)$ , то выражение

$$R_n' = R_{n\infty} \left( \exp \frac{A}{T} \right) + \left[ R_{n\infty} \left( \exp \frac{A}{T} \right) \frac{1}{\exp \left( \frac{T_{\text{exp}} - T}{A} \right) + 1} \right] \quad (2)$$

качественно отражает характер изменения сопротивления.

Разделив второе слагаемое выражения (2) на  $\exp[-a(\sqrt{U}-1)]$  получим аналитическое выражение, аппроксимирующее температурную характеристику позистора во всем рабочем диапазоне

$$R_n = R_{n\infty} \exp \frac{A}{T} + \left\{ \frac{R_{n\infty} \left( \exp \frac{A}{T} \right) \frac{1}{\exp \left( \frac{T_{\text{exp}} - T}{A} \right) + 1}}{\exp [-a(\sqrt{U}-1)]} \right\}$$

Обозначив

$$\frac{1}{\exp \left( \frac{T_{\text{exp}} - T}{A} \right) + 1} = \mu(T),$$

получаем

$$R_n \approx R_{n\infty} \exp \frac{A}{T} \left\{ 1 + \mu(T) \cdot \exp [a(\sqrt{U}-1)] \right\}, \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент, подобранный опытным путем и численно оказавшийся равным  $\mu(T)$ .  $U_{\infty}$  - число, постоянное для всего диапазона температур.

В работе приводятся результаты сравнения экспериментальной и расчетной температурных характеристик во всем рабочем диапазоне температур для позистора СТ5-1.

Смысл этой операции будет ясен после рассмотрения вопроса о варисторном эффекте в позисторах.

Предложенная аппроксимация дает вполне удовлетворительные результаты.

Значительное место в главе уделяется исследованию влияния напряжения на сопротивление позистора. Предложено 3 метода определения коэффициента нелинейности  $b$ , характеризующего его варисторные свойства.

Один из них, дающий наибольшую точность, основан на использовании тока, протекающего через позистор в момент включения (для  $t = 0$ ) при подаче на него постоянного напряжения  $U$ .

Построенные зависимости  $b = f(U)|_T$  дали возможность установить, что эти кривые характерны для элементов известных под названием варисторов, уравнение вольт-амперных характеристик которых имеет вид

$$I = \sigma_0 \cdot e^{\delta \sqrt{U}} \cdot U, \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  - проводимость в слабых полях.

Из (4)  $b$  - коэффициент, характеризующий степень влияния напряжения на сопротивление позистора при температуре  $T$  определится как

$$b = \frac{\ln \frac{R_0}{R_n}}{\sqrt{U}} \quad (5)$$

Здесь  $R_0$  - сопротивление позистора, измеренное при минимальном напряжении, - берется по температурной характеристике;  $R_n$  - сопротивление, рассчитанное по данным осциллограмм для начального момента времени.

Построив для разных значений  $T$  зависимость

$$\ln \frac{R_0}{R_n} = f(\sqrt{U})$$

получена серия прямых линий, расходящихся из начала координат и имеющих излом при некотором значении напряжения. Угол наклона каждого луча представляет собой коэффициент  $b$ . Таким образом, выражение для сопротивления имеет вид

$$R_n = R_0 \cdot \exp - [b_1 + b_2 (\sqrt{U} - \sqrt{U_{изл}})] \quad (6)$$

Здесь  $b_1$  и  $b_2$  — коэффициенты нелинейности до и после напряжения, при котором наблюдается излом.

В таблице I представлены значения  $b_1$  и  $b_2$  в широком диапазоне температур для позистора СТ5-I с  $R_{20} = 30$  ом.

Таблица I.

°C	20	70	100	125	126	127	150	170	190
$b_1$	0,11	0,08	0,12	0,28	0,32	0,375	0,57	0,63	0,67
$b_2$	0,102	0,075	0,104	0,28	0,37	0,375	1,0	1,15	1,2

Если известна температурная характеристика снятая при напряжении излома, то для расчетов можно пользоваться формулой

$$R_n = R_{изл} \cdot \exp - b(\sqrt{U} - \sqrt{U_{изл}}) \quad (7)$$

Для позистора типа СТ5-I  $U_{изл} \approx 1$  в. Тогда

$$R_n = R_0 \cdot \exp - b(\sqrt{U} - 1) \quad (7')$$

Зависимость  $b = f(T)$  по внешнему виду полностью повторяет температурную характеристику построенную в полулогарифмическом масштабе  $\ln R_0 = f(T)$ . Это сходство дало возможность установить линейную зависимость между  $b$  и  $\ln R_0$ , что значительно облегчает нахождение коэффициента нелинейности по известной температурной характеристике или наоборот. Так, например, выражение

$$\delta = \frac{R_1 \left( \frac{R_n}{R_{n1}} \right) (b_{n1} - b_{n2})}{R_2 \left( \frac{R_n}{R_{n2}} \right)} + b_{n1} \quad (8)$$

дает возможность определять коэффициент  $\delta$  для любой температуры, если известны температурная характеристика позистора и значения  $b_{n1}$  и  $b_{n2}$  для двух произвольных точек.

Одной из наиболее важных характеристик позисторов является коэффициент относительной чувствительности по мощности  $D$ , представляющий собой взятое с отрицательным знаком отношение относительного приращения сопротивления позистора к вызвавшему его относительному изменению мощности рассеяния в стационарном режиме.

$$D = - \frac{R_n}{R_n} \frac{dR_n}{dP_n} \quad (9)$$

Через координаты точек вольт-амперной характеристики (9) определяется как

$$D = - \frac{\frac{dU}{dI} \frac{U}{I}}{\frac{dU}{dI} + \frac{U}{I}} \quad (10)$$

Это определение одинаково приемлемо для терморезисторов как с положительным так и с отрицательным ТКС.

Произведенный в работе расчет для позисторов СТ5-1 в широком диапазоне температур показал, что коэффициент  $D$  имеет отрицательный знак и резко нелинейный характер. В точках, где статическое сопротивление позистора  $R_{nc}$  равно динамическому  $R_{nd}$ ,  $D = 0$ . Для точек вольт-амперной характеристики где  $\frac{dI}{dU} = 0$  коэффициент  $D = -1$ .

Максимальное значение коэффициента  $D = D_{max}$  соответствует точке на вольт-амперной характеристике в которой  $R_{nc}$  и

$R_{n0}$ , имея разный знак, по абсолютному значению очень мало отличаются друг от друга, причем,  $|R_{n0}| > R_{nc}$ .

Анализ полученных зависимостей  $D = f(U)|_0$ , показал, что положение  $D_{max}$  не связано с точкой перегиба на падающем участке вольт-амперной характеристики.

## II

Во второй главе исследуются переходные процессы в цепях с позисторами при воздействии больших сигналов. Рассматриваются шесть случаев возникновения переходного процесса в цепи составленной из последовательно включенных позистора и активного линейного резистора ( $R_n - \zeta$ ):

- а) включение одного позистора на постоянное напряжение (т.е., когда  $\zeta = 0$ ),
- б) включение цепи  $R_n - \zeta$  на постоянное напряжение,
- в) изменение величины последовательно включенного резистора  $\zeta$ ,
- г) релейный режим,
- д) скачкообразное изменение температуры окружающей среды  $\theta$  для цепи составленной из одного позистора,
- е) то же, для цепи  $R_n - \zeta$ .

Рассмотрение этого вопроса основывается на анализе системы уравнений описывающих поведение цепи  $R_n - \zeta$  при прохождении по ней электрического тока.

$$\left. \begin{aligned} R_n &= P_{\alpha} + P_{\theta} \\ \text{где } P_{\alpha} &= R(T - \theta) \quad \text{и} \quad P_{\theta} = C_v \frac{dT}{dT} \\ R_n &= I^2 R_n = \frac{U_n^2}{R_n}; \quad I = \frac{U_n}{R_n + \zeta}; \\ R_n &= R_1(T) \cdot e^{-b(T)(\sqrt{T}-1)} \end{aligned} \right\} \quad (II)$$

где  $R_1(T)$  - сопротивление позистора СТ5-1 взятое по температурной характеристике, построенной или рассчитанной для  $U = 1$  вольт;  $P_n$  - мощность, потребляемая позистором;  $P_{\alpha\alpha}$  - мощность рассеяния;  $P_{\alpha}$  - мощность, идущая на изменение теплоемкости;  $A$  - коэффициент рассеяния.

Объединяя систему (II), получим нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{C_v}{A} \frac{dT}{dt} + T = \theta + \frac{1}{A} \frac{U_n^2}{z} \frac{R_n/z}{(1 + R_{n2})} \quad (12)$$

Разделив переменные, выражение (12) можно представить в интегралом

$$t = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_v dT}{\frac{U_n^2}{R_1(R_n+z)} R_n - A(T-\theta)} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_v dT}{R_n - P_{\alpha}} \quad (13)$$

Так как величины  $C_v$ ,  $R_n$  и  $P_{\alpha}$ , входящие в подынтегральное выражение, нелинейно зависят от температуры, то решение интеграла (12) возможно только численное или графическое. Для этого строится зависимость  $P_{\alpha}/C_v$  от мгновенного значения температуры  $T$ . Построение этой зависимости усложнено, во-первых, наличием варисторного эффекта и, во-вторых, отсутствием аналитического выражения для аппроксимации температурной характеристики.

Это ведет к тому, что кроме данных теплоемкости, статической и динамической вольт-амперных характеристик, необходимо иметь дополнительно температурную характеристику  $R_n = f(T)$  снятую при минимальном приложенном напряжении (в работе она названа основной) и несколько расчетных для различных значений напряжения в качестве параметра.

Количество расчетных температурных характеристик определяет точность построения кривой переходного процесса.

В работе приводится пример расчета переходного процесса при включении позистора на постоянное напряжение. Сравнение приведенных экспериментальной и расчетной кривых тока свидетельствует о достаточной точности предложенного метода построения переходного процесса. Максимальная погрешность наблюдается в начальной части кривой и не превышает  $10 \pm 12\%$ .

При расчете переходных процессов необходимо знать так называемые динамические параметры позисторов. К ним относятся теплоемкость  $C_v$ , тепловая постоянная  $\tau$ , коэффициент относительной чувствительности по мощности  $D$ , динамическая постоянная рассеяния. Первые две из них рассматриваются в данной главе.

Определение теплоемкости терморезисторов с отрицательным ТКС сводится к анализу переходного процесса в цепи составленной из терморезистора и линейного резистора. Подобная методика приемлема и для определения теплоемкости позисторов. Однако, для позисторов удобнее производить анализ переходного процесса когда сопротивление последовательно включенного резистора равно нулю. В этом случае проще учитывать влияние варисторного эффекта.

Теплоемкость позистора определяется из уравнения теплового баланса  $P = R(T - \theta) + C_v \frac{dT}{dt}$  на основании осциллограммы переходного процесса  $I = f(t)$  при включении позистора на постоянное напряжение при  $\theta = const$ . Член  $\frac{dT}{dt} \approx \frac{dI}{dt}$  определяется путем графического дифференцирования зависимости  $T = f(I)$ , перестроенной из  $I = f(t)$  и  $R_0 = f(T)$ .

Сопротивление позистора, обусловленное влиянием двух

факторов, определяется выражением

$$R_1(T, U) = R_1(T) \cdot \exp[-b(T)(\sqrt{U}-1)] \quad (14)$$

прологарифмировав которое, получим

$$\ln R_1(T, U) = \ln R_1(T) - b(T)(\sqrt{U}-1) \quad (15)$$

Задаваясь различными значениями температуры позистора, по имеющимся зависимостям  $R_1(T)$  и  $b(T)$  легко определить  $R_1(T, U)$  при постоянстве напряжения на позисторе. Таким путем строится семейство кривых  $I = f(T)$  при  $U = const$  в качестве параметра. Имея зависимости  $I = f(T)$  и  $T = f(t)$ , можно легко построить кривую изменения температуры во времени  $T = f(t)$

Обработка осциллограмм показала, что теплоемкость позистора  $C_v$  не является величиной постоянной - она сильно зависит от его температуры, особенно в области максимального ТКС. В работе приводятся зависимости  $C_v = f(T)$ , построенные для позисторов типа СТ5-1.

В максимуме ( $T \approx 127^\circ\text{C}$ ) теплоемкость достигает 1,88 вт.сек/град для позистора с  $R_{20} = 30$  ом и 1,3 вт.сек/град для позистора с  $R_{20} = 96$  ом при подаче на него напряжения порядка 20 вольт, т.е. увеличивается почти в 15 + 30 раз по сравнению с теплоемкостью в диапазоне 20 + 110°C. При дальнейшем увеличении температуры позистора величина теплоемкости резко падает.

Скачок теплоемкости у позисторов объясняется тем, что в данной области происходит максимальное преобразование структуры полупроводникового титаната бария, ее переход из тетрагональной модификации в кубическую.

Тепловая постоянная позистора  $\epsilon$ . По общему определению выражается отношением  $\frac{C_v}{\alpha T} = \epsilon$ . В работе исследуются

кривые  $T=f(t)$ , полученные с помощью терморпары, при охлаждении и нагревании позистора (нагревание осуществлялось за счет джоулева тепла). Тепловая постоянная, определенная по кривой охлаждения, соответствует паспортным данным. Для позистора типа СТ5-1 она равна 17 + 18 сек. Для кривой нагревания название "постоянная времени" не соответствует действительности, т.к.  $\tau$  в течение всего времени переходного процесса меняется и при некоторых значениях напряжения довольно резко. В связи с этим,  $\tau$  рекомендуется называть показателем роста кривой  $T=f(t)$  и определять как длину подкасательной к кривой в данной точке, т.е.

$$\frac{T_2 - T_1}{\operatorname{tg} \alpha} \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{Вн}} \right] = \tau \quad (16)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta T}{\Delta t}$ .

При малых значениях напряжения (для позистора СТ5-1 порядка 2,5 вольт) кривая нагревания еще сохраняет экспоненциальный вид и может быть использована для определения постоянной.

На основании анализа кривой переходного процесса в цепи с позистором  $I=f(t)$  в работе предлагаются две нелинейные схемы замещения позистора.

а) Электрический двухполюсник  $[(LNR) - C] \parallel R_{\text{уст}}$

В момент времени  $t = 0$  индуктивное сопротивление  $\omega L = \infty$ , а емкостное  $\frac{1}{\omega C} = 0$ . В этом случае ток в момент включения определится

$$I_{\text{вкл}} = \frac{U}{\frac{R_{\text{нл}} \cdot R_{\text{уст}}}{R_{\text{нл}} + R_{\text{уст}}}} = \frac{U}{R_{\text{нл}}} \quad (17)$$

В установившемся режиме ( $t = \infty$ )

$$I_{\text{уст}} = \frac{U}{R_{\text{уст}}} \quad (18)$$

Сопротивление  $R_{ш}$  схемы замещения определяется следующим образом

$$R_{ш} = \frac{R_{ш} \cdot R_{вкл}}{R_{ш} + R_{вкл}} = \frac{R_1(T)}{e^{b(VU-1)}} \quad (19)$$

Откуда

$$R_{ш} = \frac{R_{уст} \cdot R_1(T)}{R_{уст} \cdot e^{b(VU-1)} - R_1(T)} \quad (20)$$

Здесь  $R_{уст}$  определяется из данных статической вольт-амперной характеристики.

Величины  $L$  и  $C$  - нелинейные. Они определяют характер и скорость протекания переходного процесса.

б) Электрический двухполюсник  $(R_{уст}-L) \parallel (R_{вкл}-C)$

Эта схема проще и нагляднее. Для нее рассчитана эквивалентная нелинейная емкость. Индуктивность принималась постоянной и равной  $L = 61$  гн. Ток в цепи дюзистора был представлен как сумма токов  $I'_1$  и  $I'_2$  через последовательные цепи  $L-R_{уст}$  и  $C-R_{вкл}$ . В зависимости от времени эквивалентная нелинейная емкость для дюзистора СТ5-1 при включении его на напряжение  $U = 10,14$  вольт изменяется от 1,26 до 0,07 фарад.

### III

В третьей главе рассматриваются линейные модели дюзисторов, т.е. система линейных уравнений, приближенно описывающих электротепловые процессы в нем.

В тех случаях, когда дюзистор используется в качестве датчика в схемах контроля и регулирования, отклонение заданной регулируемой величины от своего первоначального значения часто бывает незначительным. В этом случае нелинейные характеристики дюзистора можно заменить отрезками прямых линий, что дает

возможность перейти от нелинейного, дифференциального уравнения к нескольким линейным, отличающимся лишь значением коэффициентов.

Записывая систему (II) в отклонениях получаем линейную систему уравнений.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_n &= \Delta P_\alpha + \Delta P_\theta, \\ \Delta P_n &= 2I_0 R_n \Delta I + I_0^2 \Delta R_n, \\ \Delta P_\alpha &= \alpha_0 F(\Delta T + \Delta \theta) + F(T - \theta) \Delta \alpha, \\ \Delta P_\theta &= C_v \frac{d\Delta T}{dt} = C_v \rho \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Считая, что температура окружающей среды и коэффициент теплообмена  $\alpha$  постоянны, систему (21) можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_n &= \Delta P_\alpha + \Delta P_\theta \\ \Delta P_n &= 2I_0 R_n \Delta I + I_0^2 \Delta R_n \\ \Delta P_\alpha &= \alpha_0 F \Delta T = R_0 \Delta T \\ \Delta P_\theta &= C_v \rho \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Как отмечают некоторые авторы, в области роста сопротивления (по основной температурной характеристике) для узкого температурного интервала зависимость сопротивления от температуры может быть выражена формулой

$$R = A \cdot e^{\alpha T} \quad \text{или} \quad \ln R = \ln A + \alpha T \quad (23)$$

Поскольку зависимость коэффициента  $b$  от температуры имеет одинаковую с температурной характеристикой форму, выражение для  $b$  имеет аналогичный вид, т.е.

$$b = B + \gamma T \quad (24)$$

Тогда значение сопротивления для любой точки вольт-амперной характеристики определится как

$$R(T, U) = A \cdot e^{\alpha T - (B + \gamma T)(\sqrt{U} - 1)} \quad (25)$$

Записав уравнение (25) в отклонениях, после некоторых замен и

преобразований получили выражение для полного сопротивления позистора

$$Z_n(\rho) = R_{no} \cdot V \frac{1 + \epsilon \rho - D}{1 + \epsilon \rho + VD} \quad (26)$$

Это выражение отличается от аналогичного для термистора

$$Z_r(\rho) = R_{ro} \frac{1 + \epsilon \rho - D}{1 + \epsilon \rho + D} \quad (27)$$

только наличием члена  $V$ , характеризующего варисторные свойства позистора и представляющего собой

$$V = \frac{1}{1 + U_0 \frac{A + IT}{2\sqrt{U_0}}}$$

Следовательно, уравнение для полного сопротивления позистора является более общим и пригодным как для терморезисторов с за-  
висимой от напряжения характеристикой ( $V < 1$ ), так и с не-  
зависимой ( $V = 1$ ), - термисторов, различных проволочных  
терморезисторов. При этом знак ТКС учитывается входящим в урав-  
нение динамическим множителем, имеющим отрицательный знак для  
терморезисторов с положительным ТКС и положительный - с отри-  
цательным.

С помощью выражения (26) в работе исследуются динамические  
свойства поляризованного позистора при скачкообразном изменении  
напряжения на величину  $\Delta U$  и при наложении синусоидального  
напряжения различной частоты.

Переходя от изображения тока, полученного с помощью (26), к  
его оригиналу, выражение для переходного процесса  $\Delta I = f(t)$   
имеет вид

$$\Delta I(t) = \frac{\Delta U_0}{R_{no} V} \left[ \frac{1 + VD}{1 - D} - \frac{D(1 + V)}{1 - D} \cdot e^{-\frac{1 - D}{\tau} t} \right] \quad (28)$$

откуда для начального и установившегося тока имеем соответствен-  
но

$$\Delta I(0) = \frac{\Delta U_0}{R_{no} V} \quad (29)$$

$$\Delta I(\infty) = \frac{\Delta U_0}{R_{no} V} \cdot \frac{1+VD}{1-D} \quad (30)$$

С помощью (28), (29) и (30) в работе произведены расчеты начального и установившегося значений токов позисторов СТ5-1 и СТ7-1. Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает в среднем 10 + 12%.

Заменяя в (30)  $\rho$  на  $j\omega$ , получено выражение

$$Z_n(j\omega) = R_{no} V \left[ \frac{(\varepsilon\omega)^2 + (1+VD)(1+D)}{(\varepsilon\omega)^2 + (1+VD)^2} - \frac{(1+V)(\varepsilon\omega D)}{(\varepsilon\omega)^2 + (1+VD)^2} \right] \quad (31)$$

с помощью которого исследованы частотные свойства позисторов.

Для различных значений напряжений поляризации построены амплитудно-фазовые характеристики (АФХ). АФХ позисторов имеет вид подкружности расположенной диаметром на действительной оси и направленной в сторону отрицательных значений мнимой составляющей полного сопротивления. При увеличении частоты от 0 до  $\infty$

действительная часть полного сопротивления увеличивается от  $R = R_{дн}$  при  $\omega = 0$  до  $R = R'_{cr} = R_{cr} \cdot V$  при  $\omega = \infty$ . При частоте наложенного напряжения  $0 < \omega < \infty$  в цепи наблюдается сдвиг фазы между током и напряжением, причем, напряжение отстает от тока, что говорит о емкостном характере протекающих электрических процессов. Практически, для позисторов с тепловой постоянной  $\tau = 15 + 20$  сек. диапазон ощутимого сдвига фазы ограничивается частотами  $0,01 + 2$  гц. При частоте  $\omega_k = \frac{1}{\tau} \sqrt{(1+VD)(1-D)}$  действительная часть полного сопротивления становится равной 0, угол сдвига фазы между током и напряжением определяется как

$\arg Z_n(j\omega) = \frac{3}{2}\pi$ , т.е. сопротивление позистора становится чисто емкостным. Исходя из вида АФХ для модуля и аргумента справедливы следующие соотношения, соответствующие характерным значениям частот ( см. таблицу 2 )

Таблица 2

	$\text{mod } Z_n(j\omega)$	$\arg Z_n(j\omega)$
$\omega \rightarrow 0$	$R'_{\text{ост}} \cdot \frac{1-D}{1+VD}$	$180^\circ$
$\omega = \omega_k$	$\sqrt{-R'_{\text{ост}} \cdot R_{\text{од}}}$	$270^\circ$
$\omega \rightarrow \infty$	$R'_{\text{ост}} = R_{\text{ост}} \cdot V$	$360^\circ$

Анализ как расчетной так и экспериментальной частотно - фазовой зависимости показал, что сдвиг фазы на  $90^\circ$  для исследуемых типов позисторов с постоянной  $\tau \approx 17$  сек. наблюдается на частоте  $0,032 \pm 0,04$  гц .

Используя принцип дуальности, построена схема замещения поляризованного позистора и записано выражение для полного сопротивления через элементы эквивалентной схемы

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = Z_n(\rho) = \frac{\rho C + G - g}{\rho C G + g G - g^2} \quad (32)$$

Совместное решение ( 25 ) и (32) дало возможность определить элементы эквивалентной схемы через параметры позисто-

$$g = \frac{1+VD}{R_n(U_{no}, T_o) V(1-D)} \quad (33)$$

$$G = \frac{1}{R_n(U_{no}, T_o) \cdot V} \quad (34)$$

$$G - g = -\frac{D(1+V)}{R_n(U_{no}, T_o) V(1-D)} \quad (35)$$

$$C = - \frac{\epsilon D(1+V)}{R_n(U_n, T_n) V(1-D)^2} \quad (36)$$

Используя эти соотношения, для нескольких значений напряжения поляризации подсчитана эквивалентная емкость позистора, значение которой падает с увеличением мощности, потребляемой позистором.

Наиболее интересным с теоретической и практической точки зрения является использование терморезисторов в автоколебательных цепях.

В данной работе аналитически исследуется и доказывается возможность возникновения колебаний в последовательной цепи "позистор - индуктивность" ( $R_n - L$ ) и "позистор - термистор" ( $R_n - R_T$ ).

Уравнение описывающее переходной процесс в цепи  $R_n - L$  имеет вид

$$\Delta I [Z_n(\rho) + L\rho + R_L] = \Delta U$$

Записав характеристическое уравнение, решаем его из условия возникновения колебаний, т.е. когда корни чисто мнимые

$$\rho_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{R_n V(1-D) + R_L(1+VD)}{L\epsilon}} = \pm j\omega \quad (37)$$

Отсюда следует вывод, что колебания возникнут в цепи при определенном соотношении между величинами  $L$ ,  $R_n$  и  $R_L$ . При этом активное сопротивление катушки индуктивности  $R_L$  должно быть

$$R_L < \left| - \frac{R_n V(1-D)}{1+VD} \right| \quad (38)$$

Значение индуктивности можно определить из условия равенства нулю коэффициента при первой производной характеристичес-

кого уравнения

$$L_k = \frac{-(R_n V + R_k) \xi}{(1 + VD)} \quad (39)$$

Выражение для критической частоты имеет вид

$$\omega_k = \frac{1}{\xi} \sqrt{\frac{R_n V D - 1(1 + VD) - R_k(1 + VD)^2}{R_n V + R_k}} \quad (40)$$

Из полученных формул (39) и (40) видно, что  $\omega_k$  и  $L_k$  положительны (реальны) лишь при  $VD < -1$ , т.е. при выборе рабочей точки на падающем участке статической вольт-амперной характеристики.

Как показали расчеты, индуктивность, которая необходима для получения автоколебаний в цепи с позистором типа СТ7-1 в спокойном воздухе при  $\theta = 23^\circ\text{C}$  имеет очень большую величину, практически нереальную (3,5 + 9,0 тыс. гн).

В связи с этим возникает вопрос о замене индуктивности каким-либо эквивалентным элементом. Таким элементом может быть термистор, ибо его индуктивность, обусловленная тепловой инерцией, может достигать сотен тысяч генри.

Исследуя характеристическое уравнение цепи  $R_n - R_r$

$$Z_n(\rho) + Z_r(\rho) = 0$$

получено выражение для подсчета ее параметров

$$D_r = \frac{R_{ro}(2 + D_n V) + R_{no} V(2 - D_n)}{R_{ro} - R_{no} V} \quad (41)$$

На основании выражения (41), определяющего соотношение параметров термистора и позистора, обеспечивающих возникновение колебаний, получена формула для определения границ возможного изменения сопротивления термистора для любой рабочей точки по-

вистора.

$$R_{no}V < R_{ro} < R_{no}V \frac{2 + |D_n|}{\sqrt{|D_n|} - 2} \quad (42)$$

Частота колебаний системы "позистор - термистор"

$$\omega = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{R_{no}V(1 + D_r - D_n - D_n D_r) + R_{ro}(1 + D_n - D_r - D_r V D_n)}{R_{ro} + R_{no}V}} \quad (43)$$

Зависимость частоты колебаний от положения рабочей точки на вольт-амперных характеристиках позистора типа СТ5-1 и термистора с  $\tau_r = \tau_n = 17$  сек. представлены в таблице 3.

Таблица 3.

U, в	Исходные данные				Расчетные данные		
	R <sub>no</sub> , Ом	R <sub>ro</sub> , Ом	D <sub>n</sub>	D <sub>r</sub>	ω, сек <sup>-1</sup>	f, гц	T, сек
4,0	25,6	25,0	-2,2	35,3	0,5	0,08	12,5
5,0	37,9	40,0	-9,0	16,9	0,69	0,11	9,1
6,0	53,5	50,0	-14,0	5,37	0,356	0,0566	17,7
8,0	91,2	100,0	-5,7	6,55	0,305	0,0486	20,6
10,0	132,5	100,0	-4,1	10,25	0,3	0,0478	20,9
12,0	172,5	200,0	-2,6	3,72	0,102	0,162	62,0
14,0	212,5	200,0	-1,94	4,36	0,091	0,0145	69,0

#### IV

В четвертой главе рассматриваются вопросы применения позисторов. Главный упор делается на использование их динамических свойств.

Позистор, как и термистор, но с еще большим успехом, может применяться для измерения температуры, теплового потока, давления, концентрации растворов, влажности воздуха, скорости пото-

ка и т.д.

Графический анализ кривой тока протекающего через позистор при  $\omega \gg \omega_k$  показал, что в ней содержатся высокие нечетные гармоники. Это обусловлено влиянием варисторного эффекта и может быть использовано в устройствах умножения частоты.

В качестве примера использования переходных процессов рассмотрены следующие устройства:

I. Применение позистора для улучшения характеристик реле.

Исследуется влияние последовательного включенного позистора на время срабатывания и отпускания реле, его надежность.

Известно, что время срабатывания  $t_{ср}$  складывается из времени трогания  $t_{тр}$  и времени движения  $t_{дв}$ . Так как  $t_{дв} \ll t_{тр}$ , то  $t_{ср} \approx t_{тр}$ .

Одним из видов форсировки времени срабатывания реле является повышение напряжения. Время действия напряжения ограничивается включением добавочного сопротивления с таким расчетом, чтобы температура обмотки реле не достигла предельно допустимой. Функцию добавочного сопротивления может выполнять позистор, включенный последовательно с реле.

В работе произведен расчет цепи позистор - реле при включении ее на повышенное напряжение, подсчитана кратность форсировки включения реле типа РПН.

2. Исследование динамики процессов протекающих в позисторе при различных условиях теплообмена привели к разработке нового способа измерения температуры и устройства использующего этот способ.

Способ измерения температуры  $\theta$  основан на измерении скорости изменения сопротивления позистора при подаче на него пос-

тоянного по величине напряжения. В этом случае

$$\frac{dR_n}{dt} = f(\theta)$$

Данный способ реализован путем сочетания свойств электро-механического генератора и позистора, для чего последний включается параллельно одному из управляющих контактов генератора. Это дает возможность периодически подключать позистор на постоянное напряжение, что влечет к его нагреванию и изменению сопротивления, а это, в свою очередь, отражается на длительности импульса  $t_u$  или паузы  $t_n$  генератора, и его частота  $f = \varphi(\theta)$ , где

$$f = \frac{1}{T(\theta)} = \frac{1}{t_u(\theta) + t_n} \quad \text{или} \quad f = \frac{1}{t_u + t_n(\theta)}$$

В работе приводятся результаты испытания устройства изготовленного в лабораторных условиях с питанием от стабилизированного выпрямителя.

Легкость преобразования измеряемой температуры в частоту дает возможность использовать данное устройство в телеизмерении.

3. Рассмотренная выше цепь позистор - реле может быть использована в самых разнообразных устройствах. Например, защита объектов от перенапряжения определенной длительности осуществляется, если выбрать реле с величиной тока срабатывания немного меньше рабочего тока цепи. В этом случае отключение объекта при повышении напряжения произойдет лишь через время  $t_{отк}$ , равное времени, в течении которого ток, уменьшаясь, достигает значения тока отпускания реле  $I_{отп}$ . Скорость отключения в некоторой степени зависит и от величины перенапряжения - чем выше значение аварийного напряжения, тем быстрее сработает защита.

4. В устройстве, реагирующем на скорость изменения входного напряжения при включении, используются дифференцирующие свойства позистора. Величина тока срабатывания  $I_{ср}$  реле выбира-

ется больше тока в максимуме вольт-амперной характеристики. При увеличении напряжения величина броска тока через позистор зависит от скорости изменения этого напряжения, т.е.  $I = \frac{dU}{dt}$ . Если при этом  $I$  окажется больше  $I_{cp}$ , устройство срабатывает.

\*

Основные результаты работы:

I. Исследованы варисторные свойства позистора. Предложено три способа определения коэффициента нелинейности  $\delta$  характеризующего степень влияния напряжения на сопротивление позистора. Из них способ, давший наибольшую точность, основан на использовании тока отмечаемого осциллографом в момент подачи на позистор постоянного напряжения (т.е.  $I_{cp}$  для  $t = 0$ ). Данный способ отличается простотой, наглядностью, повышенной точностью, которая достигается за счет абсолютно точного определения температуры позистора в момент отсчета значения тока.

2. Учитывая особенности свойств позистора, т.е.  $R_n = f(T, U)$ , разработана методика расчета переходного процесса в цепи  $R_n - Z$  для различных видов возмущающего фактора большой величины.

3. Рассчитана теплоемкость в диапазоне температур от 20 до 160°С.

4. Получено выражение для полного сопротивления позистора при малых отклонениях возмущающего воздействия, используя которое подсчитаны начальные и установившиеся значения токов при скачкообразном изменении напряжения на позисторе.

Рассчитаны значения углов сдвига фазы от частоты при

наложении на поляризованный позистор переменного напряжения малой амплитуды. Сдвиг фазы на  $90^\circ$  (емкостного характера) для позисторов с  $\tau \approx 17$  сек. наблюдается при частотах порядка  $0,032 \pm 0,04$  гц .

5. На основании принципа дуальности электрических схем, построена схема замещения поляризованного позистора. Используя соотношения, полученные из схемы замещения, подсчитана эквивалентная емкость для различных точек вольт-амперной характеристики позистора.

6. Теоретически исследованы системы:

а. Позистор - индуктивность. Доказана практическая неосуществимость колебаний в такой цепи из-за чрезмерно больших значений индуктивности.

б. Позистор - термистор. Даны рекомендации по выбору параметров термистора и позистора для такой системы.

7. Приведен расчет стабилизатора тока, показывающий эффективность применения позистора для этих целей.

На основании использования динамических свойств позисторов разработаны устройство для телеизмерения температуры, устройство реагирующее на скорость изменения напряжения. защита от перенапряжения определенной длительности.

По материалам данной работы опубликовано:

1. Волошин И.Ф., Сериков В.К. Влияние варисторного эффекта на переходный процесс в цепи с позистором. Известия ВУЗов СССР, энергетика, 1968, №12.

2. Ширшова В.В., Сериков В.К. Определение теплоемкости позистора. Инженерно-физический журнал. Т.ХУ, 1968, №3.

3. Сериков В.К. О взаимосвязи коэффициента нелинейности с температурными характеристиками позистора. Известия АН БССР, серия физико-техническая, №2, 1969.

4. Касперович А.С., Сериков В.К. Расчет переходного процесса в цепи позистор - активный линейный резистор. Приборы и системы управления, №12, 1969.