

6
A55

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

КОЗЛЯЕВА Иранда Николаевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА
НЕСТАБИЛЬНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
НА ПОЛЕВЫХ ТРИОДАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНЕШНИХ
УСЛОВИЙ

05.250 Контрольно-измерительная
техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Москва - 1973

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ**

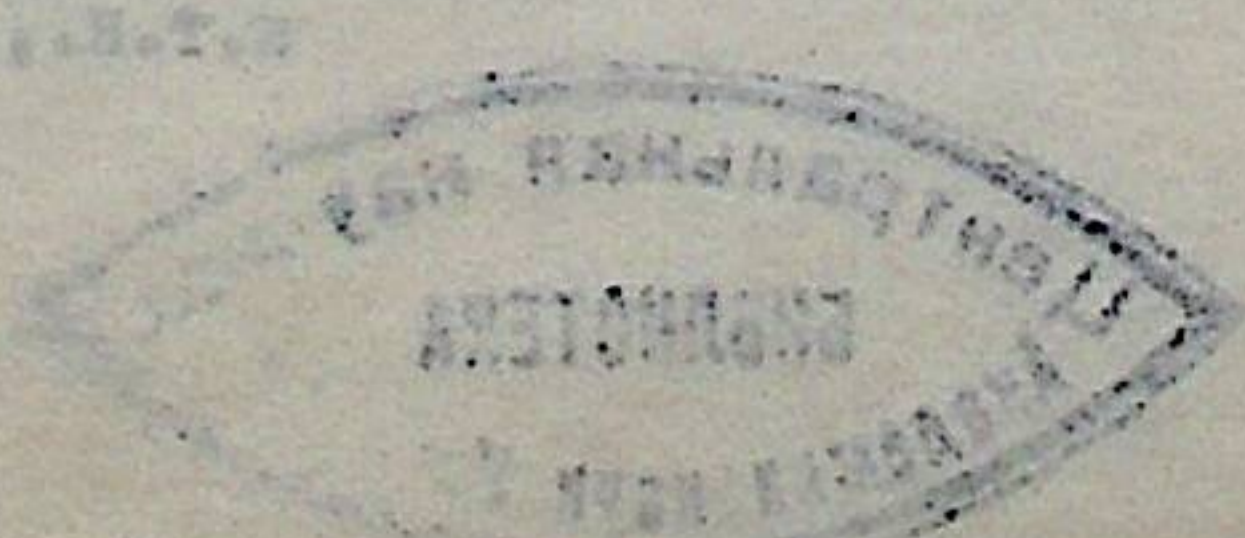
КОЗЛЯЕВА Ираида Николаевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА
НЕСТАБИЛЬНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
НА ПОЛЕВЫХ ТРИОДАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНЕШНИХ
УСЛОВИЙ**

**05.250 Контрольно-измерительная
техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

г. Москва - 1973



Работа выполнена в Сибирском государственном научно-исследовательском институте метрологии (г.Новосибирск)

Научный руководитель – канд.техн. наук, старший научный сотрудник Загорский Я.Т.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор Попов В.С.

– кандидат технических наук, старший научный сотрудник Вострокнутов Н.Н.

Ведущее предприятие – Львовский ордена Ленина политехнический институт

Автореферат разослан " ____ " _____ 1973 г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1973 г.
в ____ часов на заседании Ученого Совета Всесоюзного научно-исследовательского института метрологической службы (г.Москва, II7334, Ездаков пер., I)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
К.Т.Н., доц.

М.Я.Шегал



Полевые триоды (ПТ) – сравнительно новые полупроводниковые приборы. Они были разработаны в конце 50-х годов приблизительно одновременно в США и СССР. Серийный выпуск отечественных полевых триодов начат в 1969 году.

Полевые триоды имеют ряд ценных свойств как по сравнению с биполярными транзисторами: высокое входное сопротивление, малый уровень собственных шумов при высокоомном источнике сигнала, хорошую термостабильность и др., так и по сравнению с электронными лампами: малые габаритные размеры, повышенную экономичность, долговечность и т.д.

Благодаря этим свойствам ПТ находят широкое применение в электронной технике и предназначены, главным образом, для работы в качестве усилительных элементов.

Одной из важных задач при проектировании измерительных усилителей высокого класса точности является расчет схем в номинальном режиме и анализ их неустойчивости при изменении внешних условий. Если для низкочастотных усилителей на биполярных транзисторах эта задача, в принципе, решена, то применительно к полевым триодам – является нерешенной.

Подобное положение существенно тормозит развитие различных аналоговых устройств на ПТ и прежде всего измерительных усилителей с повышенными метрологическими характеристиками.

Целью настоящей диссертации является попытка восполнить указанный пробел и разработать метод анализа неустойчивости низкочастотных усилителей на полевых триодах при изменении внешних факторов (температуры, напряжения источников питания).

Неустойчивость характеристик усилителей (коэффициентов

усиления, входных и выходных сопротивлений и др.) в основном определяется существенной зависимостью параметров транзисторов от действия дестабилизирующих факторов. К последним относятся изменения температуры, влажности и давления окружающей среды, изменение напряжения источников питания, наличие радиации и др. Наиболее часто встречающимися и наиболее существенными факторами являются изменения температуры и напряжения источников питания. Причем их изменения обычно носят монотонный характер.

Влияние дестабилизирующих факторов проявляется в изменении параметров ПТ как по постоянному, так и по переменному току. Из параметров, определяющих режим работы полевого триода с р-п переходом по постоянному току (назовем их статическими), основное влияние оказывают напряжение отсечки U_0 , ток насыщения I_0 при напряжении затвор-исток $U_{з.и} = 0$ и ток затвора $I_з$.

Выбор системы параметров, определяющих работу ПТ по переменному току в режиме малого сигнала (назовем эти параметры динамическими), определяется многими факторами. В частности, видом усилителя и характером связей между триодами в усилительной схеме, простотой формул для расчета тех или иных характеристик усилителя, возможностью практического измерения динамических параметров и т.д. Считая ПТ полным аналогом электронной лампы, ряд авторов формально принимает в качестве динамических параметров ПТ "ламповые" параметры. Однако "ламповые" параметры, к которым относятся крутизна S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ , описывают полевой триод как четырехполюсник не полностью. Это в ряде случаев приводит к большим ошибкам, например, при расчете предельных значений характеристик усилителей. Вопрос о выборе наиболее приемлемой системы динамических параметров ПТ для расчета усилителей до последнего времени в литературе не освещен.

В первой главе настоящей работы произведен подробный анализ двенадцати систем динамических параметров: z , y , h , a , b и g -параметров в схемах включения ПТ с общим затвором и с общим истоком с целью определения наиболее приемлемой для расчета усилителей. При этом основными критериями приемлемости являлись максимально возможная точность, обеспечиваемая при измерении параметров, и минимально достижимая погрешность, обеспечиваемая при пересчете выбранной систе-

мы параметров в остальные одиннадцать.

Анализ показал, что ряд параметров: z , h , a , b , g в схеме включения ПТ с общим истоком, а также z , b , a , g в схеме включения триода с общим затвором, практически невозможно измерить из-за необходимости обеспечения при режиме холостого входа (или выхода) сопротивлений источника сигнала или нагрузки, достигающих $10^8 + 10^{12}$ Ом. Практическому измерению поддаются лишь три системы: $Y_{и}$ - параметры в схеме включения ПТ с общим истоком, а также $Y_з$ - и $h_з$ -параметры в схеме включения триода с общим затвором.

Особенностью измерения $h_з$ - и $Y_{и}$ -параметров является зависимость ряда параметров ($h_{22з}$, $1 + h_{21з}$, $Y_{и1}$, $Y_{2и1}$) от частоты даже в диапазоне инфранизких частот. Это затрудняет, с одной стороны, сам процесс измерения инфранизкочастотных h , как правило, слабых сигналов, а, с другой стороны, может снизить и точность измерения, в особенности при наличии собственных низкочастотных шумов измерительного прибора.

Наибольшая точность обеспечивается при измерении $Y_з$ -параметров. Однако этой точности оказывается совершенно недостаточно при пересчете системы $Y_з$ -параметров в любую из оставшихся одиннадцати. В диссертации приведены таблицы пересчета двенадцати рассмотренных систем параметров через три практически измеряемые. Из таблиц видно, что формулы пересчета через $Y_з$ -параметры содержат либо в числителе, либо в знаменателе разность двух практически равных друг другу величин. Оценка требуемой погрешности измерения $Y_з$ -параметров показывает, что для обеспечения приемлемой точности пересчета погрешность измерения должна быть на 5-10 порядков меньше имеющейся. Это заставляет отказаться от системы $Y_з$ -параметров, как представляющей малую практическую ценность.

Системы $h_з$ - и $Y_{и}$ -параметров обеспечивают одинаковую достаточно высокую точность пересчета в другие системы. Погрешность измерения этих параметров, за исключением входной проводимости $Y_{и1}$, соизмерима с погрешностью измерения $Y_з$ -параметров.

Погрешность измерения $Y_{и1}$ в 4-5 раз больше по сравнению с остальными параметрами и во многом определяется низким классом точности высокоомных образцовых резисторов.

Таким образом, наиболее оптимальной следует признать систему h_z -параметров в схеме включения ПТ с общим затвором. В дальнейшем при анализе неустойчивости усилительных цепей на ПТ используется система h_z -параметров.

Во второй главе диссертации обоснован метод и рассмотрены схемы измерения h_z -параметров полевых триодов. Измерение параметров активных четырехполюсников — задача, в принципе, решенная. В частности, хорошо разработаны методы измерения динамических параметров (h -параметров) биполярных транзисторов.

Анализ известных методов измерения параметров биполярных транзисторов применительно к измерению h_z -параметров полевых триодов показал, что наиболее приемлемым для ПТ является метод вольтметра-амперметра. Данный метод характеризуется простотой и относительно небольшой погрешностью.

Однако формальный перенос методики измерения параметров биполярных транзисторов на полевые триоды может повлечь за собой большие погрешности измерения. В частности, в отличие от биполярных транзисторов, у которых все h_{β} -параметры являются практически активными в области низких частот, у полевых триодов активными в диапазоне частот вплоть до 100-200 кГц остаются только h_{11z} и h_{12z} . Два других параметра: $I + h_{21z}$ ^{ж)} и h_{22z} носят активный характер лишь до единиц герц. Поэтому, если измерение первых двух параметров можно производить на тех же частотах, что и у биполярных транзисторов (50 Гц или 1 кГц) и это не вызывает особых затруднений, то измерение активных значений $I + h_{21z}$ и h_{22z} необходимо выполнять на частотах не более 1 Гц, что вызывает существенные трудности. Последнее связано с большими затратами времени при измерении сигналов инфранизких частот. Это объясняется необходимостью использования высокочувствительного измерительного усилителя с коэффициентом усиления до $1 \cdot 10^4$ в рабочей полосе частот, начиная от 0,1 Гц, и учетом его эксплуатационных особенностей: возникновением перегрузок усилителя при регулировке режима питания ПТ,

^{ж)}Поскольку параметр h_{21z} очень близок к минус единице, значительно больший интерес представляет "параметр" $I + h_{21z}$, определяющий ряд характеристик усилителей на ПТ.

переключении усилителя со входа на выход триода, при переключении коэффициента усиления. В итоге время, затрачиваемое на измерение одного значения параметра, достигает нескольких минут.

В связи с этим был разработан метод измерения активных значений $I + h_{21z}$ и h_{22z} , заключающийся в подаче сигнала низкой частоты от генератора на вход (выход) ПТ, выделении вещественной составляющей сигнала на выходе (входе) триода с помощью синхронного детектора и измерении выделенной составляющей вольтметром постоянного тока. Использование разработанного метода позволило повысить рабочую частоту сигнала на один-два порядка и, таким образом, при сохранении высокой точности повысить быстродействие измерительного процесса в десятки раз.

Создана установка для измерения и исследования h_z -параметров полевых триодов. Установка позволяет измерять h_z -параметры ПТ с р-п переходом в пределах: $h_{11z} = 0,05 + 30 \text{ Ом}$; $h_{12z} = 3 \cdot 10^{-4} + 1,0$; $I + h_{21z} = 3 \cdot 10^{-7} + 3 \cdot 10^{-3}$ (на частоте 1 кГц); $h_{22z} = 3 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 10^{-7} \text{ См}$ (на частоте 1 кГц); $I + h_{21z} = 5 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-4}$; $h_{22z} = 5 \cdot 10^{-11} + 5 \cdot 10^{-8} \text{ См}$. Погрешность измерения не превышает $2 + 3\%$. Установка предназначена для исследования h_z -параметров при изменении режима питания ПТ в диапазонах $I_c = 0,05 + 6 \text{ мА}$ и $U_{с.и} = 1 + 14 \text{ В}$, а также при изменении внешних условий работы триодов.

Третья глава диссертации посвящена разработке метода анализа неустойчивости низкочастотных усилителей на ПТ. Метод является структурно-функциональным. В его основу положен метод анализа неустойчивости усилительных цепей на биполярных транзисторах. Это сделано с целью обеспечения единства анализа неустойчивости усилителей на биполярных и полевых триодах. Обеспечение единства создает неоспоримые преимущества при анализе широко распространенных гибридных схем, содержащих и биполярные, и полевые триоды.

Разработанный метод позволяет: 1) наиболее полно учесть причинно-следственные связи в усилителе при влиянии практически любых внешних воздействий; 2) обеспечить наглядность и сравнительную простоту анализа; 3) производить расчет не только неустойчивости характеристик по переменному току (коэффициентов усиления, входного и выходного сопротивлений и др.), но

и нестабильности режима питания отдельных триодов в усилительной схеме; 4) получить пригодные для инженерных расчетов конечные выражения, связывающие внешнее воздействие и характеристики усилителя; 5) обеспечить возможность расчета нестабильности сложных усилительных цепей с помощью ЭВМ.

Указанное достигается представлением причинно-следственных связей в усилителе в виде структурной схемы. Структурная схема состоит из узлов и ветвей. Узлы символично изображают переменные величины (зависимые и независимые), а ветви — взаимосвязи между ними. Применение подобного графического построения вместо аналитических выражений дает возможность легко установить порядок взаимного расположения переменных и наглядно представить существующие между ними зависимости.

При изображении причинно-следственных связей в усилителе на ПТ принимается ряд допущений, а именно, независимость:

1) внешних воздействий друг от друга; 2) статических параметров от изменения режима питания триода, а динамических — от величины сигнала; 3) сопротивлений резисторов от внешних воздействий; 4) связей между узлами друг от друга.

Особенностью метода анализа усилителей на ПТ является иной вид структурной схемы по сравнению с биполярными транзисторами. Кроме того, в отличие от усилителей на биполярных транзисторах в усилителях на ПТ наблюдается зависимость связей между узлами от самих узловых величин, а также зависимость связей от внешних условий. Это усложняет расчет нестабильности и в ряде случаев требует применения ЭВМ.

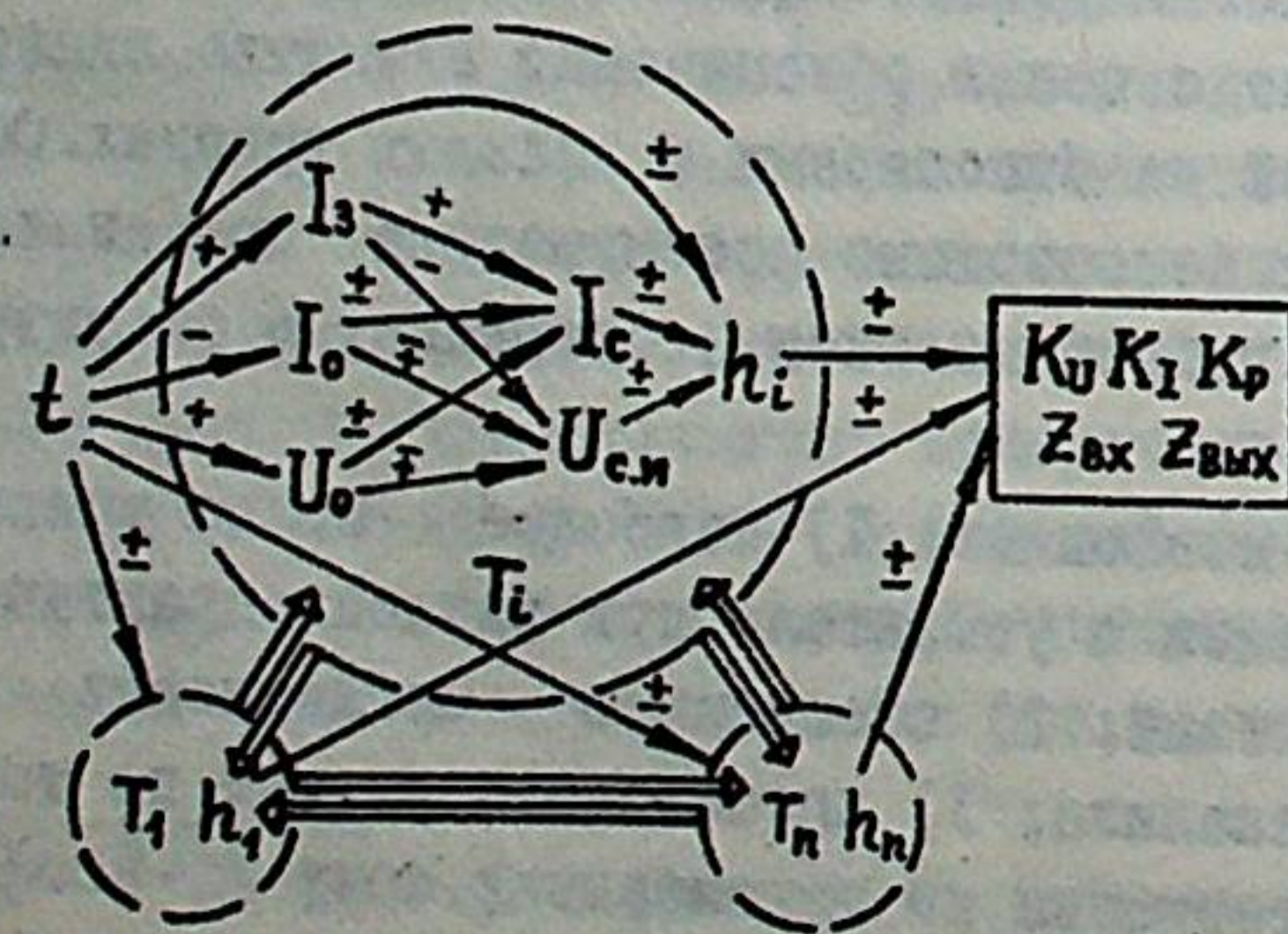


Рис. I

Структурная схема n -триодного усилителя при воздействии температуры приведена на рис. I.

Температура — дестабилизирующий фактор — является истоком схемы, а стоками служат характеристики усилителя: коэффициенты усиления, входное и выходное сопротивления и пр. В остальных узлах схе-

мы расположены переменные, характеризующие нестабильность усилителя при воздействии температуры. К ним относятся величины, определяющие режим питания триодов, а также их статистические и динамические параметры. Режим питания триода определяется значениями тока стока I_c и напряжения сток-исток $U_{c,n}$. В качестве статистических параметров, как упоминалось выше, выбраны напряжение отсечки (насыщения) U_0 , ток насыщения I_0 при напряжении затвор-исток $U_{з,и} = 0$ и ток затвора $I_з$. Динамическими параметрами являются h_z -параметры.

Причинно-следственные связи на структурной схеме отображаются ветвями, соединяющими узлы схемы. Каждая из ветвей исходит из узла, являющегося причиной (или одной из причин) нестабильности того узла, в который она входит. Таким образом, для того, чтобы расположить ветви на структурной схеме усилителя, необходимо знать все основные функциональные связи в усилителе. Последние подразделяются на функциональные связи в самих триодах и на связи между ними.

На структурной схеме (рис. I) полностью отображены функциональные связи для i -го триода T_i в схеме n -триодного усилителя. Для всех других триодов эти связи аналогичны и поэтому на рисунке не обозначены. Структурная схема одиночного триода T_i справедлива для любого способа включения триода в усилительной цепи (с общим затвором, с общим истоком, с общим стоком). Связи между триодами осуществляются через общие токи и напряжения. Эти связи на рис. I условно показаны в виде двойных линий и определяются уже видом конкретной схемы усилителя.

Построив по указанным правилам структурную схему усилителя, можно производить как качественный, так и количественный анализ его нестабильности. При этом необходимо прежде всего, пользуясь любым из известных методов расчета электрических цепей, найти аналитические зависимости исследуемых характеристик усилителя от h -параметров триодов в номинальном режиме работы. Затем по общему виду структурной схемы выявить те взаимосвязи, которые определяют влияние температуры на характеристики усилителя. Для этой цели, пользуясь полученными выражениями, следует установить узлы и ветви структурной схемы, связанные лишь с теми h -параметрами триодов, которые определяют характеристики усилителя, а все прочие узлы и ветви отбросить и при даль-

нейшем анализе не учитывать. Для проведения качественного анализа, целью которого является установление в общем виде характера неустойчивости усилителя, каждой ветви структурной схемы приписывается знак плюс или минус. Так обозначаются знаки весовых коэффициентов ветвей между соответствующими узлами. Характер неустойчивости усилителя определяется после нахождения знаков путей структурной схемы, исходящих из истока и входящих в каскадные узлы h -параметры. Знаки путей находятся по правилу алгебраического умножения, причем сомножителями являются весовые коэффициенты ветвей, входящих в состав данного пути. Весовые коэффициенты параллельных путей, сходящихся к общему узлу, необходимо суммировать, что и позволяет качественно установить характер неустойчивости усилителя, а также выявить возможность ее автокомпенсации. Качественный анализ неустойчивости целесообразен на начальной стадии проектирования при выборе той или иной схемы усилителя, а также для проведения сравнительного анализа неустойчивости ряда схем усилителей в общем виде.

Для установления зависимостей характеристик усилителя от внешних дестабилизирующих факторов, определения величины неустойчивости и условий ее автокомпенсации необходим количественный анализ неустойчивости усилителя.

При проведении количественного анализа необходимо оценить значения причинно-следственных связей в усилителе с помощью свертывания его структурной схемы. Для этого связи между отдельными узлами должны быть известны и выражены в аналитической форме. Эту операцию можно значительно упростить, представив структурную схему в виде линейного графа. Преобразование структурной схемы в линейный граф производится после замены ее узлов, изображающих зависимые или независимые переменные, соответствующими узлами, изображающими приращения этих переменных. Как и в структурной схеме (рис.1), приращение независимой переменной (приращение температуры) является истоком графа, приращения статических параметров и величин, определяющих режим питания, — каскадными узлами. Однако, в отличие от структурной схемы, стоками графа являются не характеристики усилителя, а относительные изменения динамических параметров — h -параметров (рис.2).

Выражения, определяющие зависимости характеристик усилите-

ля от температуры, находятся после их представления в виде функций переменных аргументов δh_i . Зависимости $\delta h_i = f(\Delta t)$,

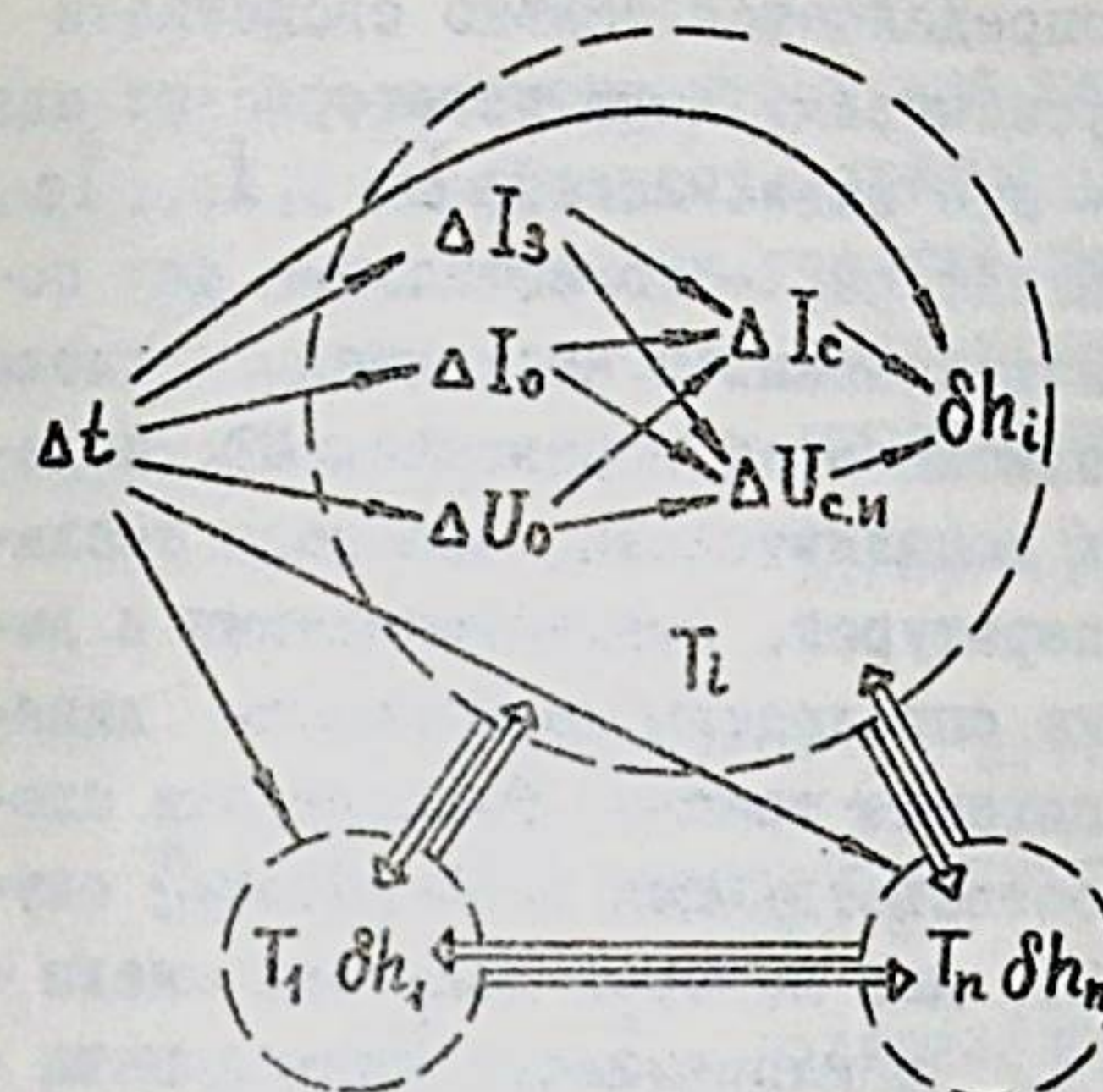


Рис.2

зависимости от Δt . Полученные в итоге алгебраические уравнения полностью характеризуют неустойчивость усилителя с переменными параметрами.

В третьей же главе диссертации рассмотрен метод анализа неустойчивости усилителей на полевых триодах при изменении напряжения источника питания; приведена и описана структурная схема h -триодного усилителя. Данный анализ в общем аналогичен анализу температурной неустойчивости. Отличие структурных схем усилителей на ПТ от усилителей на биполярных транзисторах состоит как во внешнем виде, так и в наличии зависимостей связей между узлами (например, между I_c , $U_{c,и}$ и U_o , I_o , I_z) от самих узловых величин (U_o , I_o , I_z), а также зависимостей этих связей от внешних условий (например, температуры).

Четвертая глава посвящена нахождению основных функциональных связей в усилителях на ПТ и передач ветвей графа структурной схемы усилителя.

К основным функциональным связям усилителей на ПТ относятся зависимости: а) статических параметров полевого триода от внешних условий (в частности, от температуры); б) режима питания ПТ от его статических параметров, элементов схемы (резисторов) и напряжения источника питания; в) динамических пара-

метров от внешних условий и режима питания.

Ряд функциональных связей определяется только свойствами триодов, другие - видом схемы усилителя. Если некоторые из связей уже найдены и исследованы - это зависимости U_0 , I_0 , I_3 , и крутизны $S = I/h_{из}$ от температуры, - то остальные до последнего времени оставались неизвестными. В настоящей главе путем линейной аппроксимации зависимостей параметров ПТ, известных ранее, а также полученных дополнительно, выведены аналитические соотношения между температурой, статистическими и динамическими параметрами, а также определены зависимости динамических параметров от режима питания триода. Рассмотрена схема усилителя низкой частоты, соответствующая обобщенному случаю подачи смещения (питания) ПТ, для которой получены аналитические выражения тока стока I_c и напряжения $U_{с.н}$ в зависимости от статических параметров ПТ, резисторов схемы и напряжения источника питания. Найдены коэффициенты неустойчивости режима питания. Определены передачи всех ветвей графа структурной схемы усилителя на ПТ.

Рассмотрим кратко основные функциональные связи в усилителях на ПТ.

а) Зависимости статических параметров полевого триода от температуры.

Влияние температуры на статические параметры ПТ являлось предметом многочисленных исследований. При этом достаточно убедительные данные получены относительно функций $U_0(t)$ и $I_3(t)$.

Зависимость $U_0(t)$ является практически линейной и может быть аппроксимирована выражением

$$U_0(t) = U_{0н} + \eta_n \cdot \Delta t, \quad (I)$$

где $U_{0н}$ - значение напряжения отсечки при начальной температуре окружающей среды (обычно при $t_n = 20^\circ\text{C}$); $\Delta t = t - t_n$ - приращение температуры; $\eta_n = 2\text{ мВ}/^\circ\text{C}$ - коэффициент пропорциональности, являющийся передачей ветви графа (рис.2) между узлами Δt и ΔU_0 .

Зависимость $I_3(t)$ носит экспоненциальный характер

*) Ниже под начальной температурой подразумевается $t_n = 20^\circ\text{C}$.

$$I_3(t) = I_{3.н} \cdot e^{K_i(t-t_n)}, \quad (2)$$

где $I_{3.н}$ - значение тока при начальной температуре; K_i - температурный коэффициент, равный $(0,044 + 0,08) 1/^\circ\text{C}$.

При аппроксимации участка нелинейной зависимости (2) линейной функцией уравнение аппроксимирующей прямой в интервале температур от t_1 до t_2 имеет вид

$$I_3(t) = I_{3.н} \cdot e^{K_i(t_1-t_n)} + \xi_n \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где

$$\xi_n = I_{3.н} \cdot \frac{e^{K_i(t_2-t_1)} - e^{K_i(t_1-t_n)}}{t_2 - t_1}, \quad \Delta t = t - t_1.$$

Коэффициент ξ_n является передачей ветви графа (рис. 2) между узлами Δt и ΔI_3 .

Литературные данные о зависимости $I_0 = f(t)$ носят разноречивый характер. Поэтому были проведены экспериментальные исследования отечественных триодов типа КПЮЗЕ + М, показавшие, что зависимость $I_0(t)$ близка к линейной и может быть аппроксимирована выражением

$$I_0(t) = I_{0н} (1 + q \cdot \Delta t) = I_{0н} + \varepsilon_n \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где $I_{0н}$ - значение тока насыщения при начальной температуре;

q - коэффициент пропорциональности с учетом 80%-ного производственного разброса равный - $(0,36 \pm 0,04)\%$ на 1°C ;

$\varepsilon_n = q \cdot I_{0н}$ - коэффициент пропорциональности, являющийся передачей ветви графа (рис. 2) между узлами Δt и ΔI_0 .

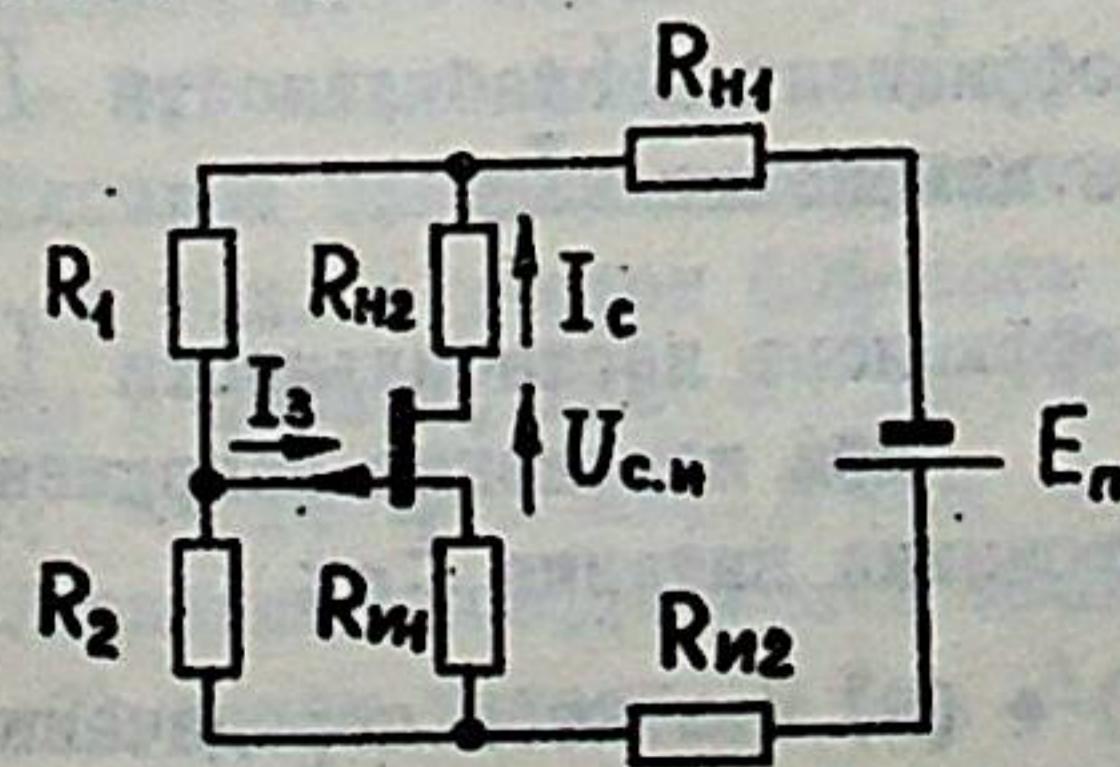


Рис.3

б) Зависимость режима питания полевого триода от его статических параметров и напряжения источника питания.

Произведен расчет режима питания обобщенной схемы включения полевого триода по постоянному току (рис.3), в результате которого по-

лучены полные выражения для тока стока I_c и напряжения на триоде $U_{c.и}$:

$$I_c = \frac{E_n R_2 / R + I_3 A + U_0}{C} + \frac{U_0^2}{2 I_0 C^2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4 I_0 C (E_n R_2 / R + I_3 A + U_0)}{U_0^2}} \right], \quad (5)$$

$$U_{c.и} = E_n + I_3 \mathcal{N} - I_c (R_2 + \mathcal{N}) + U_0 \left(1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_0}} \right) M, \quad (6)$$

где:

$$\begin{aligned} A &= R_{и1} + (R - R_2) \cdot R_2 / R; & R &= R_1 + R_2 + R_{н1} + R_{и2}; \\ C &= R_{и1} + (R_{н1} + R_{и2}) \cdot R_2 / R; & M &= \frac{R_{н1} + R_{и2}}{R_2}; \\ \mathcal{N} &= M \cdot (R_2 + R_{и1}) + R_{и1}. \end{aligned}$$

Кроме обобщенной схемы, в диссертации рассмотрены еще шесть усилительных схем, являющихся частными случаями обобщенной, а также получены полные аналитические выражения для расчета их режима работы по постоянному току.

Нестабильность режима питания триодов в усилительных схемах характеризуется коэффициентами неустойчивости, которые определяются как частные производные выражений (5) и (6) по некоторому аргументу (I_0 , U_0 , I_3 и т.д.).

$$S_{I_0} = \frac{\partial I_c}{\partial I_0} \left(V_{I_0} = \frac{\partial U_{c.и}}{\partial I_0} \right) - \text{коэффициент неустойчивости тока стока } I_c \text{ (напряжения сток-исток } U_{c.и} \text{) при изменении } I_0; \quad (7)$$

$$S_{U_0} = \frac{\partial I_c}{\partial U_0} \left(V_{U_0} = \frac{\partial U_{c.и}}{\partial U_0} \right) - \text{коэффициент неустойчивости } I_c (U_{c.и}) \text{ при изменении } U_0; \quad (8)$$

$$S_{I_3} = \frac{\partial I_c}{\partial I_3} \left(V_{I_3} = \frac{\partial U_{c.и}}{\partial I_3} \right) - \text{коэффициент неустойчивости } I_c (U_{c.и}) \text{ при изменении } I_3; \quad (9)$$

$$S_{E_n} = \frac{\partial I_c}{\partial E_n} \left(V_{E_n} = \frac{\partial U_{c.и}}{\partial E_n} \right) - \text{коэффициент неустойчивости } I_c (U_{c.и}) \text{ при изменении напряжения источника питания } E_n; \quad (10)$$

Коэффициенты неустойчивости (7) + (9) являются передачами ветвей графа (рис.2) между приращениями статических параметров и приращениями величин, определяющих режим питания ПТ. Коэффици-

енты S_{E_n} и V_{E_n} (10) - передачи ветвей графа структурной схемы усилителя при неустойчивости напряжения источника питания E_n между узлами ΔE_n и ΔI_c , $\Delta U_{c.и}$. Все рассмотренные коэффициенты неустойчивости определяются как величинами сопротивлений резисторов усилителя (рис.3), так и статическими параметрами ПТ. Последнее обуславливает зависимость коэффициентов от температуры. Если у биполярных транзисторов это нежелательное явление практически не наблюдается, то у полевых триодов оно имеет место. Поэтому для более полного анализа температурной неустойчивости усилителя необходимо учитывать еще и коэффициенты неустойчивости коэффициентов неустойчивости. Для простоты последние назовем коэффициентами неустойчивости передач ветвей графа. В диссертации найдены коэффициенты неустойчивости передач ветвей, являющиеся производными от выражений (7) + (10) по температуре t , т.е. вторыми производными от I_c (5) и $U_{c.и}$ (6).

в) Зависимости динамических параметров от температуры и режима питания.

В результате статистической обработки данных экспериментального исследования полевых триодов типа КПОЗЕ + М были получены аналитические зависимости h_3 -параметров от температуры внешней среды и режима питания (I_c , $U_{c.и}$). Найденные зависимости представлены в виде линейных функций и сведены в общую таблицу (табл.1).

В табл. 1 $h_{113.н}$, $h_{123.н}$, $1 + h_{213.н}$, $h_{223.н}$, $1 + h_{213он}$, $h_{223он}$ - начальные значения h_3 -параметров, соответствующие начальным значениям температуры $t_n = 20^\circ\text{C}$, тока стока $I_{c.н} = 0,3 \text{ мА}$ и напряжения сток-исток $U_{c.и.н} = 6 \text{ В}$; $\Delta t = t - 20^\circ\text{C}$; $\Delta I_c = I_c - 0,3 \text{ мА}$; $\Delta U_{c.и} = U_{c.и} - 6 \text{ В}$.

Типовые значения коэффициентов пропорциональности α_n , β_n , α_p и т.д. с учетом 80%-ного производственного разброса приведены в табл.2, где $\Delta t' = t - 50^\circ\text{C}$; $\Delta I_c' = I_c - 1 \text{ мА}$; $\Delta I_c'' = I_c - 3 \text{ мА}$; $\Delta U_{c.и}' = U_{c.и} - 4 \text{ В}$.

Указанные коэффициенты являются передачами ветвей графа (рис.2) между узлами Δt , ΔI_c , $\Delta U_{c.и}$ и δh_i .

Полученные данные характеризуют не только триоды типа КПОЗ, но и триоды с р - п переходом других типов, например, 2ПОЗ, 2П201, ТН5А + Д и др.

Основной целью работы, изложенной в пятой главе, являлась проверка степени достоверности предложенного метода расчета. Для этого разработанным методом был произведен анализ неустойчивости ряда усилительных схем для случаев изменения температуры и напряжения источника питания. Полученные расчетные соотношения сравнивались с экспериментальными данными о неустойчивости характеристик усилителей.

Аналізу подвергся широко распространенный однокаскадный усилитель с резисторами в истоковой и стоковой цепях триода, затвор которого подключен к источнику питания через высокоомный резистор. Представлены структурные схемы усилителя, позволяющие произвести качественный анализ неустойчивости. Произведено преобразование структурных схем в линейные графы, обоснованы условия их упрощения. Найдены передачи ветвей графов. При анализе усилителя искомыми характеристиками являлись неустойчивости коэффициента усиления, а также величин, определяющих режим питания триода.

Инженерный анализ простых усилителей в большинстве случаев не требует громоздких вычислений и может быть осуществлен "ручным" методом. Однако более продуктивным является "машинный" расчет. Расчет неустойчивости усилителя, а также всех прочих устройств, рассмотренных в пятой главе, проводился по разработанному алгоритму расчета усилительных цепей с помощью ЭВМ.

Анализ показал, что при коэффициенте усиления $10 \leq K \leq 50$ его неустойчивость в интервале температур от 20 до 70°C составляет около -3,1% на 10°C. Зависимость $\delta K = f(E_n)$ носит нелинейный характер. Например, при изменении E_n от 13,5 до 16В $\delta K = 0,56\%$, а при $E_n = 10,5$ В $\delta K = -5,06\%$. Ток стока не зависит от E_n , а напряжение сток-исток изменяется на величину ΔE_n . Экспериментальные данные о неустойчивости коэффициента усиления, а также тока стока и напряжения сток-исток практически совпали с расчетными.

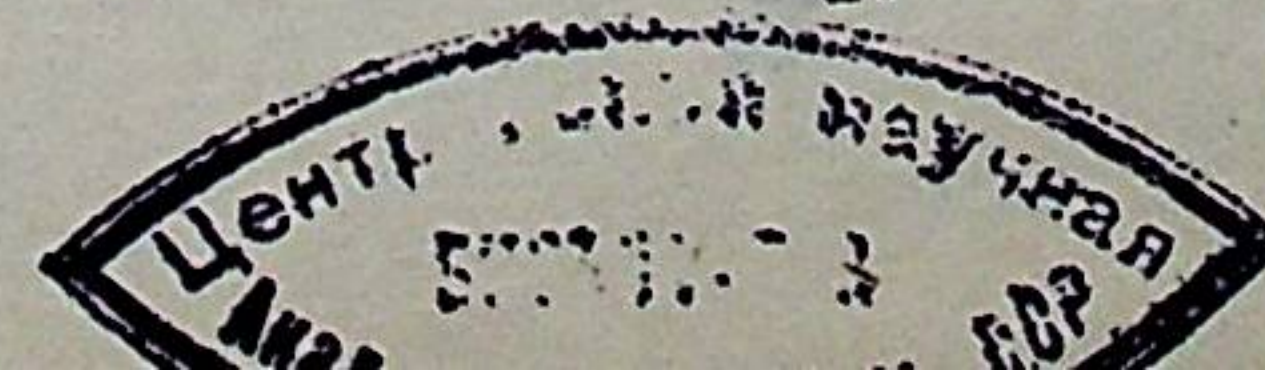
Исследована неустойчивость истокового повторителя, представляющего собой трехкаскадный усилитель, содержащий два полевых и один биполярный триоды, охваченный 100%-ной ООС. Повторитель обладает высоким входным (сотни мегом и более), малым выходным (десятки ом и менее) сопротивлением, близким к единице и достаточно стабильным коэффициентом передачи. Эти

свойства истокового повторителя отвечают требованиям реализации активных RC-фильтров. Исходя из этого, истоковый повторитель и предназначен для работы в звене активного RC-фильтра инфранизких частот. Конструктивно повторитель выполнен на бескорпусных триодах в виде интегральной микросхемы. Искомыми характеристиками повторителя являлись неустойчивости коэффициента передачи, а также величин, определяющих режим питания триодов.

Анализ показал, что при величине коэффициента $K = 0,995$ его неустойчивость в интервале температур от -20 до 80°C составляет около 0,05% на 10°C. Напряжение на всех триодах практически не изменяется, однако ток коллектора с ростом t увеличивается, а токи стоков уменьшаются. Изменение E_n от 6 В вызывает приращение коэффициента передачи на 0,1% при 8 В и его уменьшение на 0,16% при 4 В. При этом напряжение на входном ПТ остается без изменений, а на остальных триодах изменяется на величину ΔE_n . Найдены также зависимости токов через триоды от ΔE_n . Экспериментальная проверка полностью подтвердила расчетные неустойчивости как при изменении температуры, так и при изменении напряжения E_n .

Исследована неустойчивость ячейки активного RC-фильтра низких частот, вызванная изменением коэффициента передачи единичного усилителя при воздействии температуры и вариациях напряжения питания. При частоте среза 20 Гц температурная неустойчивость коэффициента передачи $K_\phi = 3,83$ и затухания фильтра $\alpha_\phi = -11,66$ дБ носит нелинейный характер и составляет в крайних точках температурного диапазона $\delta K_\phi = 7,57\%$ и $\delta \alpha_\phi = 5,5\%$ при -20°C, $\delta K_\phi = -8,08$ и $\delta \alpha_\phi = -6,26\%$ при 80°C. Изменение E_n от 6В приводит к неустойчивости $\delta K_\phi = -5,33\%$ и $\delta \alpha_\phi = -4,11\%$ при $E_n = 4$ В, $\delta K_\phi = 3,75\%$ и $\delta \alpha_\phi = 2,76\%$ при $E_n = 8$ В. Результаты экспериментального исследования неустойчивости активного RC-фильтра с достаточной степенью точности подтвердили расчетные данные.

В диссертации исследованы восемь схем истоковых повторителей. Проведен полный расчет их режима питания и характеристик по переменному току (коэффициентов передачи, входных и выходных сопротивлений). Экспериментальная проверка полностью подтвердила расчетные данные.



Наиболее перспективными представляются схемы, содержащие динамическую истоковую нагрузку, а также компенсацию стоковой проводимости входного ПТ непосредственно через вспомогательный ПТ. Отмеченные повторители на ПТ с р - п переходом обеспечивают входное сопротивление до 10^{12} Ом при $K \approx 0,9999$ и выходном сопротивлении единицы-десятки Ом. Полученные технические характеристики позволяют широко использовать истоковые повторители в качестве согласующих входных каскадов с высокоомными пьезоэлектрическими и емкостными инфранизкочастотными преобразователями, а также использовать в схемах инфранизкочастотных высокочастотных активных RC-фильтров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы:

1. Произведен анализ систем динамических параметров полевого триода, как четырехполюсника, в результате которого выбрана наиболее целесообразная система параметров, а именно - h_z -параметры в схеме включения триода с общим затвором.

2. Разработан метод измерения активных значений параметров $I + h_{21z}$ и h_{22z} в диапазоне низких частот. Без применения этого метода указанные параметры необходимо измерять на инфранизких частотах, что связано со значительными трудностями, обусловленными отсутствием отечественной инфранизкочастотной измерительной аппаратуры и большими затратами времени при измерении инфранизкочастотных сигналов.

3. Разработан метод анализа неустойчивости низкочастотных усилителей на полевых триодах с р - п переходом при изменении внешних условий. В его основу положен метод анализа неустойчивости усилительных цепей на биполярных транзисторах, что обеспечивает единство методов анализа цепей на полевых и биполярных транзисторах. Последнее удобно, так как полевые и биполярные транзисторы часто используются совместно в усилительных схемах.

4. Исследованы зависимости статических и динамических параметров триодов типов КП103, 2П103 и ТН-5 от температуры и режима питания. Указанные типы охватывают большинство полевых триодов с р - п переходом, выпускаемых отечественной промышленностью серийно. Полученные зависимости позволяют произвести

расчет параметров усилителей при изменении внешних факторов с использованием разработанного метода.

5. Выведены уравнения для тока стока I_c и напряжения на триоде $U_{c.и}$, описывающие зависимость режима питания полевого триода от его статических параметров, резисторов схемы и напряжения источника питания в обобщенной схеме включения. Найдены аналогичные уравнения для шести частных случаев включения полевого триода в усилителях. Полученные уравнения обеспечивают возможность расчета режима питания не только в номинальных условиях, но и с учетом изменений внешних факторов.

6. Разработанным методом произведен расчет неустойчивости ряда усилительных схем на полевых триодах при изменении температуры и напряжения источника питания. Экспериментальное исследование этих схем подтвердило достаточную точность и универсальность разработанного метода.

7. Разработана принципиальная схема установки для измерения h_z -параметров полевых триодов в диапазонах $I_c = 0,05 \div 6$ Ма и $U_{c.и} = 1 \div 14$ В, а также при изменении внешних условий. Установка обеспечивает измерение практически всех возможных значений h_z -параметров полевых триодов с р - п переходом. Она была использована при исследовании зависимостей h_z -параметров от температуры и режима питания.

Результаты диссертационной работы докладывались на XIV и XV областных научно-технических конференциях НТО им.А.С.Попова, г.Новосибирск (1971-1972 гг.), на научно-технической конференции молодых специалистов системы Госстандарта СССР, г.Москва (1972 г.), на Второй научно-технической конференции молодых метрологов СНИИМ, г.Новосибирск (1972 г.), на республиканской научно-технической конференции по средствам автоматизации и системам управления, г.Севастополь (1972 г.).

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гребнев В.В., Загорский Я.Т., Козляева И.Н. Усилитель на полевом триоде с ООС по току. - Измерительная техника, 1971, № 9.

2. Загорский Я.Т., Козляева И.Н., Марков В.А. Измерительные устройства переносной виброизмерительной аппаратуры. - Сб. Трудов СНИИМ "Измерения слабых магнитных и электрических полей в

широком частотном диапазоне", Новосибирск, 1971, вып.16.

3. Загорский Я.Т., Козляева И.Н. Метод анализа неустойчивости усилительных цепей на полевых триодах.- Автометрия, 1972, № 3.

4. Загорский Я.Т., Козляева И.Н., Логинова Т.И., Лаптев Ф.Д. Нормализованные зависимости динамических параметров полевых триодов типа КП103.- Информационно-справочный листок МЭП СССР, 1972, № 002138.

5. Загорский Я.Т., Козляева И.Н. Анализ динамических параметров полевых триодов. - Обзоры по электронной технике МЭП СССР, серия: Полупроводниковые приборы, ЦНИИ "Электроника", М., 1972, вып. 8(41).

6. Загорский Я.Т., Козляева И.Н. Основные функциональные связи в усилителях на полевых триодах. - Радиотехника, 1973, №7.

Табл. 1

h_3	Диапазоны изменения				$U_{с.н}$	I_c	t	$U_{с.н}$	$t, ^\circ C$	Диапазоны изменения				$U_{с.н}, В$												
	$1+h_{213}$ для $f=f_{н1}$	$1+h_{213}$	$1+h_{2130н}$	$1+h_{2130н}$						I_c, mA	$f_{н1}$	$f_{н2}$	$f_{н3}$		$l_{н1}$	$l_{н2}$	$l_{н3}$	$K_{н1}$	$K_{н2}$	$K_{н3}$	$K_{н4}$					
h_{113}	$h_{113н} \cdot (1 + a_n \cdot \Delta t)$	$h_{113н} \cdot (1 + f_n \cdot \Delta I_c)$	$h_{113н} \cdot (1 + r_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{113н} \cdot (1 + \beta_n \cdot \Delta t)$	$h_{113н} \cdot (1 + r_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{113н} \cdot (1 + f_n \cdot \Delta I_c)$	$h_{113н} \cdot (1 + a_n \cdot \Delta t)$	$h_{113н} \cdot (1 + r_n \cdot \Delta U_{с.н})$	-60 ÷ 130	0,1 ÷ 0,3	$f_{н1}$	0,3 ÷ 1,0	$f_{н2}$	0,1 ÷ 6,0	$l_{н1}$	0,1 ÷ 6,0	$l_{н2}$	0,1 ÷ 0,3	$K_{н1}$	0,3 ÷ 1,0	$K_{н2}$	1,0 ÷ 3,0	$K_{н3}$	3,0 ÷ 6,0	$K_{н4}$	$U_0 \div 10$
h_{123}	$h_{123н} \cdot (1 + c_n \cdot \Delta t)$	$h_{123н} \cdot (1 + l_n \cdot \Delta I_c)$	$h_{123н} \cdot (1 + z_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{123н} \cdot (1 + d_n \cdot \Delta t)$	$h_{123н} \cdot (1 + z_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{123н} \cdot (1 + l_n \cdot \Delta I_c)$	$h_{123н} \cdot (1 + c_n \cdot \Delta t)$	$h_{123н} \cdot (1 + z_n \cdot \Delta U_{с.н})$	-60 ÷ 130	0,1 ÷ 0,3	$l_{н1}$	0,1 ÷ 1,0	$l_{н2}$	0,1 ÷ 1,0	$l_{н2}$	0,1 ÷ 0,3	$K_{н1}$	0,1 ÷ 0,3	$K_{н1}$	0,3 ÷ 1,0	$K_{н2}$	1,0 ÷ 3,0	$K_{н3}$	3,0 ÷ 6,0	$K_{н4}$	$U_0 \div 10$
$1+h_{213}$ для $f=f_{н1}$	$h_{223н} \cdot (1 + \delta_n \cdot \Delta t)$	$(1+h_{213н}) \cdot (1 + \beta_n \cdot \Delta I_c)$	$(1+h_{213н}) \cdot (1 + p_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{223н} \cdot (1 + a_n \cdot \Delta t)$	$h_{223н} \cdot (1 + g_n \cdot \Delta U_{с.н})$	$(1+h_{213н}) \cdot (1 + K_n \cdot \Delta I_c)$	$h_{223н} \cdot (1 + \delta_n \cdot \Delta t)$	$h_{223н} \cdot (1 + g_n \cdot \Delta U_{с.н})$	0 ÷ 80	0,1 ÷ 0,3	$K_{н1}$	0,3 ÷ 1,0	$K_{н2}$	1,0 ÷ 3,0	$K_{н3}$	3,0 ÷ 6,0	$K_{н4}$	0,1 ÷ 0,8	I_0	0,1 ÷ 0,3	$K_{он1}$	0,3 ÷ 1,0	$K_{он2}$	1,0 ÷ 3,0	$K_{он3}$	$U_0 \div 10$
$1+h_{213}$ для $f=f_{н1}$	$h_{223н} \cdot (1 + \delta_{он} \cdot \Delta t)$	$(1+h_{213он}) \cdot (1 + K_{он} \cdot \Delta I_c)$	$(1+h_{213он}) \cdot (1 + p_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{223он} \cdot (1 + \delta_{он} \cdot \Delta t)$	$h_{223он} \cdot (1 + g_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	$(1+h_{213он}) \cdot (1 + K_{он} \cdot \Delta I_c)$	$h_{223он} \cdot (1 + \delta_{он} \cdot \Delta t)$	$h_{223он} \cdot (1 + g_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	0 ÷ 50	0,1 ÷ 0,3	$K_{он1}$	0,3 ÷ 1,0	$K_{он2}$	1,0 ÷ 3,0	$K_{он3}$	3,0 ÷ 6,0	$K_{он4}$	0,1 ÷ 0,3	$m_{он1}$	0,1 ÷ 0,3	$m_{он1}$	0,3 ÷ 1,0	$m_{он2}$	1,0 ÷ 3,0	$m_{он3}$	$U_0 \div 10$
$h_{223о}$	$h_{223он} \cdot (1 + d_{он} \cdot \Delta t)$	$h_{223он} \cdot (1 + m_{он} \cdot \Delta I_c)$	$h_{223он} \cdot (1 + q_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{223он} \cdot (1 + d_{он} \cdot \Delta t)$	$h_{223он} \cdot (1 + q_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	$h_{223он} \cdot (1 + m_{он} \cdot \Delta I_c)$	$h_{223он} \cdot (1 + d_{он} \cdot \Delta t)$	$h_{223он} \cdot (1 + q_{он} \cdot \Delta U_{с.н})$	0 ÷ 50	0,1 ÷ 0,3	$m_{он1}$	0,1 ÷ 3,0	$m_{он2}$	0,1 ÷ 3,0	$m_{он1}$	3,0 ÷ 6,0	$m_{он2}$	0,1 ÷ 3,0	$g_{он1}$	0,1 ÷ 3,0	$g_{он1}$	0,3 ÷ 1,0	$g_{он2}$	1,0 ÷ 3,0	$g_{он3}$	$U_0 \div 10$
									50 ÷ 80	3,0 ÷ 6,0	$m_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$m_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$m_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$m_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$g_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$g_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$g_{он2}$	3,0 ÷ 6,0	$g_{он2}$	$U_0 \div 10$

Табл. 2

Параметр	Коэффициенты пропорциональности		
	1/°C	1/мА	1/В
h_{113}	$\alpha_n = 0,0038 \pm 0,0014$	$f_{n1} = -(6,5 \pm 1,25)$ $f_{n2} = -(0,838 \mp 0,043)$ $f_{n3} = f_{n2} + (0,81 \mp 0,044) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$	$n_n = 0$
h_{123}	$C_n = 0,0032 \pm 0,002$	$e_{n1} = 0,543 \pm 0,105$ $e_{n2} = 0,8 \pm 0,026$	$z_{n1} = z_{n2} - (0,58 \pm 0,215) \cdot \frac{\Delta U_{c,n}}{\Delta U_{c,n}}$ $z_{n2} = -(0,2 \pm 0,05)$ $z_{n3} = -(0,05 \pm 0,005)$
$1 + h_{213}$	$\beta_n = 0,0036 \pm 0,0015$	$K_{n1} = -(5,35 \pm 1,43)$ $K_{n2} = -(0,6 \mp 0,09)$ $K_{n3} = K_{n2} + (0,52 \mp 0,107) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$ $K_{n4} = K_{n3} + (0,073 \pm 0,007) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$	$P_n = \pm 0,0014$
h_{223}	$d_n = 0,0015 \pm 0,001$	$m_n = -(0,03 \pm 0,02)$	$g_n = -(0,025 \pm 0,012)$
$1 + h_{2130}$	$\beta_{on1} = 0,123 \pm 0,085$ $\beta_{on2} = \beta_{on1} + (0,39 \pm 0,27) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t}$	$K_{on1} = -(3,8 \pm 2,8)$ $K_{on2} = -(0,314 \mp 0,072)$ $K_{on3} = K_{on2} + (0,223 \mp 0,036) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$ $K_{on4} = K_{on3} + (0,243 \pm 0,047) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$	$P_{on1} = \pm 0,0172$ $P_{on2} = 0,006 \pm 0,022$
h_{2230}	$d_{on1} = 0,033 - 0,033$ $d_{on2} = d_{on1} + (0,093 - 0,093) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t}$	$m_{on1} = 0,0875 \pm 0,167$ $m_{on2} = m_{on1} + (0,197 \pm 0,216) \cdot \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c}$	$g_{on1} = \pm 0,0365$ $g_{on2} = 0,0212 \pm 0,0612$

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА
АНАЛИЗА НЕСТАБИЛЬНОСТИ НИЗКОЧАС-
ТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ПОЛЕВЫХ
ТРИОДАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНЕШНИХ
УСЛОВИЙ.

Автор И.Н.Козляева

Подписано в печать 1.8.73 г. МНО1061.
Формат бумаги 62x84/16, усл. печ. л. 1,4
Тираж 150 экз. Бесплатно.
Отпечатано на роталпринте НЭМС.З.№515.