

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

РСФСР

НОВОСИБИРСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Орехов Александр Павлович

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАЛОДРЕЙФОВЫХ
ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМИ СВЯЗЯМИ

Специальности:

05.12.08 - "Электронная техника и приборы"

05.11.05 - "Приборы измерения электрических
и магнитных величин"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 1975

Работа выполнена в Новосибирском электротехническом институте.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук Д.Е.Полонников
- кандидат технических наук В.А.Рогачевский.

Ведущее предприятие -

указано в решении Ученого Совета.

Автореферат рассмотрен " " февраля 1975 г.

Защита диссертации состоялась 6 марта 1975 г.
на заседании Ученого Совета по присуждению ученых степеней
Новосибирского электротехнического института.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭТИ.

Прошим Вас принять участие в работе Совета или прислать
свой отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу:

630007, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 2С, ИЭТИ

Ученому секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук,
доцент

В.Н.Гулько

Гос. публичная
научно-техническая
библиотека СССР
ЭКЗЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНИКОГО ЗАЛА

Ар 75-64290

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАТ УГЫ

Широкое использование операционных усилителей (ОУ) в самых различных областях науки и техники, и прежде всего, в качестве основного элемента при построении решающих усилителей (РУ) для устройств и систем автоматики, измерительной и вычислительной техники и других отраслей радиоэлектроники объясняется их большими функциональными возможностями. Переход к интегральной технологии производства элементов радиоэлектронной аппаратуры определил целый ряд технических и эксплуатационных преимуществ усилителей постоянного тока с непосредственными связями (УПТ-НС) перед усилителями с преобразованием сигнала.

Современные интегральные схемы ОУ, однако, не удовлетворяют в полной мере всем требованиям, предъявляемым к операционным усилителям. Высокий дрейф (в полупроводниковых схемах в основном температурный) делает УПТ-НС не пригодными в случаях построения РУ высокой точности, а значительный входной ток охем, выполненных на биполярных транзисторах, - для построения электрометрических усилителей (ЭМУ).

Одно из главных направлений новых разработок ОУ - применение во входных каскадах полевых транзисторов, позволяющих существенно повысить входное сопротивление усилителя по сравнению со схемами на биполярных транзисторах. В ЭМУ высокой чувствительности по току до сих пор используются электрометрические лампы, лишь в последние годы стали применять активные элементы, выполненные на базе МДП - структур.

Исследования и разработки операционных и решающих усилителей посвящено большое число работ как теоретического, так и экспериментального характера. В создание и развитие теории решающих усилителей большой вклад внесли советские ученые В.Д.Авербух, В.А.Иващенко, Б.Я.Коган, Д.Е.Полонников и др. Вопросы построения и применения электрометрических усилителей с непосредственными связями глубоко разработаны А.В.Паршиным, Н.Н.Рогачевой, М.Е.Слушким, Л.Б.Устиновой и др. В ряде работ А.М.Ильковича широко освещены вопросы создания электрометрической аппаратуры повышенной точности, которая может быть использована для проверки ЭМУ.

Вместе с тем отдельные вопросы, связанные, в частности, с созданием малодрейфовых УПТ с непосредственными связями, в особенности применительно к измерению малых токов автору настоящей работы представляются недостаточно разработанными и весьма актуальными. До сих пор, например, при создании ОУ с очень низким дрейфом разработчики идут по пути построения схем с преобразованием входного сигнала, хотя возможности схем без преобразования сигнала до конца не исчерпаны.

Цель работы — установить каковы минимальные значения температурного и временного дрейфа, реально достижимые в схемах УПТ с непосредственными связями, как специальными схемными решениями, пригодными для массового применения, можно существенно снизить дрейф уже известных типов ОУ, а также каковы предельные значения чувствительности и точности измерения сверхмалых токов можно ожидать от ЭМУ без преобразования сигнала.

Научная новизна. Разработана методика и проведены расчеты дрейфа различных типов электрометрических каскадов, определены его предельные значения. Проанализированы некоторые вопросы термокомпенсации и термостатирования усилителей, показана возможность снижения температурного дрейфа УПТ-ИС до уровня значений лучших разработок схем с преобразованием сигнала. Показаны преимущества конструкции гибридной интегральной схемы, содержащей металлическую подложку, что позволяет повысить стабильность температурного дрейфа и снизить уровень сверхвысокочастотных флуктуаций. Проведен анализ погрешности измерений тока и дана оценка чувствительности по току ЭМУ, построенных по схеме с глубокой параллельной отрицательной обратной связью.

Практическая ценность. Предложена схема регулируемого термокомпенсирующего элемента, пригодная для микросхемного исполнения. Разработана микросхема активного термостатирующего элемента, изготовлены экспериментальные образцы. Применение рассмотренных в работе специальных методов снижения температурного дрейфа позволяет достичь значений его порядка 1 мкВ/К даже без специального подбора полевых транзисторов в пары по

температурному дрейфу и отказаться от трудоёмкой методики подбора парных полевых транзисторов. В электрометрических усилителях, разработанных для измерения тока в широком диапазоне с линейной шкалой выходного напряжения и приведением его к унифицированной величине $1 + 10$ В, удобной для регистрации цифровыми вольтметрами и вводе данных для обработки на ЭВМ, достигнута точность измерений в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-13} А выше гарантированных значений её в серийно выпускаемых ЭМУ.

Реализация в промышленности. Разработанные для нужд микроэлектроники электрометрические усилители внедрены в производство полевых транзисторов и гибридных интегральных схем и успешно работают в течение пяти лет на ряде предприятий МЭП СССР. Один из электрометров экспонировался на ВДНХ СССР в 1971 году и был удостоен серебряной медали. Специальные схемные решения по снижению температурного дрейфа микросхем операционных усилителей, использующих полевые транзисторы на входе, внедряются в настоящее время в производство гибридных интегральных схем.

Апробация работы. Основные результаты реферируемой диссертационной работы докладывались на:

Всесоюзном научно-техническом совещании по радиоэлектронным методам измерений электрических напряжений и омических сопротивлений (г.Таллин, июнь 1964 г.).

Объединённом научном семинаре кафедр НЭТИ "Электронные приборы", "Промышленная электроника" и "Информационно-измерительная техника" (г.Новосибирск, декабрь 1974 г.).

Научном семинаре лаборатории "Приборы для измерения малых токов" ИИИШаучприбор (г.Ленинград, январь 1975 г.).

Публикации. По результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 12 печатных работ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения и содержит 195 страниц машинописного текста, в том числе 61 рисунок, 12 таблиц, 74 наименования в списке литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Дрейф выходных каскадов УИТ

Первая глава посвящена расчету дрейфа напряжения смещения основных типов электрометрических входных каскадов. Расчет проводится в обозначениях применительно к ламповым схемам, но в равной мере распространяется и на каскады, построенные на полевых транзисторах; при этом для полупроводниковых схем должны быть опущены члены, содержащие дрейф напряжения накала. Дифференциальные параметры активных элементов — крутизна, внутреннее сопротивление, статический коэффициент усиления и крутизна анодно-накальной характеристики — обозначены, как это принято в лампах, через S , R_L , μ и S_H соответственно. Расчет дрейфа однотактных каскадов (рис. I) выполнен решением систем диф-

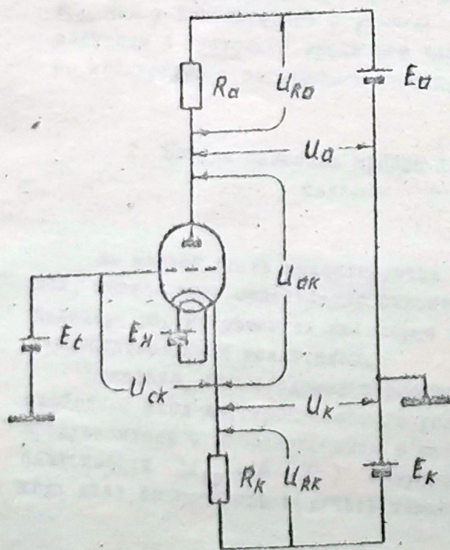


Рис. I

ференциальных уравнений в явном виде для дрейфа (дифференциала) выходного напряжения, определяемого дрейфом независимых переменных, стоящих под знаком дифференциала: E_n , E_c , E_a , E_k , R_a , R_k и I_0 вместо R_a или R_k при использовании источника тока в качестве нагрузки. Эти системы получены дифференцированием уравнения анодного тока лампы, записанного в общем виде, и линейных уравнений, состав-

ленных согласно закону Кирхгофа для анодно-катодной и сеточно-катодной цепей каскада и закону Ома для участков с резисторной нагрузкой в цепях анода и катода.

Расчетные выражения для дрейфа выходного напряжения соответствуют общему виду

$$dU_{\text{вых}} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial E_n} dE_n + \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial E_a} dE_a + \dots + \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial R_k} dR_k.$$

Частные производные по независимым переменным из приведенного выше ряда, названные коэффициентами дрейфа выходного напряжения по соответствующему дрейфовому параметру, определенные для различных типов однотактных каскадов и их вариантов, сведены в таблицы. В таблицах же представлены коэффициенты дрейфа выходного напряжения, приведенного ко входу, полученные делением вышеупомянутых коэффициентов на модуль коэффициента усиления каскада.

Дрейф мостовых (дифференциальных по входу и выходу) схем, состоящих из двух одинаковых однотактных каскадов, вызывается неидентичностью параметров элементов симметричных плеч: I_a , S_H , R_L , μ , R_a и R_k , и коэффициенты дрейфа найдены дифференцированием коэффициентов дрейфа выходного напряжения однотактных каскадов по этим параметрам.

Расчетные выражения для коэффициентов дрейфа дифференциальных каскадов по отдельным дрейфовым параметрам схемы, условно обозначенным через P , соответствуют общему виду

$$\Delta \left(\frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial P} \right) = \frac{\partial \left(\frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial P} \right)}{\partial I_a} \Delta I_a + \frac{\partial \left(\frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial P} \right)}{\partial S_H} \Delta S_H + \dots$$

Расчет коэффициентов дрейфа проведем к: для каскадов с независимыми плечами, так и для катодно-связанных каскадов с общим резистором (или источником тока) в цепи катодов. Результаты расчетов коэффициентов дрейфа в приведенном ко входу виде сведены в таблицы по каждому дрейфовому параметру в отдельности.

Анализ расчетных выражений для приведенных коэффициентов дрейфа, рассматриваемых в зависимости от температуры или во времени, позволил определить предельные значения температурного и временного дрейфа входных каскадов УПТ. Показано, что существенной разницы в температурном дрейфе дифференциальных каскадов перед однотактными ист, т.к. дрейф параметров элементов симметричных плеч может быть противоположных знаков, и в худшем случае это может даже удвоить дрейф такого каскада против однотактного.

Показано также, что дрейф каскадов, определяемый дрейфом элементов пассивной части, выполненной на прецизионных резисторах, составляет в среднем единицы мкВ / К и единицы мкВ/сутки. При массовом производстве гибридных интегральных схем, использующих резисторы, выполненные по тонкопленочной технологии, предельные значения дрейфа примерно на порядок хуже указанных.

Применение в качестве активных элементов двоярных полевых транзисторов с $p-n$ - переходом несколько ухудшает температурный дрейф каскада против названных выше цифр. Существенно возрастает температурный и временной дрейф в случае использования ИДП - транзисторов, хотя из-за много меньшего входного тока, чем у транзисторов с $p-n$ - переходом, ИДП - активные элементы в настоящее время все чаще применяются в ЭМУ, серьезно конкурируя с электрометрическими лампами.

2. Методы снижения дрейфа УПТ с непосредственными связями

Во второй главе анализируются специальные схемные решения, позволяющие существенно снизить температурный дрейф усилителя, - рассматриваются некоторые вопросы термокомпенсации и термостабилизации усилителей.

Показано, что введение термокомпенсирующего элемента через свободный вход дифференциального усилителя или внутрь УПТ после предусилителя с использованием в качестве термозадающей функции зависимости $U_{np} = f(T)$ полупроводникового $p-n$ - перехода дает возможность получить температурный дрейф порядка

1 мкВ / К даже без специального подбора полевых транзисторов в пары по температурному дрейфу.

Проанализированы вопросы точности установки значений термозадающей функции. Предложена схема (рис. 2) регулируемого

термокомпенсирующего элемента с двумя декадами ступенчатой регулировки (рис. 3) с дискретностью в 10 и 1 мкВ / К, пригодная для микросхемного исполнения.

Рациональным способом компенсации температурного дрейфа является самокомпенсация токовой разбалансировкой входного каскада на парных полевых транзисторах (рис. 4). В этом спосо-

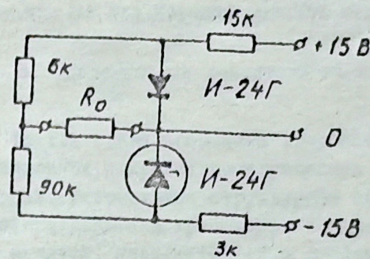


Рис. 2
каскада на парных полевых транзисторах (рис. 4). В этом спосо-

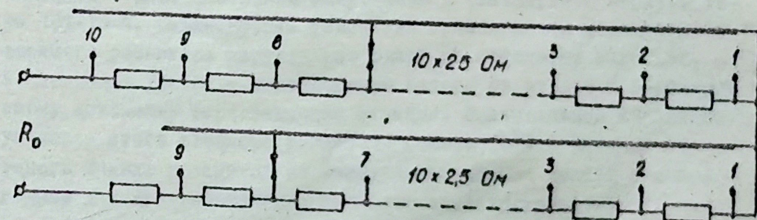


Рис. 3

бе изменение напряжения смещения затвор-исток на 10 мВ, что соответствует приблизительно 1 - процентному изменению тока стока, вызывает изменение температурного дрейфа транзистора в среднем на 50 мкВ / К. Разбаланс выходной диагонали каскада устраняется регулирующим потенциометром в цепи питания стоков. Этой же регулировкой можно производить и установку нуля усилителя в целом.

Предельные значения дрейфа термокомпенсированных УПТ определяются рядом факторов, главным из которых в производстве

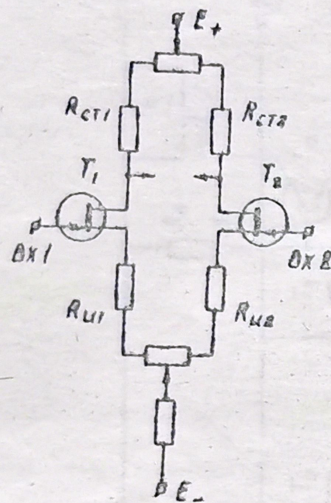


Рис. 4

гибридных интегральных схем является наличие значительных градиентов температуры по поверхности микросхемы вследствие повышенного теплового сопротивления между элементами схемы при общепринятом в технологии производства гибридных интегральных схем способе размещения элементов на ситалловой пластине. Возможное использование теплопроводящих керамических подложек на основе окиси бериллия в отечественной промышленности широкого распространения не получило из-за высокой стоимости таких подложек и токсичности их производства.

В реферированной работе проанализированы особенности конструкции гибридных интег-

ральных схем, заключающиеся в размещении навесных элементов на металлической, покрытой изоляционной пленкой пластине. Гибридные интегральные схемы, выполненные таким образом, отличаются повышенной стабильностью температурного дрейфа, что позволяет применением метода термокомпенсации добиться значений температурного дрейфа менее $1 \text{ мВ} / \text{К}$ и снизить уровень сверхвысокочастотных флуктуаций транзисторов и УПТ в целом.

Рассмотрены некоторые вопросы конструирования микротермостатов для термостатирования отдельных микросхем или групп их, сконструированных в небольшой узел. Разработан миниатюрный экономичный активный термостатирующий элемент, выполненный в виде гибридной интегральной схемы размерами $4 \times 16 \times 30 \text{ мм}$. Время разогрева собственно микрорелемента при пусковой мощности $2,5 \text{ Вт}$ оценивается простой формулой $t \approx 2 \Delta T$ и составляет примерно 200 с при нагревании на 100 К .

Достигнут коэффициент демпфирования температуры между окружающей средой и термостатируемым объемом порядка 300 по весьма простой и легко воспроизводимой схеме, что позволяет более чем на два порядка снизить температурный дрейф УПТ.

3. Операционные усилители на полевых транзисторах

Третья глава посвящена вопросам разработки малодрейфовых операционных полупроводниковых усилителей на полевых транзисторах. Рассмотрена структурная схема операционного усилителя, сформулированы требования к каждой из трех составных частей: входной, промежуточной и оконечной. Во всех разработанных типах входных усилителей применен двоярный полевой триод типа КПС-104.

Входной усилитель, схема которого показана на рис. 5, выполнен в виде отдельной микросхемы в стандартном корпусе типа И51-И5-4. Баланировка усилителя производится подключением внешнего резистора параллельно одной из истоковых нагрузок, а компенсация дрейфа — подключением одного из входов к регулируемому источнику термостабилизированной функции. Значительный коэффициент усиления этого входного усилителя (около 10^3) и наличие низкого омного выхода с защитой от коротких замыканий делают его пригодным для использования в качестве самостоятельного ОУ.

Схема универсального промежуточного усилителя приведена на рис. 6. Использование в этой схеме бескорпусных транзисторов типов КТ360 и КТ332 и балластных стабилизаторов типа И-24 делает ее пригодной для микросхемного исполнения. Схема данного промежуточного усилителя отличается хорошей широкополосностью, достаточным усилением и может быть состыкована с любым типом входной части ОУ. Промежуточный усилитель, выполненный по этой же схеме на высоковольтных корпусных активных элементах $T_5 + T_6$ типа КТ604Б при питании выходной части его от трехфазного источника напряжением плюс и минус 130 В , разработан для проведения эксперимента по обработке системы автоматической подстройки частоты газового лазера с высокой стабильностью длины волны мощного хроматического излучения; максимальной дифференциальное входное напряжение ОУ составляло $\pm 200 \text{ В}$.

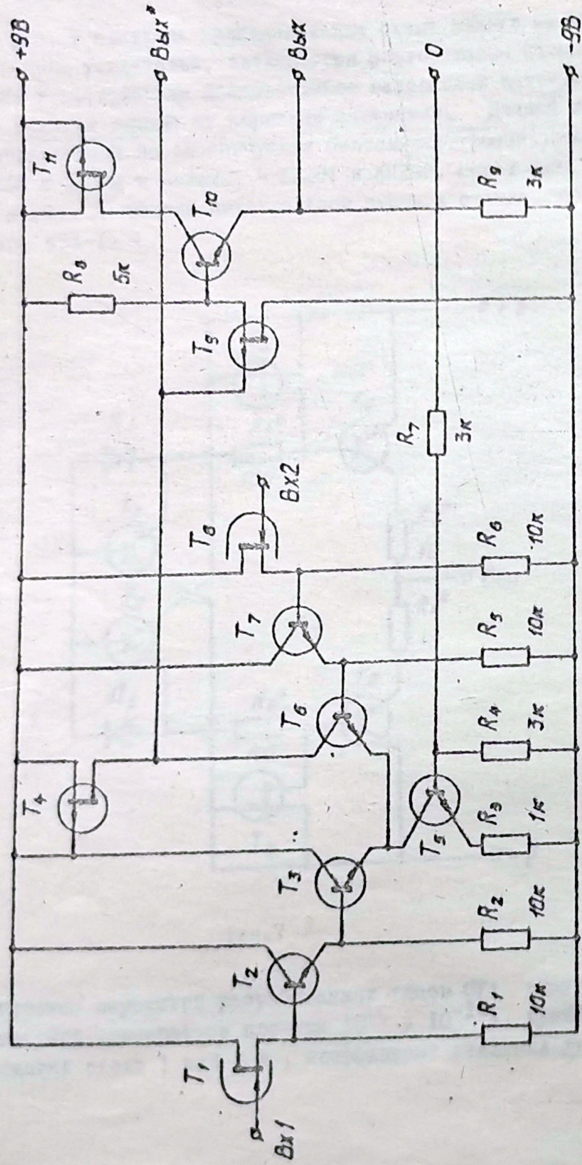


FIG. 5

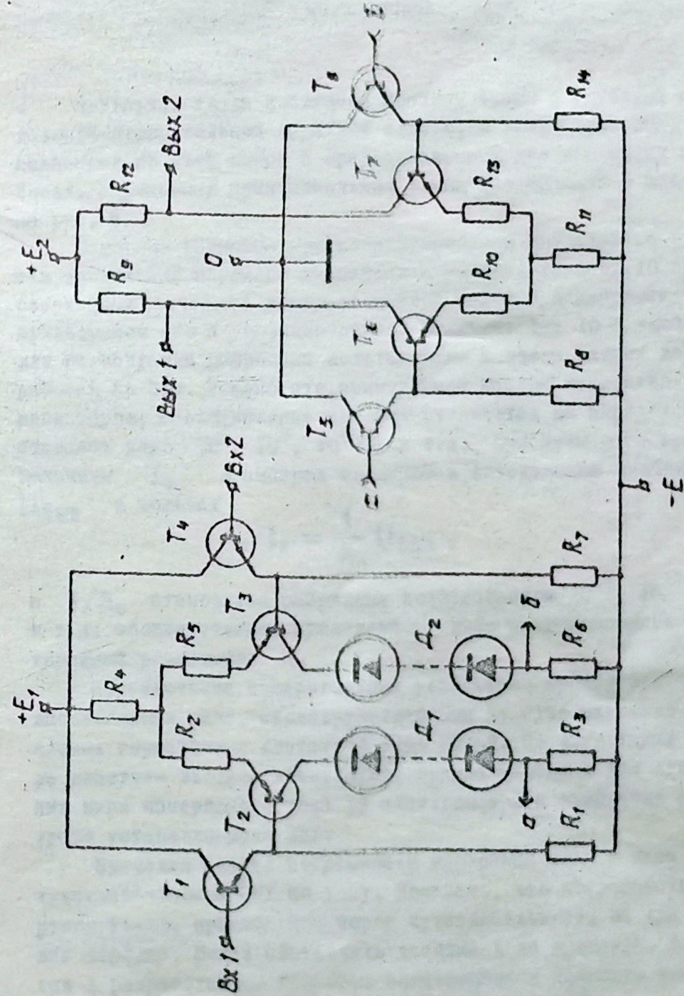


FIG. 6

На рис. 7 показана принципиальная схема одного из вариантов оконечных усилителей, являющегося повторителем напряжения с высоким коэффициентом использования напряжений источников питания и задитой выхода от коротких замыканий. Данный повторитель, построенный на бескорпусных биполярных транзисторах типов КТ360 и КТ332 и полевых - КП201 и КП202, может быть выполнен в виде гибридной интегральной схемы в стандартном корпусе типа И51-И5-4.

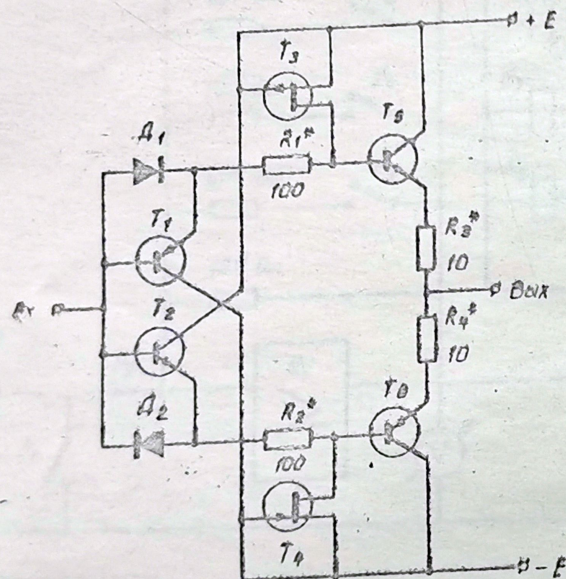


Рис. 7

Основные параметры разработанных типов ОУ: входной ток при комнатной температуре порядка $10^{-5} + 10^{-11}$ А, дрейф напряжения смещения около 1 мВ / К, коэффициент усиления до 10^6 .

4. Электрометрические усилители для измерения малых токов

Четвертая глава посвящена анализу схемы с глубокой параллельной отрицательной обратной связью, и разработке ЭМУ, выполненных по этой схеме и предназначенных для измерения малых токов. Упрощенная принципиальная схема электрометров показана на рис. 8.

Основное внимание при конструировании ЭМУ уделено вопросам достижения широкого диапазона измерения тока от 10^{-5} А до сверхмалых значений с линейной шкалой выходного напряжения и приведением его к унифицированной величине $1 + 10$ В, удобной для регистрации цифровыми вольтметрами и ввода данных для обработки на ЭВМ. Решено это применением набора измерительных резисторов, сопротивление которых отличается на порядок и составляет ряд: 10^6 , 10^7 , 10^8 Ом и т.д. При этом регистрация величины I_x в амперах сводится к определению значения $U_{\text{Вых}}$ в вольтах

$$I_x = \frac{1}{R_n} U_{\text{Вых}},$$

а $1/R_n$ становится разрядным коэффициентом 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} и т.д. соответственно приведенному выше ряду номиналов сопротивлений резисторов R_n .

Переключение измерительных резисторов производится сверхвысокочастотными реле, сконструированными на базе магнитно-управляемых герметичных контактов типа КЭМ-2. Из двух таких же реле выполнен входной коммутатор, предназначенный для отключения цепи измеряемого тока от электрометра и замыкания ее на время установки нуля ЭМУ.

Проведен анализ погрешности измерений тока и дана оценка чувствительности ЭМУ по току. Показано, что погрешность измерения токов, превышающих порог чувствительности на три или более порядка, может составлять десятые доли процента. Достигнутая в разработанных ламповых электрометрах точность измерений не хуже 1% в диапазоне токов от 10^{-5} до 10^{-13} А.

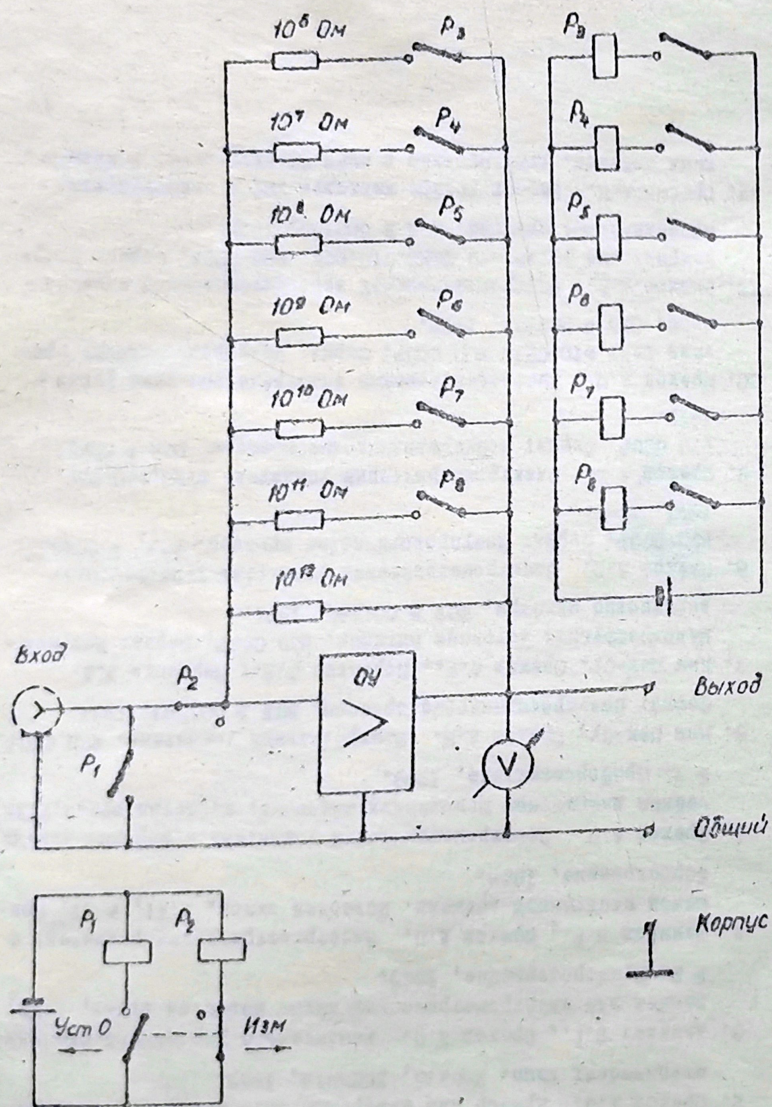


Рис. 8

На рис. 9 показаны входные каскады - электрометров, построенные на электрометрическом пентоде и МДП-триоде с каналом n -типа.

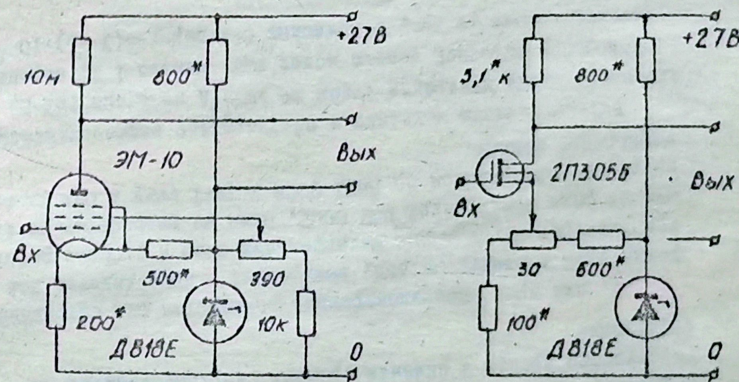


Рис. 9

В транзисторном варианте входного каскада произведена простая замена электрометрической лампы полевым триодом, а бывшая накальная цепь использована для смещения истока и балансировки (установки нуля) каскада или усилителя в целом. В остальных схемах обоих типов электрометров практически одинаковы.

Транзисторный входной каскад ЭМУ более чем на три порядка широкополоснее лампового, что создает определенные преимущества при построении быстродействующих измерителей тока; постоянная времени на отдельных поддиапазонах доведена до десятков и даже единиц микросекунд.

Чувствительность по току транзисторных ЭМУ составляет $10^{-17} + 10^{-15}$ А (в зависимости от значения тока затвора использованного во входном каскаде полевого триода), лучших ламповых экземпляров ЭМУ - $(3 + 5) \cdot 10^{-17}$ А.

В ы в о д ы

Основные результаты реферируемой работы заключаются в следующем:

1. Расчеты дрейфа отдельных типов каскадов показали, что в лучшем случае температурный и временной дрейф УПТ-НС может составлять значения порядка единиц мкВ / К и мкВ/сутки соответственно.

2. Применение рассмотренных в работе методов термокомпенсации и термостабилизации операционных усилителей позволяет достичь значений температурного дрейфа порядка 1 мкВ / К даже без подбора полевых транзисторов в пары по температурному дрейфу.

3. Термостатирование термокомпенсированных УПТ даёт возможность снизить температурный дрейф до 0,01 мкВ / К, то есть до уровня значений лучших разработок схем с преобразованием сигнала.

4. Конструкция гибридной интегральной схемы, в которой активные элементы размещены на металлической теплопроводящей подложке, позволяет значительно повысить стабильность температурного дрейфа и снизить уровень сверхнизкочастотных флуктуаций.

5. Для нужд микроэлектроники разработан ряд операционных усилителей и электрометров, внедренных в производство полных транзисторов и гибридных интегральных схем и успешно работающих на ряде предприятий МЭП СССР. Один из разработанных электрометров экспонировался на ВДНХ СССР в 1971 году и был удостоен серебряной медали.

6. Теоретически показано и подтверждено экспериментально, что погрешность измерения токов до 10^{-13} А по схеме УПТ-НС с параллельной обратной связью может быть меньше 1%; пороговая чувствительность по току в ламповых ВМУ порядка $(3+5) \cdot 10^{-17}$ А.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Орехов А.П. Электрометрические усилители. Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании по радиоэлектронным методам измерений электрических напряжений и омических сопротивлений.
2. Орехов А.П. Прибор для измерения светочных токов электрометрических ламп. Москва, ГСОИИТИ, 1965.
3. Данилов В.Г., Орехов А.П. Усилитель с упрощенной стабилизацией для электрометрических ламп. Известия вузов, т. УЮ, № 2, Приборостроение, 1965.
4. Данилов В.Г., Орехов А.П. Электрометрический усилитель с малой постоянной времени. Известия вузов, т. XI, № II, Приборостроение, 1968.
5. Орехов А.П. Электрометрический усилитель с широким динамическим диапазоном игнорированных значений. Известия вузов, т. XII, № I, Приборостроение, 1969.
6. Ким Пек-Су, Орехов А.П. Измерительный усилитель. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ № 001593, 1971.
7. Ким Пек-Су, Орехов А.П., Порватов О.П., Янушенко В.Ф. Малодрайбуемый источник питания. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ № 001594, 1971.
8. Орехов А.П. Электрометрический усилитель ТМЗ.540.015. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ, № 001595, 1971.
9. Орехов А.П. Электрометрический усилитель ТМЗ.410.020. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ № 002134, 1972.
10. Орехов А.П. Быстродействующий электрометрический усилитель ТМЗ.410.021. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ № 002133, 1972.
11. Орехов А.П. Быстродействующий широкодиапазонный электрометрический усилитель ТМЗ.410.024. МЭП СССР, Серия: Полупроводниковые приборы, ИСЛ № 002135, 1972.
12. Орехов А.П. Расчет дрейфа каскадов УПТ с непосредственными связями. Депонировано в ЦНИИ "Электроника" № 3006/74.