

На правах рукописи

НОКЕЛЬ Вальдер Павлович

УДК 621.396.6.001.57:621.039.66

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ
И ПОВЫШЕНИЕ ИХ СТАБИЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГИПЕРМОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
вычислительной техники
и систем управления

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

78 28.276

Работа выполнена в Одесском Государственном политехническом университете

ЛНБ України ім. В. Стефаника
00810614 (К)



Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Николаенко В. М.

Официальные оппоненты
доктор технических наук,
профессор

Парасочкин В. А.

кандидат технических наук,
доцент

Сукачев Э. А.

Ведущая организация - НИИ "Шгорн", г.Одесса.

Защита диссертации состоится "19" ноября 1993 г. в 14.00 час.
на заседании специализированного Совета К.068.19.04 Одесского
Государственного политехнического университета по адресу:
270044, г.Одесса, проспект Шевченко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГПУ.

Автореферат разослан "18" октября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
к. т. н., с. н. с.

В. И. Капинос

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Поиски путей решения проблемы управляемого термоядерного синтеза и космические исследования - две самые известные и значительные причины интенсивных разработок по созданию методов и устройств контроля параметров плазмы (УКПП).

В комплексных исследованиях космического пространства особое место занимают исследования ионосферы Земли. Они идут по двум направлениям. Это пассивные и активные (управляемые) эксперименты. Последние проводятся с борта летательных аппаратов (спутников, ракет, высотных самолетов-лабораторий) путем инъекции в окружающее пространство электронных, ионных пучков, нейтрального газа, искусственной плазмы, излучения электромагнитной энергии и т. д. Приоритетным в указанных экспериментах является контроль электронной температуры и концентрации плазмы поскольку они являются базовыми в системах управления (СУ) экспериментом (работой инжекторов заряженных частиц, маршевых двигателей и т. п.).

Теория датчиков параметров плазмы (ДПП) сложна и ее разработка далека еще до своего удовлетворительного завершения. Отсюда вытекает, что методы обработки характеристик ДПП носят, в известной мере, приближенный характер, так что погрешность контроля параметров плазмы зависит от погрешностей, заложенных в моделях ДПП. Наиболее существенный вклад в эту погрешность вносит, во-первых, ионный ток, а, во-вторых, емкость двойного слоя, образующегося у электродов ДПП, погруженных в плазму. Удовлетворительный учет ионного тока требует больших значений анализирующих воздействий, которые могут привести к нарушению физических процессов в плазме и росту времени анализа характеристик ДПП. Последнее приводит к дополнительным пространственно-временным погрешностям контроля параметров плазмы. Для уменьшения влияния емкости двойного слоя обычно снижают частоту анализирующих воздействий, что также влечет за собой упомянутые последствия.

Поэтому первой актуальной задачей является разработка моделей ДПП при помощи специального математического аппарата (гипермоделирования), а второй - создание на их основе методов контроля параметров плазмы, учитывающих рассмотренные особенности ДПП.

Результаты контроля параметров плазмы содержат в себе, кроме погрешностей используемых методов, еще и аппаратные погрешности. Дело в том, что УКПП устанавливаются на открытых платформах летательных аппаратов под тепловыми шубами и функционируют при значи-

тельных перепадах температуры окружающего пространства, приводящих к нестабильности параметров УКПП и снижению эффективности СУ.

Таким образом, третьей актуальной задачей является повышение температурной устойчивости УКПП, решение которой в рамках традиционных методов представляется малозффективным. Это связано с громоздкостью современных моделей электронных устройств, затруднениями в учете в них влияния температуры, нелинейностей характеристик, начальных условий и формы воздействий, что приводит к значительным погрешностям в процессе проектирования УКПП.

Тематика исследований, проведенных в диссертации, определялась в соответствии с приказом Минвуза СССР N 779 от 01.07.82г. и была включена в научно-техническую программу на 1985-90 годы О. 80.03 (Приложение N 78 к Постановлению ГК СССР по науке и технике и АН СССР от 10.11.85 г., N 5731137).

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методов контроля параметров плазмы и создание на их основе электронных устройств СУ повышенной стабильности с применением термофункционального гипермоделирования.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать гипермодели ДПП (одиночного зонда Ленгмюра - ОЗЛ и двойного зонда Ленгмюра - ДЗЛ).
2. Разработать методы контроля параметров плазмы для датчиков с характеристиками экспоненциального типа (ОЗЛ) и тангенциального типа (ДЗЛ).
3. Разработать УКПП на основе ДПП с характеристиками экспоненциального и тангенциального типов.
4. Разработать термофункциональные гипермодели УКПП.
5. Разработать методику повышения стабильности УКПП на основе термофункционального гипермоделирования.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические основы физики плазмы, теория пламенных измерений, методы идентификации электрических характеристик нелинейных электронных устройств, элементы математического аппарата термофункционального гипермоделирования, методы теории нелинейных электронных схем, методы термокомпенсации электронных цепей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны гипермодели ДПП в общей и адаптированной формах.
2. Разработаны методы контроля параметров плазмы для датчиков с экспоненциальными и тангенциальными характеристиками.

3. Разработаны термофункциональные гипермодели УКПД.

4. Разработана методика повышения стабильности УКПД на основе термофункционального гипермоделирования.

Практическая ценность работы. Сформированные в работе гипермодели ДПП позволили разработать методы контроля параметров плазмы для датчиков с характеристиками экспоненциального и тангенциального типов, которые в отличие от традиционных методов позволяют контролировать два параметра плазмы - I и N при уменьшении погрешности контроля в 3 и более раза. Эти методы нечувствительны к форме анализирующих воздействий, что позволяет снизить требования к стабильности выходных параметров генераторов анализирующих воздействий. Они могут быть использованы для контроля параметров периферийной плазмы в ТОКАМАКАх. На основе предложенных методов были разработаны штатные образцы УКПД "Пеленг", предназначенные для контроля параметров плазмы в активных космических экспериментах. Использование термофункционального гипермоделирования позволило повысить термоустойчивость разработанных УКПД в 2,5 и более раза по сравнению с традиционной аппаратурой. Разработанные методы контроля параметров плазмы и термофункциональное гипермоделирование электронных устройств на их основе могут быть использованы при проектировании аппаратуры с ДПП различных типов.

Реализация и внедрение результатов. Работа выполнялась в СПКБ "Дискрет", на кафедрах КПРА, РТУ в соответствии с планом важнейших научно-исследовательских работ ОРПУ, национальной и международной программ космических исследований АН СССР в рамках договоров о сотрудничестве с Институтом космических исследований АН СССР "Зонд" N 246 от 01.09.80г., N 474 от 27.12.85г. и хозяйственной работы "Пеленг" N 34Д-05 от 01.07.87г.

Штатные образцы УКПД серии "Пеленг" успешно использовались в активных космических экспериментах "Грузия-60-Спурт" (район европейской части СССР, 1981г.), "Плазма-1", "Плазма-2" (район Бразильской магнитной аномалии, 1985г.), в активных экспериментах, проведенных в вакуумной камере ИКИ АН СССР (1983, 1985, 1989 годы). Общий экономический эффект от внедрения составил 418 тыс. рублей в ценах 1981-89 годов. За разработку методов контроля параметров плазмы, создание комплексов УКПД серии "Пеленг", участие с проведением активных космических экспериментов, расшифровку телеметрических данных автор награжден бронзовой (1982г.) и серебрянной (1987г.) медалями ВДНХ СССР.

Апробация работы. Основные теоретические положения и резуль-

таты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 Международных, Всесоюзных и Республиканских научно-технических симпозиумах, конференциях и семинарах, в частности, "Научное космическое приборостроение" (г. Одесса, 1982г.), "Системы контроля параметров электронных устройств и приборов" (г. Киев, 1986г.), "Методы прогнозирования надежности проектируемой РЭА" (г. Пенза, 1987г.), "Современные проблемы радиоэлектроники" (г. Москва, 1988г.), "Проблемы качества и надежности электронной техники, радиоэлектронной аппаратуры и средств управления" (г. Минск, 1988г.), "Разработка и применение методов и средств ускоренных испытаний продукции на надежность" (г. Ижевск, 1988г.), "Научное космическое приборостроение" (г. Фрунзе, 1989г.), "Методы оценки и повышения надежности РЭА" (г. Пенза, 1989г.), "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (г. Москва, 1991г.), "Радиоизмерения-91" (г. Севастополь, 1991г.), "Физика космической плазмы" (г. Киев, 1993г.), семинарах секции активных экспериментов ИКИ АН СССР (1984-85гг.), а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ОПИ (1983г., 1986г.).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 33 печатных работы, в том числе получено 5 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, изложенных на 130 страницах машинописного текста; содержит 75 рисунков, 11 таблиц, список использованной литературы из 137 наименований и приложения, в котором приведены распечатки анализа УКПН на ЭЭМ и акты о внедрении основных результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, изложены результаты.

В первом разделе. выделен класс ДПП, широко используемых как в пассивных, так и активных (управляемых) космических экспериментах - ОЗЛ и ДЗЛ. Показаны присущие данному классу ДПП объединительные признаки - зависимость результатов контроля параметров плазмы от изменений ионного тока и наличия емкости двойного слоя. Дан краткий анализ особенностей применения ОЗЛ и ДЗЛ, методов обработки их характеристик, определена область анализирующих воздействий, в которой сохраняется неизменность ионного тока. Описана методика экспериментальных исследований ДПП, основанная на математическом

аппарате гипермоделирования, суть которого заключается в подаче на ДПП ступенчатых тестирующих импульсов напряжения, регистрации откликов, описывающих переходный процесс в ДПП, и их аппроксимации в виде переходной характеристики. Последняя служит основой для формирования гипермодели ДПП.

Переходная характеристика ОЗЛ по результатам тестирования представима выражением

$$i_{03A}(\tau) = [D(U_{03A}) + b_1 U_{03A} e^{-\frac{b_2}{b_1} \tau}] I(\tau), \quad (1)$$

где $D[U_{03A}] = dN\sqrt{U_3} \exp[U_{03A}/U_3]$, здесь d, b_1, b_2 - численные коэффициенты, определяемые площадью электродов ОЗЛ, зарядом электрона и массой ионов плазмы; U_{03A} - амплитуда тестирующих напряжений; $I(\tau)$ - единичная функция, U_3 - электронная температура, выраженная в энергетических единицах (В); N - концентрация плазмы; τ - время в описании переходных процессов.

На основе использования метода частных функций и оператора переходной реакции описание гипермодели ОЗЛ (рис. 1) имеет вид

$$i_{03A}(t) = D[U_{03A}(t)] + b_1 u_{03A}(t) - b_2 \int_0^t u_{03A}(\tau) e^{-\frac{b_2}{b_1} \tau} d\tau. \quad (2)$$

Далее эта гипермодель может быть представлена в адаптированной форме (рис. 2), где обозначено $I = D[u_{03A}(t)]$, $R = 1/b_1$, $C = b_1^2/b_2$.

Переходная характеристика ДЗЛ описывается следующим образом

$$i_{43A}(\tau) = [A(U_{43A}) + \alpha U_{43A} \exp\{-B(U_{43A})\tau\}] I(\tau), \quad (3)$$

где $B(U_{43A}) = \left\{ \frac{a_2}{e^{\gamma} [1 + a_3(U_{43A}/N)] \sqrt{2} [a_4 \operatorname{ch}^{-1}(a_5 U_{43A}) + a_6]} \right\}$;
 $\alpha, a_i (i = \overline{1, 6})$ - численные коэффициенты; $A(U_{43A}) = i_{0A} \operatorname{th}(U_{43A}/2U_3)$.

Преобразование выражения (3) приводит к описанию гипермодели ДЗЛ, которое представимо в виде (рис. 3):

$$i_{43A}(t) = A[u_{43A}(t)] + \alpha u_{43A}(t) - \alpha \exp\left\{-\int_0^t B[u_{43A}(\tau)] d\tau\right\} \times \times \int_0^t u_{43A}(\tau) B[u_{43A}(\tau)] \exp\left\{\int_0^{\tau} B[u_{43A}(\theta)] d\theta\right\} d\tau. \quad (4)$$

Одна из возможных адаптированных форм гипермодели ДЗЛ приведены на рис. 4 со следующими характеристиками элементов

$$I_1 = A[u_{43A}(t) - k_1 u_6(t)]; \quad I_2 = k_2 u_{43A}(t); \quad G_1 = \alpha; \quad G_2 = k_3/\alpha; \quad G_3 = \alpha.$$

Показано, что гипермодель (4) позволяет рассматривать ДЗЛ как безынерционный элемент с погрешностью $\epsilon(t)$, обусловленной его инерционностью, которую можно компенсировать посредством суммиро-

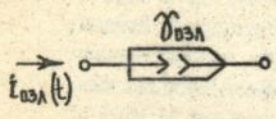


Рис. 1

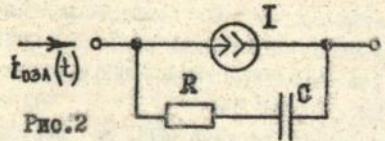


Рис. 2

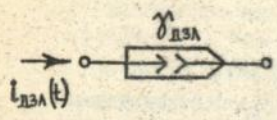


Рис. 3

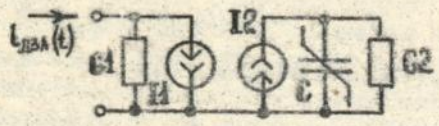


Рис. 4

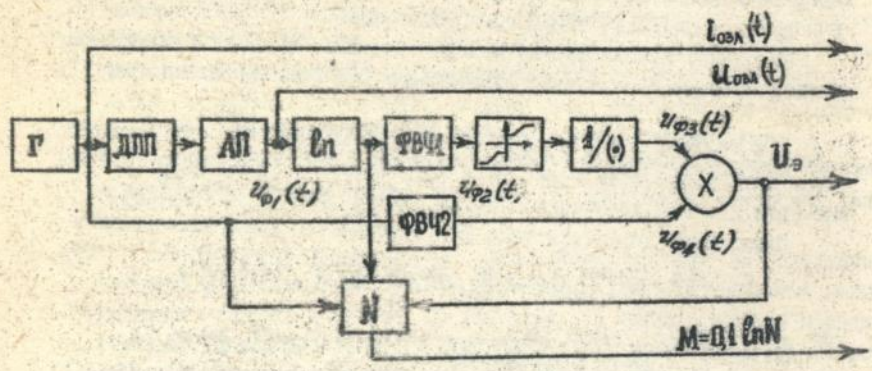


Рис. 5

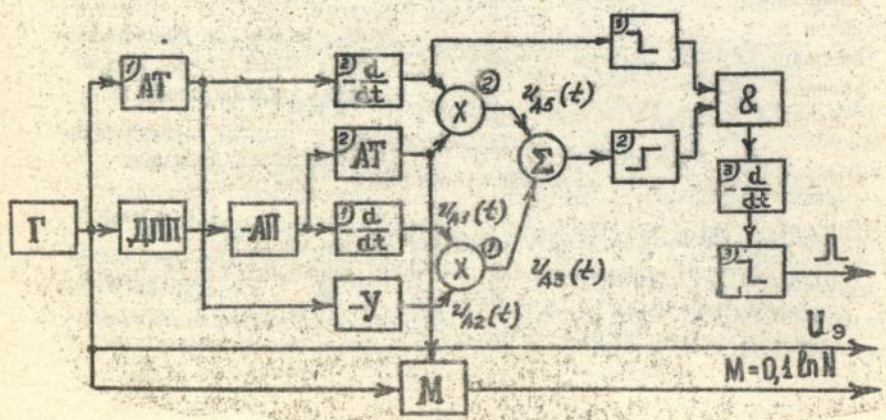


Рис. 6

вания тока ДЗЛ со специальным током

$$i_{ДПП}(t) = i_{ДЗЛ}(t) + I_0(t). \quad (5)$$

Погрешность гипермоделирования ДПП составила не более $\pm 6\%$.

Далее рассмотрены структура современной бортовой аппаратуры с ДПП для управления космическим экспериментом и выделены особенности ее электронных устройств.

Второй раздел посвящен разработке методов контроля параметров плазмы U_3 , N и УКШ на основе датчиков с характеристиками экспоненциального типа. Обосновывается характеристика ОЗЛ в режиме торможения электронов, используемая в предлагаемых методах (2).

Ионный ток при плавающем потенциале равен

$$i_{OH} = dN\sqrt{U_3}, \quad d = q^{3/2} S m^{-1/2}$$

где q - заряд электрона; m - масса иона; S - площадь электрода ОЗЛ.

В разделе рассмотрено 3 метода: фильтрации, трансформации и задержки с линейным и нелинейным воздействием. Метод фильтрации основан на преобразовании сигналов в ФВЧ и ПФ. Структурная схема УКШ с ФВЧ показана на рис. 5. Тракт измерения состоит из последовательно соединенных генератора Г, датчика ДПП, амплитудного преобразователя ток-напряжение АП, логарифматора, ФВЧ1, ограничителя по минимуму, блока деления $1/(.)$ и умножителя, а также ФВЧ2.

Анализирующее воздействие подается на ДПП, состоящий собственно из ОЗЛ, источника тока $I_0(t)$ (5). После преобразования отклика ДПП в амплитудном преобразователе с коэффициентом передачи $K_{АП}$ на его выходе действует сигнал

$$u_{ФЧ1}(t) = K_{АП} i_{OH} \exp[u_{03Л}(t)/U_3].$$

Этот сигнал, преобразованный в логарифматоре и ФВЧ1 представляется в виде

$$u_{ФЧ2}(t) = \ln i_{OH} g_{ФВЧ}(t) + \frac{1}{U_3} \frac{d}{dt} \int_0^t u_{03Л}(\tau) g_{ФВЧ}(t-\tau) d\tau,$$

где $g_{ФВЧ}(\tau)$ - переходная функция ФВЧ. На выходе первого блока деления $1/(.)$ при $t > \tau_{ФВЧ}$ получаем

$$u_{ФЧ3}(t) = U_3 / \frac{d}{dt} \int_0^t u_{03Л}(\tau) g_{ФВЧ}(t-\tau) d\tau. \quad (6)$$

Анализирующее воздействие, преобразованное в идентичном ФВЧ2 описывается выражением

$$u_{ФЧ4}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t u_{03Л}(\tau) g_{ФВЧ}(t-\tau) d\tau. \quad (7)$$

После перемножения откликов (6) и (7) в перемножителе на его выходе вырабатывается сигнал, равный искомому параметру U_3 .

Тракт измерения N состоит из умножителя, ограничителя по

минимуму, блока деления, логарифматора, двух сумматоров, аттенюатора и источника постоянного напряжения. На выходе умножителя действует сигнал

$$u_{N1}(t) = -u_{031}(t)/U_3.$$

Этот сигнал совместно с сигналом на выходе логарифматора

$$u_{N2}(t) = \ln i_{0N} + u_{031}(t)/U_3$$

подается на сумматор 1, на выходе которого формируется сигнал

$$u_{N3}(t) = \ln q^{3/2} + \ln m^{-1/2} + \ln S + \frac{1}{2} \ln U_3 + \ln N.$$

Вычитая из сигнала $u_{N3}(t)$, $\frac{1}{2} \ln U_3$ и постоянное напряжение, учитывая логарифм q, m, S , получаем значение $M = 0,1 \ln N$.

Из анализа метода следует, что трансляция параметров производится в течение всего периода анализирующего воздействия. Это позволяет повысить помехоустойчивость, снизить погрешность контроля. Показано, что применение ПФ не изменяет структуру УКПШ. Здесь даны рекомендации по выбору элементов ФВЧ и ПФ.

Разработка метода трансформации обоснована тем, что в ряде случаев возникает необходимость в электрической развязке узлов УКПШ. Показано, что этот метод позволяет при линейном и нелинейном воздействии получить параметры U_3 и N , сохраняя структуру УКПШ, показанного на рис. 5, при замене ФВЧ трансформаторами.

Последний из рассмотренных методов - метод задержки. Структурная схема УКПШ на его основе имеет вид, аналогичный УКПШ (рис. 5). Отличие заключается в том, что вместо ФВЧ применены линия задержки (ЛЗ), инвертор и сумматор. На входе первой ЛЗ и первого инвертора действует сигнал

$$u_{31}(t) = \ln i_{0N} + u_{031}(t)/U_3.$$

На выходе первой ЛЗ имеем

$$u_{32}(t) = \ln i_{0N} + u_{031}(t - \tau_3)/U_3,$$

а на выходе первого инвертора получаем

$$u_{33}(t) = -\ln i_{0N} - u_{031}(t)/U_3.$$

Тогда после первого сумматора действует сигнал

$$u_{34}(t) = \frac{1}{U_3} [u_{031}(t - \tau_3) - u_{031}(t)],$$

а на выходе блока деления имеем

$$u_{35}(t) = U_3 / [u_{031}(t - \tau_3) - u_{031}(t)].$$

Анализирующее воздействие, будучи подано на 2-ую ЛЗ, инвертор и сумматор, преобразуется к виду

$$u_{36}(t) = u_{031}(t - \tau_3) - u_{031}(t).$$

Перемножение сигналов $u_{35}(t)$ и $u_{36}(t)$ дает искомый параметр U_3 . Тракт контроля N аналогичен предыдущему УКПШ. Здесь

также рассмотрены особенности использования линейного и нелинейного воздействий в разработанных методах.

В третьем разделе показано, что выполнение условия

$$10 \leq v_{A3A}(t)/U_3 \leq 35 \quad (8)$$

положенного в основу обработки характеристик ДЗЛ в традиционных методах, в ряде случаев неприемлемо из-за возможного пробоя двойного слоя, нарушения физических процессов, протекающих в плазме, потери свойств ДЗЛ, как "плавающей" системы, обуславливая большую потребляемую мощность УКПП, ведущую к увеличению его массы.

Предложен подход к разработке методов контроля U_3 и N , функционирующих при пониженных анализирующих воздействиях, которые свободны от недостатка традиционных методов, и на его основе разработан ряд методов и УКПП.

Первый метод, который получил название метода дифференцирования и умножением иллюстрируется УКПП, приведенном на рис. 6.

На входе умножителя 1 действуют сигналы

$$v_{A1}(t) = (i_{0n}/2U_3)(ch^2 v_{A3A}(t)/2U_3) dv_{A3A}/dt; \quad v_{A2}(t) = \eta_1 v_{A3A}(t),$$

а на его выходе имеем

$$v_{A3}(t) = -i_{0n} \eta_1 \xi [ch^{-2} \xi] dv_{A3A}/dt,$$

где $\xi = v_{A3A}(t)/2U_3$. (Коэффициенты передачи соответствующих блоков опущены). На вход второго умножителя через аттенкуатор 2 поступает отклик ДЗЛ

$$v_{A4}(t) = i_{0n} th \xi$$

и преобразованное в дифференциаторе 2 воздействие с инверсией знака $-dv_{A4}/dt$, так что на выходе умножителя 2 действует сигнал

$$v_{A5}(t) = i_{0n} th \xi \xi dv_{A3A}/dt.$$

В момент выполнения условия

$$sh \xi ch \xi - \eta_1 \xi = 0,$$

которое является признаком однозначной связи заданного аппаратно коэффициента η_1 с U_3 , происходит изменение состояния компаратора 2. Такая организация его работы позволяет фиксировать на характеристике ДЗЛ анализирующее воздействие, находящееся в определенном соотношении через коэффициент η_1 с U_3 . Так, если $\eta_1 = 1,1752$, то $v_{A3A}(t) = U_3$. Указанная фиксация возможна при дифференцировании выходного сигнала компаратора 2, в результате чего будут вырабатываться два стробимпульса. В схеме на рис. 6 компаратор 1, логический элемент "И", дифференциатор 3 и компаратор 3 обеспечивают выработку одного стробимпульса только при прямом ходе развертки. В работе обосновывается указанный алгоритм работы УКПП.

Тракт контроля M в основном функционирует аналогично УКПП (рис. 5). В этом разделе рассмотрены также методы дифференцирования с делением и методы интегрирования с умножением и делением.

Четвертый раздел посвящен решению задач повышения стабильности УКПП на основе термофункционального гипермоделирования. Для этого в начале потребовалось рассмотреть ТГМ электронных элементов и оценить возможности их использования в указанном аспекте. При этом возникла потребность в отказе от использования полных гипермоделей, основанных на традиционных ТГМ активных приборов, и были разработаны частные гипермодели электронных элементов УКПП. На рис. 7 приведена модель УКПП на основе метода фильтрации (рис. 5), содержащая предложенные частные ТГМ. На базе этих моделей был проведен анализ отклонения контролируемых параметров под действием температуры, которые в среднем составили для $U_2 \pm 23\%$, для $M \pm 17\%$ в диапазоне от -60°C до $+80^\circ\text{C}$ при исследовании УКПП на основе ОЗЛ и ДЗЛ. Полученные значения отклонений были подтверждены экспериментальными данными.

Для повышения стабильности УКПП на основе разработанных частных ТГМ была предложена методика, включающая следующие этапы.

1. Определение коэффициентов влияния электронных элементов УКПП на его выходные параметры.
2. Минимизация влияния электронных элементов УКПП на его выходные параметры в заданном диапазоне температур.
3. Реализация полученных температурных зависимостей на уровне ТГМ электронных элементов.
4. Экспериментальная проверка и подстройка УКПП в заданном диапазоне температур.

На первом этапе некоторый параметр УКПП z рассматривается в виде зависимости

$$z = F_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \quad (9)$$

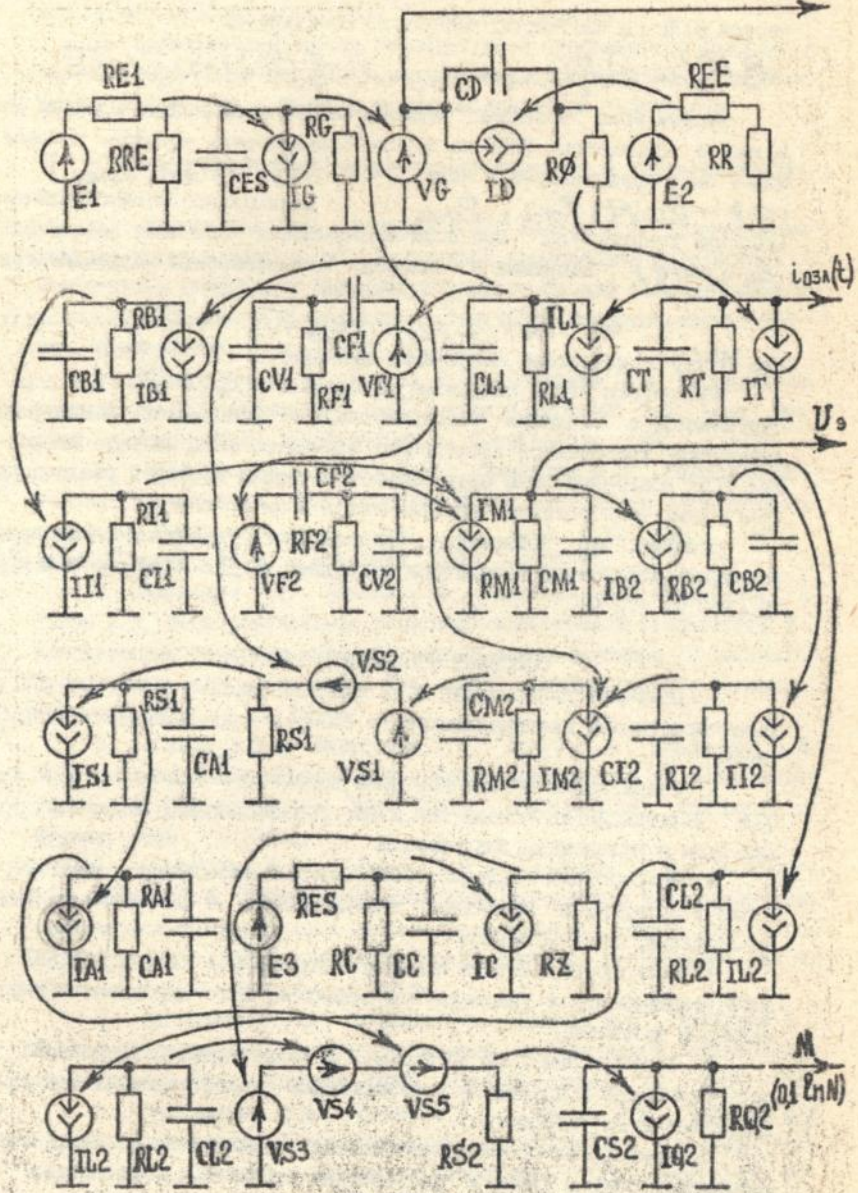
где α_i ($i = \overline{1, m}$) - температурные коэффициенты параметров электронных элементов УКПП, зависящие от температуры T ($\alpha_i = 1$ при $T = 20^\circ\text{C}$); $F_2(\dots)$ - некоторая функция или оператор, зависящий от α_i ($i = \overline{1, m}$). В линеаризованном виде выражение (9) представимо следующим образом

$$z = F_2(\bar{T}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial F_2(\bar{T})}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \varepsilon_z, \quad (10)$$

где $\bar{T} = \{1, 1, \dots, 1\}$ - вектор единичных значений α_i ($i = \overline{1, m}$), ε_z - погрешность линеаризации.

Коэффициенты влияния $\partial F_2(\bar{T}) / \partial \alpha_i$ ($i = \overline{1, m}$) (10) определяются на базе разработанной модели УКПП (рис. 7) посредством схемотехни-

$U_{03A}(t)$



ческой САПР (в частности, NAR-2) из соотношения

$$\frac{\partial F_2(\vec{I})}{\partial \alpha_i} = [F_2(t_1, \dots, t + \Delta \alpha_i, \dots, t) - F_2(\vec{I})] / \Delta \alpha_i, \quad i = \overline{1, m}.$$

Второй этап посвящен решению задачи минимизации влияния на выходные параметры УКПП на основе традиционных методов, которая может быть представлена в виде: $\mathcal{Z} = \text{const}, T \in [T_{\min}, T_{\max}]$, где $\mathcal{Z} - U_3, M$; T_{\min}, T_{\max} - минимальное и максимальное значения температуры. При этом определяются значения параметров $\beta_k (k = \overline{1, q})$, входящих в описание температурных коэффициентов

$$\alpha_i = W_i(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q, T), \quad i = \overline{1, m}, \quad (11)$$

где $W_i(\cdot)$ - известные нелинейные функции.

На третьем этапе найденные коэффициенты $\beta_k (k = \overline{1, q})$ (11) пересчитываются в значения температурных коэффициентов конкретных дискретных компонентов электронных элементов УКПП на базе их полных ТГМ. Последний этап предложенной методики посвящен реализации полученных температурных коэффициентов и их проверке.

Отметим, что применение предложенной методики позволило сократить отклонение параметров в среднем до $\pm 6\%$ по U_3 и M при $T \in (-60^\circ\text{C}, +80^\circ\text{C})$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены гипермодели и их адаптированные формы для ДПП с характеристиками экспоненциального (ОЗЛ) и тангенциального (ДЗЛ) типов.
2. Разработаны методы контроля параметров плазмы и N для ОЗЛ: фильтрации на основе ТВЧ и ПФ; трансформации; задержки при линейном и нелинейном воздействии.
3. Разработаны УКПП на основе методов фильтрации, трансформации и задержки и проведены моделирование и экспериментальные исследования этих устройств.
4. Разработаны методы контроля параметров плазмы для ДЗЛ: дифференцирования с умножением и делением; интегрирования с умножением и делением.
5. Разработаны УКПП на основе методов дифференцирования и интегрирования и проведены моделирование и экспериментальные исследования этих устройств.
6. Рассмотрены особенности полных ТГМ электронных элементов, входящих в состав УКПП, и разработаны их частные гипермодели.
7. Предложена методика повышения стабильности УКПП с исполь-

ованием термофункционального гипермоделирования.

8. Проведено повышение температурной стабильности УКП на основе разработанной методики, что сократило отклонения их характеристик в 2,5 раза и более в заданном диапазоне температур.

Основное содержание диссертации отражено в 33 публикациях, в том числе:

1. Николаенко В. М., Ковалев Н. И., Нокель В. П. Термофункциональное гипермоделирование нелинейных компонентов и устройств // Перспективы развития и применения средств ВТ для моделирования и автоматизированного исследования: Тез. докл. Всесоюз. научно-технич. конференции. - М., 1991. - С. 71-72.

2. Николаенко В. М., Нокель В. П., Ткаченко О. В. Гипермоделирование средств радиоизмерений // Радиоизмерения: Тез. докл. Всесоюз. научно-технич. конференции. - Севастополь, 1991. - С. 67.

3. Ковалев Н. И., Нокель В. П., Ткаченко О. В. Термофункциональные макромоделли электротехнических устройств // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Тез. докл. Международн. научно-технич. конф., Т. 10. - М.: МВТУ, 1991. - С. 25-26.

4. Манагадзе Г. Г., Нокель В. П., Гдалевич Г. Л., Емельянов С. Л., Гагуа Т. И. Непосредственное измерение электронной температуры и концентрации плазмы в методе двойного зонда Ленгмюра // Космическое научное приборостроение: Тез. докл. Международного семинара. - Фрунзе, 1989. - С. 13-14.

5. Нокель В. П., Манагадзе Г. Г., Гагуа Т. И., Емельянов С. Л. Учет емкости двойного слоя при зондовых измерениях // Космическое научное приборостроение: Тез. докл. Международн. семинара. - Фрунзе, 1989. - С. 15-16.

6. Манагадзе Г. Г., Нокель В. П., Гдалевич Г. Л., Емельянов С. Л., Гагуа Т. И. Анализ вычислительных алгоритмов для определения электронной температуры и концентрации плазмы в методе симметричного двойного цилиндрического зонда Ленгмюра // Препринт ИКИ АН СССР. - М., 1989. - N1581. - С. 1-13.

7. Николаенко В. М., Ковалев Н. И., Нокель В. П., Логвинов О. В. Оценка погрешности термофункциональных макромоделей электронных устройств // Сб. рефератов НИОКР, обзоров, перев. - М., 1989. - 16с.

8. Николаенко В. М., Логвинов О. В., Нокель В. П., Ковалев Н. И. Определение вероятностных характеристик параметров термофункциональных макромоделей электронных устройств // Сб. рефератов, обзоров, переводов. Вып. 5, ВИМИ, N3-8407, 1988. - С. 16

9. Спокойный Ю. Е., Николаенко В. П. Проектирование РЭС на основе термофункциональных макромоделей // Сб. тезисов Всесоюз. научно-технич. конф. "Современные проблемы радиозлектроники". - М., 1988. - С.155.
10. Николаенко В. М., Ковалев Н. И., Нокель В. П. Термофункциональные макромоделли динамических систем управления // Сб. тезисов Республ. научно-технич. конф. "Методологические проблемы автоматизированного проектирования и исследования систем". - Севастополь, 1987. - С. 14-15.
11. Манагадзе Г. Г., Нокель В. П., Емельянов С. Л., Гагуа Т. И. Вычислительный алгоритм для определения электронной температуры и концентрации плазмы методом двойного зонда Ленгмюра // АН СССР, ИКИ. Пр.-1328, М., 1987. - С.1-9.
12. Манагадзе Г. Г., Нокель В. П., Гагуа Т. И., Емельянов С. Л. Искажения ВАХ двойного зонда Ленгмюра и ее производных при работе в динамическом режиме // АН СССР, ИКИ. Пр.-1327, М., 1987. - С.1-10.
13. Нокель В. П. Влияние емкости зонда Ленгмюра на динамическую погрешность измерения параметров зондовой характеристики и ее производных // АН СССР, ИКИ. Сб. статей "Научная аппаратура для космических исследований". - М., Наука, 1987. - С. 17-21.
14. Манагадзе Г. Г., Бурчуладзе Т. Г., Нокель В. П., Гагуа Т. И. Зависимость величины потенциала ижектирующих электроны зонда от высоты и направления его полета // АН СССР, ИКИ. Пр. - 1148, М., 19867 - С. 1-16.
15. Нокель В. П. Повышение точности измерения вольт-амперной характеристики двойного зонда // АН СССР, ИКИ, 3-й Междунар. семинар соц. стран "Научное космическое приборостроение", Сб. тезисов. - М., 1982. - С.24-27.
16. Нокель В. П. и др. Авторское свидетельство СССР №1428016, 01.06.1988 г.
17. Нокель В. П. и др. Авторское свидетельство СССР №1385808, 01.12.1987 г.
18. Нокель В. П. и др. Авторское свидетельство СССР №1199074, 15.08.1985 г.
19. Нокель В. П. и др. Авторское свидетельство СССР №1118195, 08.06.1984 г.
20. Нокель В. П. и др. Авторское свидетельство СССР №1080625, 15.11.1983 г.

Давид