На правах рукописи

ken

Ким Валерий Львович

# МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНДУКТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения (измерение электрических и магнитных величин)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный консультант:	доктор технических наук, профессор		
	Муравьев Сергей Васильевич		
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, с.н.с.		
	Зыков Владимир Михайлович		
	доктор технических наук, профессор		
	Данилов Александр Александрович		
	доктор технических наук, доцент		
	Бирюков Сергей Владимирович		

Ведущая организация: ОАО «НИИ ЭЛЕКТРОМЕРА», г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 10 » ноября 2009 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2, ауд. 213

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_2009 г.

Учёный секретарь совета Д 212.269.09 кандидат технических наук, доцент Б.Б. Винокуров

Актуальность проблемы. В теории измерений к числу важнейших измерительных преобразований относят изменение размера величины. В области электро- и радиоизмерений уменьшение размера осуществляется типовыми устройствами – масштабными измерительными преобразователями, в частности, делителями напряжения переменного тока. Наиболее приемлемыми метрологическими характеристиками (MX) в диапазоне частот десятки Гц – сотни кГц и диапазоне измерений сотни нановольт – единицы киловольт обладают индуктивные делители напряжения (ИДН). ИДН, работающие в этом частотном диапазоне, относятся к условно низкочастотным. Они применяются в мостовых измерениях импедансов, параметров электрических цепей, неэлектрических величин, системах измерения ослабления аттенюаторов, сопротивлений, емкостей, параметров преобразователей переменного тока, трансформаторов напряжения и тока, при калибровке и поверке усилителей, вольтметров и калибраторов. ИДН составляют основу метрологического обеспечения значительного числа приборов и систем, используемых в области измерений, контроля и диагностики.

Высокие МХ ИДН оправдывают включение их в состав государственных эталонов таких стран как США, Великобритания, Германия, Россия, Канада, Индия, Китай, Польша, Австралия и др.

Анализ состояния дел в области проектирования и промышленного выпуска ИДН позволяет сделать вывод о том, что страны, имеющие лучшие эталоны отношения индуктивного типа, имеют конкурентные преимущества в области высоких технологий. В этом контексте с точки зрения метрологической безопасности и технологической независимости страны одной из важнейших задач является создание рабочих эталонов нового поколения, в том числе ИДН, адаптированных к серийному выпуску.

Расширение диапазона измерений и полосы рабочих частот современных средств измерений, в том числе ЦАП и АЦП с разрядностью 20 и более, требует опережающего развития ИДН, как средств их метрологического обеспечения. В связи с этим актуальны вопросы разработки и создания ИДН с большим числом двоичных разрядов или декад не менее шести. Делители с ручным и программным управлением с такой разрешающей способностью выпускаются в основном за рубежом, в России серийный выпуск не освоен. Однако, для большинства ИДН погрешность преобразования нормируется в диапазоне частот до 10 кГц. На частотах выше 10 кГц погрешность увеличивается пропорционально квадрату частоты. Из-за разброса частотной погрешности, являющейся систематической для отдельного экземпляра и случайной – для генеральной совокупности (типа), сложная проблема нормирования погрешности на верхних частотах до сих пор не решена. Положение усугубляется отсутствием приемлемых адекватных моделей и корректных методов расчета многокаскадных делителей без значительных временных и аппаратных затрат.

Одним из преимуществ ИДН является то, что они могут служить эталонами отношения не только при низковольтных измерениях, но и для области высоких напряжений переменного тока. Например, при поверке современных калибраторов напряжения, в новом стандарте мощности на эффекте Джозефсона и в системах калибровки высоковольтных термопреобразователей на уровнях до 1000 В среднеквадратического значения применяются высоковольтные ИДН. В этом контексте актуальна проблема построения высоковольтного, в том числе высокочастотного ИДН.

Физические принципы, лежащие в основе работы ИДН, ограничивают возможность их применения в области инфранизких частот вплоть до постоянного тока. Эту и другие проблемы можно решить использованием индуктивнорезистивных делителей напряжения. Однако точность таких делителей определяется точностью ИДН.

**Целью работы** является развитие теории повышения точности индуктивных делителей напряжения и её применение для создания прецизионных делителей напряжения нового поколения с широкими частотным и динамическим диапазонами.

**Основными задачами** диссертационной работы в связи с поставленной целью являются:

1. Анализ принципов построения и нормирования метрологических характеристик индуктивных делителей напряжения.

2. Разработка и исследование математических моделей и методов расчета многокаскадных индуктивных делителей напряжения.

3. Разработка и исследование метода симметрирования для повышения точности индуктивных делителей напряжения в широком частотном и динамическом диапазонах.

4. Исследование принципа многоканальности для построения широкополосных индуктивных и индуктивно-резистивных делителей напряжения.

5. Разработка методов и средств метрологического обеспечения индуктивных делителей напряжения. 6. Разработка принципов построения и создание эталонных многокаскадных индуктивных делителей напряжения.

Методы исследований. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электрических и магнитных цепей, теории погрешностей, математической статистики, системного анализа, математического моделирования, дифференциального и интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились с использованием систем проектирования *OrCAD* 9.2, MATLAB 6.5, пакета MAPLE 11, натурными испытаниями и метрологическими исследованиями созданных установок и приборов.

#### Научная новизна.

1. Разработаны полные и упрощенные математические модели одно- и многокаскадных ИДН, проведена оценка точности этих моделей. Показана возможность расчета и анализа многокаскадных ИДН и многообмоточных трансформаторов с использованием упрощенных моделей аналитическим и машинным методами.

2. Разработан компьютерный метод получения передаточных функций одно- и многокаскадных ИДН не выше третьего порядка.

3. Разработаны методы расширения динамического диапазона многокаскадных ИДН, основанные на уменьшении аддитивной погрешности при помощи дополнительных шунтирующих коммутационных элементов и понижающих автотрансформаторов.

4. Предложен, разработан и исследован метод расширения частотного диапазона путем симметрирования многосекционных делительных обмоток посредством двоичного делителя.

5. Разработан расчетно-экспериментальный метод проектирования широ-кополосных двухканальных ИДН.

6. Предложен и исследован композиционный принцип построения трехканального ИДН, основанный на изменении межкаскадных связей в двухканальном ИДН.

7. Разработаны способы повышения точности кодоуправляемых индуктивных делителей напряжения в области верхних частот, основанные на использовании низкочастотного канала в качестве канала компенсации погрешностей высокочастотного канала ИДН.

8. Разработаны и исследованы принципы построения кодоуправляемых индуктивно-резистивных делителей напряжения в диапазоне частот 0...200 кГц.

9. Разработан метод расчета амплитудной погрешности одно- и многокаскадных ИДН с учетом стохастических свойств их элементов.

5

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в диссертационной работе, обеспечивают практические возможности существенного улучшения метрологических характеристик ИДН в широком частотном и динамическом диапазонах, позволяют эффективно решать как конкретные задачи совершенствования и создания эталонов отношения на уровне лучших зарубежных образцов, так и проблемы создания измерительных систем и комплексов.

Это подтверждено созданием и внедрением в метрологическую практику системы метрологического обеспечения средств измерений переменного напряжения, включающей в себя:

1. Исходный эталонный шестидекадный индуктивный делитель напряжения ДИ-6 с рабочим диапазоном частот 0,4...1 кГц и эталонный шестидекадный индуктивный делитель напряжения ДИ-3м с рабочим диапазоном частот 0,02...200 кГц, входящие в состав установки высшей точности УВТ 52-А-87 для измерения ослабления электромагнитных колебаний на фиксированных частотах в диапазоне частот 0...100 МГц. Установка входит в реестр эталонов и установок высшей точности ВНИИФТРИ, является исходной в Российской Федерации. Международные ключевые сличения показали, что МХ установки УВТ 52-А-87 соответствуют характеристикам аналогичных национальных эталонов ведущих метрологических центров зарубежных стран.

2. Рабочие эталонные шестидекадные индуктивные делители напряжения с диапазоном частот 0,02...200 кГц, входящие в состав установки для поверки вольтметров В1-20 и комплексной измерительной установки К2-41, предназначенной для поверки измерительных усилителей и других активных и пассивных четырехполюсников. Установки внесены в Госреестр средств измерений Российской Федерации (№ 8577-81, № 8404-81).

3. Установку для проверки электродов УПЭ-2, предназначенную для измерения параметров медицинских электродов, а также аддитивной погрешности и сигналов на выходе ИДН до 100 мВ в диапазоне частот до 100 кГц. Установка включена в Госреестр средств измерений Российской Федерации (№ 39325-08).

Реализация результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации использованы при выполнении под руководством и при непосредственном участии автора хоздоговорных и госбюджетных НИР с рядом предприятий и организаций городов Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Харькова, Львова, Томска, Северска, Курчатова (Республика Казахстан), в том числе следующих проектов:

• Разработка автоматизированного поверочного комплекса для поверки мультиметров и масштабных преобразователей «Кедр-1», внедренного в

ЦКБ «Алмаз» в 1986 г. АПК «Кедр-1» отмечен бронзовой медалью на тематической выставке «Поверка-87» (ВДНХ СССР).

- Разработка индуктивных делителей напряжения для применения в качестве эталонных мер ослабления ЭМК на частотах 0,02...200 кГц, созданных в 1984–1987 гг. по договору о содружестве между ВНИИФТРИ и Томским политехническим институтом.
- Разработка автоматизированного поверочного комплекса для поверки мультиметров, созданного в 1990 г. по заказу ОАО «Эталон» (г. Воронеж).
- Разработка автоматизированного метрологического комплекса «Степь» для аттестации и поверки программно-управляемых средств измерений, созданного по заказу НПО «Автоматика» (г. Екатеринбург). Опытнопромышленная партия выпущена в 1992 г.
- Разработка комплекта документов для целей утверждения типа калибратора напряжения и тока *GTIU*-98. Работа выполнена в 2006 г. по заказу ООО «Микрокод» (г. Львов).
- Разработка дифференциального нановольтметра, созданного в 2008 г. по заказу ООО «ГРОГ» (г. Северск).
- Разработка методов и средств автоматизации экспериментов на стендовом комплексе электрофизической установки «ТОКАМАК-КТМ». Работа выполнена в 2008 г. по заказу ООО «ТомИУС-ПРОЕКТ» (г. Томск) для Национального ядерного центра Республики Казахстан (г. Курчатов, Республика Казахстан).
- «Проведение опытно-конструкторских, технологических и экспериментальных работ по созданию промышленной технологии массового производства одноразовых хлор-серебряных электродов на базе пористой керамики» (программа Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы», 2005 г.) и «Разработка научных основ формирования малошумящего высокостабильного неполяризующегося перехода «электронная-ионная проводимость» на базе пористой керамики» (Проект РФФИ № 08-08-99069, 2008 г.). В рамках этих проектов создана установка для проверки медицинских электродов УПЭ-2.
- «Создание учебно-лабораторных комплексов на базе новых информационных технологий». Работа выполнена в рамках Комплексной программы развития Томского политехнического университета в 2000 г. Результаты этой работы используются для проведения занятий по дисциплинам «Физика», «Измерительные информационные системы».

#### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели индуктивных делителей напряжения, позволяющие решать задачи анализа и расчета одно- и многокаскадных ИДН аналитическим и машинным методами.

2. Теоретические и экспериментальные исследования новых методов расширения частотного и динамического диапазонов индуктивных делителей напряжения, основанных на идее симметрирования многосекционных обмоток и использовании шунтирующих коммутационных элементов и понижающих автотрансформаторов.

3. Методы построения широкополосных многокаскадных ИДН в виде параллельной двухканальной структуры с адаптированными к поддиапазонам рабочих частот параметрами низкочастотных и высокочастотных каскадов и композиционного трехканального ИДН, обеспечивающего без значительных аппаратных затрат высокие метрологические характеристики в широкой полосе частот.

4. Теоретические и экспериментальные исследования методов повышения точности кодоуправляемых индуктивных и индуктивно-резистивных делителей напряжения, позволяющих использовать структурную избыточность многоканальных структур для повышения точности делителей.

5. Методы расчета амплитудной погрешности одно- и многокаскадных ИДН с учетом стохастических свойств элементов, позволяющие нормировать частотную погрешность и АЧХ делителей в области верхних частот.

6. Принципы построения, структурные и принципиальные схемы эталонных ИДН и прецизионных индуктивных, индуктивно-резистивных делителей напряжения с ручным и программным управлением для частотного диапазона до 200 кГц с ослаблением 0...160 дБ и диапазоном выходного напряжения от сотен нановольт до единиц киловольт.

7. Результаты практических разработок делителей напряжения, входящих в состав различных систем и комплексов, выпускаемых серийно и отдельными партиями и являющихся средствами метрологического обеспечения широкого круга средств измерений переменного тока, а также приборов и установок, при калибровке и поверке которых были использованы разработанные ИДН.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: Всесоюзном совещании «Точные измерения энергетических величин» (Ленинград, 1982); Всесоюзной конференции «Влияние повышения уровня метрологического обеспечения и стандартизации на эффективность производства и каче-

ство выпускаемой продукции» (Тбилиси, 1983); VI Всесоюзной конференции «Метрология в радиоэлектронике» (ВНИИФТРИ, Москва, 1984); Республиканской конференции «Вопросы теории и практики электронных вольтметров и средств их поверки» (Таллин, 1985); Всесоюзной конференции «Системные исследования и автоматизация в метрологическом обеспечении ИИС и управлении качеством» (Львов, 1986); Республиканской конференции «Применение микропроцессоров в народном хозяйстве» (Таллин, 1988); III Всесоюзной конференции «Метрологическое обеспечение ИИС и АСУТП» (Львов, 1990); III International Symposium «SIBCONVERS-99» (Tomsk, 1999); Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2000); Международной конференции «Новые методологии проектирования изделий микроэлектроники» (Владимир, 2002); 8-ой Всероссийской конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Н.Новгород, 2003); IV Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2003); The IEEE Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2003» (Tomsk, 2003); 8-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology «KORUS 2004» (Tomsk, 2004); The IEEE International Siberian Conference on Control and Communications «SIBCON-2005» (Tomsk, 2005); Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008» (Новосибирск, 2008).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 80 научных работ, в том числе монография, 19 авторских свидетельств, один патент РФ на изобретение, три патента РФ на полезные модели, 27 опубликованных тезисов и докладов конференций, 29 статей в журналах и сборниках. Основные научные результаты диссертации опубликованы в монографии и 25 статьях в журналах, рекомендуемых ВАК для опубликования научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы из 255 наименований, 15 приложений. Общий объем работы – 342 страницы, включая 88 рисунков и 45 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** рассмотрены особенности нормирования метрологических характеристик и принципы построения ИДН с высокими МХ.

Методы нормирования МХ индуктивных делителей напряжения основываются на международных документах *IEC* 618, *EAL-G*32 и ГОСТ 8.009-84. Во всех этих документах ИДН рассматривается как линейное устройство. Границы линейного режима работы делителя в большей степени определяются уровнем входного напряжения, поэтому обязательно указывают допускаемое максимальное значение входного напряжения. Наряду с классом точности, номинальными значениями коэффициента передачи, входным и выходным импедансом, важнейшими являются динамический диапазон и динамические характеристики, в частности АЧХ, по которой определяется диапазон рабочих частот.

При гармоническом воздействии коэффициент передачи ИДН определяется в виде

$$\dot{K}_{_{\Pi i}} = \frac{\dot{U}_{_{\rm BMXi}}}{\dot{U}_{_{\rm BX}}} = K_{_{\rm H}i}(1 + \dot{\delta}K_i) = K_{_{\rm H}i}(1 + \delta_{_{\rm a}i} + j\delta_{_{\rm b}i}), \qquad (1)$$

где  $\dot{U}_{_{BX}}$  – входное, а  $\dot{U}_{_{BMXi}}$  – выходное напряжение на *i*-ом отводе;  $\dot{\delta}K_i$  – относительная погрешность коэффициента передачи;  $\delta_{ai}$  и  $\delta_{\phi i}$  – амплитудная и фазовая погрешности;  $K_{_{Hi}}$  – номинальный коэффициент передачи.

Номинальный коэффициент передачи равен  $K_{\rm Hi} = w_i / w_{\rm Bx}$ , где  $w_{\rm Bx}$ ,  $w_i - чис-$ ло витков всей делительной обмотки и её выходной части для отвода *i*.

Типичная трудность расширения диапазона рабочих частот ИДН состоит в том, что уменьшение нижней границы частотного диапазона приводит к росту погрешности на высоких частотах и наоборот.

Методами повышения точности широкополосных ИДН являются: *совершенствование конструктивно-технологических решений*; *изменение структуры*; *учет вероятностных свойств параметров элементов ИДН*. Возможности первой группы, основанной на применении ферромагнитных материалов с улучшенными магнитными характеристиками и специальных видов делительных обмоток, во многом исчерпаны. Среди структурных методов повышения точности делителей наиболее перспективен предложенный М.С. Ройтманом многоканальный принцип, идея которого заключается в разбиении диапазона рабочих частот на поддиапазоны, в каждом из которых работает отдельный делитель. Развитию структурных методов препятствует отсутствие научно обоснованной методики проектирования многоканальных делителей. Методы третьей группы направлены на увеличение верхней граничной частоты, благодаря использованию разброса параметров секций и случайной последовательности соединения проводов жгута в делительной обмотке. Однако оптимальное соединение трудно реализовать. Эти методы, пригодные для единичных ИДН, неэффективны в условиях массового производства, так как требуют проведения большого объема измерений параметров жгутов и расчетов на ЭВМ.

Вторая глава посвящена математическому моделированию ИДН.

В основу построения математической модели ИДН положена базовая мо*дель* (БМ). В качестве БМ выбрана линейная эквивалентная схема секции делительной обмотки ИДН (рис. 1), включающая в себя активное сопротивление R, индуктивность L, емкость C и зависимый источник напряжения e.



Рис. 1. Базовая эквивалентная схема секции ИДН

БМ описывается математическими предикатами MT, где T – означает динамичность модели. Введение понятия БМ позволило облегчить разработку математических моделей ИДН различных уровней сложности. Критерием сложности моделей может служить количество БМ, определяющих степень детализации и полноты описания процессов, протекающих в ИДН.

На рис. 2 приведена построенная на этом принципе линейная полная модель (ПМ) одноступенчатого (одножгутового) делителя (ОИДН).



Рис. 2. Эквивалентная схема декадного ИДН

Входная цепь ОИДН изображена в виде четырехполюсника, на вход которого в общем случае поступают напряжения  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  от предыдущей (i - 1)-й декады. Базовые модели  $MT_{11}$  (R1, L1),  $MT_{12}$  (R2, L2) моделируют импедансы коммутационных элементов и соединительных проводов,  $MT_{13}$  (R3, L3) – активное сопротивление и индуктивность рассеяния делительной обмотки, а  $MT_{14}$ (R4) – активное сопротивление потерь в сердечнике,  $MT_{15}$  (L4, C1) – индуктивность и емкость делительной обмотки,  $MT_{16}$  (R5, C2) – сопротивление и емкость нагрузки, пересчитанные во входную цепь.

Выходная цепь ИДН моделируется моделями  $MT_1 - MT_{10}$ . В этих моделях  $e_j$ ,  $r_j$ ,  $l_{sj}$ ,  $c_j$  представляют собой ЭДС, активное сопротивление провода, индуктивность рассеяния *j*-й секции и эквивалентную емкость, шунтирующую эту секцию. Развязка входной цепи от выходной осуществляется при помощи зависимых источников напряжения  $\dot{U}_5 = f_1(\dot{U}_3)$  и  $\dot{U}_6 = f_2(\dot{U}_4)$ , где  $f_1$ ,  $f_2$  – линейные операторы преобразования.

Полная модель отображает все характеристики ИДН, интересующие разработчиков: входной и выходной импедансы, АЧХ и ФЧХ на всех выходных отводах j = 0, 1, 2, ..., 10.

При анализе и расчете многодекадных ИДН целесообразно использовать упрощенную модель – макромодель (МКМ), которая представляет собой простую модель, содержащую минимально необходимое количество базовых моделей в выходной цепи. МКМ построена путем замены совокупности последовательно соединенных моделей  $MT_{10}, MT_{9}, ..., MT_{j+2}$  и  $MT_{1}, MT_{2}, ..., MT_{j}$  эквивалентными им базовыми моделями  $MT_{17}$  и  $MT_{18}$ .

Параметры элементов эквивалентной базовой модели МКМ, включенной в общем случае между какими-либо отводами  $k, m (k, m \in j)$ , выражаются через параметры базовых моделей ПМ следующим образом:

$$e_{k,m} = \sum_{j=k+1}^{m} e_j, \ r_{k,m} = \sum_{j=k+1}^{m} r_j, \ l_{sk,m} = \sum_{j=k+1}^{m} l_{sj}, \ c_{k,m} = (k-m)^{-2} \sum_{j=k+1}^{m} c_j.$$
(2)

Заметим, что для  $MT_{17}$  k = j + 1, m = 10, а для  $MT_{18}$  k = 0, m = j.

Формулы (2) справедливы для ИДН с любым числом секций. Приведены параметры компонентов макромоделей декадного ОИДН для различных коэффициентов передач при идентичных параметрах секций  $e_j = e_0$ ,  $r_j = r_0$ ,  $l_{sj} = l_{s0}$  и одинаковых значениях межпроводных емкостей  $C_0$ .

Во входные цепи полной и упрощенной моделей включена базовая модель  $MT_{13}$  (*R*3, *L*3), отображающая активное сопротивление и индуктивность рассеяния делительной обмотки. Это позволило корректно моделировать, во-первых,

прохождение вершины прямоугольного или ступенчатого импульса, т.е. постоянного сигнала и, во-вторых, автотрансформаторные и трансформаторные делители, в которых на общем ферромагнитном сердечнике размещаются несколько делительных обмоток с гальваническими и индуктивными связями. Предложенный вид входной цепи принципиально отличает эти модели от известных и существенно расширяет возможности их применения к анализу многообмоточных индуктивно-связанных цепей.

*Оценка качества моделей*. Для всех разработанных математических моделей ИДН оценивалась их адекватность, т.е. степень их соответствия физическим процессам, протекающим в ИДН. Численной мерой адекватности является погрешность модели, которая по всей совокупности *n* амплитудных погрешностей оценивалась по норме вектора  $\vec{\epsilon}_{\delta} = (\epsilon_{\delta 1}, \epsilon_{\delta 2}, ..., \epsilon_{\delta n})$ , равной

$$\varepsilon_{\delta} = \left\| \vec{\varepsilon}_{\delta M} \right\| = \max \left| \varepsilon_{\delta j} \right|, \ j = 1, 2, 3, ..., n$$
$$\varepsilon_{\delta j} = \frac{\delta_{jp} - \delta_{jy}}{\delta_{jy}} \cdot 100\%, \tag{3}$$

где  $\delta_{jp}$ ,  $\delta_{j9}$  – относительные погрешности коэффициента передачи модели и эталона. В качестве последнего использовалась более сложная модель с известной точностью или реальный ИДН. Выражение (3) справедливо для всех нормируемых параметров ИДН.

Методы расчета многокаскадных ИДН. Учет структурных особенностей многокаскадных ИДН позволяет применить при их расчете метод подсхем и модели разного уровня сложности и частотного поддиапазона. В качестве типовой подсхемы можно выбрать полную или упрощенную эквивалентную схему декадного делителя. Тогда расчет многокаскадного ИДН проводится последовательным расчетом типовых фрагментов, состоящих из типовой подсхемы и входной цепи последующего каскада. В результате удалось свести исходную задачу высокой размерности к последовательному решению задач низкой размерности.

Все рассмотренные выше методы расчета в общем случае применимы при аналитических исследованиях делителей. Однако их трудоемкость высока, особенно при анализе многокаскадных ИДН, что приводит к необходимости моделирования процессов в ИДН. Широкие возможности для этого представляет система OrCAD 9.2. Модель, созданную в этом пакете с помощью графического редактора PSpice Schematics, условимся обозначать как P-модель. Преобразование полной и упрощенной моделей в соответствующие P-модели осуществляется использованием зависимых источников напряжения типа ИНУН, имеюцихся в библиотеках *OrCAD* 9.2. Адекватность модели оценивалась путем сопоставления результатов моделирования и натурных испытаний опытного образца двухдекадного ОИДН, имеющего разброс параметров декад не более 5 %. Определение относительной погрешности коэффициента передачи делителя проводилось на частотах 50 и 100 кГц методом сравнения с эталонным ИДН, входящим в состав измерительных установок К2-41 и В1-20, с помощью дифференциального указателя Ф7239 (ДУ-12А), входящего в состав поверочной установки высшей точности УВТ 52-А-87 (ВНИИФТРИ). Результаты моделирования и натурных испытаний показали, что погрешности полной и упрощенной моделей для первой ( $\varepsilon_{\delta 1}$ ) и второй ( $\varepsilon_{\delta 1,2}$ ) декад, рассчитанные по формуле (3), не превышают 3 %.

Расчет МХ измерительных систем, состоящих из звеньев, соединенных между собой различными способами, удобно проводить по их передаточным функциям. Задача получения аналитических выражений искомых схемных функций была решена в системе компьютерной математики MATLAB.

Метод построения моделей в форме передаточной функции (*T*-моделей) одно- и многокаскадных ИДН заключается в следующем. По исходной упрощенной модели, содержащей в выходной цепи только две базовые модели, создаем *S*-модель делителя средствами пакета *Simulink*. Затем, с помощью специальных функций получаем передаточные функции отдельных ветвей *S*-модели в виде отношения многочленов комплексной переменной  $s = \sigma + j\omega$ . Далее создаем модель ИДН из блоков передаточных функций (рис. 3), в которой входная цепь отображается блоками с передаточными функциями  $T_{10}$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ , а выходная – блоками с передаточными функциями  $T_{23}$ ,  $T_{33}$  и сумматор *Sum*. Выходной сигнал формируется на выходе второго сумматора *Sum 1*.



Рис.3. Структурная схема однодекадного ИДН при  $K_n = 0, 1$ 

Получено выражение искомой передаточной функции *T*<sub>13</sub> в виде отношения двух многочленов двадцать пятого порядка. После понижения порядка модели получено следующее выражение искомой редуцированной передаточной функции

$$T_{13} = \frac{0,1166s^3 + 2,646 \cdot 10^4 s^2 + 4,115 \cdot 10^{12} s + 1,345 \cdot 10^{12}}{s^3 + 2,451 \cdot 10^5 s^2 + 4,115 \cdot 10^{13} s + 1,262 \cdot 10^{13}}$$

Максимальная погрешность редуцирования составила  $\varepsilon_{1rt} = 11$  %, а максимальная погрешность *T*-модели, определенная методом сравнения ее с эталоном (*P*-моделью) в диапазоне частот до 200 кГц, оказалась равной  $\varepsilon_{\delta r} = \varepsilon_{\delta} + \varepsilon_{\delta 9} = 20$  %, где  $\varepsilon_{\delta}$  – погрешность *T*-модели, рассчитанная по формуле (3);  $\varepsilon_{\delta 9}$  – погрешность эталонной *P*-модели, равная 3 %.

Описанным методом были получены передаточные функции третьего порядка двухдекадных ИДН, выполненных на общем и отдельных сердечниках. Погрешности этих моделей не превысили 20 % и 30 % соответственно.

В третьей главе предложены и исследованы методы расширения частотного и динамического диапазонов индуктивных делителей напряжения.

Для поиска путей повышения точности делителей в *области нижних частот* разработана эквивалентная схема двухдекадного ИДН, в котором делительные обмотки намотаны на общем сердечнике. Используя предложенный метод расчета типового фрагмента, получены условия уменьшения погрешности преобразования в виде

$$\lim_{R_{i+1}-r_{0i}\to\infty}\frac{nr_{0i}}{9r_{0i}+r_{2i}}=0,1n\,,$$
(4)

где  $r_3 = \{r_{0i}(r_{1(i+1)} + r_{2(i+1)} + R_{i+1})\}/(r_{0i} + r_{1(i+1)} + r_{2(i+1)} + R_{i+1}); n$  – номер отвода первой (*i*-ой) делительной обмотки;  $r_{0i}$  – активное сопротивление секции *i*-ой делительной обмотки;  $R_{i+1}$  – активное сопротивление последующей (*i*+1)-ой делительной обмотки;  $r_{1(i+1)}$ ,  $r_{2(i+1)}$  – активные сопротивления соединительных проводов и контактов коммутаторов последующей декады.

Из (4) следует, что, выбирая любые соотношения активных сопротивлений проводов делительных обмоток путем изменения диаметров проводов при условии существенного неравенства сопротивлений  $R_{i+1}$  и  $r_{0i}$ , можно обеспечить сколь угодно малую погрешность коэффициента передачи. Назовем делители, выполненные таким способом, *делителями второго типа* – ИДН 2. В работе приведены рекомендации по технической реализации последних. Моделирование в пакете *OrCAD* 9.2 и экспериментальные исследования с использованием эталонного делителя ДИ-6 и дифференциального указателя Ф7239 показали,

что у ИДН 2 амплитудная погрешность в области нижних частот (ОНЧ) 0,02...20 кГц при  $R_{i+1} = 10r_{0i}$  уменьшается в 4...10 раз, а фазовая – в 14...60 раз. В делителях типа ИДН 2 наряду со снижением массогабаритных и стоимостных показателей, значительно уменьшаются перенапряжения при коммутации обмоток.

Для ИДН 2 получены выражения амплитудной и фазовой погрешностей при максимальном ослаблении, т.е. *К*<sub>п</sub> = 0,01, в виде:

$$\delta_{a01} = \frac{r_{2(i+1)}}{r_{1(i+1)} + r_{2(i+1)} + 10r_{0(i+1)}} \cdot (1 - \frac{r_{0i}}{r_{0i} + r_{1(i+1)} + r_{2(i+1)} + 10r_{0(i+1)}}), \delta_{\phi 01} = \frac{r_{1i} - 89r_{2i}}{\omega L_i}.$$
 (5)

Из (5) видно, что наибольший вклад в амплитудную и фазовую погрешности коэффициента передачи при малых его значениях вносят: активные сопротивления  $r_{2i}$ ,  $r_{2(i+1)}$  нижних подводящих проводов и коммутаторов декад, активные сопротивления секций первой  $(r_{0i})$ , второй  $(r_{0(i+1)})$  декад и индуктивность  $L_i$  делительной обмотки первой декады. Предложены сравнительно простые, но эффективные способы уменьшения активных сопротивлений нижних подводящих проводов и коммутаторов декад, основанные на использовании шунтирующих коммутационных элементов – контактов электромагнитных реле (ЭМР) и понижающих автотрансформаторов. Результаты моделирования показали, что в ОНЧ погрешность при максимальном ослаблении уменьшается в 7...40 раз. Следовательно, имеется возможность расширения динамического диапазона ИДН путем подключения к его выходу дополнительных декад.

Принцип симметрирования. Для построения широкополосных ИДН необходимо обеспечить равенство эквивалентных емкостей, приведенных к секциям делительной обмотки каскада. Предложено для решения поставленной задачи использовать **принцип симметрирования** многосекционных делительных обмоток.

Рассмотрим первый способ построения индуктивного делителя с симметрирующей обмоткой (ИДНСО-1.1). На рис. 4 приведена схема декадного делителя, выполненного на одном тороидальном сердечнике, на котором размещаются пять делительных обмоток L1...L5 (рис. 4, а). Симметрирующая обмотка L1, представляющая собой двоичный делитель, выполняется десятипроводным жгутом. Пятисекционные обмотки L2 и L4 изготавливаются из второго десятипроводного жгута, а обмотки L3 и L5 – из третьего десятипроводного жгута. При известных значениях шунтирующих эквивалентных емкостей пяти- и десятисекционных обмоток для делителя ИДНСО-1.1 получено распределение емкостей как показано на рис. 4, б.



Рис. 4. ИДНСО-1.1: а) принципиальная схема; б) эквивалентные емкости секций

Анализ точности ИДН проводился при следующих допущениях: материал магнитопровода однороден; диаметры проводов всех обмоток одинаковы; активные сопротивления секций равны нулю; индуктивности рассеяния секций одинаковы; емкостные проводимости между обмотками и обмотками и магнитопроводом равны нулю; все взаимные емкости между проводами в жгуте равны между собой.

С учетом этого коэффициент передачи делителя определяется по формуле:

$$K_{\rm ni} = \frac{U_{\rm BMX\,i}}{U_{\rm BX}} = \frac{L_{2i}}{L_{1i} + L_{2i}} \left[ 1 + \omega^2 L_{1i} \left( \frac{L_{2i}}{L_{1i} + L_{2i}} - 1 \right) C_{1i} + \frac{\omega^2 L_{1i} L_{2i}}{L_{1i} + L_{2i}} C_{2i} \right], \tag{6}$$

где  $U_{\text{вых }i}$  – выходное напряжение на *i*-м отводе;  $i = 1, 2, 3, ..., 10; L_{1i}, L_{2i}$  – эквивалентные индуктивности рассеяния и  $C_{1i}, C_{2i}$  – эквивалентные емкости секций, включенных соответственно между отводами *i*, 10 и 0, *i*;  $\omega$  – круговая частота.

После преобразований с учетом выражения (1) получаем

$$K_{n1} = 0, 1(1 - 4\delta); K_{n2} = 0, 2(1 - \delta); K_{n3} = 0, 3(1 + 0, 7\delta);$$
  

$$K_{n4} = 0, 4(1 + \delta); K_{n5} = 0, 5; K_{n6} = 0, 6(1 - 0, 7\delta);$$
  

$$K_{n7} = 0, 7(1 - 0, 3\delta); K_{n8} = 0, 8(1 + 0, 3\delta); K_{n9} = 0, 9(1 + 0, 4\delta),$$
(7)

где  $\delta = \omega^2 L_s C_0$ ;  $L_s$ ,  $C_0$  – индуктивность рассеяния секции и межпроводная емкость соответственно.

В то же время для ОИДН имеем

$$K_{n1} = 0,1(1-12\delta); K_{n2} = 0,2(1-8\delta); K_{n3} = 0,3(1-4,7\delta); K_{n4} = 0,4(1-2\delta); K_{n5} = 0,5; K_{n6} = 0,6(1+1,3\delta); K_{n7} = 0,7(1+2\delta); K_{n8} = 0,8(1+2\delta); K_{n9} = 0,9(1+1,3\delta).$$
(8)

17

Из сравнения выражений (7) и (8) видно, что у ИДНСО-1.1 максимальная частотная погрешность (при минимальном коэффициенте передачи) в три раза меньше, чем у ОИДН.

Проведены метрологические испытания ИДНСО-1.1 и ОИДН методом сравнения с мерой, в качестве которой использовался ИДН типа ДИ-3м. Разность напряжений измерялась дифференциальным указателем Ф7239. Экспериментальные исследования подтвердили существенный выигрыш по точности ИДНСО-1.1 на верхней частоте 100 кГц (рис. 5).



*Рис. 5. Относительные погрешности коэффициентов передач делителей: 1) ИДНСО-1.1; 2) ОИДН; (*×, +*)* – экспериментальные данные

В частности, максимальное значение модуля частотной погрешности (при  $K_{ni} = 0,1$ ) у ИДНСО-1.1 уменьшается в четыре раза. Это позволяет увеличить верхнюю граничную частоту в два раза. Расхождение расчетных и экспериментальных данных объясняется принятыми выше допущениями.

Расширение диапазона рабочих частот приводит к улучшению качества переходного процесса. Действительно, как показали расчеты приведенных динамических погрешностей и экспериментальные исследования, максимальный выброс на первом выходном отводе ИДНСО-1.1 равен 28 %, что в 6 раз меньше, чем у ОИДН.

Входная емкость ИДНСО-1.1 равна  $C_{\text{вх1.1}} = 2,45C_0$ . Напомним, что входная емкость ОИДН равна  $C_{\text{вх0}} = 1,65C_0$ .

Входную емкость можно снизить путем различного выполнения двоичного и пятеричных субделителей. Например, во *втором варианте* (ИДНСО-1.2)

симметрирующая обмотка изготавливается из двухпроводного жгута. Тогда входная емкость делителя равна  $C_{\text{вх1.2}} = 2,05C_0$ .

Второй способ построения ИДНСО основан на выполнении требования полноты модели системы: включении в нее дополнительного элемента, приводящего к повышению ее точности. Так, в одном из вариантов делителя – ИДНСО-2м обмотки L2 и L4 изготавливаются из одиннадцатипроводного жгута, из пяти проводов которого выполняется пятисекционная обмотка L2, а из остальных шести – шестисекционная обмотка L4. Аналогично выполняются обмотки L3 и L5. Таким образом, шестые секции обмоток L4 и L5 и являются теми самыми дополнительными элементами. Введение последних уменьшает отличие эквивалентных емкостей крайних секций от других, и, следовательно, повышает точность делителя на высоких частотах (частотная погрешность в 1,7 раза меньше, чем у ОИДН). Уменьшение выходных импедансов (в 2 раза по активной и в 1,2 раза по индуктивной составляющим) обеспечивает хорошее согласование с последующими каскадами, что в конечном итоге приводит к расширению динамического диапазона. Последний ограничивается уровнем собственных шумов и внешних электромагнитных полей.

Анализ прохождения шумов через ИДН. В работе проведен сравнительный анализ откликов однодекадных делителей типа ОИДН и ИДНСО-2м на воздействие квазибелого шума (9), т.е. белого шума с ограниченным по полосе спектром [- $\omega_c$ , + $\omega_c$ ] со спектральной плотностью мощности (СПМ)

$$S_{_{\rm BX}}(\omega) = \begin{cases} S_0, \, |\omega| \le \omega_{\rm c}, \\ 0, \, |\omega| > \omega_{\rm c}. \end{cases}$$
(9)

Пусть для упрощения дальнейших расчетов  $S_0 = 1 \text{ B}^2/\Gamma$ ц, тогда средний квадрат напряжения на выходе имеет вид

$$\overline{U}_{\scriptscriptstyle B b I X}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \left| K_n(j\omega) \right|^2 d\omega, \qquad (10)$$

где  $K_n(j\omega)$  – коэффициент передачи ИДН.

Таким образом, для нахождения отклика необходимо определить коэффициент передачи ИДН. Аналитическое выражение последнего можно найти по эквивалентной схеме средствами *Simulink*/MATLAB. Делители отличаются параметрами входной и выходной цепей. При заданных исходных данных по алгоритму, приведенному в главе 2, получены редуцированные передаточные функции входных цепей для ОИДН и ИДНСО-2м в виде

$$T_{\rm on} = \frac{j9,525 \cdot 10^{13} \,\omega + 2,857 \cdot 10^{13}}{j9,535 \cdot 10^{13} \,\omega + 2,667 \cdot 10^{14}}, \ T_{\rm co} = \frac{j5,953 \cdot 10^{13} \,\omega + 5,952 \cdot 10^{12}}{j5,959 \cdot 10^{13} \,\omega + 1,548 \cdot 10^{14}}.$$
 (11)

Подставив (11) в (10) и проведя интегрирование в среде MAPLE 11, получим средние квадраты выходных напряжений. Из их сравнения следует, что средняя мощность шума на выходе делителя ИДНСО-2м в диапазоне частот [- 0,15 Гц, + 0,15 Гц] на 20 % меньше, чем у ОИДН. Обусловлено это меньшим активным сопротивлением делительной обмотки ИДНСО-2м. В более широкой полосе частот мощности шумов отличаются не более чем на 2 %.

Таким образом, по шумовым свойствам во всем диапазоне рабочих частот ОИДН и ИДНСО-2м идентичны. Преимущества ИДНСО-2м проявляются только в инфранизкочастотном поддиапазоне. Напомним, что этот делитель имеет меньший выходной импеданс по сравнению с другими вариантами ИДНСО. Поэтому ИДНСО-2м был использован для расширения динамического диапазона и разрешающей способности установки В1-20 при калибровке установки для проверки медицинских электродов УПЭ-2 и установки К2-41 при калибровке дифференциального нановольтметра ДНВ-1. Краткие описания УПЭ-2 и ДНВ-1 приведены в Приложениях диссертации.

*Высоковольтный ИДН*. Эффективность принципа симметрирования проявляется и при построении делителей лестничного типа. В декадном ИДН (рис. 6)



Рис. 6. Принципиальная схема лестничного ИДНСО (сердечники трансформаторов TV2 – TV12 не обозначены)

используется параллельно-последовательное соединение двоичных делителей *TV2...TV*12, размещенных на отдельных сердечниках. Теоретически при иден-

тичных характеристиках сердечников и параметрах жгутов рассматриваемый ИДН не имеет частотной погрешности. Особенность делителей лестничного типа заключается в существенно меньшем значении входной емкости и высоком допустимом уровне входного напряжения (до нескольких единиц кВ) в диапазоне частот 20 Гц...1 МГц.

Однако, такие делители обладают значительным выходным импедансом, например, выходной импеданс на пятом отводе ИДН лестничного типа в 30 раз больше выходного импеданса среднего отвода ОИДН.

Получено выражение зависимости выходного импеданса от номера отвода *n* в виде

$$Z_{\text{вых }n'} = \sum_{i=1}^{n'} a_i (1 - \frac{\sum_{i=1}^{n'} a_i}{2\sum_{i=1}^{0,5m}}) m z_c \text{ ДЛЯ } n' = 1, 2, 3, \dots, \frac{m}{2} \text{ M}$$

$$(12)$$

$$Z_{\text{вых } n} = \sum_{i=1}^{m-n} a_i \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{m-n} a_i}{2\sum_{i=1}^{0.5m} a_i}\right) m z_c \text{ для } n = \frac{m}{2} + 1, \frac{m}{2} + 2, \dots, m-1;$$

где m – число квантованных уровней выходного напряжения;  $z_c$  – средний импеданс секций;  $a_i$  – натуральные числа.

Из формулы (12) при *m* = 10 получаем

$$Z_{\text{BMX1}} = Z_{\text{BMX9}} = 10z_{\text{c}}, \quad Z_{\text{BMX2}} = Z_{\text{BMX8}} = 27z_{\text{c}}, \\ Z_{\text{BMX3}} = Z_{\text{BMX7}} = 48z_{\text{c}}, \quad Z_{\text{BMX4}} = Z_{\text{BMX6}} = 67z_{\text{c}}, \quad Z_{\text{BMX5}} = 75z_{\text{c}}.$$
(13)

Большие значения выходных импедансов Z<sub>вых</sub> приводят к существенному росту методической погрешности при экспериментальном исследовании метрологических характеристик ИДН.

Метод симметрирования позволил улучшить параметры ИДН лестничного типа, благодаря подключению параллельно декадному делителю симметрирующего двоичного делителя TV1 (см. рис. 6), выполненного на отдельном сердечнике. Для случая идеального симметрирующего делителя, когда его выходной импеданс  $z_0$  равен нулю, получены следующие значения выходных импедансов декадного делителя

$$Z_{_{B\,bIX1}} = Z_{_{B\,bIX4}} = Z_{_{B\,bIX6}} = Z_{_{B\,bIX9}} = 4, 4z_{_{C}},$$

$$Z_{_{B\,bIX2}} = Z_{_{B\,bIX3}} = Z_{_{B\,bIX7}} = Z_{_{B\,bIX8}} = 10z_{_{C}}, \quad Z_{_{B\,bIX5}} = 0.$$
(14)

Из выражений (13) и (14) видно, что наиболее значимо снижается выходной импеданс на пятом отводе. При  $z_0 \neq 0$  выходной импеданс на этом отводе приближенно равен выходному импедансу симметрирующей обмотки, который можно уменьшать путем использования проводов большего поперечного сечения, их параллельного соединения, применения активных устройств, например, электронных усилителей.

Малые выходные сопротивления рассмотренного варианта лестничного ИДН уменьшают методическую погрешность при экспериментальных исследованиях. Так, погрешность аттестации высоковольтного ИДН равна  $5 \cdot 10^{-6}$  при  $U_{\rm Bx} = 1000$  В среднеквадратического значения и частоте 100 кГц. При этом относительная погрешность коэффициента передачи не превышала  $3 \cdot 10^{-5}$ .

**Четвертая глава** посвящена вопросам проектирования многоканальных делителей напряжения.

В двухканальных ИДН изменение связей происходит на границе двух частотных поддиапазонов – частоте сопряжения f<sub>2</sub>. В диссертации разработана расчетно-экспериментальная методика проектирования двуканального многокаскадного ИДН, позволяющая с достаточной степенью точности осуществить выбор конструктивных и электромагнитных параметров ИДН и частоты f<sub>2</sub> при заданных значениях погрешностей на нижней  $f_{\rm H}$  и верхней  $f_{\rm B}$  граничных частотах. Предложен и другой вариант построения широкополосного ИДН – трехканальный делитель композиционного типа. Особенностью такой структуры является то, что при помощи дополнительных коммутаторов из каскадов НЧ и ВЧ каналов образуется среднечастотный (СЧ) многокаскадный ИДН. В соответствии с этим диапазон рабочих частот разбивается на три поддиапазона: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Обоснована целесообразность построения СЧ делителя из третьей – шестой НЧ декад и пятой, шестой декад ВЧ канала. При этом возможны две постановки задачи проектирования: прямая и обратная. Прямая задача: по заданным границам НЧ и ВЧ поддиапазонов  $f_{\rm H}$ ,  $f_2$ ,  $f_{\rm B}$  определить границы СЧ поддиапазона  $f_1$ ,  $f_3$ . Обратная задача заключается в следующем: по заданному значению относительной погрешности коэффициента передачи  $\delta K_{a}$  определить минимальную возможную нижнюю границу  $f_{\rm H}$  и максимально возможную верхнюю границу  $f_{\rm B}$  диапазона рабочих частот ИДН.

При решении прямой задачи проведен машинный расчет АЧХ НЧ, СЧ и ВЧ каналов ИДН. Построены зависимости погрешностей коэффициентов передач от частоты и найдены частоты сопряжений  $f_1$  и  $f_3$  как абсциссы точек пересечений трех кривых. Анализ зависимостей показал, что введение СЧ канала позволяет существенно снизить значения погрешностей ИДН в диапазоне частот  $f_1 \dots f_3$ . Кроме того, в трехканальных ИДН зависимости входного сопротивления и допустимого уровня входного напряжения от частоты имеют более равномерный вид, при этом на частоте  $f_2$  выигрыш достигает пять раз.

В работе предложен вариант решения обратной задачи, когда известны параметры первой декады СЧ канала. Путем моделирования на ЭВМ с использованием полных и упрощенных моделей рассчитана АЧХ СЧ канала и построена зависимость относительной погрешности коэффициента передачи от частоты (кривая 3 на рис. 7). Абсциссы точек пересечений кривой 3 с линией заданной погрешности  $\delta K_{\mu} = \delta K_{3}$  являются частотами сопряжений  $f_{1}$  и  $f_{3}$ .



Рис. 7. Частотная погрешность ИДН композиционного типа

В результате решения обратной задачи удалось спроектировать ИДН, имеющий при тех же значениях требуемой погрешности значительно больший диапазон рабочих частот  $f_{\rm H} \dots f_{\rm B}$  по сравнению с двухканальным ИДН, без существенного усложнения как структуры, так и конструкции ИДН. Из анализа кривых 1...3 видно, что введение СЧ делителя позволяет расширить полосу частот в области НЧ и ВЧ путем сдвига кривой 1 (кривая погрешности НЧ канала) влево, а кривой 2 (кривая погрешности ВЧ канала) вправо по оси частот. Так, в трехканальном ИДН типа ДИ-5 нижняя граница уменьшена до 10 Гц при одновременном уменьшении погрешности в два раза. В то же время, малое число витков и соответственно малые паразитные параметры декад ВЧ канала расширили диапазон рабочих частот до 150 кГц, что в 1,5 раза больше верхней граничной частоты двухканального ИДН.

Таким образом, многоканальные ИДН композиционного типа обеспечивают без значительных аппаратных затрат высокую точность деления напряжения в широком диапазоне частот.

Кодоуправлямые индуктивные делители напряжения (КИДН). В высокоточных КИДН коммутация отводов делительных обмоток осуществляется контактами электромагнитных реле. В области верхних частот превалирующее влияние на точность КИДН оказывают паразитные параметры ЭМР, соединительных проводов и емкости монтажа и нагрузки. Эффективными являются методы нейтрализации паразитных емкостей, основанные на идеях, используемых в теории инвариантности. Представим многокаскадный КИДН в виде объекта, на который воздействуют возмущения в виде паразитных параметров ЭМР и монтажных емкостей и вызывают отклонения реальных характеристик ИДН от номинальных. Тогда в качестве элемента второго канала можно выбрать паразитную емкость между контактом и металлическим экраном реле. Соединив все экраны и подав на них напряжение от дополнительного источника напряжения, равное, например,  $U_{\rm g} = 2U_{\rm вых}$ , можно уменьшить влияние паразитных емкостей и повысить точность КИДН на высоких частотах. В работе предложены технические решения, защищенные авторскими свидетельствами, по созданию дополнительных источников напряжения на основе электронных усилителей, автотрансформаторов и НЧ части КИДН. Последний реализован в КИДН типа ДИП-2 (рис. 8), входящего в состав калибратора Ф7090 и автоматизированного поверочного комплекса «Кедр-1».



Рис. 8. Схема формирования компенсирующего напряжения

Для подтверждения эффективности предложенного способа повышения точности были проведены испытания делителя ДИП-2м с помощью установки К2-41 на частоте 200 кГц. Установлено, что при использовании компенсирующего напряжения погрешность уменьшается в 2...3 раза (в зависимости от коэффициента передачи).

Кодоуправляемые индуктивно-резистивные делители напряжения (КИРДН). В рамках многоканального принципа построения делителя исследовано функциональное объединение двух типов делителей напряжения – КИДН и кодоуправляемого резистивного (КРДН). Такое решение позволяет уменьшить массо-габаритные показатели ИДН. В зависимости от требуемого приоритета характеристик (быстродействие, надежность, диапазон частот) возможны различные варианты построения кодоуправляемых индуктивно-резистивных делителей (КИРДН). Эти варианты можно разделить на два класса: комбинированные делители напряжения переменного тока и универсальные, т.е. способные работать как на переменном, так и на постоянном токе. КИРДН переменного тока можно в свою очередь разбить на комбинированные делители с сумматором на входе и с сумматором на выходе. Проведен анализ погрешностей, определены требования, предъявляемые к звеньям – КИДН и КРДН (микроэлектронным ЦАП).

При создании *универсальных* делителей целесообразно использовать автокоррекцию погрешности КРДН методом образцового сигнала, реализованного на основе КИДН. Если последний играет роль узкополосной образцовой меры, то КРДН, буферированный усилителем с регулируемым коэффициентом усиления (РУ), работает во всем диапазоне рабочих частот, например, 0...200 кГц. При такой сравнительно широкой полосе частот увеличиваются некоррелированные (высокочастотные) составляющие погрешности. Для уменьшения их влияния на погрешность коррекции корректирующий сигнал образуется путем интегрирования погрешности делителя.

Фильтрация не нужна при пренебрежении дисперсией некоррелированной составляющей погрешности. Это возможно для узкополосных РУ. Отсюда следует другой вариант построения универсального КИРДН (рис. 9), состоящего из КИДН, КРДН, РУ, схемы сравнения СС, блока выходных аттенюаторов БВА, блоков коммутации БК1 и БК2 и устройства управления УУ. По принципу действия такой делитель аналогичен двухканальному ИДН. В низкочастотном диапазоне, например 0...1 кГц, работает КРДН, а в высокочастотном 1...100 кГц – КИДН. В режимах «Коррекция» и «Измерение» каналы конфигурируются блоками коммутации БК1 и БК2.

Автокоррекция характеристики преобразования КРДН производится на нижней границе частотного диапазона КИДН, где последний играет роль эталона. Ограничение полосы частот КРДН позволяет использовать в качестве резистивного делителя современные прецизионные интегральные умножающие ЦАП. Так как КИДН работает только в высокочастотной области, то и он может быть выполнен малогабаритным.



Рис. 9. Структурная схема двухканального КИРДН

Программируемый делитель ДНП-2, реализованный по приведенной выше структурной схеме, входит в состав автоматизированного метрологического комплекса «Степь».

**Пятая глава** посвящена методам и средствам метрологического обеспечения ИДН.

Для решения задачи нормирования погрешностей и АЧХ в области высоких частот разработан метод расчета амплитудной погрешности одно- и двухдекадного ИДН с учетом стохастических свойств жгутов, из которых выполняются делительные обмотки.

Для декадного ОИДН коэффициент передачи для *i*-го выходного отвода определяется выражением (6). В этой формуле эквивалентные индуктивности рассеяния и емкости секций определяются в виде:

$$L_{1i} = \sum_{j=i+1}^{10} L_{sj}, L_{2i} = \sum_{j=1}^{i} L_{sj}, C_{1i} = (1\ 0 - i)^{-2} \sum_{j=i+1}^{10} C_j, C_{2i} = i^{-2} \sum_{j=1}^{i} C_j,$$
(15)

где  $L_{sj}$  и  $C_j$  – индуктивность рассеяния и шунтирующая емкость *j*-й секции; *j* = 1, 2, 3,..., 10.

Из (6) получаем формулу амплитудной погрешности

$$\delta_{ai} = -\frac{\omega^2 L_{1i}^2}{L_{1i} + L_{2i}} C_{1i} + \frac{\omega^2 L_{1i} L_{2i}}{L_{1i} + L_{2i}} C_{2i} .$$
(16)

На основании формул (16) и (15) находим:

$$\begin{split} \delta_{a1} &= -12\delta; \, \delta_{a2} = -8\delta; \, \delta_{a3} = -4, 7\delta; \, \delta_{a4} = -2\delta; \\ \delta_{a5} &= 0; \, \delta_{a6} = 1, 3\delta; \, \delta_{a7} = 2\delta; \, \delta_{a8} = 2\delta; \, \delta_{a9} = 1, 3\delta, \end{split}$$

где  $\delta = \omega^2 L_s C_0$ .

Отклонения межпроводных емкостей и индуктивностей рассеяния проводов в жгуте от их средних значений C<sub>0</sub>, L<sub>s</sub> и случайная последовательность соединения проводов в делительных обмотках генеральной совокупности декадных ИДН обуславливают случайный характер амплитудной погрешности. Последняя, как следует из (15) и (16), является многомерной случайной величиной, зависящей от двадцати параметров, вследствие чего аналитический расчет оказывается весьма трудоемким. Решение задачи упрощается, если воспользоваться критерием существенности случайной составляющей погрешности. Так, амплитудную погрешность (16), обусловленную разбросом параметра секций, полагаем пренебрежимо малой, если среднее квадратическое отклонение (СКО) σ параметра не превышает 10 % среднего значения. В ряде работ приводятся данные о том, что СКО индуктивностей рассеяния проводов не превышает 6 %, тогда как СКО межпроводных емкостей достигает 20 %. Тогда, если пренебречь влиянием индуктивностей рассеяния, то амплитудная погрешность, распределенная по нормальному закону, зависит только от стохастических свойств емкости между двумя проводами жгута.

Для расчета амплитудной погрешности по формуле (16) необходимо доказать факт статистической зависимости случайных величин  $C_{1i}$  и  $C_{2i}$ . С учетом формулы (15) это следует из коррелированности эквивалентных шунтирующих емкостей секций  $C_j$  декадной обмотки. Действительно, если рассмотреть упрощенную физическую модель жгута, например, четырехпроводного (рис. 10), то в сечении А емкости между проводами 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3 равны между собой, т.е.  $C_0^{12} = C_0^{13} = C_0^{23} = C_0$ , а емкость между проводами 3 и 4 меньше остальных, т.е.  $C_0^{34} < C_0$ . При случайной перестановке проводов емкости изменяются. Например, в сечении Б имеем  $C_0^{34} = C_0$ , но  $C_0^{13} < C_0$ .



Рис. 10. Расположение проводов в поперечных сечениях жгута

То есть, увеличение межпроводной емкости одной пары проводов сопровождается уменьшением взаимной емкости другой. Из рис. 10 виден механизм появления разброса значений межпроводных емкостей от среднего значения емкости  $C_0$ . Несмотря на случайное смешивание проводов, с некото-

рой вероятностью пара проводов всегда будет располагаться в поверхностном слое сечения жгута, а другая – в центре.

Таким образом, амплитудная погрешность (16) представляет собой функцию двух коррелированных величин  $C_{1i}$ ,  $C_{2i}$  и для её дисперсии получено следующее выражение:

$$D[\delta_{ai}] = A_i^2 D[C_{1i}] + B_i^2 D[C_{2i}] + 2A_i B_i R[C_{1i}C_{2i}] \sqrt{D[C_{1i}]D[C_{2i}]}, \qquad (17)$$

где 
$$A_i = -\frac{\omega^2 L_{1i}^2}{L_{1i} + L_{2i}}; B_i = \frac{\omega^2 L_{1i} L_{2i}}{L_{1i} + L_{2i}}; R[C_{1i} C_{2i}], D[C_{1i}], D[C_{2i}] - коэффициент кор-$$

реляции и дисперсии величин C<sub>1i</sub> и C<sub>2i</sub> соответственно.

Для упрощения расчета принимаем  $R[C_{1i}C_{2i}] = -1$ . Это допущение обусловливает сильную обратную корреляцию между двухпроводными емкостями как в одном жгуте, так и во всей совокупности жгутов.

Тогда формула (17) принимает вид

$$D[\delta_{ai}] = A_i^2 D[C_{1i}] + B_i^2 D[C_{2i}] - 2A_i B_i \sqrt{D[C_{1i}] D[C_{2i}]}.$$
 (18)

Для определения дисперсий емкостей  $C_{1i}$  и  $C_{2i}$  предположим, что среднее значение межпроводных емкостей генеральной совокупности равно  $C_0$ , а дисперсия –  $D[C_0]$ . Тогда, используя методику приведения межпроводных емкостей  $C_0$ , подключенных к серединам секций, к концам каждой секции декадной обмотки, можно рассчитать дисперсии емкостей для *i*-го отвода обмотки. Например, для отвода *i* = 1 из (15) находим:

$$C_{11} = \frac{1}{9^2} (2 \cdot 12, 5 + 2 \cdot 18, 5 + 2 \cdot 22, 5 + 2 \cdot 24, 5 + 4, 5) C_0 = 1,98C_0; \quad C_{21} = \frac{4,5C_0}{1^2} = 4,5C_0;$$
$$D[C_{11}] = D[1,98C_0] = 3,9D[C_0], \quad D[C_{21}] = D[4,5C_0] = 20,3D[C_0].$$

После вычисления всех значений  $D[C_{1i}]$  и  $D[C_{2i}]$  по формуле (18) были найдены значения дисперсии амплитудной погрешности  $D[\delta_{ai}]$  для всех отводов.

Расчет результирующей погрешности был сделан в предположении, что коэффициент вариации  $V = \sqrt{D[C_0]}/C_0 = 0,2$  и доверительная вероятность  $P_{\rm q} = 0,997$ . Полученные интервалы амплитудной погрешности имеют вид:

$$\delta_{1} = -(12 \pm 12)\delta; \delta_{2} = -(8 \pm 13)\delta; \delta_{3} = -(4,7 \pm 12)\delta; \delta_{4} = -(2 \pm 12)\delta; \\ \delta_{5} = \pm 10\delta; \delta_{6} = (1,3 \pm 8)\delta; \delta_{7} = (2 \pm 5)\delta; \delta_{8} = (2 \pm 3)\delta; \delta_{9} = (1,3 \pm 1,3)\delta.$$

$$(19)$$

На рис. 11 приведен пример графического представления АЧХ делителя для коэффициента передачи 0,1 при  $L_s C_0 = 2,6 \cdot 10^{-16} c^2$ .



Рис. 11. АЧХ ИДН в области верхних частот:

1) номинальная характеристика; 2, 3) верхняя и нижняя граничные характеристики

В работах Иыерса Р.Р. проведен расчет границ разброса амплитудной погрешности для отводов 1...5 путем статистического моделирования на ЭВМ случайной последовательности соединения проводов делительной обмотки и получены интервалы амплитудной погрешности:

 $\delta_1' = -(12 \pm 11)\delta, \, \delta_2' = -(8 \pm 10)\delta, \, \delta_3' = -(4,7 \pm 11)\delta, \, \delta_4' = -(2 \pm 9)\delta, \, \delta_5' = \pm 7\delta.$ (20)

Результаты расчета по формулам (20) совпадают (отличие менее 30 %) с интервалами погрешностей (19) для тех же пяти нижних отводов. В диссертации получены аналитические выражения амплитудных погрешностей для всех отводов декадного ИДН. Экспериментальные исследования подтверждают, что погрешности отдельных экземпляров ОИДН находятся в зоне допусков, определяемых формулой (19).

По этой методике проведены расчеты интервалов амплитудных погрешностей ИДН с симметрирующей обмоткой и двухдекадных ИДН, выполненных на общем и отдельных сердечниках.

Предложенный метод расчета амплитудной погрешности как случайной величины применим для расчета как одно-, так и многокаскадных ИДН, делительные обмотки которых могут содержать любое число секций с известными распределениями шунтирующих емкостей секций и статистическими характеристиками параметров секций. При этом исходные данные для расчета (индуктивности рассеяния и межпроводные емкости) определяются сравнительно простыми методами и средствами измерений.

Из экспериментальных методов определения погрешностей коэффициента передачи делителя наибольшее применение нашел метод сравнения поверяемого делителя с эталонным ИДН. На основе теоретических исследований, проведенных в главах 2, 3 и 4, созданы прецизионные узкополосные и широкополосные многокаскадные ИДН.

Эталонный шестидекадный самоповеряемый делитель ДИ-6 выполнен по двухступенчатой технологии и по способу размещения двух декад на одном сердечнике, т.е. в виде ИДН 2. При этом делительные обмотки были изготовлены одиннадцатипроводными жгутами, из десяти проводов которых выполнялись декадные обмотки, а одиннадцатого провода – опорные секции. Последние обеспечивают возможность поверки ИДН методом опорного потенциала.

По точности ДИ-6 не уступает зарубежным аналогам (табл. 1). С 1986 года ДИ–6 используется во ВНИИФТРИ в составе установки высшей точности для измерения электромагнитных колебаний УВТ 52–А–87 в качестве исходной меры ослабления в диапазоне частот 0,4...1 кГц.

При экспериментальном определении погрешностей делителей любых типов, в том числе ЦАП, в широком частотном и динамическом диапазонах необходимы эталонные делители, точность которых должна быть более чем в три раза выше точности поверяемых масштабных измерительных преобразователей. Для этих целей были созданы ИДН с переменными связями – двухканальные типа Р755, ДИ-3м и трехканальный ДИ-5, являющиеся более широкополосными по сравнению с зарубежными ИДН (см. табл. 1). По результатам испытаний, проведенных во ВНИИФТРИ, делитель ДИ-3м аттестован в качестве рабочей эталонной меры ослабления в диапазоне частот 0,02...200 кГц и динамическом диапазоне 120 дБ. Делитель ДИ-3м включен в состав УВТ 52–А–87.

Особенностью разработки ИДН является широкое использование экспериментальных данных на разных стадиях и этапах проектирования. Правильное проектирование ИДН возможно только при наличии методов и средств измерений характеристик ИДН, отличающихся приемлемой точностью, высокой производительностью и низкой стоимостью проведения экспериментальных работ. Этим требованиям удовлетворяют разработанные и созданные компьютерные системы измерений параметров и характеристик ИДН, состав аппаратных средств которых (вольтметры, генераторы, платы сбора данных) определяется реализуемыми методами измерений характеристик элементов и всего ИДН в целом; программноуправляемые генераторы тестовых напряжений постоянного и переменного тока с диапазоном частот до 200 кГц на основе ЦАП, активных *RC*-цепей и функционального генератора *MAX*038; дифференциальный нановольтметр с чувствительностью 50 нВ в диапазоне рабочих частот 0,2...2 кГц.

Тип (число декад) Диапазон рабочих частот <i>f</i> , кГц	Предел	Импеданс		Допустимое	
	допускаемой основной погрешности преобразования	входной	выходной	входное напряжение, В	
DT72A США (7)	0,051 120	$\pm 10^{-6}$ при $K_{\Pi} = 0, 11$ $\pm 10^{-6} (\sqrt{10K_{\Pi}^{-1} + 0, 01}) f_{[\kappa\Gamma\Pi]}^2$	500 кОм	5 Ом, 30 мкГн	0,35 <i>f</i> [Гц], (макс. 350 В)
Т 924 NPL Англия (6)	0,055	$\pm 5.10^{-7}/K_{ m m}$	1 Гн	10 Ом, 20 мкГн	0,05 <i>f</i> [Гц], (макс. 150 В)
ДИ-6 (6)	0,41	$\pm (3 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 10^{-9} / K_{\pi})$ при $K_{\pi} = 0, 1 \dots 1$	10 кОм	6 Ом, 15 мкГн	0,35 <i>f</i> [Гц], (макс. 350 В)
ДИ-3м (6)	1 0,02200	$ \pm (5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-7} / K_{\pi})  \pm (4 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-7} / K_{\pi}) $	50 кОм	5 Ом, 5 мкГн	0,5 <i>f</i> [Гц], (макс. 200 В)
P755 (8)	1 0,02200	$ \pm (5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-7} / K_{\rm m})  \pm (4 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-7} / K_{\rm m}) $	50 кОм	5 Ом, 5 мкГн	0,5 <i>f</i> [Гц], (макс. 200 В)
ДИ-5 (6)	1 0,01200	$ \pm (3 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-7} / K_{\pi})  \pm (3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-7} / K_{\pi}) $	100 кОм	5 Ом, 5 мкГн	<i>f</i> [Гц], (макс. 300 В)
ДИП-2м (6)	1 0,02200	$ \pm (5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6} / K_{\pi})  \pm (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-6} / K_{\pi}) $	50 кОм	5 Ом, 5 мкГн	0,5 <i>f</i> [Гц], (макс. 200 В)
ДНП-2 (6)	010 100	$ \begin{array}{c} \pm (10^{-5} + 3 \cdot 10^{-7} / K_{\rm m}) \\ \pm (3 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-6} / K_{\rm m}) \end{array} $	10 кОм	5 Ом, 5 мкГн	10

Технические характеристики индуктивных делителей напряжения

В приложениях приведены методика проектирования импульсного трансформатора, результаты расчета шестидекадного ИДН в системе *OrCAD* 9.2, переходные характеристики ИДН, описания и технические характеристики серийных установок К2-41, В1-20, ИДН с ручным и программным управлением, кодоуправляемых индуктивно-резистивных делителей, приборов медицинского назначения и ядерной физики, калибровка которых проводилась с использованием разработанных ИДН, и документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования новых методов повышения точности делителей напряжения в области низких и высоких частот и улучшения временных характеристик. В результате проведенных исследований автором получены следующие результаты:

1. Предложены адекватные сравнительно полные и упрощенные математические модели ИДН, позволяющие осуществлять расчет и анализ многокаскадных делителей различных структур и сложности аналитическими и машинными методами. Разработана методика получения передаточной функции одно- и многокаскадных ИДН не выше третьего порядка в системе MATLAB.

2. Определены и сформулированы условия уменьшения погрешности коэффициента передачи в области низких частот. Предложены пути повышения точности, заключающиеся в размещении двух каскадов на общем магнитопроводе при выполнении их обмоток проводами существенно разных диаметров и введении дополнительных компенсационных обмоток.

3. Проведено исследование источников погрешностей ИДН при больших ослаблениях и предложены меры по уменьшению аддитивной погрешности до 200 нВ и расширению динамического диапазона до 160 дБ с помощью шунтирующих коммутационных элементов и понижающих автотрансформаторов.

4. Разработан принцип симметрирования обмоток, позволяющий увеличить верхнюю граничную частоту в 1,2...2,2 раза. Предложены и исследованы варианты ИДН с симметрирующими обмотками. Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование применимости метода симметрирования для построения высоковольтного ИДН с относительной погрешностью коэффициента передачи 0,003 % при уровне входного напряжения 1000 В и частоте 100 кГц.

5. Установлено, что для расширения диапазона рабочих частот многокаскадных ИДН необходимо использовать структуры с переменными связями. Предложена методика расчета частоты сопряжения двухканальных делителей. Разработаны и исследованы трехканальные ИДН композиционного типа, имеющие более высокие метрологические характеристики в диапазоне частот 0,01...200 кГц при минимальных аппаратурных затратах.

6. Показано, что погрешность деления напряжения кодоуправляемых ИДН на высоких частотах определяется в основном параметрами коммутационных и соединительных элементов, емкостями монтажа и нагрузки. На основе разработанной модели кодоуправляемого ИДН и теории инвариантности предложено использовать низкочастотный канал для формирования компенсирующего воз-

действия на источники погрешностей, что позволило уменьшить погрешность в два раза на частоте 200 кГц.

7. Разработаны и исследованы комбинированные индуктивно-резистивные делители напряжения. Предложены схемы кодоуправляемых универсальных делителей с автокоррекцией погрешности резистивного делителя методом образцового сигнала, реализуемого индуктивным делителем.

8. Предложен аналитический метод оценки выбросов напряжений на выходных отводах делительной обмотки. Правильность этого метода подтверждена экспериментальными исследованиями переходных характеристик одноступенчатого делителя и ИДН с симметрирующей обмоткой. Предложены способы уменьшения перенапряжений в многокаскадных ИДН, не приводящие к снижению быстродействия и ухудшению частотных свойств и не требующие значительных аппаратных затрат.

9. Проведен анализ прохождения шумов через различные типы ИДН. Отмечено, что такое исследование стало возможным только в результате разработанной методики получения аналитического выражения передаточной функции в системе MATLAB.

10. Разработан новый метод расчета амплитудной (частотной) погрешности одно- и многокаскадных ИДН различных типов с учетом стохастических свойств элементов. Получены интервалы амплитудных погрешностей с заданной вероятностью. Последние позволяют нормировать номинальную АЧХ и допускаемые отклонения от нее. При этом исходные данные для расчета – индуктивности рассеяния и межпроводные емкости – определяются сравнительно простыми методами и средствами измерений.

11. В результате проведенных исследований разработаны принципы построения и созданы прецизионные ИДН, дифференциальный нановольтметр и генераторы для метрологического обеспечения ИДН. По результатам испытаний в ВНИИФТРИ делитель ДИ-6 аттестован в качестве исходной меры ослабления в диапазоне частот 0,4...1 кГц, а делитель ДИ-3м – как рабочий эталон в диапазоне частот 0,02...200 кГц в динамическом диапазоне 120 дБ.

12. Разработаны и изготовлены индуктивные и индуктивно-резистивные делители напряжения в виде отдельных приборов и в составе различных систем. Ряд из них выпускались серийно – установка для поверки вольтметров В1-20, установка измерительная комплексная К2-41, отдельными партиями – программируемый источник калиброванных напряжений переменного тока Ф7090, автоматизированный поверочный комплекс «Кедр-1», автоматизированный метрологический комплекс «Степь». Разработанные средства измере-

ний защищены авторскими свидетельствами и патентами России. Показана эффективность применения установок B1-20 и K2-41 совместно с ИДН с симметрирующими обмотками при калибровке измерительных каналов приборов медицинского назначения и ядерной физики, а также установки УПЭ-2 при измерениях аддитивной погрешности и малых напряжений на выходе ИДН.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения: монография. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 214 с.

2. Ким В.Л. Многоканальные композиционные индуктивные делители напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – N 6. – С. 49–53.

3. Ким В.Л. Алгоритм определения частоты сопряжения в многоканальном индуктивном делителе напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – N 4. – С. 52–55.

4. Ким В.Л. Повышение точности многокаскадных индуктивных делителей напряжения в диапазоне низких частот // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – N 8. – С. 44–49.

5. Ким В.Л. Математическое моделирование индуктивного делителя напряжения в системе MATLAB // Электричество. – 2006. – N 8. – С. 23–29.

6. Ким В.Л. Моделирование многокаскадных индуктивных делителей напряжения в частотной области // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – N 2. – С. 15–20.

7. Ким В.Л. Расчет случайной погрешности многокаскадного индуктивного делителя напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – N 4. – С. 40–43.

8. Ким В.Л. Расчет случайной погрешности индуктивных делителей напряжения с симметрирующей обмоткой // Электричество.–2005.–N 2.– C. 48–52.

9. Ким В.Л. Расчет погрешностей индуктивного делителя напряжения с симметрирующей обмоткой // Измерительная техника. – 2004. – N 10. – С. 40–43.

10. Ким В.Л. Расчет погрешностей многодекадного индуктивного делителя напряжения // Известия Томского политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, N 6. – С. 121–125.

11. Ким В.Л. Анализ подавления четных гармоник в управляемом аттенюаторе на полевых транзисторах // Известия ВУЗов «Приборостроение». – 2004. – N 5. – С. 58–61.

12. Ким В.Л. Расчет амплитудной погрешности индуктивного делителя напряжения // Измерительная техника. – 2004. – N 3. – С. 28–31.

13. Ким В.Л. Расчет выходного импеданса индуктивного делителя напряжения с симметрирующей обмоткой // Известия Томского политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, N 2. – С. 145–148.

14. Ким В.Л. Новый способ расширения частотного диапазона индуктивных делителей напряжения // Электричество. – 2003. – N 12. – C. 46–49.

15. Ким В.Л. Широкополосный индуктивный делитель напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – N 9. – С. 22–24.

16. Ким В.Л. Синтез управляемых аттенюаторов с малыми нелинейными искажениями // Известия Томского политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, N 4. – С. 67–71.

17. Ким В.Л. Индуктивные делители напряжения с симметрирующей обмоткой // Известия Томского политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, N 3. – С. 93–95.

18. Ким В.Л. Микропроцессорные системы: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2000. – 136 с.

19. Ким В.Л., Казаков В.Ю., Меркулов С.В. Компьютерная система измерения параметров медицинских электродов // Датчики и системы. – 2008. – N 8. – С. 44–46.

20. Ким В.Л., Меркулов С.В. Кодоуправляемые индуктивно-резистивные делители напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – N 1. – С. 42–45.

21. Ким В.Л., Меркулов С.В. Компьютерная система измерения характеристик индуктивных делителей напряжения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – N 3. – С. 42–45.

22. Ким В.Л., Меркулов С.В. Моделирование индуктивных делителей напряжения в системе MATLAB // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – N 8. – С. 20–25.

23. Ким В.Л., Дайнаков В.Н. Моделирование многодекадного индуктивного делителя напряжения в системе MATLAB // Известия Томского политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, N 4. – С. 167–172.

24. Ким В.Л., Ройтман М.С. Эталонный индуктивный делитель напряжения // Известия Томского политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, N 5. – С. 88–92.

25. Муравьев С.В. Ким В.Л., Комаров А.В., Октябрьский В.В.,

Сарычев С.В. Компьютерные лабораторные работы на основе графической программной технологии // Датчики и системы. – 2000. – N 10. – С. 7–11.

26. Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П. Кодоуправляемые прецизионные делители напряжения // Измерения, контроль, автоматизация: науч.тех. сб. обзоров /ЦНИИТЭИ приборостроения.– М., 1986. – Вып. 1(57) – С. 3–17.

27. Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Зайдман Г.И., Ким В.Л. Широкополосный кодоуправляемый индуктивный делитель напряжения // Приборы и системы управления. – 1981. – N 11. – С. 16–17.

28. Ким В.Л., Подкопаев Н.Н., Березовский А.Б. Устройства поверки высоких уровней напряжения // Проблемы метрологии. Метрологическое обеспечение средств измерений переменного тока: межвуз. научно-техн. сборник. – Томск: Изд-во ТПИ, 1985. – С. 44–56.

29. Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П. Метрологическое обеспечение индуктивных делителей напряжения // Современные проблемы метрологического обеспечения: сб. науч. тр. – М., 1986.–С. 43–47.

30. Пат. 2223564 РФ, МПК<sup>7</sup> Н01F 21/12. Многодекадный индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л.; заявл. 09.07.2002; опубл. 10.02.2004, Бюл. N 4.

31. Пат. 50043 РФ, МПК<sup>7</sup> Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л.; заявл. 07.06.2005; опубл. 10.12.2005, Бюл. N 34.

32. Пат. 39001 РФ, МПК<sup>7</sup> Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л.; заявл. 04.02.2004; опубл. 10.07.2004, Бюл. N 19.

33. Пат. 60785 РФ, МПК<sup>7</sup> Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л., Меркулов С.В.; заявл. 02.05.2006; опубл. 27.01.2007, Бюл. N 1.

34. А. с. 951598 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н02М 05/06. Индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л.; заявл. 14.10.80; опубл. 15.08.82, Бюл. N 30.

35. А. с. 1035650 СССР, МКИ Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ким В.Л., Калиниченко Н.П., Ройтман М.С.; заявл. 09.03.82; опубл. 15.08.83, Бюл. N 30.

36. А. с. 637925 СССР, МКИ<sup>2</sup> Н02М 5/12. Многодекадный индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Ким В.Л.; заявл. 20.01.75; опубл. 15.12.78, Бюл. N 46.

37. А. с. 773507 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01R 15/06. Декадный индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Ким В.Л., Демкин В.М.; заявл. 16.04.79; опубл. 23.10.80, Бюл. N 39.

38. А. с. 792301 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н01F 21/12. Многодекадный индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П.; заявл. 21.06.78; опубл. 30.12.80, Бюл. N 48.

39. А. с. 909644 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01R 15/06. Индуктивный делитель напряжения / Калиниченко Н.П., Коновалов В.Е., Ким В.Л., Сухов А.С.; заявл. 18.07.80; опубл. 28.02.82, Бюл. N 8.

40. А. с. 920987 СССР, МКИ<sup>3</sup> Н02М 5/10. Индуктивный делитель напряжения / Крамнюк А.И., Калиниченко Н.П., Ким В.Л., Сухов А.С.; заявл. 13.05.80; опубл. 15.04.82, Бюл. N 14.

41. А.с. 1049991 СССР, МКИ Н01F 21/12 Индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Крамнюк А.И., Калиниченко Н.П., Ким В.Л.; заявл. 13.05.80; опубл. 23.10.83, Бюл. N 39.

42. А. с. 1061240 СССР, МКИ Н03С 3/30. Устройство с регулируемым коэффициентом передачи / Сергеев В.М., Чуфистов В.И., Ким В.Л.; заявл. 22.12.80; опубл. 15.12.83, Бюл. N 46.

43. А. с. 1191951 СССР, МКИ Н01F 21/12. Устройство для деления напряжения / Ройтман М.С., Ким В.Л., Калиниченко Н.П.; заявл. 21.12.83; опубл. 15.11.85, Бюл. N 42.

44. А. с. 1249622 СССР, МКИ Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Ким В.Л.; заявл. 11.12.84; опубл. 07.08.86, Бюл. N 29.

45. А. с. 1257530 СССР, МКИ G01R 15/06. Управляемый масштабный преобразователь переменного напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Ким В.Л.; заявл. 15.06.84; опубл. 15.09.86, Бюл. N 34.

46. А. с. 1259344 СССР, МКИ Н01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Гладикова Е.А., Ким В.Л.; заявл. 14.07.83; опубл. 23.09.86, Бюл. N 35.

47. А. с. 1277227 СССР, МКИ Н01F 21/12. Кодоуправляемый индуктивный делитель напряжения / Ройтман М.С., Калиниченко Н.П., Ким В.Л.; заявл. 11.01.85; опубл. 15.12.86, Бюл. N 46.

48. Ким В.Л. Широкополосная многозначная мера отношения // Материалы IV международн. научно-техн. конф. «Измерение, контроль, информатизация ИКИ-2003», 19-21 мая 2003 г. – Барнаул: Изд-во АГТУ, 2003. – С. 81–83.

49. Ким В.Л. Методы повышения точности индуктивных делителей напряжения // Материалы восьмой Всеросс. научно-техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин», 23 дек. 2003 г. – Н. Новгород: Межрег. Верхне-Волжское отдел. Академии технол. наук РФ, 2003. – С. 19–20.

50. Меркулов С.В., Ким В.Л. Модуль первичной обработки сигналов электрофизической установки «Токамак-КТМ» // Материалы IX междунар. конф.

«Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008», 24-26 сент. 2008 г. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2008. – Т. 2. – С. 89–91.

51. Roitman M.S., Kim V.L., Komarov A.V. Using LabVIEW Software in the Automatic Measurement System // Proc. of Third International Symposium «Application of the Conversion Research Results for International Cooperation SIBCONVERS-99». – Russia, Tomsk. – May 18–20, 1999. – P. 187–188.

52. Kim V.L., Silushkin S.V., Plotnikov A.N. Mathematical Models and Methods of Multidecade Inductive Voltage Divider Calculation // Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2003). – Russia, Tomsk, October 1–2, 2003. – P. 98–101.

53. Kim V.L., Dainakov V.N., Iljin A.B. Extending of the Frequency Range of Multidecade Inductive Voltage Divider // Proc. 8-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology KORUS 2004. – Russia, Tomsk, 26 June–3 July, 2004. – Vol. 1. – P. 241–244.

54. Kim V.L., Dulbinov R.G. Inductive Voltage Divider Simulation in MATLAB // Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2005). – Russia, Tomsk, October 21-22, 2005. – P. 135–140.

Подписано к печати 24.04.2009. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл.печ.л. 2,21. Уч.-изд.л. 2,0. Заказ 415-09. Тираж 100 экз.



издательство ту. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.