

На правах рукописи



ДУТУШКИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ТРЁХЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Специальность 05.11.01 - "Приборы и методы измерения по видам измерения"  
(электрические измерения) по техническим наукам

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск-2005

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и технология электронных средств»  
Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Тюкавин А.А.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
Самохвалов М.К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Добровинский И.Р.  
доктор технических наук, профессор  
Абрамов Г.Н.

Ведущее предприятие: ОАО «Электроприбор», г. Чебоксары

Защита состоится 8 июня 2005 г. в 15 часов 00 мин. в ауд. 211 на заседании  
диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом  
университете (г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного  
технического университета

Автореферат разослан: «\_\_» апреля 2005 г.

Учёный секретарь  
диссертационного Совета  
Д 212.277.01  
д.т.н., профессор



Казakov М.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

В настоящее время мосты переменного тока распространены как обеспечивающие наивысшую точность измерения параметров электрических двухполюсников в широких диапазонах. Характерным является то, что зарубежные и отечественные цифровые мосты (класса точности 0,1; 0,05; 0,02 по основному параметру) предназначены для измерения только по двухэлементной схеме замещения.

Большое число важных объектов измерения, встречающихся в практике лабораторных исследований и контроля в технологических процессах, имеют своей электрической моделью трёхэлементный двухполюсник (ТД). Известные цифровые мосты могут обеспечить измерение только двух эквивалентных параметров трёхэлементных двухполюсников, которые существенно отличаются от частотно-независимых  $R$ ,  $C$ ,  $L$  параметров, содержащих в себе искомую информацию о физико-химических свойствах объекта исследования или контроля. При измерении эквивалентных параметров известные мосты являются частотно-зависимыми и поэтому характеризуются значительной погрешностью из-за недобаланса. Положение усугубляется тем, что система уравнений, составляемая по неточным результатам измерения эквивалентных параметров, как правило, является плохо обусловленной. Вследствие этого с помощью известных мостов переменного тока результаты совместных измерений частотно-независимых параметров трёхэлементных двухполюсников сопровождаются недопустимо большой погрешностью.

Созданию точных частотно-независимых уравновешенных мостов переменного тока для прямого измерения параметров ТД препятствует чрезвычайно сложный и длительный процесс уравновешивания (ПУ) по трём регулируемым параметрам (РП), так как на частотах измерения одному и тому же состоянию равновесия моста соответствует множество сочетаний из значений трёх регулируемых параметров цепи сравнения, из которого только одно сочетание обеспечивает частотно-независимое равновесие моста.

Многочисленные методы раздельного уравновешивания, разработанные применительно к квадратурным и экстремальным мостам для измерения по двухэлементной схеме, при уравновешивании по трём параметрам оказались принципиально непригодными в силу неоднозначного соответствия между любыми известными информативными параметрами сигнала разбаланса и отклонениями трёх регулируемых параметров от их отсчитываемых значений.

Существующая теория мостовых цепей не позволяет осуществить синтез наиболее точных многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных двухполюсников по всем возможным схемам замещения и не позволяет разрабатывать быстросходящиеся алгоритмы уравновешивания по трём параметрам многоплечих трансформаторных мостов.

**Цель работы** заключается в разработке и исследовании многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполюсников.

Цель эта достигается решением следующих основных задач.

1. Разработка для общего случая методики синтеза частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов (ЧНУМТМ) с учётом измеряемых параметров ТД по числам витков регулируемых плеч отношения при помещении в плечо сравнения постоянной меры сопротивления.

2. Разработка способов быстросходящегося уравновешивания по трём параметрам квадратурных, экстремально-квадратурных, экстремальных частотно-независимых много-

плечих трансформаторных мостов, а также методики анализа сходимости по трём параметрам этих мостов, общей для всех возможных схем замещения измеряемого трёхэлементного двухполюсника независимо от конфигурации моста.

3. Разработана методика анализа чувствительности квадратурных, экстремально-квадратурных, экстремальных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов по каждому из трех регулируемых параметров, а также методики анализа погрешностей этих мостов.

Методы исследования основаны на теории электрических сигналов, теории линейных электрических цепей, теории автоматического управления. Используются математический аппарат теории комплексного переменного, линейной алгебры, классических разделов математического анализа. Оценивание погрешностей проведено с рекомендациями метрологии. Проверка результатов теоретических исследований проведена посредством натуральных экспериментов.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан метод синтеза частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов для измерения по всем возможным схемам замещения трёхэлементных двухполюсников путём формирования комплексного напряжения, изменяющегося с частотой подобно входному иммитансу измеряемого двухполюсника, либо подобно иммитансу его двухэлементного участка, либо подобно иммитансу его двухэлементной ветви. Для реализации метода разработаны схемы формирователей комплексного напряжения.

2. Синтезированы 5 структур частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов, характеризующихся возможностью анализа их сходимости по трём параметрам на плоскости иммитансов, что обеспечивает общность результатов этого анализа и позволяет использовать свойства симметрии частотных годографов трёхэлементных двухполюсников.

3. Разработан **метод тангенсов (котангенсов)** для исследования сходимости по трём параметрам *квадратурных* многоплечих трансформаторных мостов на плоскости иммитансов, с помощью которого и формулы перехода выявлены на плоскости комплексных напряжений (или токов) информативные проекции сигнала разбаланса и доказано существование однозначного соответствия между знаком этих проекций и знаком отклонения одного из трёх (третьего) регулируемых параметров цепи сравнения.

4. Разработан **метод проекций** для исследования сходимости по трём параметрам *экстремально-квадратурных* многоплечих трансформаторных мостов на плоскости иммитансов, с помощью которого и формулы перехода выявлены информативные проекции сигнала разбаланса и доказано существование однозначной зависимости между их знаком и знаком отклонения одного из трёх (третьего) регулируемых параметров цепи сравнения. Разработано связанное регулирование трех параметров плеча сравнения для повышения быстродействия экстремально-квадратурных мостов независимо от их структуры.

5. Разработаны **способы уравнивания** по трём параметрам *экстремальных* многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных *GLR-* и *GLL-* двухполюсников на основе установленного на плоскости иммитансов и доказанного с помощью формулы перехода для общего случая существования однозначного соответствия между знаком отклонения одного из трёх (третьего) регулируемого параметра и знаком приращения модуля сигнала разбаланса при подаче пробного воздействия по изменению этого параметра и переводе уравновешенного моста на другую частоту.

6. Синтезированы частотно-независимые уравновешенные мосты для измерения

параметров трёхэлементных двухполосников, защищенные тремя патентами за № 2149413, № 2150709, № 2161314.

**Практическая значимость работы.**

1. Разработаны алгоритмы уравнивания по трём параметрам частотно-независимых мостов переменного тока для измерения параметров трёхэлементных двухполосников, приближающихся по быстродействию и простоте автоматизации к мостам для измерения по двухэлементной схеме замещения.

2. Синтезированы частотно-независимые уравнишенные многоплечие трансформаторные мосты для точного измерения параметров трёхэлементных двухполосников по всем возможным схемам замещения. Синтезированы как квадратурные, экстремально-квадратурные, так и экстремальные мосты.

3. Проведён анализ чувствительности и погрешности многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполосников.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методика синтеза формирователей комплексного напряжения, подобного иммитансу трёхэлементных двухполосников или их участков и ветвей, обеспечивает построение ЧНУМТ, в которых ток плеча измерения сопоставляется с током, протекающим через «чистую» меру сопротивления, помещённую в плечо сравнения с отсчётом измеряемых параметров по числам коммутируемых витков заземлённых обмоток трансформаторных узлов.

2. Методики анализа сходимости на плоскости иммитансов по трём регулируемым параметрам квадратурных, экстремально-квадратурных и экстремальных частотно-независимых многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполосников позволяют с помощью формулы перехода выявить связи между параметрами сигнала разбаланса и отклонениями регулируемых параметров и получить однозначные зависимости для организации направленного процесса уравнивания.

3. Способы уравнивания по трём регулируемым параметрам частотно-независимых мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполосников характеризуются высокой сходимостью по числу тактов уравнивания и простотой автоматизации.

**Достоверность результатов.**

1. Эффективность предложенных быстросходящихся способов уравнивания по трём регулируемым параметрам подтверждена результатами экспериментов с экстремально-квадратурным и экстремальным одинарными трансформаторными мостами при достаточно широких диапазонах значений измеряемых трёх параметров.

2. Синтез многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных двухполосников проведён в элементном базисе известных высокоточных многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров двухэлементных двухполосников, благодаря чему построение на практике синтезированных мостов не представляет затруднений.

**Реализация результатов работы.**

Результаты исследований использованы при выполнении госбюджетной научно-исследовательской работы «Разработка и исследование микроэлектронных и оптоэлектронных устройств и технологии их изготовления» (отчёт по НИР, н.г.р. 01960008668, Ульяновск 2000 г., раздел «Теория уравнивания и методы синтеза мостов переменного тока для измерения параметров трёх-, четырёх- и многоэлементных двухполосников»).

Материалы диссертации и экспериментальная установка в 2003 г. были использованы в ОАО ОКБ «Искра» в совместных научно-исследовательских работах по

использованы в ОАО ОКБ «Искра» в совместных научно-исследовательских работах по измерению параметров индукторов пустых и нагруженных (индуктивности силовых шин полупроводниковых приборов по последовательно-параллельной GZZ-схеме замещения на частотах 2кГц-8кГц).

Личный вклад.

Автором лично проведены эксперименты и расчеты. Совместные публикации [4, 5, 7, 10, 13-15] выполнены при равном, а [2, 5, 9] при преобладающем вкладе автора

Апробация работы.

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Методы и средства преобразования аналоговой информации» (Ульяновск 1999), «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, 2000), ежегодных научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета в 1999-2001 годах, а также на заседании кафедры «Информационно-измерительная техника» Московского энергетического института (технического университета) в 2005г.

**Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 19 работ, в том числе 3 патента, 11 статей и 5 работ в трудах международных, российских и университетских конференций.

**Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложения. Основной текст изложен на 156 страницах, содержит 50 рисунков, 3 таблицы. Список литературы включает в себя 158 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, выделены основные результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость.

В первой главе дан обзор трёхэлементных двухполюсников являющихся, электрическими моделями (рис.1, рис.2) многих объектов исследования на переменном токе.

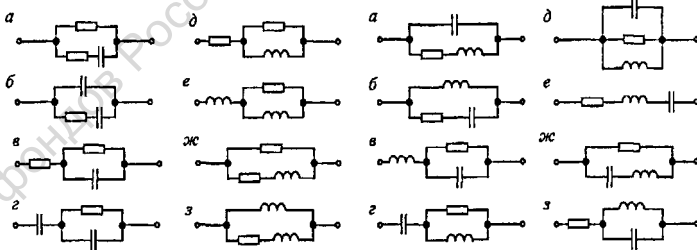


Рис.1 Схемы нерезонансных ТД

Рис.2 Схемы резонансных ТД, имеющих активные потери

Проанализированы известные мостовые методы для измерения параметров ТД по последовательно-параллельным схемам замещения (рис. 1, в-е), по параллельно-последовательным схемам (рис. 1, а,б,ж, рис. 2, а) с помощью частотно-независимых уравновешенных мостов переменного тока. Недостатком наиболее совершенных из них явля-

есть использование в плече сравнения регулируемых мер, вследствие чего становится неосуществимой защита моста от ёмкостей утечки, ёмкостей элементов коммутации и паразитных параметров регулируемых резисторов и конденсаторов путем их компенсации. Применение известных способов измерения ко всему классу ТД ограничено из-за сложности достижения измерительного состояния моста. На основании проведённого анализа доказана целесообразность разработки частотно-независимых многоплечих трансформаторных мостов переменного тока для измерения параметров ТД.

Во второй главе разработана единая методика синтеза схем высокоточных ЧНУМТМ для измерения на переменном токе параметров трехэлементных двухполосников, согласно которой:

- для устранения шунтирующего влияния емкостей элементов коммутации и емкостей токов утечки регулируемым элементом моста является число витков заземлённых обмоток трансформаторов с тесной индуктивной связью;
- плечо сравнения содержит постоянную меру сопротивления (или ёмкости), являющуюся «чистой» благодаря простоте компенсации её паразитных параметров;
- процесс уравнивания проводится путём формирования комплексного напряжения, изменяющегося с частотой, либо подобно иммитансу измеряемого ТД, либо подобно иммитансу двухэлементных ветвей и участков схемы замещения этого ТД;
- в схеме моста используется элементный базис современных высокоточных цифровых многоплечих трансформаторных мостов для измерения по двухэлементной схеме.

По данной методике выявлены 5 структур полного класса ЧНУМТМ для измерения параметров всех (шестнадцать возможных) схем замещения ТД (рис. 1,2). Под структурой понимается принципиальная схема ЧНУМТМ, общая для случаев измерения нескольких ТД. Структура состоит из плеча сравнения, плеча измерения, формирователя  $\Phi$  напряжения питания плеча измерения или плеча сравнения, нуль-индикатора НИ, компаратора токов КТ, трансформатора напряжения ТН, подключённого первичной обмоткой  $w_r$  к генератору синусоидального напряжения  $\dot{U}_r$  с достаточно малым выходным сопротивлением и работающего в режиме холостого хода. Для каждой структуры проведён синтез схем формирователей комплексного напряжения, моделирующих иммитанс ТД, иммитанс двухэлементных ветвей или участков ТД, а также одноэлементных ветвей и участков ТД. Двухканальные формирователи комплексного напряжения получены благодаря использованию местных и общих обратных связей по напряжению, охватывающих каскадно-соединённые операционные усилители, а также применению прецизионного сумматора напряжений на операционном усилителе. Входной величиной формирователя  $\Phi$  комплексного напряжения является э.д.с. одного витка трансформатора ТШ:

$$\dot{U}_\Phi(j\omega) = \frac{\dot{U}_r(j\omega)}{w_r} F_\Phi(j\omega),$$

где  $F_\Phi(j\omega)$  - передаточная функция формирователя, размерность которой - *виток*. Полученные структуры представлены в таблице по схемам измерения ТД.

Структура ЧНУМТМ, показанная в строке 1 таблицы, предназначена для измерения параметров ТД, представленных схемами замещения (рис.1, в,г,е, рис.2, в,г,е,з). Измеряемый ТД с сопротивлением  $Z_x(j\omega)$  подключен к выходу формирователя  $\Phi$ . В структуре реализован формирователь, имеющий два параллельно включённых по входу канала. Передаточная функция одного из каналов подобна комплексному сопротивлению двухэлементного участка последовательно-параллельного ТД, а передаточная функция второго

канала подобна комплексному сопротивлению одноэлементного участка этого ТД. В измерительную диагональ  $cd$  включен избирательный нуль-индикатор НИ, характеризующийся достаточно большим входным сопротивлением, что обеспечивает протекание одного и того же тока через измеряемый ТД и меру сопротивления  $R_N$ . При проведении очередной  $i$ -ой итерации уравнивания напряжение разбаланса данной структуры имеет вид:

$$\Delta \dot{U}_i(j\omega) = \frac{\dot{U}_i(j\omega)}{Z_i(j\omega) + R_N} \cdot \Delta Z_i(j\omega), \quad (9)$$

где разность между регулируемой и измеряемой комплексными величинами равна

$$\Delta Z_i(j\omega) = \frac{F_{\Phi_i}(j\omega)R_N}{w_i} - Z_i(j\omega).$$

Выражение (1) характеризует особенность структуры. При всех итерациях  $i$  процесса уравнивания по трём РП напряжение разбаланса  $\Delta \dot{U}(j\omega)$  и разность пассивных комплексных величин  $\Delta Z(j\omega)$  связаны одним и тем же коэффициентом пропорциональности  $\frac{\dot{U}_i(j\omega)}{Z_i(j\omega) + R_N}$ . Следовательно, при выборе тока  $\frac{\dot{U}_i(j\omega)}{Z_i(j\omega) + R_N}$  в качестве базового вектора на комплексной плоскости напряжений, сходимость по трём РП может анализироваться на комплексной плоскости сопротивлений с последующим переносом результатов анализа на комплексную плоскость напряжений при любых значениях трёх РП в диапазонах их изменения.

Вторая структура ЧНУМТМ (см. табл., строка 2) также характеризуется неизменным коэффициентом пропорциональности между сигналом разбаланса моста (которым является ток индикаторной обмотки  $\dot{I}_N$ ) и разностью сравниваемых пассивных величин на плоскости комплексных сопротивлений. Она расширяет диапазоны измерения параметров ТД, представленных схемами (рис.1 в.г,е., рис.2 в.г,е,з). В отличие от первой, структура содержит компаратор токов КТ. К индикаторной обмотке  $I_N$  которого подсоединён нуль-индикатор с достаточно малым входным сопротивлением, вследствие чего компаратор КТ работает в режиме короткого замыкания и становится возможным пренебрежение комплексным сопротивлением обмоток  $l_1, l_2$  не только при нулевых показаниях нуль-индикатора НИ, но и при состоянии моста далёком от равновесия на всех частотах. Анализ сходимости по трём РП мостов этой структуры, также может проводиться на плоскости комплексных сопротивлений, а его результаты переносятся на комплексную плоскость токов, где и фиксируется сигнал разбаланса (вектор тока индикаторной обмотки).

В третьей структуре (см. табл. строка 3), предназначенной для измерения параметров ТД по параллельно-последовательным схемам замещения, содержащих одноэлементную ветвь (рис 1 а, б, ж, з), можно создать ток, компенсирующий м.д.с обмотки  $l_1$  компаратора КТ, создаваемую током этой одноэлементной ветви. Благодаря чему можно формировать напряжение, моделирующее комплексное сопротивление только двухэлементной ветви измеряемого ТД, что и было реализовано в изобретении по патенту РФ №2161314. Комплексная проводимость измеряемого ТД, определяется выражением

$$Y_i(j\omega) = \frac{w_i l_2}{l_1 F_{\Phi_i}(j\omega) R_N} + Y_N' \frac{l_3}{l_1},$$

где  $F_{\Phi_i}(j\omega)$  - передаточная функция формирователя напряжения, подобного комплексной проводимости последовательной двухэлементной ветви схемы замещения ТД.

Четвёртая структура ЧНУМТМ (см. табл. строка 4) для измерения параметров



Схемы структур ЧНУМТМ и измеряемые ТД

	ЧНУМТМ	ТД	СВОЙСТВА
1			$Z_x(j\omega) = \frac{F_\Phi(j\omega)R_N}{w_2}$ <p>где <math>F_\Phi(j\omega)</math> регулируемая передаточная функция формирователя <math>\Phi</math></p>
2			$Z_x(j\omega) = \frac{F_\Phi(j\omega)R_N}{w_2} \cdot \frac{l_1}{l_2}$ <p>где <math>F_\Phi(j\omega)</math> регулируемая передаточная функция формирователя <math>\Phi</math></p>
3			$i_1(j\omega)l_1 - i_2(j\omega)l_2 = \dot{I}_2(j\omega)l_1$ <p>уравнение равновесия</p> $Y_2(j\omega) = \frac{w_2 l_2}{l_1 F_\Phi(j\omega) R_N} + \frac{l_2}{l_1} Y'_N(j\omega)$ <p>мера <math>Y'_N</math>: либо <math>R_N</math> либо <math>C_N</math></p>
4			<p>уравнение равновесия</p> $Y_x(j\omega) = \frac{F_\Phi(j\omega)l_1}{w_2 l_2 R_N}$ <p>где <math>F_\Phi(j\omega)</math> регулируемая передаточная функция формирователя <math>\Phi</math></p>
5			<p>уравнение равновесия</p> $\dot{I}_1(j\omega)l_1 + \dot{I}_2(j\omega)l_2 + \dot{I}_3(j\omega)l_3 = \dot{I}_4(j\omega)l_4$ <p>пропорциональны комплексным проводимостям элементов <math>L_x, R_x</math></p> $C_x$

параллельно-последовательных ТД (рис. 1, в, г, где, рис. 2, в, г, з), в которой по сравнению с предыдущей структурой плечо сравнения  $R_n$  и плечо измерения переставлены местами, также отсутствует дополнительное плечо сравнения. Формирователь  $\Phi$  в этом случае моделирует напряжение, подобное комплексной проводимости всей схемы замещения измеряемого ТД. Однако, как показали результаты исследования, экстремальные мосты этой структуры имеют более простые алгоритмы уравнивания по трём РП.

Пятая структура ЧНУМТМ (см. табл. строка 5) для измерения параметров параллельных резонансных ТД содержит компаратор токов КТ, по первичным обмоткам  $l_1, l_2, l_3$ , которого протекают соответственно уравнивающие токи  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  плеч сравнения, а по первичной обмотке  $l_4$  протекает ток  $\dot{I}_4$  плеча измерения. К индикаторной обмотке  $l_4$  подсоединён нуль-индикатор с достаточно малым входным сопротивлением, вследствие чего компаратор КТ работает в режиме короткого замыкания и комплексным сопротивлением обмоток  $l_1, l_2, l_3, l_4$  можно пренебречь. В состоянии равновесия выполняется условие:

$$\dot{I}_1(j\omega)l_1 + \dot{I}_2(j\omega)l_2 - \dot{I}_3(j\omega)l_3 = \dot{I}_4(j\omega)l_4,$$

где токи  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  имеют индуктивный, активный и ёмкостной характеры соответственно. Передаточные функции формирователей  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  пропорциональны комплексным проводимостям элементов  $L_2, R_2, C_2$  измеряемого резонансного параллельного ТД. Анализ сходимости ЧНУМТМ этой структуры тоже удобно проводить на плоскости комплексных проводимостей.

На основе полученных структур и схем формирователей комплексного напряжения был проведён синтез частотно-независимых уравнивающих многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров последовательно-параллельных  $GLR-$ ,  $GLC-$ ,  $GLL-$ ,  $RCR-$ ,  $RCC-$ ,  $RCL-$  двухполосников (рис. 1, в, г, где, рис. 2, в, г), параллельно-последовательных  $RCG-$ ,  $RCC-$ ,  $RCL-$  двухполосников (рис. 1, а, б, рис. 2, б), резонансных последовательных  $RLC-$  и резонансных параллельных  $LCG-$  двухполосников (рис. 2, д, е).

Для синтезированных ЧНУМТМ приведены уравнения равновесия, найдены передаточные функции формирователей и формулы отсчёта измеряемых параметров в частотном - независимом состоянии равновесия.

**В третьей главе** получило развитие известное решение (полученное в УЛГТУ) задачи прямого измерения параметров ТД квадратурными одинарными трансформаторными мостами, согласно которому ПУ моста сводится к ряду уравниваний по фазе на двух заданных частотах. Мост уравнивается на первой частоте регулировкой второго РП при задаваемых значениях третьего РП. Значения третьего РП задаются по знаку фазы сигнала разбаланса моста, появляющегося после перевода уравниваемого моста на вторую частоту измерения. В заключительной операции ПУ регулировкой плеч отношения мост приводится в состояние равновесия по амплитуде. В главе разработана методика анализа сходимости квадратурных ЧНУМТМ, синтезированных по структуре (см. таблица, строка 3). При её решении были выявлены информативные проекции сигнала разбаланса, связанные однозначно с отклонениями трёх РП от отсчитываемого значения. Анализ сходимости моста проведён на комплексной плоскости проводимостей, его результаты были перенесены на комплексную плоскость токов. Получена формула перехода:

$$\dot{I}_n(j\omega) = \dot{U}_*(j\omega) \frac{\Delta Y(j\omega) Y_1}{I_n},$$

в которой  $\Delta Y(j\omega) = Y^*(j\omega) - Y_n(j\omega)$  является разностью компенсирующей и сравниваемой комплексных проводимостей;  $I_n$  - количество витков регулируемой обмотки КТ компенси-

рующей ток одноэлементной ветви ТД,  $I_H$  - индикаторной обмотки,  $\dot{U}_0(j\omega)$  - напряжение двухканального формирователя моделирующего комплексное сопротивление только двухэлементной ветви измеряемого ТД. Согласно формуле перехода, при выборе выходного напряжения формирователя  $\dot{U}_0(j\omega)$  в качестве базового вектора на комплексной плоскости токов фазовые соотношения на ней и на плоскости комплексных проводимостей совпадают, что является необходимым условием переноса результатов анализа.

В результате проведённого анализа на плоскости иммитансов был разработан метод тангенсов и основанный на нём способ уравнивания ЧНУМТМ на плоскости токов для измерения параметров  $RCC$  -,  $GCC$  -,  $RLL$  -,  $GLL$  - двухполосников (рис. 1, б,г,е,з). Для измерения параметров  $RCG$  -,  $GCR$  -,  $GLR$  -,  $RLG$  - двухполосников (рис. 1, а,в,д,ж) был разработан метод котангенсов и основанный на нем способ уравнивания квадратурного ЧНУМТМ на плоскости токов. Получены точные аналитические зависимости между отклонениями регулируемых параметров и информативными проекциями сигнала разбаланса на частотах измерения, на основе которых доказано существование в общем случае однозначного соответствия между знаками информативных проекций и отклонениями регулируемых параметров. Рассмотрено влияние на сходимость погрешностей установки фаз опорных напряжений моста и способ его исключения. Определены чувствительности моста по каждому регулируемому параметру, проведена оценка сходимости.

Так, при использовании информации только о знаке проекций сигнала разбаланса предельное число тактов уравнивания (ТУ) оценивается как

$$N_{пред} = n_{m3}n_{m2} + n_{l1},$$

где  $n_{m3}$ ,  $n_{m2}$ ,  $n_{l1}$  - числа двоичных разрядов трёх РП (количество витков регулируемых обмоток ТН и КТ). С применением информации о модуле проекций сигнала разбаланса предельное число ТУ уменьшается до

$$N_{пред} = n_{m3} + n_{m2} + n_{l1},$$

что по сравнению с известными цифровыми мостами для измерения по двухэлементной схеме лишь на 50% больше.

В четвёртой главе разработан метод проекций для исследования сходимости на плоскости иммитансов по трём параметрам экстремально-квадратурных ЧНУМТМ с постоянной мерой сопротивления в плече сравнения, предназначенных для измерения параметров последовательно - параллельных ТД. Для случаев измерения параметров  $GLR$ -и  $GLL$ -двухполосников определены на плоскости иммитансов информативные реактивные и активные составляющие разности сравниваемых пассивных комплексных величин, однозначно связанных по знаку с отклонением третьего регулируемого параметра от его отсчитываемого значения. На основе формулы перехода с плоскости иммитансов на плоскость комплексных напряжений найдены фазы опорного напряжения для выделения информативной проекции, связанной с отклонением отмеченного третьего РП.

То есть, если ЧНУМТМ синтезирован по первой структуре (см. таблица стр.1), в которой измеряемый ТД питается напряжением, изменяющимся в функции частоты одинаково с иммитансом этого ТД, то ток плеча измерения не зависит от частоты и может быть сопоставлен с током, протекающим через «чистую» меру сопротивления, помещённую в плечо сравнения. Напряжение разбаланса таких мостов для режима холостого хода в измерительной диагонали описывается выражением (1) и может быть представлено в виде

$$\text{Re}\Delta\dot{U}(j\omega) + j\text{Im}\Delta\dot{U}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2(j\omega)}{Z_x(j\omega) + R_N} \cdot (\text{Re}\Delta Z(j\omega) + j\text{Im}\Delta Z(j\omega)),$$

где коэффициент  $\frac{U_2(j\omega)}{Z_2(j\omega)+R_4}$ , имеющий размерность тока, не зависит от номера итерации, и

при выборе фазы базового напряжения  $\arg U_B(j\omega) = \arg \left( \frac{\dot{U}_2(j\omega)r_N}{Z_2(j\omega)+R_4} \right)$  на плоскости напряжений

по показаниям ФЧНИ однозначно определяется знак проекций  $\text{Re}\Delta Z(j\omega)$  и  $\text{Im}\Delta Z(j\omega)$ . Благодаря чему анализ сходимости ЧНУМТМ по трём РП  $m_1, m_2, m_3$  проводится на комплексной плоскости сопротивлений  $Z$ , ось абсцисс которой совпадает с вектором  $R_N$ , с последующим переносом его результатов на комплексную плоскость напряжений  $\dot{U}$  (рис. 3).

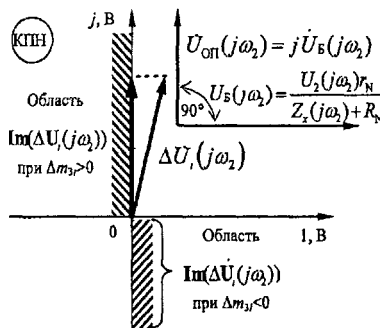


Рис.3 Области информативных проекций сигнала разбаланса моста на частоте  $\omega_2$

По методу проекций разработан способ уравнивания по трём параметрам экстремально-кватратурных частотно-независимых многоплечих трансформаторных мостов в виде последовательности в а н и й моста по амплитуде на первой частоте измерения при задаваемых значениях третьего регулируемого параметра по информативной проекции напряжения разбаланса, появляющегося после перевода уравновешенного моста на вторую частоту. Способ, в отличие от известных способов уравнивания одинарных мостов, уже свободен от учёта текущих значений РП и применения регулируемых индуктивностей в цепях сравнения.

Получены выражения для чувствительности экстремально-кватратурных многоплечих трансформаторных мостов по третьему регулируемому параметру. Проведена оценка предельного числа ТУ по трём РП:

$$N_{пред} = n_{m3}(n_{m1} + n_{m2}),$$

где  $n_{m1}, n_{m2}, n_{m3}$  - числа двоичных разрядов РП  $m_1, m_2, m_3$ .

Для повышения сходимости было введено связанное регулирование цепи сравнения многоплечего трансформаторного моста первого и второго РП в функции третьего РП  $m_3$ , понижающее предельное число тактов уравнивания до суммы двоичных разрядов трех регулируемых параметров, это в 1,5 раза больше предельного числа тактов уравнивания известных цифровых мостов для измерения по двухэлементной схеме.

В пятой главе показано как, используя связи, разработанные в предыдущей главе, можно обеспечить экстремальное уравнивание по трём РП на обеих частотах.

Связанное регулирование параметров  $m_{1b}, m_{21}$  проведено в функции переменной  $\delta_1$ , являющейся относительным отклонением третьего РП  $m_3$ , нормированным по положительному максимальному отклонению  $\Delta m_{3m} = m_{3,r} m_{3,0}$  этого РП:

$$\begin{cases} m_{1l} = \frac{m_{1m} b^2}{b^2 + (1 - \delta_1)^2}; \\ m_{2l} = \frac{C_4 R_4 m_{3m} w (b^2 + (1 - \delta_1)^2)}{C R w_1 (1 - \delta_1)}; \end{cases}$$

где  $b = \frac{w w_1}{\omega C_4 R_4 \Delta m_{3n} m_{1m}}$ ,  $\delta_i = \frac{\Delta m_{3i}}{\Delta m_{3m}}$ . Модуль появляющейся на второй частоте разности пассивных величин находится как

$$|\Delta Z_i(j\omega_2)| = \frac{R_N(k^2 - 1)\delta_i |w w_1|}{w_{2m} m_{1m} \sqrt{\left(\frac{1 - \delta_i}{t} - t\right)^2 + (2 - \delta_i)^2}},$$

где  $t = bk = \frac{1}{\omega_2 L_{2x} C_{1x}}$ , т.е. является в функции переменной  $\delta_i$  (рис. 4). С помощью формулы

перехода эта зависимость от отклонения третьего РП перенесена с комплексной плоскости сопротивлений на комплексную плоскость напряжений. Первая производная модуля напряжения разбаланса разности  $|\Delta U_i(j\omega_2)|$  в точке  $\delta_i = 0$  а чком меняет свое значение на противоположное по знаку, что весьма благоприятно для фиксации равенства  $\delta_i = 0$ , а следовательно, и для точной фиксации отсчитываемого значения  $m_{3i} = m_{30}$  при проведении ПУ по трем РП.

Было доказано для общего случая существование однозначного соответствия между знаком приращения модуля напряжения разбаланса экстремального частотно-независимого уравновешенного многоплечего трансформаторного моста для измерения параметров *GLL*- и *GLR*-двухполосников и знаком отклонения одного из трёх (третьего) регулируемого параметра цепи сравнения при подаче пробного воздействия по изменению этого параметра. Благодаря чему и был разработан способ экстремального уравновешивания по трём параметрам. Определены диапазоны регулирования каждого из трёх переменных параметров частотно-независимого уравновешенного многоплечего трансформаторного моста, найдено аналитическое выражение для чувствительности таких мостов по третьему регулируемому параметру.

Способ состоит из последовательности экстремальных уравновешиваний моста на первой частоте регулировками первого и второго регулируемых параметров при задаваемых значениях третьего регулируемого параметра по методу взвешивания в зависимости от знака приращения модуля сигнала разбаланса на второй частоте.

Согласно сказанному, новое  $(i+1)$ -ое значение третьего РП при использовании метода взвешивания задаётся по формуле

$$m_{3(i+1)} = m_{3i} - \frac{\text{sign}(\Delta \dot{U}'_i(j\omega_2)) - |\Delta \dot{U}'_i(j\omega_2)|}{2'} m_{3m}, \quad (2)$$

где  $|\Delta \dot{U}'_i(j\omega_2)|$  - появляющийся модуль напряжения разбаланса моста, предварительно уравновешенного на первой частоте при  $m_{3i} = m_{3i}$ ;  $|\Delta \dot{U}'_i(j\omega_2)|$  - модуль напряжения разба-

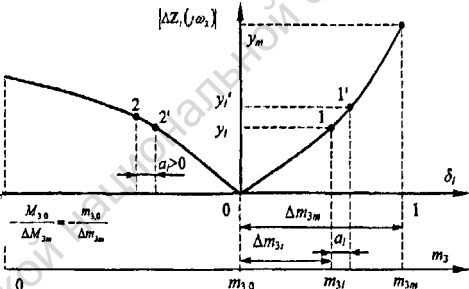


Рис.4 График зависимости модуля  $|\Delta Z_i(j\omega_2)|$  от относительного отклонения  $\delta_i$  на КПС

ланса моста, после подачи положительного пробного воздействия  $a_i$ , при заданном третьем РП  $m_3 = m_3 \mp a_i$ ,  $a_i < \frac{m_{3m}}{3 \cdot 2^i}$ . Мост приводится в измерительное частотно-независимое состояние равновесия при любых исходных значениях третьего РП  $m_3$  в диапазоне  $m_3 \in [0, m_{3m}]$

Предельное число ТУ  $N_{пред}$  описанного способа при проведении ПУ по трем РП  $m_1, m_2, m_3$  на основе формулы (2) лишь в 2 раза больше длительности ПУ по двум РП известных экстремальных мостов для измерения по двухэлементной схеме:

$$N_{пред} = n_{m1} + n_{m2} + 2 \cdot n_{m3} - 1,$$

где сумма  $n_{m1} + n_{m2}$ , равная числу двоичных разрядов РП  $m_1$  и  $m_2$ , делит число ТУ на частоте  $\omega_1$  при установке границ регулирования, множитель 2 обусловлен необходимостью подачи пробного воздействия. Для повышения сходимости были получены выражения, учитывающие информацию о модуле напряжения разбаланса при определении  $m_{3j+1}$  для приведения моста в измерительное частотно-независимое состояние равновесия. И тогда предельное число ТУ записывается как

$$N_{пред} = n_{m1} + n_{m2} + 2N_{|\Delta U|} - 1,$$

где  $2N_{|\Delta U|} < 2n_{m3}$ , так как число связанных регулирований при определении модуля напряжения разбаланса  $|\Delta U_i(j\omega_2)|$  по показаниям АНИ меньше числа двоичных разрядов РП  $m_3$ .

В этом случае  $N_{пред}$  было всего лишь в 1,5 раза больше, чем у известных экстремальных мостов для измерения параметров двухполюсников по двухэлементной схеме замещения.

Таким образом, на основании свойств эквивалентности, дуальности, симметрии частотных годографов между *GLL*- , *GLR*- и другими шестью нерезонансными трёхэлементными двухполюсниками была показана возможность разработки алгоритмов экстремального уравнивания по трём параметрам многоплечих трансформаторных мостов для построения высокоточных быстродействующих измерителей параметров нерезонансных трёхэлементных двухполюсников.

В шестой главе представлены результаты проведённых экспериментов по уравниванию тремя параметрами. Согласно разработанным методикам анализа сходимости на плоскости иммитансов алгоритмы уравнивания многоплечих частотно-независимых трансформаторных мостов не отличаются от алгоритмов уравнивания одинарных трансформаторных мостов. Поэтому для проверки эффективности разработанных алгоритмов достаточно было ограничиться экспериментами по уравниванию экстремально - квадратного одинарного трансформаторного моста, а также экстремального одинарного трансформаторного моста. Объектом измерения являлся *RCC*-двухполюсник. Приведены таблицы значений РП, подтверждающие хорошую сходимость разработанных алгоритмов уравнивания. Результаты измерения во всех случаях были достоверными, расхождение результатов измерения по трёхэлементной схеме с результатами измерения расчищенного макета по двухэлементной схеме не превосходили 0,02%, что меньше класса точности магазинов сопротивления, из которых собран макет. Экспериментально подтверждено уменьшение предельного числа тактов уравнивания путём использования связанного регулирования трёх параметров, а также путем использования информации о модуле сигнала разбаланса для определения регулирующего воздействия по изменению третьего регулируемого параметра. При этом число тактов уравнивания в экспериментах соответствовало приведенной оценке глав 4 и 5. Результаты экспериментов подтвердили достижение более высокой точности измерения параметров ТД экстремальными мостами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным итогом диссертационной работы является разработка методов синтеза и анализа сходимости многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполюсников по всем встречающимся на практике схемам замещения.

Основные результаты, полученные в работе, сводятся к следующему.

1. Разработана единая методика синтеза высокоточных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов с отдельным отсчетом по числам витков при использовании в плече сравнения постоянной «чистой» меры сопротивления для измерения параметров трёхэлементных двухполюсников по всем возможным их схемам замещения.

2. Синтезированы 5 структур полного класса квадратурных, экстремально-квадратурных, экстремальных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполюсников по 14 схемам замещения.

3. Синтез многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных двухполюсников проведён в элементном базисе известных высокоточных многоплечих трансформаторных мостов для прямого измерения параметров двухэлементных двухполюсников, что обеспечивает достижение такой же высокой точности измерения, ограничиваемой классом точности используемых мер в плече сравнения.

4. На синтезированные многоплечие трансформаторные мосты получены патенты №№ 2149413, 2150709, 2161314.

5. Разработаны метод тангенсов (котангенсов), и метод проекций для анализа сходимости на комплексной плоскости сопротивлений по трём параметрам квадратурных, экстремально-квадратурных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов, на основе которых с помощью формулы перехода получены точные соотношения между информативными параметрами сигнала разбаланса и соответствующими отклонениями трёх регулируемых параметров.

6. Разработана методика анализа сходимости на комплексной плоскости сопротивлений по трём параметрам экстремальных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов.

7. Разработаны алгоритмы уравнивания по трём параметрам частотно-независимых мостов переменного тока для измерения параметров трёхэлементных двухполюсников, приближающиеся по быстрдействию и простоте автоматизации к мостам для измерения по двухэлементной схеме замещения.

8. Для квадратурных, экстремально-квадратурных, экстремальных частотно-независимых уравновешенных многоплечих трансформаторных мостов определена чувствительность по каждому из трёх регулируемых параметров.

9. Результаты экспериментов, проведённых с помощью экстремально-квадратурных и экстремальных одинарных трансформаторных мостов, при достаточно широких диапазонах значений измеряемых параметров, подтверждают эффективность предложенных быстросходящихся способов уравнивания по трём регулируемым параметрам.

Таким образом, в диссертации получила решение имеющая важное научное и производственное значение проблема быстрого и точного измерения параметров трёхэлементных двухполосников по 14 основным схемам замещения с помощью многоплечих частотно-независимых уравновешенных мостов. Результаты исследований могут быть положены в основу универсальных цифровых мостовых измерителей параметров по 14 трёхэлементным схемам замещения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А. Метод синтеза многоплечих трансформаторных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполосников. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов / Под ред. Сарафанова А.В.-Красноярск: КГТУ, 1999г.-С. 122-124.
2. Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А., Джикаев Г.В., Белов С.А. Методика анализа сходимости квадратурных мостов для измерения параметров трёхэлементных двухполосников. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов. /Под ред. А.В. Сарафанова А.В.-Красноярск: КГТУ, 1999. - С. 119-121.
3. Дугушкин С.Н., Тюкавин А.А. Мост для измерения параметров *RLC*- двухполосников и способ его уравновешивания. // Реляторная схемотехника и средства преобразования аналоговой информации: Труды международной конференции «Методы и средства преобразования аналоговой информации» /Под ред. Л.И. Волгина. - Ульяновск: УлГТУ, 1999.-Том2.С.61-63.
4. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А. Анализ погрешностей измерения параметров трёхэлементных двухполосников квадратурными мостами переменного тока. // Радиоэлектронная техника: Сборник научных трудов.- Ульяновск: УлГТУ, 1999.-С. 11-15.
5. Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А., Джикаев Г.В., Белов С.А., Тюкавин А.А. К уравновешиванию квадратурных мостов переменного тока для измерения параметров трёхэлементных двухполосников. // Радиоэлектронная техника: Сборник научных трудов. -Ульяновск: УлГТУ, 1999. - С. 16-21.
6. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А. Аналоговые операционные преобразователи напряжения на основе трансформаторных компараторов тока. // Радиоэлектронная техника: Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - С.31-34.
7. Тюкавин А.А., Васильева Е.Е., Дугушкин С.Н., Мишалов С.А., Тюкавин П.А. Уравновешивание экстремальных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных двухполосников. // Радиоэлектронная техника: Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ. 2000.- С.35-41.
8. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А. Трансформаторные формирователи комплексного напряжения в виде цепной дроби. // Материалы международной НТК «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации». - Пенза: ПГУ, 2000. - С.94-96.
9. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А. Методика анализа сходимости экстремальных мостов для прямого измерения параметров трёхэлементных двухполосников. // Материалы международной НТК «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации». - Пенза: ПГУ, 2000. - С.96-97.



10. Тюкавин А.А., Тюкавин П.А., Дугушкин С.Н., Хазиев Т.А., Тюкавин А.А. Способ измерения параметров трёхэлементных двухполосников экстремальными мостами. // Вестник Ульяновского Государственного Технического Университета. - 2000. №1. - С.31-39.

11. Дугушкин С.Н., Тюкавин А.А. Уравновешивание квадратурного четырёхплечевого моста для прямого измерения параметров трёхэлементных *LGL*-двухполосников. // Электронная техника: Сборник научных трудов. - Ульяновск. УЛГТУ, 2001. - С. 64-71.

12. Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А. Мосты для измерения параметров многоэлементных двухполосников. // Электротехника. - 2001, №5. - С.28-31.

13. Тюкавин А.А., Федоров Т.А., Дугушкин С.Н. "Эксперименты по сопоставлению погрешности прямых и совокупных измерений параметров трёхэлементных КС-двухполосников мостовым методом". Научно-технический калейдоскоп, г. Ульяновск 2004, № 2, стр.76-79.

14. А.с. Патент № 2149413 РФ. МКИ<sup>7</sup> G01R 17/10, 27/02 БИПМ. 2000. № 14 Многоплечий трансформаторный мост переменного тока для измерения параметров трёхэлементных двухполосников по параллельно-последовательной ГИС-схеме замещения и способ его уравновешивания по трем параметрам Тюкавин А.А., Хазиев Т.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А.

15. А.с. Патент 2150709 РФ. МКИ<sup>7</sup> G01R 17/10, 27/02. БИПМ 2000 №16 Частотно-независимый многоплечий трансформаторный мост переменного тока для измерения параметров трёхэлементных двухполосников по последовательной ГИС-схеме и способ его уравновешивания Тюкавин А.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Хазиев Т.А.

16. А.с. Патент 2161314 РФ. МКИ<sup>7</sup> G01R 17/10, 27/02. БИПМ 2000 №36 Частотно-независимый многоплечий трансформаторный мост переменного тока для измерения параметров трёхэлементных параллельно-последовательных 2<sup>2</sup>С-двухполосников Тюкавин А.А., Хазиев Т.А., Дугушкин С.Н., Тюкавин П.А., Белов С.А.

**ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АНИ - амплитудный нуль-индикатор,  
КТ - ком паратор токов;  
НИ - нуль-индикатор,  
ПУ - процесс уравнивания;  
РП - регулируемые параметры;  
ТД-трехэлементный двухполюсник;

ТН - трансформатор напряжения;  
ТУ - такт уравнивания;  
Ф - формирователь;  
ФЧНИ - фазочувствительный нуль-индикатор;  
ЧНУМТМ - частотно-независимый уравни-  
вешенный многоплечий трансформатор-  
ный мост.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Автореферат  
ДУГУШКИН Сергей Николаевич

**МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ**

Подписано в печать 18.04.2005 Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Уел. п. л. 1,16.

Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № 384

Типография УлГТУ. 432027. Ульяновск, Сев. Венец, 32.

05.09 - 05.11

Из фондов Российской национальной библиотеки



19 МАЙ 2005

1351