

6
А-24
АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ОТДЕЛЕНИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Е. Ю. НЕБОЛЮБОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИСКРЕТНО
УРАВНОВЕШИВАЕМЫХ МОСТОВЫХ ЦЕПЕЙ
С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ПЛЕЧАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

ФРУНЗЕ—1967

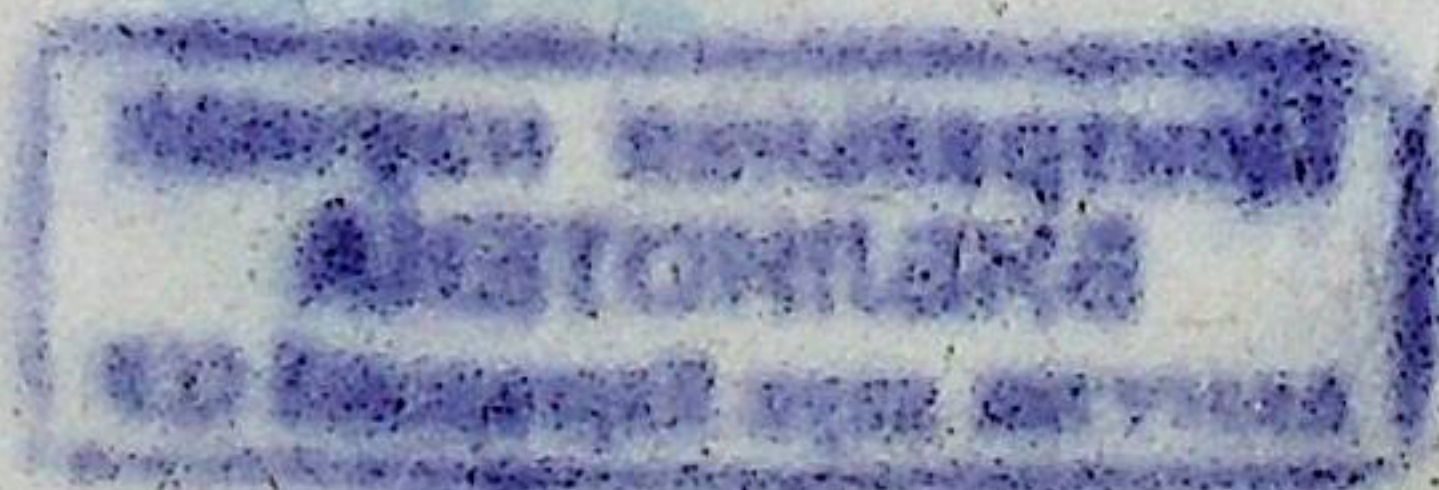
АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ОТДЕЛЕНИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Е. Ю. НЕБОЛЮБОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИСКРЕТНО
УРАВНОВЕШИВАЕМЫХ МОСТОВЫХ ЦЕПЕЙ
С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ПЛЕЧАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель—доктор
технических наук Ф. Б. ГРИНЕВИЧ



ФРУНЗЕ—1967

Мостовые методы измерения применяются уже более столетия. В измерительной технике, действительно, нет более совершенных способов, чем мостовые методы определения емкости, индуктивности, сопротивления и других параметров электрических цепей. Разработка и исследование мостовых методов, в частности мостовых методов переменного тока, интенсивно ведется за рубежом. Исследованию свойств различных мостовых цепей, развитию их общей теории, вопросам расчета, изучению процесса уравнивания, автоматизации мостовых методов измерения посвящены многочисленные труды советских ученых: чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандеева, чл.-корр. АН УССР А. Д. Нестеренко, М. И. Левина, И. Н. Кроткова, В. Н. Мильштейна, Б. И. Швецкого, Ф. Б. Гриневича, Г. А. Штамбергера, К. М. Соболевского, Е. А. Будницкой, В. П. Карпенко, В. Ю. Кнеллера, Г. В. Гесена, С. Л. Эпштейна и многих других.

В связи с развитием вычислительной и цифровой техники, в последние годы широко развернулись исследования по созданию цифровых автоматических мостов переменного тока, служащих для измерения параметров комплексных сопротивлений. Как за рубежом, так и у нас уже появились первые образцы приборов. При создании цифровых мостов переменного тока одним из самых важных вопросов является разработка и исследование дискретно уравниваемых мостовых измерительных цепей. Среди таких измерительных цепей особое положение занимают дискретно уравниваемые одинарные и двойные мостовые цепи с тесной индуктивной связью. Использование новых марок ферритов, пермаллоя с высокой магнитной проницаемостью позволяет создавать дискретно уравниваемые измерительные цепи с индуктивно связанными плечами, имеющие исключительно высокие метрологические характеристики. Кроме того, отличная защищаемость таких цепей и возможность уравнивания путем коммута-

ции витков плечевых обмоток делают цепи с индуктивной связью практически незаменимыми при создании высокочастотных цифровых автоматических мостов переменного тока.

Данная работа посвящена вопросам расчета дискретно уравниваемых цепей с тесной индуктивной связью, исследованию процесса уравнивания таких цепей, определению и исследованию их чувствительности и погрешности. Развитие вычислительной техники открывает широкие возможности для применения электронных цифровых вычислительных машин к исследованию свойств мостовых цепей и, в частности, двойных мостов с индуктивно связанными плечами. Определенное внимание уделено в работе использованию ЭЦВМ для изучения процесса уравнивания многодекадных схем двойных мостов, расчета токораспределения в них, исследованию некоторых видов погрешностей.

Работа содержит 5 глав (206 страниц машинописного текста и 83 рисунка). Ниже кратко изложено содержание отдельных глав.

1. Методы расчета электрических цепей и их применение для исследования дискретно уравниваемых мостов с индуктивно связанными плечами

Дискретно уравниваемые измерительные цепи являются довольно сложными. Это в особенности относится к дискретно уравниваемым цепям с индуктивно связанными элементами при учете влияния паразитных внутренних и внешних электромагнитных связей, который необходим при определении погрешностей, чувствительности, сходимости. Создание нового класса сложных измерительных цепей привело к необходимости анализа применимости к их расчету и эффективности использования как известных классических, так и новых методов расчета электрических цепей.

В работе показаны возможности использования классических методов для расчета дискретно уравниваемых двойных мостовых цепей с индуктивными связями. Использование метода, основанного на непосредственном применении законов Кирхгофа и Ома, для расчета современных дискретно уравниваемых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами приводит к необходимости решения системы расчетных уравнений высокого порядка, что снижает эффективность его применения. При учете паразитных и остаточных параметров цепь усложняется, поэтому при использовании метода контурных токов также имеет место значительное увеличение порядка системы расчетных уравнений. Возможно применение

метода узловых потенциалов, однако это требует предварительного преобразования заданной для расчета цепи с индуктивными связями в эквивалентную ей без связей. Для современных двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами такая задача оказывается достаточно трудоемкой. Из вышесказанного следует, что использование классических методов для расчета двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами может вызвать значительные затруднения.

Чл.-корр. АН УССР, проф. Г. Е. Пуховым разработана группа методов для расчета сложных электрических цепей. С помощью этих методов можно определить непосредственно несколько токов, напряжений или одновременно токов и напряжений электрической цепи без введения большого количества дополнительных неизвестных. Поэтому методы названы прямыми. К прямым относятся также методы, основанные на применении теорем Тевенена — Гельмгольца и Нортон и позволяющие определить один неизвестный ток или одно неизвестное напряжение.

В зависимости от того, какие неизвестные величины подлежат определению, различаются прямые методы токов, напряжений и смешанный. Применение прямых методов для расчета электрических цепей позволяет значительно снизить порядок получаемой системы уравнений и тем самым облегчить решение задачи. Прямые методы позволяют непосредственно сводить расчет сложной цепи к расчету нескольких более простых цепей (подсхем).

В работе показана целесообразность применения прямых методов для расчета мостовых цепей с индуктивно связанными плечами [1]. Прямой метод токов предполагает учет падения напряжения в сопротивлениях взаимной индуктивности и может быть использован для расчета цепей с индуктивными связями непосредственно. Для анализа одинарных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами наиболее удобен прямой метод токов без разделения заданной цепи на подсхемы. Для расчетов двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами при учете паразитных и остаточных параметров желательнее применение прямого метода токов с разделением цепи на подсхемы. При этом подсхемы не должны иметь магнитных связей. Двойные мостовые цепи обычно включают в себя две основные части, не связанные магнитно: трансформатор напряжения и компаратор токов. Таким образом, возможно разделение цепи на две подсхемы, при этом выполняются требования, необходимые для такого разделения.

Прямой метод напряжений, так же как и метод узловых потенциалов, может быть применен для расчета электроизмерительных цепей рассматриваемого типа лишь при замене их эквивалентными цепями без индуктивных связей, так как не позволяет учесть падение напряжения на сопротивлениях взаимной индукции.

В систему уравнений прямого смешанного метода входят уравнения, родственные составленным по прямому методу напряжений. Это налагает определенные ограничения на расчеты с помощью данного метода мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Метод может быть использован для расчета идеализированных цепей такого вида, учета влияния собственных активных сопротивлений обмоток при отличии коэффициента индуктивной связи от единицы. При этом в числе неизвестных может быть только одно напряжение. Во всех остальных случаях прямой смешанный метод предполагает предварительное получение эквивалентных схем без индуктивных связей.

В первой главе подробно рассмотрена реализация прямого метода токов с разделением цепи на подсхемы для расчета двойных мостов с индуктивно связанными плечами при учете влияния различных паразитных параметров схем.

2. Измерительные схемы цифровых автоматических мостов переменного тока и процесс их уравнивания

При разработке мостов переменного тока большое значение имеет исследование процесса уравнивания, т. е. процесса приведения к нулю напряжения неравновесия путем регулировок переменных параметров схемы. Особенно важно это при построении автоматических измерительных устройств, так как кроме наиболее эффективного использования схемы, появляется возможность правильного выбора способа и системы автоматического уравнивания.

Уравнивание двойных мостов с индуктивно связанными плечами производится или регулированием образцовых мер, или изменением (коммутацией) количества витков плечевых обмоток. Возможно также уравнивание изменением одной из образцовых мер и количества витков какой-либо плечевой обмотки. В связи с тем, что в большинстве случаев выходное напряжение измерительных цепей цифровых автоматических мостов снимается с дополнительной обмотки, называемой выходной, в работе выполнено исследование поведения вектора $\dot{U}_{вых}$ в зависимости от величины переменного параметра. Относительно $\dot{U}_{вых}$ построены диаграммы уравнивания [2].

Рассмотрим вначале процесс уравнивания применительно к классической двойной мостовой схеме с индуктивно связанными плечами при регулировке образцовых мер. Предположим, что измеряемое и образцовое сопротивления имеют одинаковые по характеру фазовые углы и представлены последовательной схемой замещения. Выходное напряжение цепи может быть при этом определено с помощью зависимости:

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_r \frac{n_B}{m_n} \cdot \frac{Z_2 n_1 m_1 - Z_1 n_2 m_2}{Z_1 n_2^2 + Z_2 n_1^2 + Z_1 Z_2 \frac{1}{j \omega a_1}}, \quad (1)$$

где Z_1 и Z_2 — измеряемое и образцовое комплексные сопротивления, $n_1, m_1, n_2, m_2, n_B, m_n$ — количества витков соответствующих обмоток, $a_1 = \mu_0 \mu \frac{S}{l}$ — магнитная проницаемость

материала сердечника, \dot{U}_r — напряжение питания цепи. В качестве переменных (регулируемых) параметров приняты составляющие образцового сопротивления Z_2 . Изучение процесса уравнивания производится согласно методике, предложенной чл.-корр. АН СССР К. Б. Карандеевым и д. т. н., проф. Б. И. Швециком. Из выражения (1) видно, что функция \dot{W} будет дробнолинейной по отношению к регулируемому образцовому сопротивлению. Таким образом, линии уравнивания двойного моста с индуктивно связанными плечами при регулировании образцовых мер являются окружностями, как и для обычных четырехплечих мостов. В том случае, когда принята последовательная схема замещения комплексных сопротивлений, т. е. $Z_1 = R_1 + jX_1$ и $Z_2 = R_2 + jX_2$, функция \dot{W} будет дробнолинейной по отношению к параметру X_2 :

$$\dot{W} = \frac{e_1 + f_1 X_2}{g_2 + h_1 X_2}, \quad (2)$$

где

$$e_1 = R_2 n_1 m_1 - R_1 n_2 m_2 - j X_1 n_2 m_2,$$

$$f_1 = j n_1 m_1,$$

$$g_1 = R_1 n_2^2 + R_2 n_1^2 + \frac{R_2 X_1}{a_1 \omega} + j X_1 n_2^2 - j \frac{R_1 R_2}{a_1 \omega},$$

$$h_1 = \frac{R_1}{a_1 \omega} + n_1^2 + \frac{X_1}{a_1 \omega},$$

R_1, R_2 — активные составляющие измеряемого и образцового сопротивлений соответственно,

X_1, X_2 — реактивные составляющие этих сопротивлений. Для переменного R_2 получено аналогичное выражение:

$$\dot{W} = \frac{e_2 + f_2 R_2}{g_2 + h_2 R_2}, \quad (3)$$

где

$$e_2 = -R_1 n_2 m_2 - j X_1 n_2 m_2 + j X_2 n_1 m_1$$

$$f_2 = n_1 m_1,$$

$$g_2 = R_1 n_2^2 + \frac{R_1 X_2}{a_1 \omega} + j X_1 n_2^2 + j X_2 \left(n_1^2 + \frac{X_1}{a_1 \omega} \right),$$

$$h_2 = n_1^2 + \frac{X_1}{a_1 \omega} - j \frac{R_1}{a_1 \omega}.$$

В соответствии с указанной методикой построена топографическая диаграмма уравнивания. Определена область изменения вектора \dot{W} . Такое же подробное исследование проведено и для параллельной схемы замещения образцового и измеряемого сопротивлений. Исследован также процесс приведения к состоянию равновесия ряда двойных мостов с индуктивно связанными плечами при уравнивании регулировкой образцовых мер. Показано, что траектория потенциальных точек также будут окружности, расположение и линии центров которых будут отличными от случая классической схемы. Однако процесс уравнивания подобен и отличается от последнего лишь в частности. Таким образом, процесс уравнивания как двойных, так и одинарных мостов с индуктивно связанными плечами при регулировании образцовых мер в основном аналогичен уравниванию обычных четырехплечих мостов. На этом основании можно заключить, что результаты теоретических исследований, относящихся к построению квазиуравновешенных четырехплечих мостов и теория отдельного уравнивания полностью применимы к рассматриваемому классу двойных мостов с индуктивно связанными плечами [2].

В большинстве случаев переменными параметрами дискретно уравниваемых двойных мостов с индуктивно связанными плечами являются количества витков плечевых обмоток. Уравнивание по одной составляющей измеряемого комплексного сопротивления может при этом производиться изменением количества витков обмотки трансформатора напряжения, а по другой — изменением количества витков обмотки компаратора токов. В некоторых схемах переменными являются количества витков обмоток дополнительных трансформаторов напряжения или тока. В работе проведено исследование и построены топографические диаграммы процесса уравнивания двойных мостовых цепей с индуктивно свя-

занными плечами [2], в том числе и схемы двойного моста с дополнительной обмоткой компаратора токов, послужившей основой для измерительной цепи серийно выпускаемого цифрового моста Р-570.

В качестве иллюстрации ниже приводится в сокращенном виде описание исследования процесса уравнивания двойного моста с дополнительной обмоткой трансформатора напряжения (рис. 1). Выходное напряжение такого моста определяется из выражения:

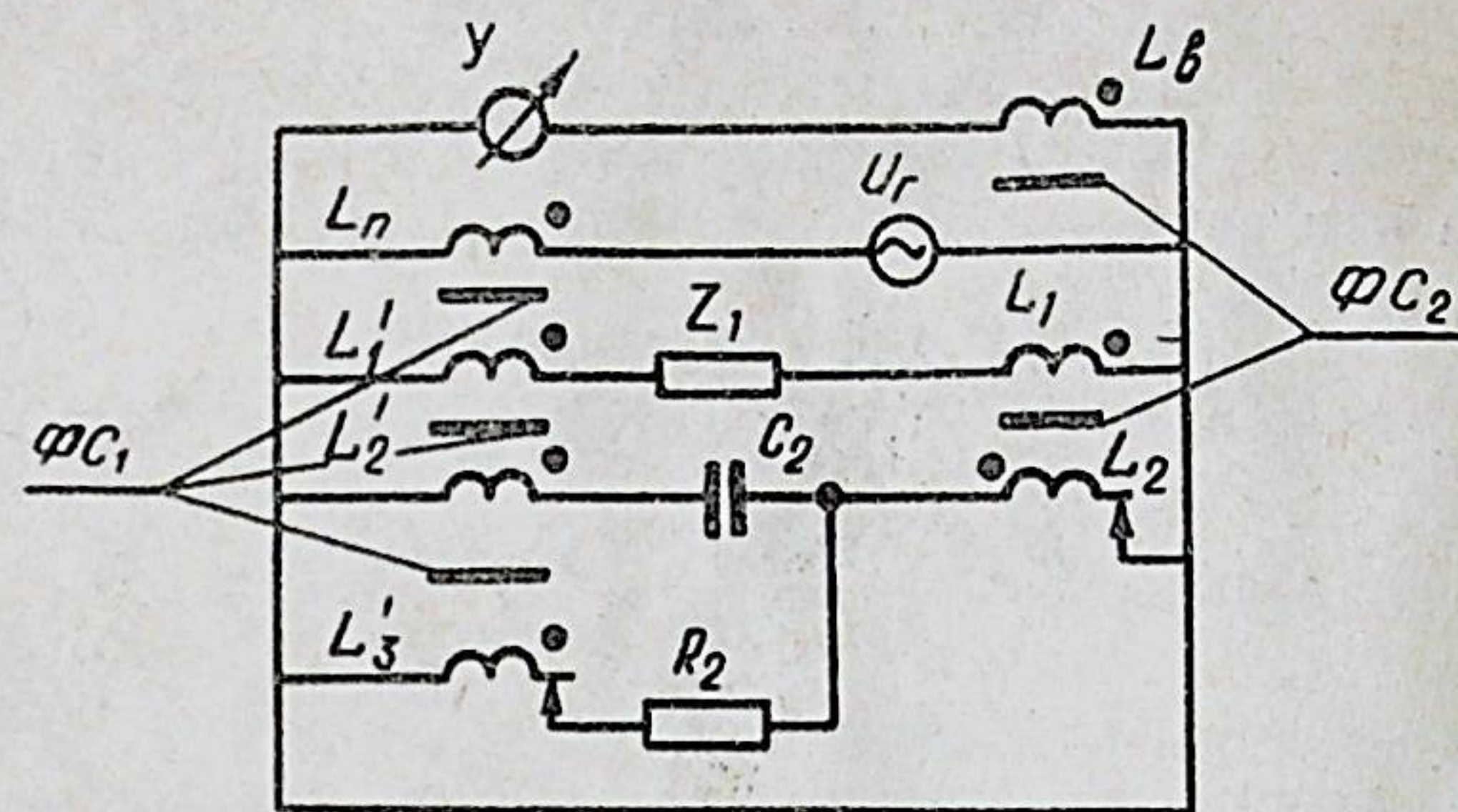


Рис. 1.

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_r \frac{n_8}{m_n} \cdot \frac{(R_2 n_1 m_1 - R_1 m_3 n_2) + j \omega R_1 R_2 (C_1 n_1 m_1 - C_2 n_2 m_2)}{(R_2 n_1^2 + R_1 n_2^2) + j \omega R_1 R_2 (C_1 n_1^2 + C_2 n_2^2 - \frac{1}{a_1 \omega^2})}. \quad (4)$$

где \dot{U}_r — напряжение питания мостовой цепи, $n_1, m_1, n_2, m_2, m_3, n_8, m_n$ — количество витков соответствующих обмоток, C_1 и C_2 — емкости измеряемого и образцового конденсаторов, R_1 и R_2 — сопротивления потерь этих конденсаторов. Функция \dot{W} в данном случае имеет вид:

$$\dot{W} = \frac{(R_2 n_1 m_1 - R_1 m_3 n_2) + j \omega R_1 R_2 (C_1 n_1 m_1 - C_2 n_2 m_2)}{(R_2 n_1^2 + R_1 n_2^2) + j \omega R_1 R_2 (C_1 n_1^2 + C_2 n_2^2 - \frac{1}{a_1 \omega^2})}. \quad (5)$$

Если принять в качестве переменного количества витков m_3 , то (5) можно записать в виде:

$$\dot{W} = \frac{A}{D} m_3 + \frac{B}{D}, \quad (6)$$

где A, B, D — постоянные комплексные коэффициенты.

Из (6) следует, что линии уравнивания являются в данном случае прямыми. В том случае, когда переменным параметром является количество витков обмотки компаратора токов n_2 , функция W на основании (5) представляется в виде:

$$\dot{W} = \frac{n_2 N_1 + N_2}{n_2^2 N_3 + N_4}, \quad (7)$$

где $N_1 \div N_4$ — постоянные комплексные величины. Линии уравнивания в этом случае не являются ни прямыми, ни окружностями. Исследование расположения линий и процесса уравнивания по обычной методике в этом случае затруднительно. Характер линий уравнивания может быть определен при переходе к параметрическому заданию функции (7):

$$\alpha = \operatorname{Re} \dot{W} = \frac{n_2^3 G_1 + n_2^2 G_2 + n_2 G_3 + G_4}{n_2^4 G_5 + n_2^2 G_6 + G_7},$$

$$\beta = \operatorname{Im} \dot{W} = \frac{n_2^3 G_8 + n_2^2 G_9 + n_2 G_{10} + G_{11}}{n_2^4 G_5 + n_2^2 G_6 + G_7}, \quad (8)$$

где $G_1 \div G_{11}$ — постоянные действительные величины.

Уравнения (8) соответствуют параметрическому заданию некоторой кривой четвертого порядка от n_2 . Следовательно, при изменении количества витков обмотки компаратора токов линиями уравнивания являются кривые четвертого порядка. Повышение порядка кривых, соответствующих данным линиям уравнивания можно объяснить тем, что здесь изменение $U_{\text{вых}}$ происходит за счет изменения как собственной, так и взаимной индуктивностей.

Задавая в (8) различными, в том числе крайними ($0, +\infty$) значениями переменных параметров n_2 и m_3 , можно определить положение конца вектора W и выяснить некоторые особенности топографической диаграммы уравнивания данной цепи (рис. 2). В работе выполнено построение диаграммы уравнивания при изменении переменного параметра n_2 от нуля до бесконечности, а также построение «рабочей» части диаграммы, т. е. области, соответствующей тем значениям параметров, которые применяются в реальных цепях. В работе показана возможность некоторых упрощений в построении, которые при этом не искажают истинной картины процесса. «Рабочая» часть диаграммы представлена на рис. 3.

Следует отметить, что для ряда двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами существует возможность разрывов функций W в связи с появлением действительных

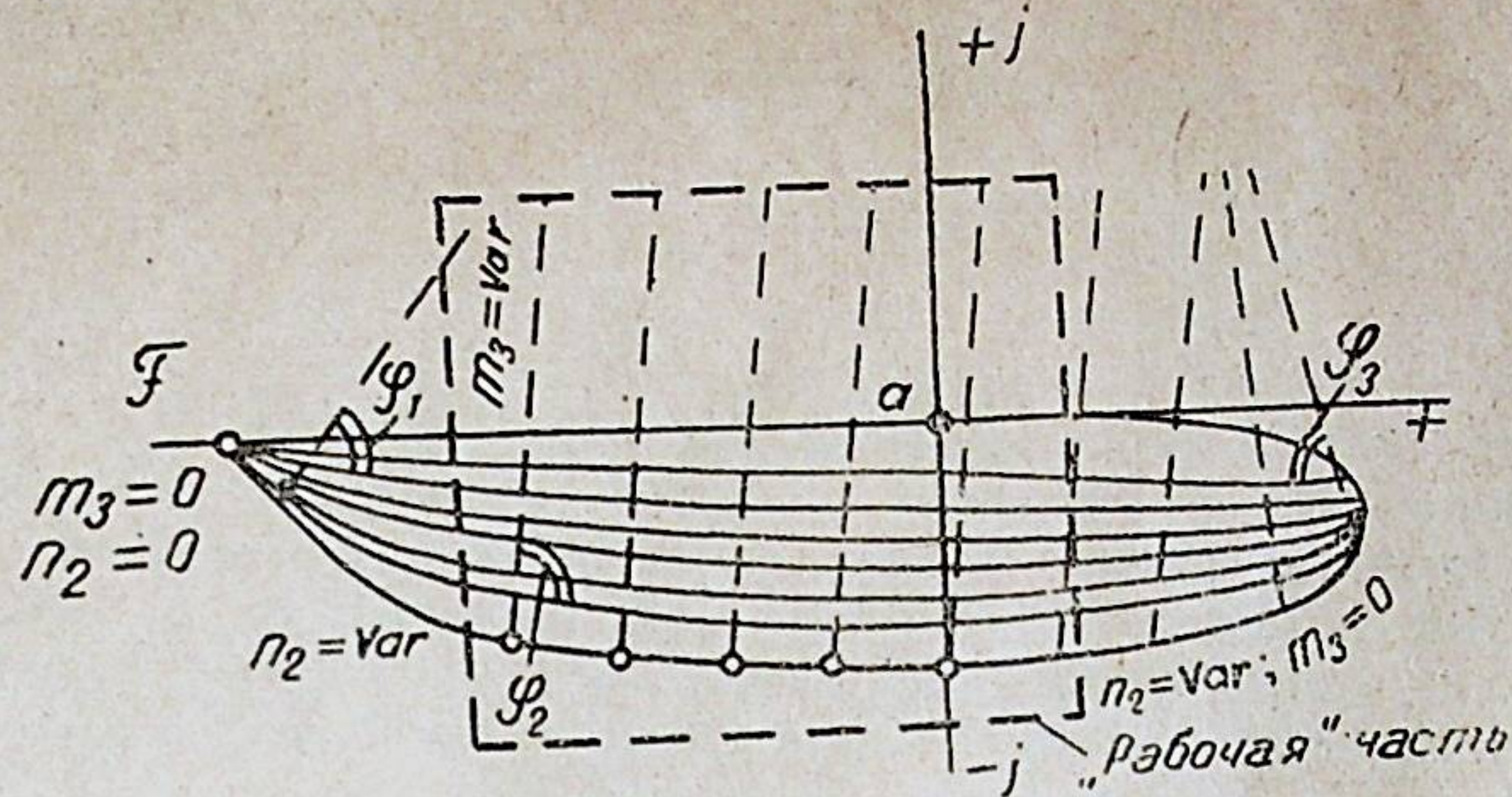


Рис. 2.

положительных корней в знаменателе, который при параметрическом задании W представляет собой биквадратное уравнение относительно количества витков обмотки компаратора токов. При совпадении этих корней с вероятными значениями, принимаемыми указанным параметром в реальной цепи, работа системы автоматического уравнивания будет затруднена. Это обстоятельство можно использовать как критерий проверки возможности технической реализации двойной мостовой цепи с индуктивно связанными плечами в заданных условиях. В работе рекомендуется порядок такой проверки.

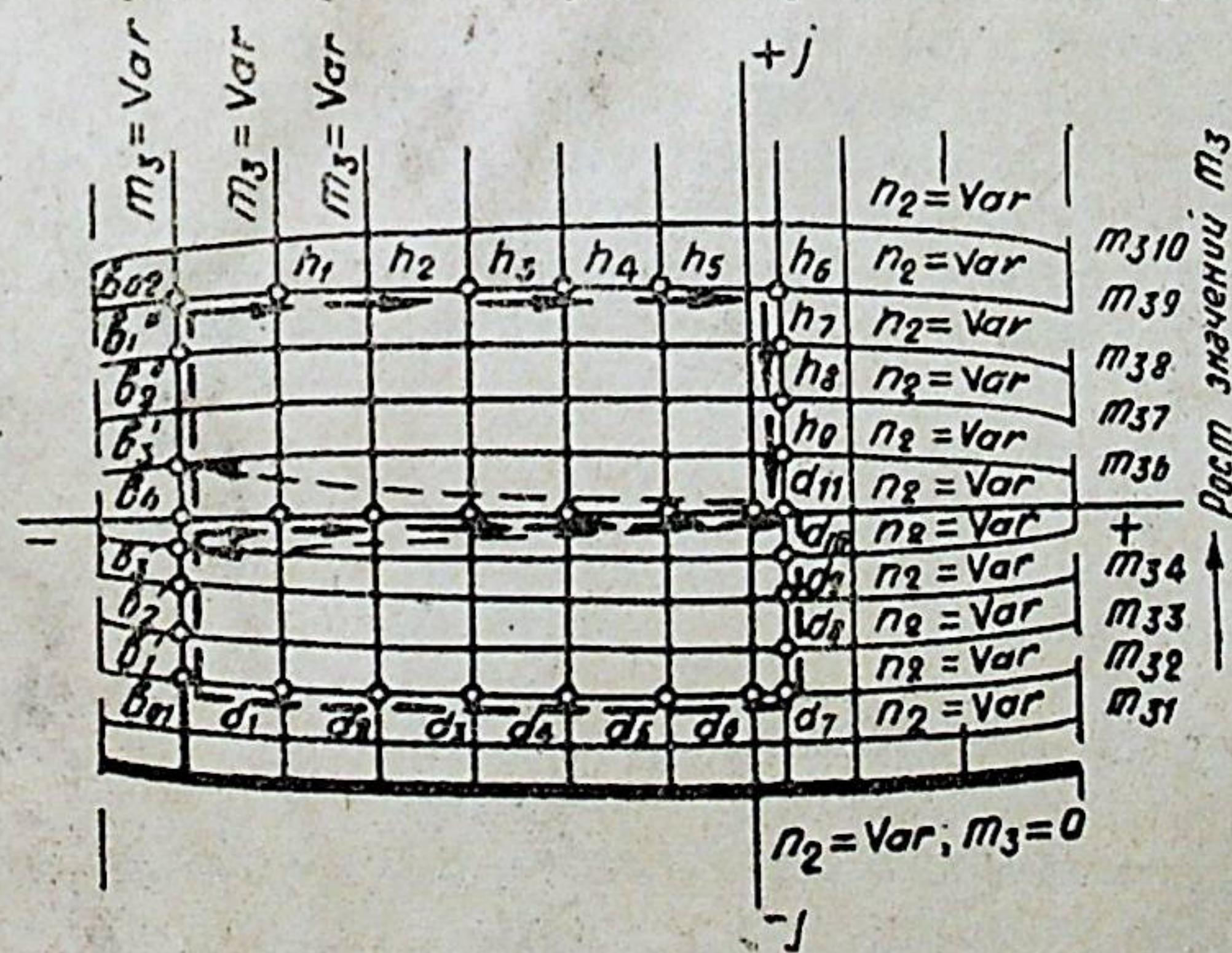


Рис. 3.

3. Чувствительность двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами

Третья глава посвящена определению абсолютной чувствительности двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами к изменению количества витков плечевых обмоток. Выяснен вопрос о возможности получения выражений чувствительности путем дифференцирования функции выходного напряжения и определены границы изменения переменного параметра, в пределах которых найденные зависимости имеют смысл. Показана возможность применения общей методики определения чувствительности К. Б. Карандеева и Ф. Б. Гриневича для двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами.

Для удовлетворительной работы системы автоматического уравнивания необходимо, чтобы изменение количества витков регулируемой обмотки на единицу вызывало всегда одинаковое приращение чувствительности, т. е. чтобы абсолютная чувствительность двойного моста с индуктивно связанными плечами была постоянной [3, 4, 5]. Исследована чувствительность двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами при различных типах измеряемых и образцовых сопротивлений. Определены условия, при которых чувствительность к изменению количества витков плечевых обмоток будет постоянной на каждом пределе измерения. Подобный анализ был проведен для ряда двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Оказалось, что постоянная на каждом пределе чувствительность может быть получена лишь для тех параметров рассмотренных цепей, которые являются общими для каждой из них и классической двойной мостовой цепи с индуктивно связанными плечами.

В качестве примера ниже приводятся зависимости, полученные для цепи, послужившей основой измерительной схемы моста Р-570, выпускаемого серийно заводом «Точэлектроприбор»:

$$\left| \dot{S}_{n_3}^u \right| = \frac{n_8}{m_n} \cdot m_2 \cdot \frac{a_2 \omega}{R_2}, \quad (9)$$

$$\left| \dot{S}_{m_2}^u \right| = \frac{n_8}{m_n} \cdot a_2 \omega^2 n_2 C_2, \quad (10)$$

где $\left| \dot{S}_{n_3}^u \right|$ — модуль чувствительности по количеству витков дополнительной обмотки компаратора токов n_3 :

$\left| \dot{S}_{m_2}^u \right|$ — модуль чувствительности по количеству витков основной обмотки трансформатора напряжения m_2 ,

a_2 — магнитная проводимость материала сердечника компаратора токов;

C_2, R_2 — образцовые емкость и сопротивление;

n_8, m_n — количество витков указательной и питающих обмоток.

Выражения (9) и (10) подтверждают тот факт, что постоянной на каждом пределе измерения может быть только чувствительность по m_2 .

В работе определена зависимость чувствительности двойного моста к изменению количества витков плечевой обмотки от паразитных и остаточных параметров цепи. Выяснено, что во многих случаях расчетная величина чувствительности может заметно отличаться от ее значений для идеализированной схемы.

4. О погрешностях дискретно уравниваемых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами

При построении цифровых мостов переменного тока приходится сталкиваться с необходимостью определения конструктивных параметров измерительных цепей из условия получения погрешности, которая не превышала бы допустимую. Известны работы А. Л. Грохольского, Е. А. Будницкой, В. П. Карпенко, А. В. Чеботарёва и других отечественных и зарубежных авторов, посвященные изучению влияния различных факторов на точность измерения параметров комплексных сопротивлений мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Особенное внимание уделялось исследованию зависимости погрешностей измерения от величин паразитных параметров цепей.

В четвертой главе рассматривается влияние на погрешность измерения двойных мостов с индуктивно связанными плечами параметров конденсаторов и катушек индуктивности паразитных и остаточных параметров цепи [6]: активных сопротивлений обмоток, собственных и межобмоточных емкостей. Предполагается также, что коэффициент индуктивной связи не равен единице. В отличие от известных работ, производится одновременный учет указанных параметров.

Кратко рассмотрен порядок расчета и приводятся выражения, позволяющие определить предполагаемую погрешность измерения по емкости и тангенсу угла потерь:

$$\delta_c = \left| -\omega^2 C_2 \left[\varepsilon_1 \left(L_1 \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_1 L_3}} - L_2 \right) + \varepsilon_2 \left(L_3 \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_1 L_3}} - L_4 \right) \right] + \right. \\ \left. + \omega \operatorname{tg} \delta_1 \left[R_{2c} (C_{33} - C_{23} + C_{33} \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}) - \right. \right. \\ \left. - R_{1c} (C_{33} - C_{13} + C_{33} \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}}) + R_{3c} \left(C_{53} + C_{43} + C_{53} \frac{\sqrt{L_4}}{\sqrt{L_3}} \right) - \right. \quad (11) \\ \left. - R_{4c} \left(C_{33} + C_{63} + C_{53} \frac{\sqrt{L_3}}{\sqrt{L_4}} \right) \right] \cdot 100\% ,$$

$$\operatorname{ctg} \delta = \left| -\omega^2 C_2 \left[\varepsilon_1 \left(L_1 \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_1 L_3}} - L_2 \right) + \varepsilon_2 \left(L_3 \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_1 L_3}} - L_4 \right) \right] + \right. \\ \left. + \omega \operatorname{tg} \delta_1 \cdot \left[R_{2c} \left(C_{33} - C_{23} + C_{33} \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}} \right) - R_{1c} \left(C_{33} - C_{13} + C_{33} \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \right) + \right. \right. \\ \left. + R_{3c} \left(C_{53} + C_{43} + C_{53} \frac{\sqrt{L_4}}{\sqrt{L_3}} \right) - R_{4c} \left(C_{53} + C_{63} + C_{53} \frac{\sqrt{L_3}}{\sqrt{L_4}} \right) \right] + \\ \left. + \omega^2 C_2 \operatorname{tg}^{-1} \delta_1 \left\{ R_{1c} L_1 \left[\omega \left(C_{33} - C_{13} + C_{33} \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \right) + \frac{1}{\omega L_1} \right] \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_1 L_3}} + \right. \right. \\ \left. + R_{3c} L_3 \left[\omega \left(C_{53} - C_{43} + C_{43} \frac{\sqrt{L_4}}{\sqrt{L_3}} \right) + \frac{1}{\omega L_3} \right] \frac{\sqrt{L_2 L_4}}{\sqrt{L_2 L_3}} - \quad (12) \\ - R_{2c} L_2 \left[\omega \left(C_{33} - C_{23} + C_{33} \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}} \right) + \frac{1}{\omega L_2} \right] - R_{4c} L_4 \left[\omega \left(C_{53} - \right. \right. \\ \left. - C_{63} + C_{53} \frac{\sqrt{L_3}}{\sqrt{L_4}} \right) + \frac{1}{\omega L_4} \right] \left. \right\} + \operatorname{tg}^{-1} \delta_1 \left\{ \omega^3 (C_{53} C_{63} + C_{43} C_{63} + C_{43} C_{53}) \times \right. \\ \left. \times (L_3 R_{4c} + L_4 R_{3c}) + \omega_3 (C_{13} C_{23} + C_{13} C_{33} + C_{23} C_{33}) (L_1 R_{2c} + L_2 R_{1c}) + \right. \\ \left. + \omega C_{33} R_{1c} \left(1 + \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \right) + \omega C_{53} R_{3c} \left(1 + \frac{\sqrt{L_4}}{\sqrt{L_3}} \right) - \omega C_{13} R_{1c} - \right. \\ \left. - \omega C_{43} R_{3c} \right\} \cdot 100\% ,$$

где L_1, L_2, L_3, L_4 — соответствующие плечевые обмотки,
 $R_{1c}, R_{2c}, R_{3c}, R_{4c}$ — собственные активные сопротивления обмоток,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — величины, дополняющие до единицы коэффициенты индуктивной связи между обмотками транс-

форматора напряжений и компаратора токов соответственно,
 $C_{13}, C_{23}, C_{33}, C_{43}, C_{53}, C_{63}$ — эквивалентные емкости, определяемые из выражений:

$$C_{13} = \frac{C'_1 C'_n + C'_1 C_{1n} + C'_1 C_{2n} + C_{1n} C'_n}{C'_n + C_{1n} + C_{2n}} \\ C_{23} = \frac{C'_2 C'_n + C'_2 C_{1n} + C'_2 C_{2n} + C_{1n} C'_n}{C'_n + C_{1n} + C_{2n}} \\ C_{33} = \frac{C_{12} C'_n + C_{12} C_{1n} + C_{12} C_{2n} + C'_n C_{2n}}{C'_n + C_{1n} + C_{2n}} \\ C_{43} = \frac{C'_3 C'_8 + C'_3 C_{83} + C'_3 C_{84} + C'_8 C_{83}}{C'_8 + C_{83} + C_{84}} \\ C_{53} = \frac{C'_4 C'_8 + C'_4 C_{83} + C'_4 C_{84} + C'_8 C_{83}}{C'_8 + C_{83} + C_{84}} \\ C_{63} = \frac{C_{34} C'_8 + C_{34} C_{83} + C_{34} C_{84} + C'_8 C_{84}}{C'_8 + C_{83} + C_{84}}$$

в которых:

$C'_1, C'_2, C'_1, C'_4, C'_n, C'_8$ — собственные емкости соответствующих плечевых, указательной и питающей обмоток;

C_{1n}, C_{2n} — емкости между соответствующими плечевыми и питающей обмотками;

C_{38}, C_{48} — емкости между плечевыми и выходной обмотками. Собственные и межобмоточные емкости определяются по формулам, приведенным в работах Ю. С. Русина и Е. И. Боровкова.

Исследование (11), (12) показало, что слагаемые, входящие в эти выражения, могут быть разделены на отдельные группы. Произведен сравнительный анализ таких групп и выяснены условия превалирования их по величинам. Подобные выражения получены и для определения погрешностей измерения параметров катушек индуктивностей. Выяснено, что характер зависимостей величин погрешностей от параметров схемы проще, чем для случая измерения емкостных сопротивлений. На основании полученных данных сделаны некоторые рекомендации по уменьшению погрешности измерения параметров комплексных сопротивлений.

Рассмотрены погрешности измерения параметров конденсаторов для схемы сравнения напряжений [7] и схемы сравнения токов.

Исследовано влияние внешних электромагнитных полей, синхронных по частоте с напряжением питания цепи, на по-

грешность измерения параметров конденсаторов двойной мостовой цепи с индуктивно связанными плечами. Выяснено, что максимальная погрешность измерения емкости имеет место при совпадении фаз напряжения, индуктированного на выходной обмотке, и напряжения питания. Погрешность измерения тангенса угла потерь при этом минимальна. При сдвиге фаз этих напряжений, равном 90° , погрешность измерения тангенса угла потерь максимальна, а емкости — минимальна.

Величины погрешностей, определенных с помощью выведенных зависимостей и полученных экспериментально, сходятся удовлетворительно.

5. Применение ЭЦВМ для расчета и исследования свойств мостовых измерительных цепей с индуктивно связанными плечами

Использование ЭЦВМ для расчета мостовых цепей с индуктивно связанными плечами позволяет значительно сократить время расчета, получить важные количественные характеристики и выбрать наиболее оптимальный вариант схемы.

В пятой главе рассматривается возможность применения для исследования свойств двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами программы, автоматизирующей расчет электрических цепей по методу контурных токов [8].

В качестве исходной используется информация о геометрическом образе и параметрах цепи, наличии взаимной индуктивности между ветвями. С помощью этой программы на ЭЦВМ М-20 можно анализировать электрические цепи, описываемые системой линейных уравнений. По программе осуществляется сборка комплексной матрицы, разворот ее в действительную, решение системы уравнений и получение действительных и мнимых составляющих контурных токов, а затем и токов в ветвях. Лёгкость изменения параметров цепи в процессе расчета позволяет использовать программу для исследования различных вариационных процессов.

В работе предлагается один из возможных алгоритмов расчета погрешностей от влияния паразитных и остаточных параметров, основанный на использовании связи составляющих измеряемого и образцового комплексных сопротивлений. Приводится алгоритм, позволяющий исследовать процесс уравнивания многодекадных двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Произведя ряд подобных расчетов, можно выбрать оптимальный по быстродействию алгоритм уравнивания. При этом цепь может быть рассмотрена с учетом всех известных паразитных и остаточных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Проведен анализ применимости различных методов расчета электрических цепей к дискретно уравниваемым мостовым цепям с индуктивно связанными плечами. Впервые получена реализация для этой цели новых (прямых) методов, что значительно облегчает расчет.

2. Произведено исследование процесса уравнивания ряда двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Показано, что при уравнивании их изменением образцовых мер линии уравнивания как и в обычных мостах являются окружностями. Следовательно, все результаты теоретических исследований четырехплечих квазиуравненных мостов, теория отдельного уравнивания полностью применимы к двойным мостам с индуктивно связанными плечами.

При выборе в качестве переменного параметра количества витков обмотки трансформатора напряжения линии уравнивания являются прямыми, а обмотки компаратора токов — кривыми четвертого порядка. Выяснен характер линий уравнивания при включении такого переменного параметра в цепь дополнительного трансформатора тока и трансформатора напряжения. Найдено условие, выполнение которого позволяет обеспечить удовлетворительную работу системы автоматического уравнивания на всех пределах измерения.

3. Произведено исследование абсолютной чувствительности двойных мостов к изменению количества витков плечевых обмоток. Выявлены условия получения постоянной на пределе измерения чувствительности. Показана возможность определения чувствительности двойных мостов с индуктивно связанными плечами к изменению количества витков плечевых обмоток путем дифференцирования. Выявлено влияние паразитных и остаточных параметров схемы на чувствительность к изменению количества витков.

4. Получены выражения, позволяющие определить погрешность измерения параметров конденсаторов одинарными и двойными мостами с индуктивно связанными плечами. Предложены некоторые меры по уменьшению погрешностей измерения. Подобное исследование проведено и для погрешностей измерения параметров катушек индуктивностей.

5. Предложены способы исследования некоторых свойств многодекадных двойных мостов с индуктивно связанными плечами при помощи программы автоматизации расчета по методу контурных токов на ЭЦВМ М-20.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Расчет дискретно уравниваемых измерительных цепей с индуктивными связями. Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Изд-во СО АН СССР, Новосибирск, 1966.

2. Исследование процесса уравнивания двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Известия АН Киргиз. ССР, № 5, 1967.

3. Об определении чувствительности цифровых мостов с индуктивно связанными плечами (в соавторстве с А. В. Чеботаревым). В сб. «Датчики и схемы влагомеров и уровнемеров для нефтехимической промышленности», «Илим», Фрунзе, 1965.

4. О чувствительности одной измерительной схемы цифрового автоматического моста переменного тока. В сб. «Элементы и схемы устройств автоматического контроля», «Илим», Фрунзе, 1966.

5. Исследование чувствительности одной измерительной схемы цифрового автоматического моста переменного тока. Тезисы доклада на II научной конференции по автоматическому управлению, Фрунзе, 1966.

6. Погрешность измерения двойных мостовых схем с индуктивно связанными плечами. Тезисы доклада на III научной конференции по автоматическому управлению, Фрунзе, 1967.

7. Погрешности схемы сравнения напряжений с тесной индуктивной связью между плечами (в соавторстве с Ф. Б. Грипевичем). В сб. «Элементы и схемы устройств автоматического контроля», «Илим», Фрунзе, 1966.

8. Анализ цепей с произвольными магнитными связями с помощью ЭЦВМ (в соавторстве с В. В. Скугаревым и С. А. Кисленко). В сб. «Анализ электрических цепей и электромагнитных систем», «Наукова Думка», Киев, 1967.

9. Расчет мостовых измерительных цепей с индуктивно связанными плечами прямыми методами. «Автометрия», 1967, в печати.

10. Исследование погрешностей измерения двойных мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. Сб. «Методы и приборы определения состава и свойств вещества», «Илим», Фрунзе, в печати.

Подписано к печати 23/X—1967 г. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Объем 1,5 п. л.
Д — 01515. Заказ 1833. Тираж 250 экз.

г. Фрунзе, тип. АН Киргизской ССР