

05.13.14
К 493

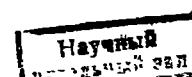
На правах рукописи


КЛИНАЧЁВ НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

СИСТЕМА ОЦЕНКИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ
УГЛЕГРАФИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность 05.13.14 –
“Системы обработки информации и управления”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Челябинск, 1998 г.

Работа выполнена на кафедре "Электротехника" Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Волович Г.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Шестаков А.Л.;
кандидат технических наук, доцент Кощеев А.А.

Ведущее предприятие – НИИ по измерительной технике,
г. Челябинск.

Защита состоится 18 июня 1998 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д053.13.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, прошу выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Южно-Уральский государственный университет, ученый совет, т. (3512) 39-91-23.

Автореферат разослан "16" мая 1998г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

М.Н. Устюгов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопросы экономичности, производительности, соответствия мировым стандартам вынуждают производителей электродной продукции неуклонно повышать требования к контролю качества выпускаемых изделий. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) для изделий электродной промышленности является важным, комплексным показателем качества. Так, в связи с необходимостью сертификации продукции, возросли требования к точности определения УЭС. На текущий момент существуют приборы для определения УЭС углеродитовых изделий, но они не удовлетворяют требованиям производства. Сложность задачи повышения точности определения УЭС углеродитовых изделий заключена в следующем:

- нет удовлетворяющей, единой методической базы для производственного контроля УЭС;
- до сегодняшнего дня существующий стандарт на методы определения УЭС не дает способов учета неоднородной плотности тока при измерении, для коррекции результатов;
- неоднородность и анизотропность углеродитовых изделий приводят к значительным ошибкам и расширяют доверительные интервалы оценочного определения УЭС.

Целью работы является повышение точности определения удельного электросопротивления углеродитовых изделий.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- разработка адекватной аналитической модели электрофизических свойств углеродитовых изделий;
- повышение точности определения удельного сопротивления углеродитовых изделий на основе усовершенствования алгоритмов обработки измерительной информации;
- разработка и теоретическое обоснование методик получения дополнительной информации о параметрах углеродитовых изделий;
- разработка принципов построения измерительных приборов и создание соответствующих конструкций, которые должны удовлетворять жестким техническим требованиям и могут быть утвержденены органом Росстандарта.

Идея работы состоит в том, что применение более совершенной, автоматизированной системы получения и обработки измерительной информации позволяет снизить влияние факторов, ограничивающих как точность измерений, так и достоверность оценивания удельного электрического сопротивления углеродных изделий.

Методы исследования. Теоретические исследования основывались на применении методов идентификации, оптимизации, математической статистики, структурного анализа, машинного моделирования. Широко использовались экспериментальные исследования и физическое моделирование.

Научная новизна.

1. Создана адекватная аналитическая модель электрофизических свойств углеродных изделий. Впервые модель описывает влияние анизотропных свойств углеродных изделий на результаты определения УЭС по стандартным методам.

2. Предложена автоматизированная система получения и обработки информации, позволившая существенно повысить достоверность оценивания среднего значения удельного сопротивления углеродных изделий, включающая:

- методику определения схемы наблюдений и их минимально-необходимого количества;
- алгоритм получения и обработки измерительной информации, позволяющий выявить и определить влияющие факторы на определение УЭС и на качество изделий.

3. Разработаны принципы построения аппаратуры, позволяющие автоматизировать процесс сбора и обработки информации об изделии, для определения его удельного электросопротивления. Предложено решение задачи оптимизации для выбора размеров датчика УЭС. Указаны направления развития методов определения удельного электросопротивления углеродных изделий и соответствующих средств измерений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена:

- корректным выбором математического аппарата и учетом всех существенных электрофизических свойств углеродных изделий при аналитическом описании модели электрофизических свойств углеродных изделий;

– экспериментально установленным соотвествием аналитической модели углеррафитовых изделий реальным объектам: электролитической ванне и углеррафитовым изделиям.

Пригодность принципов построений измерительной аппаратуры к практической реализации подтверждена свидетельством о метрологической аттестации, выданным органом Росстандарта на прибор ИУС-3.

Научная и практическая ценность.

1. Разработанные в работе алгоритмы и методики позволяют усовершенствовать систему метрологического контроля и повысить точность определения удельного электросопротивления углеррафитовых изделий.

2. Выведенные формулы для расчета коэффициентов коррекции результатов измерений, позволяют уточнить требования стандарта, описывающего методы определения УЭС углеррафитовых изделий.

3. Предложенная в работе методика экспериментального определения коэффициентов формы с помощью электролитической ванны, а также разработанное метрологическое оборудование для проведения измерений на ванне позволяют моделировать различные потенциальные поля и могут быть широко использованы.

4. Предложенные принципы построения аппаратуры для определения удельного электросопротивления применимы и были использованы при разработке приборов иного назначения – измерения переходного сопротивления контактов масляных выключателей и активного сопротивления обмоток электромашин большой мощности.

5. Разработанные приборы для определения УЭС позволили снизить трудоемкость измерений. В сравнении с конкурирующими приборами улучшены технические характеристики и упрощено обслуживание.

Реализация работы. Работа выполнялась в ходе договорных работ с АО “Челябинский электродный завод” (г. Челябинск) и АО “Волгоградский алюминий” (г. Волгоград). В производство внедрены:

- конструкции трех приборов для определения УЭС в количестве 9 экз.;

- методика экспериментального определения необходимого числа наблюдений для проведения измерений с заданной точностью на углеррафитовых изделиях в целях определения УЭС;

- методика экспериментального определения коэффициентов коррекции результатов измерений для определения УЭС;

– программы расчета коэффициентов коррекции результатов измерений, выполняемых в соответствии с двумя стандартными методами определения УЭС, для изделий цилиндрической и прямоугольной форм.

Прибор ИУС-3, изготовленный малой серией, аттестован органом Росстандарта.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований по работе докладывались и обсуждались на:

- Всероссийской молодежной научно-технической конференции (Уфа 1995 г.);
- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЧГТУ (1995, 1996, 1997 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, библиографического списка из 101 наименования и 7-и приложений. Содержит 130 страниц машинописного текста, 29 иллюстраций. В приложениях представлены основные технические характеристики разработанных приборов для определения УЭС углеррафитовых изделий и измерительного комплекса для снятия АФЧХ; копии акта внедрения, протокола испытаний прибора ИУС-3, сертификационного свидетельства на прибор ИУС-3.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, изложены основание и исходные данные для разработки темы, сформулирована цель, указаны требующие решения задачи и отмечена связь исследования с производством.

В промышленности широко используются два стандартных метода определения УЭС углеродных изделий. На рис. 1 а, б приведены схемы измерений, соответствующие торцевому методу измерения (с торцевым вводом тока), и боковому методу (с боковым вводом тока).

УЭС (ρ), в Ом·м, по стандарту, на основании торцевого измерения определяется по формуле

$$\rho = U/I \cdot S/l, \quad (1)$$

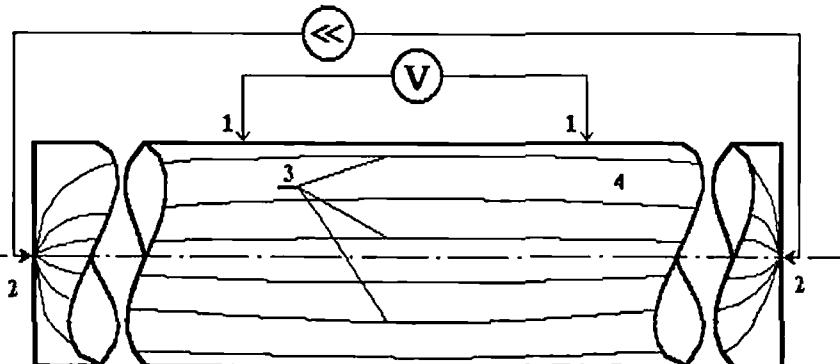
а на основании бокового измерения

$$\rho = K \cdot U/I. \quad (2)$$

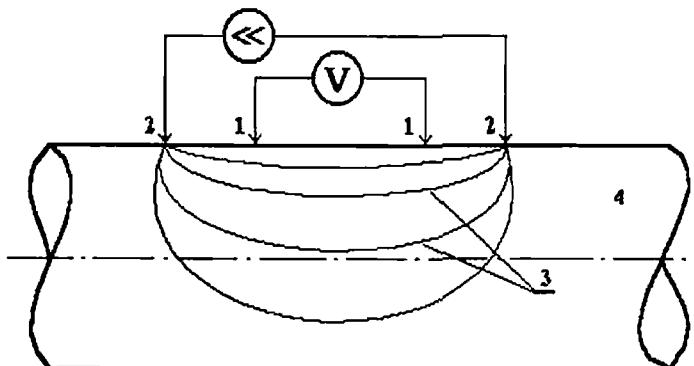
где: U – падение напряжения между потенциальными зондами, В; I – сила тока, А; S – площадь поперечного сечения, м²; l – расстояние между

потенциальными зондами, м; K – коэффициент, зависящий от геометрических размеров изделия и от расстояния между зондами. Стандарт не указывает способа определения коэффициента K .

Схемы измерений удельного электросопротивления с торцевым и боковым вводом тока в изделия



a)



б)

1 – место установки потенциальных зондов; 2 – место ввода измерительного тока в электрод; 3 – условное, графическое изображение линий тока; 4 – углекрафитовое изделие

Рис. 1

В первой главе изложена суть коррекции результатов стандартных измерений, необходимой для определения УЭС углекрафитовых изделий. Описана модель электрофизических свойств углекрафитовых изделий и рассмотрен вопрос ее адекватности.

В работе выделены два важных фактора, влияющие на результаты стандартных измерений: "геометрический фактор" и анизотропные свойства углекрафитовых изделий. Предложено выполнять коррекцию соответствующих измерений по формулам

$$\rho = K_m \cdot U / I \cdot S / l, \quad (3)$$

$$\rho = K_b \cdot M \cdot U / I, \quad (4)$$

где: K_m – коэффициент коррекции результатов торцевого измерения; K_b – коэффициент коррекции результатов бокового измерения; M – уникальный коэффициент датчика УЭС, определенный его размерами, м. Для любого датчика коэффициент M числено равен коэффициенту коррекции в формуле (2) в частном случае, когда измерения проводятся на поверхности бесконечного изотропного полупространства. Для датчика с расстоянием между потенциальными зондами 100 мм, а между токовыми 200 мм – $M=0,2356$ м.

Для определения коэффициентов коррекции K_m и K_b разработана аналитическая модель электрофизических свойств углекрафитовых изделий. Модель основана на решениях задач распределения электрического потенциала во время измерений в объеме анизотропных углекрафитовых изделий. Идея заключена в том, что, задавшись анизотропными свойствами изделия, его геометрией, схемой расположения зондов при измерении, приняв удельное электрическое сопротивление и измерительный ток равными единице, рассчитав значение потенциалов в точках измерения можно найти коэффициент коррекции. Модель описывает все виды прямоугольных и цилиндрических изделий. В работе дан обзор литературы по определению потенциальных полей. Отмечено отсутствие работ ведущих институтов электродной промышленности НИИграфит и ГОСНИИЭП в этом направлении.

Решения искались исходя из физического условия, состоящего в том, что в замкнутом объеме электрода нет источника тока, т.е. его плотность равна нулю – $\operatorname{div}(E)=0$, где $E=j_x\rho_x+j_y\rho_y+j_z\rho_z$. Решения получены интегрированием неоднородного самосопряженного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка, эллиптического типа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\xi \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (5)$$

где ξ – коэффициент анизотропии, равный отношению УЭС в поперечном направлении к УЭС вдоль оси прессования.

Задачи относятся к классу краевых. Краевые условия описывают физическое состояние, заключающееся в том, что вне проводящего углеррафитового изделия (за границами его поверхности) приращение потенциала в момент измерения равно нулю. Исключение составляют две области приложения возмущающего воздействия на поверхности изделий – точки контакта с токовыми зондами, где приращение потенциала отлично от нуля и описано поверхностными дельта-функциями или импульсами с конечной площадью проекции.

Не приводя непосредственно решений для расчета потенциала, приведем формулы для расчета коэффициентов коррекции результатов измерений торцевым и боковым методом, для прямоугольных и цилиндрических тел соответственно

$$K_m = \frac{I \cdot L}{S} \cdot \left(\frac{1}{ab} \left[\frac{c}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh} k_{m0} c}{k_{m0} \operatorname{ch} k_{m0}} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\operatorname{sh} k_{0n} c}{k_{0n} \operatorname{ch} k_{0n}} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\operatorname{sh} k_{mn} c}{k_{mn} \operatorname{ch} k_{mn}} \right] \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$K_6 = \frac{L}{M} \cdot \left(\frac{1}{a\pi\Delta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\pi\Delta (\cos m\pi d_1 - \cos m\pi d_2)(\cos m\pi c_1 - \cos m\pi c_2)}{m k_{m0} \cdot \operatorname{th}(k_{m0} b)} + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi^2 \Delta^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi\Delta}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\pi\Delta (\cos m\pi d_1 - \cos m\pi d_2)(\cos m\pi c_1 - \cos m\pi c_2)}{m k_{mn} \cdot \operatorname{th}(k_{mn} b)} \right)^{-1}, \quad (7)$$

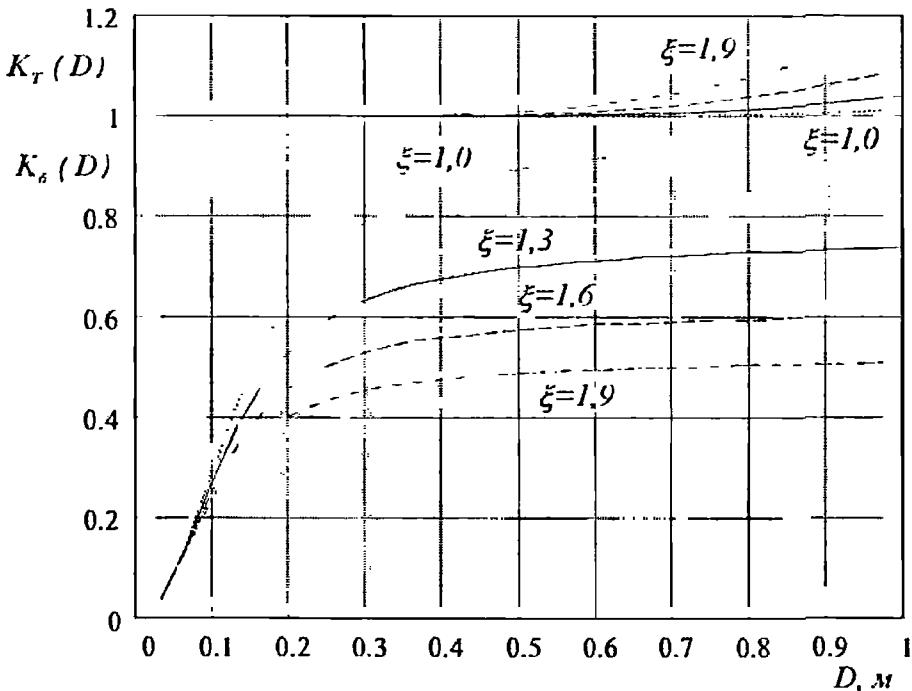
$$K_m = \frac{I \cdot L}{S} \cdot \left(\frac{2}{\pi R^2} \left[c + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{\xi} \mu_m c)}{\sqrt{\xi} \mu_m J_0(\mu_m R) \operatorname{ch}(\sqrt{\xi} \mu_m)} \right] \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$K_6 = \frac{L}{M} \cdot \left(\frac{R}{\pi^3 \Delta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\pi\Delta}{m^2} (\cos m\pi d_1 - \cos m\pi d_2) \frac{J_0(\sqrt{\xi} m\pi R)}{\sqrt{\xi} \cdot I_0(\sqrt{\xi} m\pi R)} (\cos m\pi c_1 - \cos m\pi c_2) + \right. \\ \left. + \frac{2R}{\pi^2 \Delta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\Delta}{R} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\pi\Delta}{m^2} (\cos m\pi d_1 - \cos m\pi d_2) \frac{J_n(\sqrt{\xi} m\pi R)}{\sqrt{\xi} \cdot I_n(\sqrt{\xi} m\pi R)} (\cos m\pi c_1 - \cos m\pi c_2) \right)^{-1}, \quad (9)$$

где: $d_1, d_2, c_1, c_2, R, a, b, L, \Delta$ – координаты точек ввода тока в электрод, контактов с потенциальными зондами, геометрические размеры изделий и контактного пятна.

В соответствии с формулами (6), ..., (9) написаны программы для расчета коэффициентов. Сходящиеся решения получены благодаря представлению возмущающего воздействия в виде импульса с конечной

площадью контакта. Установлены зависимости коэффициентов от анизотропных свойств и номенклатуры размеров изделий – рис. 2.



Расчетные зависимости коэффициентов коррекции результатов измерений от номенклатуры выпускаемых цилиндрических электродов при разном проявлении анизотропных свойств изделий. Верхнее семейство кривых – для торцевых измерений. Нижнее семейство – для боковых

Рис. 2

Для проверки адекватности аналитической модели электрофизических свойств углеграфитовых изделий разработана методика и аппаратура, позволяющая экспериментально создать и провести измерения потенциального поля в электролитической ванне. Решения уравнения (5), почти во всех случаях представляют собой сумму решений по трем геометрическим координатам. Одно из решений зависит от дополнительной переменной – коэффициента анизотропии. Суть этих решений – экспоненциальные зависимости с увеличивающейся производной по мере приближения соответствующего краевого условия к точкам ввода тока и снятия потенциала, что позволяет в экспериментах разделить их влияние и произвести проверку по отдельности.

Идентификация решений по всем геометрическим координатам выполнена в опытах на ванне с приближением либо торца, либо боковой стенки, либо уменьшения диаметра электрода. Расхождения в результатах составили не более 1%. Измерения на реальных углеррафитовых изделиях позволили качественно идентифицировать влияние анизотропии. Неоднородность углеррафитовых изделий не позволила провести измерения боковым методом с доверительными интервалами погрешности менее $\pm 5\%$, т.е. провести идентификацию точностных параметров модели для анизотропного случая с требуемой точностью.

Во второй главе диссертации описывается автоматизированная система получения и обработки измерительной информации позволившая существенно повысить достоверность оценивания среднего значения удельного сопротивления углеррафитовых изделий. Рассмотрены входящие в нее методики и описываются соответствующие алгоритмы.

Проведение измерений на углеррафитовых изделиях усложнено фактом наличия в их объеме неоднородностей, в основном по причине локального ослабления межзерновой связи. При применении метода измерения с боковым вводом тока в режиме однократных измерений, можно вести речь лишь об оценке локального значения УЭС. Для достоверного оценивания УЭС всего изделия необходимо проводить измерение с многократными наблюдениями.

В связи с этим решена задача о минимально-необходимом количестве наблюдений, гарантирующем заданную погрешность измерений на всех изделиях вида продукции с определенной надежностью. На базе решения разработана соответствующая методика.

Решение основано на факте принятия для вида продукции гипотезы о постоянстве дисперсии результатов измерений, поскольку технология изготовления и рецептура одна и та же (т.е. распределение оценки среднеквадратического отклонения результатов измерений асимптотически нормально).

По выборке изделий, методика предполагает определение оценки среднеквадратического отклонения результатов измерений для вида продукции. После уточнения верхнего доверительного предела оценки, определяется необходимое количество наблюдений для обеспечения заданной погрешности измерения.

В таблице приведены экспериментально полученные данные для разных видов продукции. Границы относительной погрешности измерения

$\pm 5\%$ при доверительной вероятности 0,95 обеспечиваются для всех изделий вида продукции с надежностью 0,95.

Вид изделия	Графитированный электрод	Обожженное изделие	Доменный блок	Подовый блок
Количество измерений	7	11	13	9

Для определения УЭС по формулам (3) и (4), если известен коэффициент анизотропии ξ , модель электрофизических свойств углекрафитовых изделий позволяет определить соответствующие коэффициенты коррекции K_m и K_b – формулы (6), ..., (9). Ввиду существенно различной степени проявления анизотропии в изделиях разных видов, использование усредненного значения коэффициента анизотропии приводит к расширению границ относительной погрешности определения УЭС боковым методом до $\pm 25\%$. Для изделий конкретного вида и типоразмера установлено, что коэффициент анизотропии меняется, но незначительно; можно снизить соответствующую погрешность, и погрешность определения составит $\pm 5 \div 7\%$ практически для всех видов изделий. С этой целью разработан алгоритм обработки измерительной информации и предложена на его базе методика для системы метрологического контроля УЭС, позволяющая периодически контролировать закон распределения анизотропных свойств для видов изделий, определять необходимые коэффициенты коррекции результатов измерений K_m и K_b и уточнять доверительные границы оценочного определения УЭС.

Идея заключается в том, что в измерительных данных при определении удельного электросопротивления двумя стандартными методами заключена информация об анизотропных свойствах изделий; с помощью аналитической модели электрофизических свойств и итерационного приближения ее можно извлечь и статистически обработать – рис. 3. Система уравнений для итерационного приближения

$$\rho = K_m \cdot U_m / I_m \cdot S / l,$$

$$K_b = \rho / (M \cdot U_b / I_b).$$

$$K_m = f(\xi, \Gamma_u, \Gamma_s).$$

$$\xi = f(K_b, \Gamma_u, \Gamma_s).$$

где: U_m, U_b – падения напряжения между потенциальными зондами в случаях торцевого и бокового измерений соответственно, В; I_m, I_b – силы токов при измерениях, А; Γ_u, Γ_s – множества геометрических размеров, описывающие геометрию изделия и расположение зондов соответственно.

Схема обработки информации в системе метрологического контроля

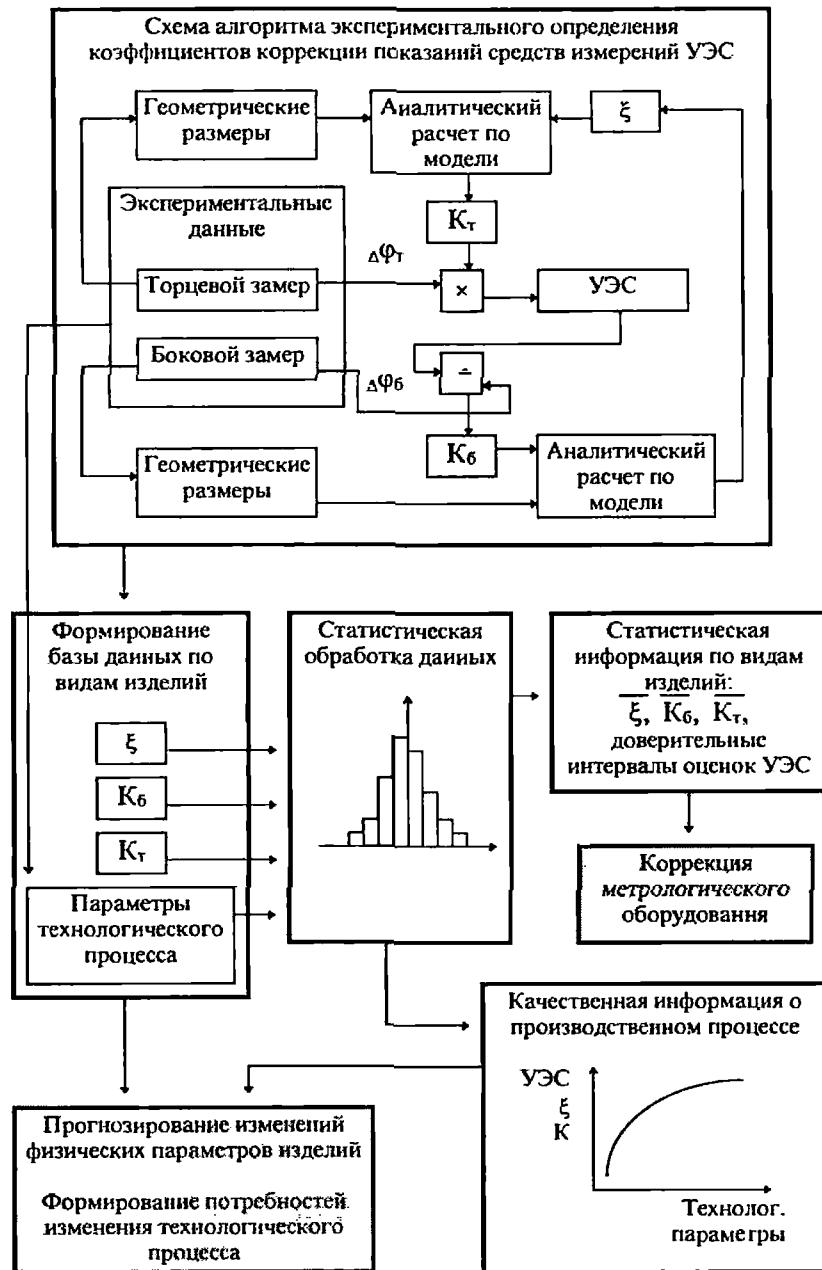


Рис. 3

На основании аprobации предлагаемой обработки данных, в диссертации делается вывод о том, что для повышения точности определения УЭС необходимо для каждого вида и типоразмера углеррафитовых изделий периодически переопределять коэффициенты коррекции, поскольку коэффициент анизотропии меняется и для вида изделий, в основном вследствие отклонений технологии. В связи с этим предложены изменения в структуре системы метрологического контроля УЭС, которые заключаются в принятии в ее состав описанных методик, и четком указании алгоритма применения их данных.

Усовершенствование системы обработки информации в системе метрологического контроля позволит: 1) уточнить и контролировать границы погрешности определения УЭС; 2) изучить распределение коэффициента анизотропии по видам изделий; 3) выявить корреляционные зависимости между технологией изготовления и свойствами изделий; 4) прогнозировать изменение физических свойств изделий; 5) обосновано формировать требования модернизации тех или иных технологических процессов.

В третьей главе описаны разработанные принципы построения аппаратуры для определения УЭС углеррафитовых изделий. Предложено решение задачи обоснованного выбора размеров датчика для бокового измерения. Указаны направления развития аппаратуры и методов измерения.

Проведенная исследовательская работа по созданию необходимых в производстве средств измерений позволила изучить варианты возможных структурных построений и схемотехнических решений, позволяющие достичь высоких значений важных эксплуатационных параметров: качества измерений, ресурса автономной работы, разрешающей способности, массогабаритных показателей.

Наиболее важные принципы построения таких приборов:

- 1) сокращение аналоговых преобразователей в схеме измерительной части;
- 2) применение микроЭВМ для цифровой обработки результатов измерений, управления прибором и повышения сервисно-информационных возможностей;
- 3) применение АЦП двойного интегрирования со временем преобразования кратным периоду тока сетей электроснабжения;
- 4) использование структурных методов уменьшения погрешностей;
- 5) наличие ключевого управления измерительным током и режима пониженного энергопотребления;
- 6) выполнение оптимизации размеров датчика УЭС.

Среди наиболее важных схемотехнических решений отмечены: включение в схему малошумящего операционного усилителя со смещением нуля не более единиц микровольт; выполнение коррекции нуля всей схемы непосредственно перед каждым измерением; использование одного источника опорного напряжения для формирования стабилизированного измерительного тока и опорного напряжения для АЦП; применение коммутируемого источника тока номиналом 5 А; наличие режима самокалибровки прибора под управлением микроЭВМ, а также энергонезависимой памяти для хранения коэффициентов коррекции результатов измерений и калибровки.

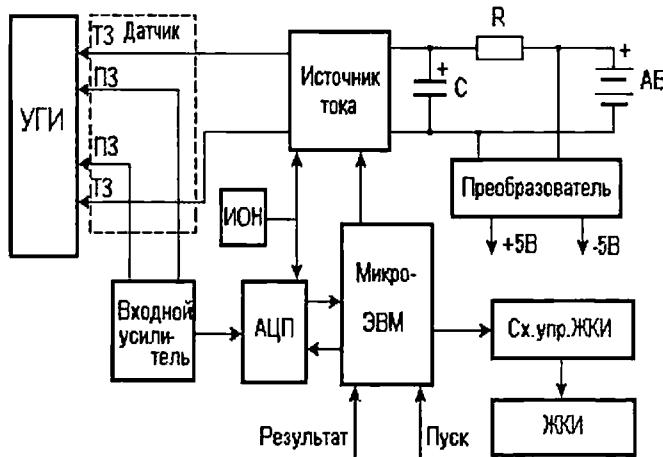


Рис. 4

Наиболее удачное структурное построение электрической схемы, реализованной в приборе ИУС-3, изображено на рис. 4. Измерение производится под управлением микроЭВМ по сигналу оператора, в следующем порядке: производится измерение смещения нуля; измерение разности потенциалов на образце; обрабатывается и индицируется результат.

Рассмотренное в работе решение задачи выбора размеров датчика сведено к составлению условий, ограничений, геометрическому построению и оптимизации по заданным критериям.

Ограничительные неравенства, являющиеся критериями для оптимизации и определяющие область допустимых решений (ОДР)

$$K(\xi=1) \leq 1,$$

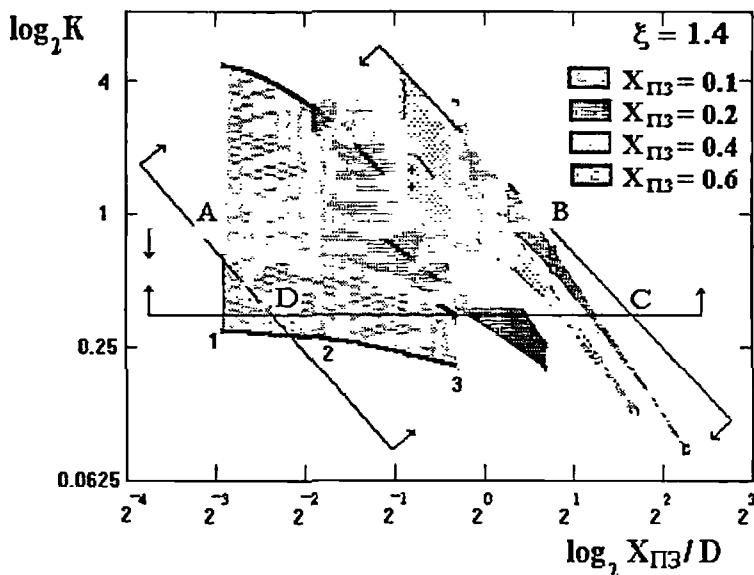
$$\max(P_d) \cdot \min(K(\xi=1,9; D=0,125)) \geq 70,0 \text{ [мкОм} \cdot \text{м]},$$

$$X_{пз} + 2 \cdot X_{тпз} \leq 2,2 \text{ [м]},$$

$$\delta_t \leq 1 [\%],$$

где: P_t – показания приборов при боковом измерении; $X_{пз}$ – расстояние между потенциальными зондами датчика УЭС; $X_{тпз}$ – расстояние между соседними потенциальным и токовым зондами датчика; δ_t – погрешность от люфта зондов.

Область допустимых значений строится из семейств отрезков кривых, при движении вдоль которых размеры датчика остаются неизменны, а выстраиваются зависимости коэффициента коррекции измерительного оборудования от сечения электродов. На рис. 5 четко различимы 4 семейства, в каждом неизменным фактором является расстояние между потенциальными зондами, изменяются же расстояния между токовыми зондами.



- ОДР – четырехугольник ABCD, который ограничивают факторы:
- AB – разрешение прибора 0,1 мкОм·м, при $\text{Min}(\xi)$;
- DC – максимальный предел прибора 70 мкОм·м, при $\text{Max}(\xi)$;
- BC – предельно возможные размеры датчика УЭС;
- AD – погрешность от люфта зондов и анизотропных свойств (1%)

Рис. 5

ОДР ограничена четырехугольником ABCD. Оптимальным решением являются максимальные геометрические размеры датчика УЭС, которым соответствует полностью входящий в ОДР отрезок кривой из любого

семейства. Особого выбора нет: области допустимых решений удовлетворяет небольшая вариация размеров датчика – $X_{из}=0,1\div0,14$ м. $X_{ппз}=0,05\div0,075$ м, и следует отметить, что погрешности при подобной вариации отличаются незначительно.

Большим достоинством решения является возможность простого определения необходимого изменения разрешающей способности и диапазона прибора с помощью границ АВ и DC соответственно, при изменении размеров датчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрен комплекс задач, возникающих при повышении точности определения удельного электросопротивления углеррафитовых изделий. В изложенных материалах выделяются следующие основные результаты.

1. Создана адекватная аналитическая модель электрофизических свойств углеррафитовых изделий. В достаточной мере выполнена идентификация её параметров. Учет моделью анизотропных свойств среды позволил более точно описать потенциальное поле в момент измерений, проводимых для определения УЭС.

Выведены формулы для расчета коэффициентов коррекции результатов измерений, которые необходимы для определения УЭС в соответствии со стандартом. Таким образом, уточнены два стандартных метода определения удельного электросопротивления.

2. Предложена автоматизированная система получения и обработки информации, позволяющая существенно повысить достоверность оценивания среднего значения удельного электросопротивления углеррафитовых изделий, включающая:

- Методику определения схемы наблюдений и их минимально-необходимого количества, основанную на двух алгоритмах получения экспериментальных данных. Определяемое минимально-необходимое количество наблюдений позволяет гарантировать заданную погрешность при измерениях на всех изделиях вида продукции с определенной надежностью.

- Алгоритм получения и обработки измерительной информации, позволяющий выявить и определить влияющие факторы на определение УЭС и на качество изделий. Показано, что только учёт выявленной информации об анизотропии изделий позволяет для бокового метода определения

удельного электросопротивления сократить доверительные границы результата с $\pm 25\%$ до $\pm 5\div 7\%$. Таким образом, предложен способ преодоления неоднозначности, имеющейся в стандартных методах определения удельного электросопротивления, состоящей в возможной вариации распределения потенциального поля в изделиях с одинаковым удельным электросопротивлением вдоль оси прессования при условии различного проявления анизотропных свойств.

3. Предложенное решение задачи оптимизации для выбора размеров датчика УЭС дополняет теоретическое обоснование стандартных методов определения удельного электросопротивления углеграфитовых изделий.

Сформулированные, на основе последовательного проектирования трех конструкций приборов для определения УЭС, основные принципы их построения позволяют достигать высоких значений важных эксплуатационных параметров: разрешающей способности, качества измерений, ресурса автономной работы, автоматизации измерений, массогабаритных показателей.

Проданные приборы заметно улучшили существующую в промышленности базу средств измерений. Приборы типа ИУС-3 можно использовать при сертификации продукции электродных заводов, поскольку они аттестованы органом Росстандарта как нестандартизированные средства измерений.

Рассмотренные перспективы развития аппаратуры и методов измерения обеспечивают преемственность дальнейшего развития.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Волович Г.И., Клиничёв Н.В. Генератор сигналов произвольной формы // Приборы и техника эксперимента. – 1994. – №1.

2. Волович Г.И., Клиничёв Н.В. Измерительный комплекс для снятия частотных характеристик динамических объектов // В кн. "Программное обеспечение. Микропроцессорная техника сложных автоматических систем и их устройства: Тем. сборник науч. трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – с. 25–30.

3. Волович Г.И., Клиничёв Н.В. Прибор для замера контактного сопротивления // Энергетик. – 1995. – №5.

4. Волович Г.И., Клиничёв Н.В. Прибор для измерения удельного электросопротивления угольных и графитированных электродов // Информационный листок №149-97. – Челябинск: ЦНТИ, 1997.

5. Волович Г.И., Клиничёв Н.В. Прибор для контроля удельного сопротивления угольных и графитированных электродов // Элементы и приборы систем управления: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – с. 46–49.

6. Волович Г.И., Клиничёв Н.В., Волович А.Г. Прибор для измерения удельного электросопротивления угольных и графитированных электродов // Измерительная техника. – 1997. – №11. – с. 51–52.

7. Волович Г.И., Клиничёв Н.В., Клиничёв В.В. Экспериментальное определение поправочных коэффициентов для учета формы и размеров графитовых изделий при замере их удельного электросопротивления // Элементы и приборы систем управления: Тем. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – с. 104–107.

8. Клиничёв Н.В. Алгоритмы съёма и обработки информации при экспериментальном определении частотных характеристик систем управления // Информационные и кибернетические системы управления и их элементы: Тезисы докладов. – Уфа: УГАТУ, 1995. – с. 206–207.

