

ПМК-УРАЛ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ПМК-Урал»



А.А. Зобнина

«08» 05 2026 г.

ПРОГРАММА

повышения квалификации по электрическому методу
неразрушающего контроля

(подготовка к аттестации по СДАНК-02-2020, I и II уровни)

г. Пермь, 2026

1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа охватывает методы контроля, основанные на измерении электрических параметров материалов (сопротивление, потенциал, диэлектрические свойства). Включает практику на образцах и реальных объектах.

2. ЦЕЛЬ

Научить специалистов выявлять несплошности, оценивать толщину покрытий и структуру материалов с помощью электрических методов.

3. ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН (70 часов: 28 + 42)

№	Тема	Часы
1	Основы НК и электрофизика материалов	8
2	Физические основы электрических методов	10
3	Аппаратура и датчики	8
4	Методы электрического контроля	12
5	Технология электрического контроля объектов	10
6	Нормативная база и обработка результатов	4
7	Настройка приборов	5
8	Контроль на образцах	8
9	Разработка инструкций	3
10	Предэкзаменационная подготовка	2
Всего		70

4. СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ

Тема 1. Основы НК и электрофизика материалов (8 ч)

1.1. Введение в электрический метод

Назначение и область применения электрического контроля (ЭК) в системе НК. Связь ЭК с другими методами (вихретоковым, магнитным, тепловым). Основные виды электрического контроля: контактные методы измерения электрического сопротивления, потенциалов, ёмкости; электропотенциальный метод; метод термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС); электроискровой метод; метод регистрации электромагнитного излучения при разрушении (экзоэлектронная эмиссия).

Преимущества: возможность оценки механических свойств (твёрдость, прочность), обнаружение поверхностных и подповерхностных трещин, контроль толщины и сплошности диэлектрических покрытий, селективность к химическому составу. Ограничения: необходимость хорошего электрического контакта (для контактных методов), влияние состояния поверхности, температуры, влажности.

1.2. Электрофизические свойства материалов

Электропроводность, удельное сопротивление ρ (Ом·м), единицы измерения (мкОм·м, % IACS для цветных металлов). Зависимость ρ от химического состава, структуры, термообработки, наклёпа. Примеры: медь ($\rho \approx 1,72$ мкОм·см), алюминий (~2,65), сталь (10–20 для низкоуглеродистой). Влияние легирующих элементов, примесей. Термо-ЭДС, коэффициент Зеебека; использование для сортировки сталей и сплавов (контактный термоэлектрический метод). Диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, их связь с влажностью, пористостью, старением диэлектриков.

1.3. Электрические свойства дефектов

Модель трещины как нарушения сплошности проводящей среды: увеличение сопротивления на участке с трещиной, искажение линий тока. Дефекты диэлектрических покрытий (поры, трещины) вызывают пробой или снижение ёмкости изоляции. Коррозионные поражения изменяют контактное сопротивление. Металлургические дефекты (неоднородность состава) – причина локального изменения электропроводности.

1.4. Система аттестации персонала

Требования СДАНК-02-2020 к специалистам I, II и III уровней по ЭК. Ответственность персонала II уровня за выбор метода, разработку методик, оценку результатов. Электробезопасность при работе с источниками постоянного и переменного тока, высоковольтными испытательными установками.

Тема 2. Физические основы электрических методов (10 ч)

2.1. Электрическое поле в проводящей среде

Закон Ома в дифференциальной форме: $J = \sigma E$ (J – плотность тока, σ – удельная электропроводность, E – напряжённость электрического поля). Распределение потенциала в однородном проводнике при точечном вводе тока. Потенциал полупространства: $\varphi = I \cdot \rho / (2\pi r)$ (для одиночного точечного электрода на поверхности полубесконечного тела). Принцип суперпозиции. Четырёхэлектродная схема: два токовых электрода, два потенциальных. Измеряемое удельное сопротивление $\rho = 2\pi a \cdot \Delta V / I$ (для линейной эквидистантной расстановки электродов с расстоянием a).

2.2. Электропотенциальный метод (метод падения напряжения)

Принцип: пропускание постоянного или переменного тока через контролируемый участок и измерение падения напряжения между двумя контактами (щупами), расположенными по разные стороны от предполагаемой трещины. Электрическое поле вокруг трещины: эквипотенциальные линии сгущаются, ток огибает дефект, возрастает локальное сопротивление. Увеличение падения напряжения ΔU на измерительных электродах (по сравнению с бездефектным участком) служит мерой глубины трещины. Зависимость глубины h от соотношения напряжений: $h \approx f(\Delta U_{\text{def}} / \Delta U_0)$. Приближённые экспериментальные градуировочные кривые для различных

материалов и геометрии электродов (например, четырёхточечный зонд с фиксированным расстоянием). Влияние расположения электродов относительно трещины, её ориентации, расстояния между контактами.

2.3. Измерение электропроводности

Метод вихревых токов (импедансный) – родственный, но в контексте ЭК чаще используют четырёхконтактный метод на постоянном токе или метод с использованием вихретокового прибора. Здесь уместно описать метод четырёх электродов (ван-дер-Пау для пластин). Зависимость сигнала от температуры: термокомпенсация, приведение к стандартной температуре 20 °С с помощью коэффициентов (например, для меди $\sim 0,0039$ 1/°С). Использование для сортировки сплавов: сравнение показаний с эталонными значениями.

2.4. Термоэлектрический метод

Эффект Зеебека: при нагреве контакта между двумя различными металлами возникает термо-ЭДС, величина которой зависит от химического состава. Горячий электрод и холодный электрод прижимаются к детали; по знаку и величине термо-ЭДС идентифицируют марку стали, оценивают содержание углерода, легирующих элементов. Градуировочные таблицы. Влияние температуры горячего спая, состояния поверхности.

2.5. Электроёмкостной метод

Принцип: измерение ёмкости между электродом и проводящей основой через диэлектрическое покрытие. Ёмкость $C = \epsilon \cdot S/d$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость покрытия, S – площадь электрода, d – толщина. При наличии пор, пузырей, расслоений диэлектрическая проницаемость изменяется, что приводит к изменению ёмкости. Используется для контроля толщины диэлектрических плёнок, обнаружения дефектов (непроклеев) в слоистых пластиках.

2.6. Электроискровой метод

Высоковольтный пробой воздушного промежутка между электродом и поверхностью диэлектрического покрытия на проводящей основе. При наличии сквозной поры или трещины в покрытии происходит искровой разряд в месте дефекта, регистрируемый визуально или акустически. Напряжение пробоя зависит от толщины и диэлектрической прочности материала покрытия. Метод применяется для контроля сплошности изоляции трубопроводов, эмалевых покрытий.

2.7. Другие электрические методы

Метод экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ): регистрация электронов, испускаемых свежedefормированной или разрушенной поверхностью. Используется для обнаружения зарождающихся микротрещин. Метод контактной разности потенциалов: датчик Кельвина для обнаружения электрохимической неоднородности. Метод электрического шума: регистрация флуктуаций тока или напряжения при деформации, коррозии.

Тема 3. Аппаратура и датчики (8 ч)

3.1. Электродные системы для контактных методов

Требования к материалу электродов: низкое переходное сопротивление, твёрдость, износостойкость. Часто используют медь, вольфрам, серебро. Конструкции:

подпружиненные щупы с острыми концами для точечного контакта, роликовые контакты для сканирования, магнитные держатели. Четырёхэлектродная головка с фиксированным межэлектродным расстоянием. Прижимное усилие.

3.2. Измерительные приборы

Миллиомметры и микроомметры: принцип измерения малых сопротивлений по 4-проводной схеме (Кельвина). Источники стабилизированного постоянного тока (1–10 А). Вольтметр с высоким входным сопротивлением. Цифровые приборы для измерения электропроводности (например, «Сигма-тест», «Вектор»).

Термоэлектрические приборы: измеритель термо-ЭДС с подогреваемым электродом (например, прибор ТЭС-2). Ёмкостные измерители (куметры, измерители импеданса). Электроискровые дефектоскопы (высоковольтные пробойники) с напряжением 1–50 кВ, с постоянным или импульсным выходом. Электрометрические усилители для метода Кельвина.

3.3. Вспомогательное оборудование

Генераторы для возбуждения переменного тока низкой частоты (для снижения поляризационных эффектов). Термометры и термодпары для контроля температуры. Образцовые резисторы, меры электропроводности (эталонные пластины). Калибровочные образцы с искусственными трещинами известной глубины (для электропотенциального метода).

Тема 4. Методы электрического контроля (12 ч)

4.1. Измерение глубины трещин

Методика выполнения: очистка поверхности, размещение электродов симметрично относительно трещины, измерение падения напряжения. Сравнение с показаниями на бездефектном участке того же материала при одинаковом расстоянии между электродами. Использование градуировочных таблиц или кривых, построенных по образцам с известной глубиной трещины. Факторы, влияющие на точность: расстояние между потенциальными контактами (база), расстояние до края детали, расположение трещины (сквозная, поверхностная), электропроводность материала, температура. Оценка погрешности. Практические примеры: измерение глубины трещин в валах, зубьях шестерён, сварных швах.

4.2. Сортировка сплавов по электропроводности

Использование вихретоковых измерителей электропроводности или контактных четырёхзондовых приборов. Калибровка по эталонам. Сравнение измеренной электропроводности с паспортными значениями для различных марок. Учёт влияния термообработки (закалка, отпуск), наклёпа. Различение марок алюминиевых сплавов (Д16, АМг6, В95), медных сплавов, титановых сплавов.

4.3. Оценка твёрдости и прочностных характеристик

Корреляция между электропроводностью и твёрдостью для термоупрочняемых алюминиевых сплавов. Метод термо-ЭДС для оценки содержания углерода в сталях, различения марок инструментальных сталей. Комбинация с другими методами для повышения достоверности.

4.4. Контроль толщины диэлектрических покрытий

Ёмкостной метод: калибровка по образцам с известной толщиной покрытия. Диапазон

измеряемых толщин (от десятков микрометров до нескольких миллиметров). Влияние влажности, температуры, состава покрытия. Электроискровой метод: установка напряжения, соответствующего минимальной толщине покрытия, и сканирование электродом-щёткой или проволоочной гребёнкой. Регистрация разрядов (звуковая и световая сигнализация). Маркировка дефектных мест.

4.5. Контроль влажности диэлектриков

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ или ёмкости на разных частотах. Корреляция с влажностью. Применяется для оценки состояния изоляции трансформаторов, кабелей.

4.6. Искровой контроль изоляции

Метод сплошности диэлектрических покрытий на металлической подложке (трубопроводы, резервуары). Напряжение пробоя воздушного промежутка: $V = k \cdot d$, где d – толщина покрытия, k – диэлектрическая прочность покрытия (кВ/мм). При обнаружении дефекта разряд пробивает воздух и регистрируется. Осторожность: не повредить само покрытие излишне высоким напряжением.

Тема 5. Технология электрического контроля объектов (10 ч)

5.1. Подготовка к контролю

Очистка контролируемой поверхности от окалины, ржавчины, краски в местах установки электродов. Обезжиривание. Обеспечение надёжного электрического контакта. Для электропотенциального метода возможно нанесение контактной пасты. Выбор схемы измерения (двух-, четырёхэлектродная) в зависимости от требуемой точности и влияния переходного сопротивления.

5.2. Выполнение измерений

Фиксация датчика, обеспечение постоянного прижимного усилия. Учёт дрейфа показаний (поляризация, термо-ЭДС, наводки). Использование переменного тока низкой частоты (10–100 Гц) для устранения влияния термо-ЭДС и поляризации. Измерение температуры для температурной коррекции.

5.3. Интерпретация результатов

Сопоставление с эталонными значениями для бездефектных участков того же материала. Статистическая обработка: определение среднего, разброса. Определение браковочного порога.

5.4. Документирование

Заполнение протокола: схема измерения, тип прибора, номера электродов, температура, результаты по каждому участку, заключение о годности.

Тема 6. Нормативная база и обработка результатов (4 ч)

6.1. Основные нормативные документы

ГОСТ 27333-87 «Контроль неразрушающий. Метод электрический. Термины и определения».

ГОСТ Р 56542-2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов».

Отраслевые стандарты по электропотенциальному контролю (например, для авиации, атомной энергетики).

Правила устройства и безопасности эксплуатации электроустановок (в части требований к испытательному оборудованию).

Методики предприятия.

6.2. Обработка результатов

Пересчёт показаний в единицы измеряемой величины (глубина трещины по градуировочной зависимости). Оценка неопределённости. Требования к отчётности. Хранение протоколов.

Тема 7. Настройка приборов (5 ч)

Цель: освоить подготовку электрических приборов, калибровку, проверку работоспособности.

Оборудование: миллиметр или электропотенциальный измеритель (прибор для измерения глубины трещин), вихретоковый измеритель электропроводности, термоэлектрический прибор, калибровочные образцы (эталонные резисторы, эталоны электропроводности, образцы с трещинами известной глубины), ёмкостной измеритель толщины покрытий, высоковольтный искровой дефектоскоп, соединительные провода.

Порядок:

1. Калибровка миллиметра с помощью эталонного резистора (4-проводная схема).
2. Калибровка измерителя электропроводности по эталонам с известной электропроводностью (медь, алюминий, сплавы). Проверка стабильности показаний.
3. Калибровка электропотенциального прибора на бездефектном образце и на образце с трещиной известной глубины. Построение градуировочной кривой.
4. Проверка термоэлектрического прибора по эталонному образцу известной марки (например, сталь 45).
5. Настройка искрового дефектоскопа: установка испытательного напряжения, проверка на образце с искусственным дефектом (проколом).
6. Запись калибровочных данных в журнал.

Тема 8. Контроль на образцах (8 ч)

Цель: выполнить электрический контроль реальных образцов, научиться выявлять и оценивать дефекты, интерпретировать результаты.

Оборудование: то же, что в теме 7, а также набор образцов:

- Стальные и алюминиевые детали с поверхностными трещинами естественного происхождения (усталостные, закалочные), на которых указана реальная глубина трещины (для проверки точности).
- Образцы сплавов различных марок (для сортировки).
- Образцы с диэлектрическими покрытиями, имеющими дефекты (поры, проколы).

Порядок:

1. **Измерение глубины трещины:** на образцах выполнить измерения электропотенциальным методом, записать показания, по градуировочной кривой определить глубину, сравнить с реальной.
2. **Сортировка сплавов:** измерить электропроводность или термо-ЭДС нескольких немаркированных образцов, определить марку по таблице.
3. **Контроль покрытий:** ёмкостным методом измерить толщину покрытия в нескольких точках, найти места с уменьшенной ёмкостью (дефекты). Искровым дефектоскопом проверить сплошность покрытия образца, обнаружить проколы по искре.
4. **Документирование:** заполнить протоколы с эскизами, указать тип прибора, параметры, результаты, заключение.

Тема 9. Разработка инструкций (3 ч)

Цель: научиться составлять технологические инструкции по электрическому контролю для конкретных задач.

Задание: слушатель получает объект (например, лопатка турбины, сварной шов трубопровода, вал редуктора) и разрабатывает инструкцию по контролю с использованием одного или нескольких электрических методов. Инструкция должна содержать:

- Область применения.
- Тип и модель прибора, настройки.
- Подготовку поверхности и электродов.
- Схему измерений (расположение электродов, база).
- Критерии приёмки (допустимая глубина трещины, допустимое отклонение электропроводности).
- Оформление результатов.

Ролевая игра: другой слушатель выполняет контроль по этой инструкции, автор проверяет правильность и оценивает качество работы.

По итогам проводится обсуждение достоинств и недостатков инструкций.

Тема 10. Предэкзаменационная подготовка (2 ч)

Цель: закрепить знания и подготовиться к квалификационному экзамену.

Содержание:

- Повторение физических основ: закон Ома, распределение потенциалов, влияние дефекта на электрическое поле.
- Решение тестовых заданий из сборника Независимого органа по ЭК (не менее 15 вопросов).
- Расчётные задачи: определить глубину трещины по результатам измерений потенциала, рассчитать сопротивление по известной электропроводности.
- Пробное практическое задание: за 1,5 ч выполнить контроль образца с неизвестным дефектом и оформить заключение.
- Индивидуальные консультации.

5. НОРМАТИВНАЯ БАЗА

- ГОСТ 27333. Контроль неразрушающий. Метод электрический. Термины и определения.