

На правах рукописи



Лавров Валерий Александрович

**АППАРАТНО - ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
И ДИАГНОСТИКИ РЕЛЕ**

Специальность 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие
системы (машиностроение)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: Клементьев Алексей Валентинович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Алексеев Владимир Васильевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и технологий ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Шевцов Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент, руководитель лаборатории государственных эталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»

Ведущая организация: ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области»

Защита состоится «29» декабря 2016 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251 С.-Петербург, ул. Политехническая, 21, 9-й учебный корпус, ауд. 121.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences/>

Автореферат разослан «24» ноября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.10
кандидат технических наук, доцент

Богач Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная номенклатура отечественных слаботочных электромагнитных реле составляет более двухсот типов. Объем выпуска исчисляется миллионами штук. Только в Российской Федерации и странах СНГ потребителями реле являются более 2000 предприятий, представляющих практически все отрасли промышленности. Выпуск слаботочных электромагнитных реле постоянно растет, улучшаются их технические характеристики и разрабатываются новые типы.

Значительный сегмент рынка занимают реле специального назначения, используемые в ракетно-космической, авиационной и различной военной технике, где жесткие условия эксплуатации требуют особого внимания к качеству и надежности комплектующих изделий. Скрытые дефекты реле, не обнаруженные при производстве, приводят к отказам и сбоям в работе специальной аппаратуры при ее эксплуатации и, как следствие, к возможным ситуациям с катастрофическими последствиями. Ремонт и восстановление работоспособности различных электронных узлов и блоков при этом требует значительных технических и финансовых затрат.

В связи с необходимостью повышения надежности, наращиванием выпуска, улучшением технических параметров и разработкой новых типов слаботочных электромагнитных реле, в частности, содержащих элементы ограничения ЭДС самоиндукции, должны решаться задачи по совершенствованию технологий контроля качества и диагностики в процессе их производства.

Развитие технологии контроля качества требует разработки и внедрения новых методов и измерительных систем высокопроизводительного, автоматизированного неразрушающего контроля технических характеристик реле, позволяющих выявлять дефектные и потенциально ненадежные экземпляры на ранних стадиях производства.

Возросшие требования к точности и расширению диапазонов измерения технических характеристик, необходимость автоматизации контроля и диагностики с оценкой стабильности значений параметров и их статистического анализа для выявления потенциально ненадежных изделий пришли в противоречие с устаревшими, не отвечающими современным требованиям средствами и методами измерений. Поэтому диссертационная работа, посвященная разработке и исследованию методик и аппаратно-программных средств автоматизированного неразрушающего контроля реле, имеет актуальное значение.

Цель работы состоит в разработке и совершенствовании методов и аппаратно-программных средств с расширенными функциональными возможностями для автоматизированного неразрушающего контроля основных характеристик реле в процессе промышленного производства.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **основные задачи**:

1. Анализ известных методов измерения параметров реле и структурного построения контрольно-измерительной аппаратуры по литературным и патентным источникам информации.
2. Разработка метода и реализующих данный метод аппаратно-программных средств измерения сопротивления цепи обмотки реле постоянному току с гарантированным пределом относительной погрешности измерения в широком динамическом диапазоне.
3. Разработка методики и создание устройства косвенного измерения временных параметров движения подвижных узлов магнитопровода и контактной системы реле в процессах его срабатывания и возврата.

4. Разработка методики и создание программного обеспечения для оценки ресурса и поиска наиболее информативных параметров, характеризующих надежность работы реле.

5. Проведение экспериментальных исследований и промышленных испытаний для подтверждения достоверности и эффективности предложенных методов и аппаратно-программных средств.

Объект исследования. Процессы, обеспечивающие повышение качества и получение информации о состоянии реле путем его испытаний и измерений параметров.

Предмет исследования. Методы и средства неразрушающего контроля качества и диагностики реле, их аппаратное, программное и метрологическое обеспечение. Автоматизация процессов измерения характеристик реле.

Методы исследования основываются на положениях теории измерений электрических и временных величин, методах вычислительной математики, математической статистики, теории информации и цифровой обработки сигналов, компьютерных технологиях, теории диагностики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод измерения сопротивления постоянному току с гарантированным пределом относительной погрешности измерения в расширенном динамическом диапазоне изменения измеряемой величины. Реализация метода позволила создать однопредельные широкодиапазонные универсальные цифровые омметры для оснащения более ста рабочих мест в серийном производстве реле.

2. Разработана методика неразрушающего автоматизированного измерения времени трогания, движения подвижной системы электромагнитных герметичных реле и времени совместного движения их подвижной и контактной систем в комплексе с динамическими характеристиками, определяемыми по показателям переходных процессов в цепи контактов. Предложены способы метрологической калибровки средств измерения динамических характеристик, определяемых по показателям переходных процессов в реле.

3. Разработана методика выявления наиболее информативных параметров, влияющих на надежность работы реле, и прогнозирования ресурса с использованием расширенной номенклатуры диагностических признаков.

4. Предложены структуры и новые принципы построения измерительных систем для контроля качества и прогнозирования ресурса реле, позволяющие в широких динамических диапазонах измерять их электрические и динамические характеристики и получившие промышленное внедрение.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований и испытаний созданных измерительных систем, а также успешным внедрением разработанных программно-аппаратных средств в технологические процессы производства и проектирования слаботочных электромагнитных герметичных реле.

Практическая ценность диссертационной работы. Практическая ценность проведенных исследований заключается в создании и внедрении в технологические процессы контроля слаботочных электромагнитных герметичных реле измерительных систем, реализующих предложенные в диссертационной работе методы. Внедрение измерительных систем позволило повысить оперативность, точность и производительность контроля, выявлять дефектные экземпляры реле на основе измерений электрических и динамических характеристик. Разработанные компьютерные программы позволяют осуществить автоматизированные измерения динамических ха-

рактических реле и обеспечивают обработку результатов контроля для прогнозирования их ресурса и надежности работы.

Обеспечение автоматизированных измерений времени трогания, движения подвижной системы и времени совместного движения контактной и подвижной систем реле позволяет выявлять внутренние дефекты, связанные с работой магнитной системы в целом, ранее не всегда обнаруживаемые в серийном производстве.

Внедрение в производство измерительных систем контроля сопротивления обмотки, реализующих метод, разработанный в диссертационной работе, позволило повысить точность измерений и значительно сократить расходы на переоснащение производства реле по сравнению с применением стандартных средств измерения.

Результаты диссертации полностью использованы при создании шести различных типов измерительных систем, внедренных в производство герметичных электромагнитных реле. Они позволяют повысить качество и значительно уменьшить время проведения измерений параметров реле с занесением результатов контроля в компьютерную базу данных для последующей статистической обработки.

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные теоретические и практические результаты работы были реализованы в следующих измерительных системах контроля качества и диагностики реле: УИПР-У1 – контроля электрических и временных параметров, КДР-2 – контроля ЭДС самоиндукции, СО-11 – измерения сопротивления обмоток постоянному току, УТР – контроля динамических характеристик реле, НР-31 – ресурсных испытаний.

Указанные средства контроля качества и диагностики реле внедрены в технологические процессы производства слаботочных электромагнитных герметичных реле на ОАО НПК «Северная заря» (г. Санкт-Петербург).

Измерительная система УИПР-У1, произведенная в количестве 96-ти экземпляров, используется на операциях входного контроля, производства и анализа отказов реле на следующих предприятиях: ОАО «НПП «Старт» (г. В. Новгород); ОАО «Иркутский релейный завод» (г. Иркутск); ОАО «Научно - исследовательский институт точной механики» (г. Санкт-Петербург); ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (г. Химки, Московская обл.); ОАО «НПЦ «Полюс» (г. Томск); ООО «ИРЗ ТЕСТ» (г. Ижевск); ОАО «ВПК «НПО Машиностроения» (г. Реутов, Московская обл.); ОАО «НПК «КБМ» (г. Коломна, Московская обл.); ОАО «Юность» (г. Краснодон, Луганская обл., Украина); ФГУП МОКБ «Марс» (г. Москва); ОАО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» (г. Москва).

Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях:

- Международная научная конференция «Актуальные вопросы современной техники и технологии», Россия, г. Липецк, 24 апреля 2010 г.;
- Пятая международная научно-техническая конференция «Электрическая изоляция – 2010», Россия, г. Санкт-Петербург, 1-4 июня 2010 г.;
- Третья международная научно-практическая конференция «Измерения в современном мире – 2011», Россия, г. Санкт-Петербург, 17-20 мая 2011 г.;
- Четвертая международная научно-практическая конференция «Измерения в современном мире – 2013», Россия, г. Санкт-Петербург, 4-6 июня 2013 г.;
- Пятая международная научно-практическая конференция «Измерения в современном мире – 2015», Россия, г. Санкт-Петербург, 2-4 июня 2015 г.

Личный вклад автора. Диссертантом лично выполнены анализ методов и

средств контроля качества реле, предложены структура и принципы построения интегрированной системы контроля качества реле на основе применения разработанных унифицированных измерительных систем. Также предложены методы измерения параметров цепей управления слаботочных электромагнитных герметичных реле.

Непосредственно соискателем разработаны методики автоматизированного определения времени трогания и движения подвижной системы, а также времени совместного движения подвижной и контактной систем реле. Данная работа получила логическое завершение в разработанном при участии автора программном обеспечении измерительной системы для определения комплекса динамических характеристик реле.

Личное участие автора диссертации по анализу информативных параметров и прогнозированию ресурса реле заключалось в разработке методики и проведении экспериментальных работ.

Под непосредственным руководством и при активном личном участии соискателя были созданы и внедрены в производство 6 различных измерительных систем контроля характеристик реле: ЭДС самоиндукции КДР-2, сопротивления обмоток СО-11, динамических характеристик УТР, электрических и временных параметров УИПР-У1, контроля износостойкости НР-31, общим количеством более 190 экземпляров. Лично участвовал в разработке, организации серийного производства и внедрении в технологические процессы, что нашло отражение в соответствующих актах внедрения и конструкторской документации.

Из 15 научных публикаций 9 работ опубликовано автором лично.

Положительная оценка результатов творческой деятельности диссертанта отмечена распоряжением Президента Российской Федерации №425-рп от 30.12.2014. Этим распоряжением ему присуждена стипендия Президента Российской Федерации «За значительный вклад в создание прорывных технологий и разработку современных образцов вооружения, военной и специальной техники в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства».

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод измерения сопротивления обмоток реле постоянному току в широком динамическом диапазоне с гарантированным пределом относительной погрешности измерения.

2. Методика косвенного измерения времени трогания, движения подвижной системы и времени совместного движения подвижной и контактной систем слаботочных электромагнитных герметичных реле. Метрологическое обеспечение неразрушающего контроля динамических характеристик реле.

3. Методика выявления наиболее информативных параметров, влияющих на надежность работы электромагнитных герметичных реле, и прогнозирования ресурса.

4. Принципы построения и структурные решения системы контроля качества слаботочных электромагнитных герметичных реле.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 170 страницах, включая 70 рисунков, 15 таблиц, библиографический список, содержащий 136 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, и 27 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая ценность диссертационного исследования, приведены результаты апробации. Сформулированы результаты исследований, выносимые на защиту.

В первой главе произведен аналитический обзор методов контроля качества и диагностики слаботочных электромагнитных реле. Описаны и классифицированы применяемые в технологических процессах производства и исследованиях реле средства измерений и испытательное оборудование.

Анализ технологии контроля качества реле позволил выявить основные тенденции ее развития, проблемы и недостатки. В 70-е и 80-е годы 20 века было разработано большое число методов измерений и контроля, подтвержденных авторскими свидетельствами на изобретения (среди авторов Кострюков С. И., Копылов В. С., Ганкин И. А., Ченский В. Н., Пунгин Н. А., Звонов В. М., и др.). Тогда же был создан значительный научный задел, который, к сожалению, из-за экономической ситуации в последующие годы не получил должного развития. Данное обстоятельство является основной причиной того, что существующая технология контроля качества реле характеризуется большим количеством ручных операций и в основном базируется на применении морально устаревшей специализированной контрольно-измерительной аппаратуры.

Особенностями определения технических характеристик реле являются не всегда имеющаяся возможность осуществления прямых измерений, большое количество объектов измерения и широкий динамический диапазон изменения электрических и временных параметров: сопротивления обмотки – от 3 до $6 \cdot 10^4$ Ом, сопротивления цепи контактов – от $1 \cdot 10^{-3}$ до 2 Ом, сопротивления изоляции – от 50 до $5 \cdot 10^3$ МОм, напряжений срабатывания и возврата – от 0,2 до 30 В, временных показателей – от $2 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-2}$ с, падений напряжения в цепи контактов - от $5 \cdot 10^{-4}$ до 0,5 В.

Существенным недостатком применяемых специализированных средств измерений является крайне низкий уровень автоматизации.

Анализ методов неразрушающего контроля реле, используемых на производстве, выявил, что ни один из них не позволяет автоматически определять полный комплекс динамических характеристик реле. Известные методы измерения времени трогания, движения и времени совместного движения контактной и подвижной систем не доведены до практического применения и не обеспечены метрологически. Поэтому они не применяются в серийном производстве реле, несмотря на их высокую информативность.

Выявлено, что для оценки прогнозирования ресурса реле наиболее исследованным является метод дискриминантного анализа, применявшийся для классификации и выбора наиболее информативных параметров. Но при этом в качестве диагностических признаков использовалось крайне ограниченное количество однотипных параметров. В итоге не удалось достичь необходимой достоверности оценок, что привело к фактическому отказу от применения данного метода.

По результатам проведенного анализа определены основные направления и задачи диссертационного исследования, включающие разработку новых неразрушающих методов и аппаратно-программных автоматизированных средств измерения параметров цепей управления, динамических характеристик и определения значений диагностических признаков реле.

Во второй главе, посвященной исследованию методов измерения параметров цепей управления реле, дано теоретическое обоснование и предложен новый метод измерения сопротивления обмоток реле постоянному току, а также развит известный метод развертывающего напряжения применительно к контролю ЭДС самоиндукции.

Для повышения точности измерения сопротивления обмоток в диапазоне от единиц ом до десятков килоом при существующей многоступенчатой системе контроля от средств измерения требуется обеспечение уровня допустимой относительной погрешности не более 1% во всем диапазоне. Применение для этих целей универсальных многопредельных цифровых омметров с разрешением более 4,5 десятичных или 16 двоичных разрядов не обосновано по причинам больших финансовых затрат, массогабаритных показателей и низкого быстродействия.

Разработан способ измерения сопротивления обмоток постоянному току на базе современных сигма-дельта АЦП с высокой разрешающей способностью и встраиваемых микропроцессоров. Структурная схема измерителя, а также график зависимости относительной погрешности измерения от относительной величины измеряемого сопротивления приведены на рисунке 1.

Измерительная цепь составлена из измеряемого и образцового сопротивлений R_x и R_0 , питаемых от цифроаналогового преобразователя DAC.

С помощью поочередного измерения напряжения на образцовом резисторе R_0 и измеряемом сопротивлении R_x получаем на выходе АЦП коды N_1 и N_2 соответственно

$$N_1 = \frac{R_0}{R_x + R_0} 2^n \pm b = \frac{IR_0}{U_{REF}} \pm b, \quad N_2 = \frac{R_x}{R_x + R_0} 2^n \pm b = \frac{IR_x}{U_{REF}} \pm b, \quad (1)$$

где b – аддитивная погрешность АЦП, выраженная в единицах его младшего разряда; I – ток в измерительной цепи R_0 и R_x .

Для исключения влияния тока I вычисляем $\alpha = N_2/N_1$, в результате подстановки получая

$$\alpha \approx \frac{R_x}{R_0} \left[1 \pm \frac{b}{2^n} \left(\frac{R_x + R_0}{R_x} + \frac{R_x + R_0}{R_0} \right) \right] = \frac{R_x}{R_0} \left[1 \pm \frac{b}{2^n} \left(2 + \frac{1}{\frac{R_x}{R_0}} + \frac{R_x}{R_0} \right) \right]. \quad (2)$$

$$\text{В итоге получаем значение} \quad R_x = R_0 \frac{N_2}{N_1} (1 \pm \delta). \quad (3)$$

Второе слагаемое в квадратных скобках в формуле представляет собой составляющую относительной погрешности измерения, обусловленную аддитивными ошибками АЦП. С учетом мультипликативной составляющей δ_m , определяемой в основном погрешностью образцового резистора, получено выражение относительной погрешности измерения сопротивления в виде

$$\delta = \delta_m + \frac{b}{2^n} \cdot \left(2 + \frac{1}{\frac{R_x}{R_0}} + \frac{R_x}{R_0} \right). \quad (4)$$

На рисунке 1б представлены зависимости относительной погрешности от величины R_x/R_0 при условии $\delta_m = 0,1\%$, $b = 2$, $n = 16$. Данный график показывает, что динамический диапазон измерителя сопротивлений, построенного по предлагаемой структуре (сплошная линия), составляет около 100 дБ при $\delta \leq 1\%$ и в логарифмическом масштабе в 2 раза шире, чем в известных структурах (пунктирная линия), рекомендуемых производителями АЦП для измерения сопротивлений.

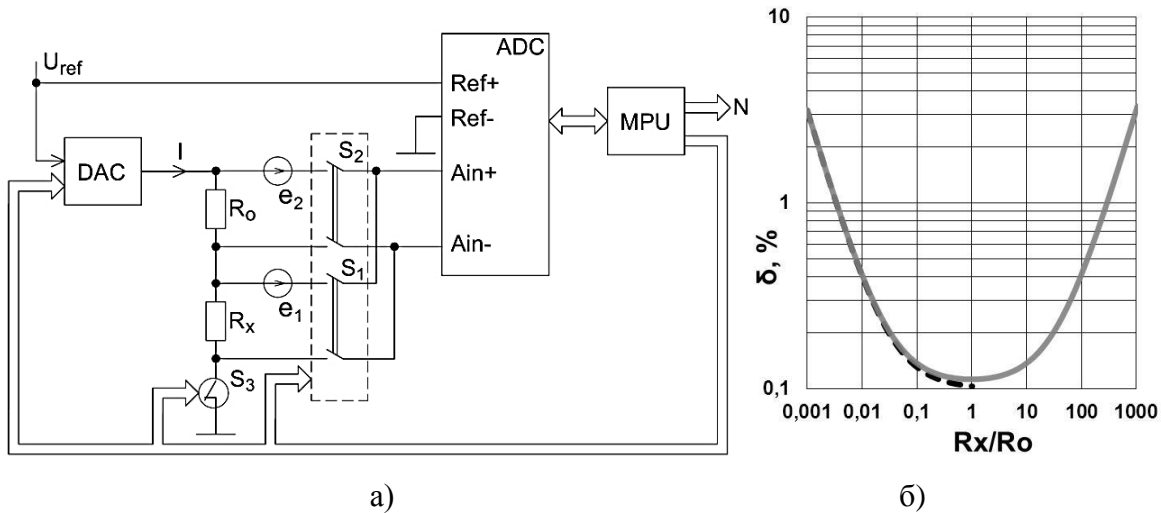


Рисунок 1. а) Структурная схема измерителя сопротивления с расширенным динамическим диапазоном, б) график расчетной зависимости относительной погрешности измерителя от относительной величины измеряемого сопротивления

При заданной величине допустимой относительной погрешности измерения максимальный динамический диапазон получается при равенстве относительной погрешности в начале и в конце диапазона, что соответствует условию

$$R_{xmax}/R_0 = 1/(R_{xmin}/R_0). \quad (5)$$

Для минимизации относительной погрешности измерения при $R_x \in [R_{xmin}; R_{xmax}]$ необходимо выполнение условия $R_0 = \sqrt{R_{xmax}R_{xmin}}$.

Для дополнительного расширения динамического диапазона можно использовать усиление напряжения на измеряемых сопротивлениях. Применению этой меры способствует наличие масштабных усилителей в структурах современных сигма-дельта АЦП. Дополнительное усиление напряжения на резисторе R_x расширяет диапазон измерения в сторону низких сопротивлений, а усиление напряжения на резисторе R_0 – в сторону высоких. В итоге возможно расширение динамического диапазона до величины 140-150 дБ при $\delta \leq 1\%$.

На практике точность измерений в значительной степени зависит от систематических составляющих аддитивной погрешности, к которым в первую очередь относят погрешности от напряжений и токов смещения входных каскадов дифференциального усилителя, а также термоЭДС во входных цепях измеряемых резисторов и ключах коммутаторов. В сумме они могут достигать величин порядка единиц-десятков микровольт. С учетом эквивалентной ЭДС смещения e_{bias} динамический диапазон предложенного измерителя сопротивлений будет ограничен величиной

$$D \leq 40 \lg \left(\frac{U_{REF}}{e_{bias}} \cdot \delta \right). \quad (6)$$

Подставляя значения $e_{bias} = 30$ мкВ, $\delta = 1\%$, $U_{REF} = 3$ В, получаем в итоге $D \leq 120$ дБ.

Предложена процедура коррекции погрешностей, вызываемых ЭДС смещения e_1 и e_2 во входных цепях устройства, состоящая из 4-х циклов преобразования (рисунок 1а).

В первых двух циклах ключ S_3 замкнут и на цепь сопротивлений R_0 и R_x с выхода цифро-аналогового преобразователя DAC подается максимальное напряжение $U_{DAC} \approx U_{REF}$. Соответственно на вход ADC при последовательном замыкании ключей S_1 и S_2 поступают сигналы

$$U_{Ain1} = IR_x + e_1, \quad U_{Ain2} = IR_0 + e_2. \quad (7)$$

В микроконтроллере запоминаются результаты аналого-цифрового преобразования N_1 и N_2 , далее ключ S_3 размыкается, ток $I = 0$ и последующие два преобразования дают на выходе АЦП коды ΔN_1 и ΔN_2 , пропорциональные ЭДС смещения e_1 и e_2 .

Окончательный результат измерения определяется отношением

$$\alpha = \frac{N_1 - \Delta N_1}{N_2 - \Delta N_2} = \frac{IR_x + e_1 - e_1}{IR_0 + e_2 - e_2} = \frac{R_x}{R_0}. \quad (8)$$

В процессе практической реализации установлено, что величины смещения e_1 и e_2 не являются постоянными. Они в значительной степени могут изменяться при коммутации тока I за счет изменения синфазного сигнала на входах A_{in+} и A_{in-} . Проведенный анализ технических характеристик около 40 типов интегральных АЦП (Analog Devices, Maxim и др.) показал, что минимальное значение подавления синфазного сигнала у них составляет $CMRR=70\dots 90$ дБ.

Если принять величину коэффициента подавления синфазного сигнала $CMRR$ входного дифференциального каскада АЦП равной 80 дБ (10^4), то это означает, что изменение синфазного сигнала $\Delta U_{сф} = 3$ В вызовет появление эквивалентного напряжения смещения

$$\Delta U_{bias} = \frac{\Delta U_{сф}}{\frac{CMRR}{10^{\frac{20}{20}}}} = \frac{3}{\frac{80}{10^{\frac{20}{20}}}} = 300 \text{ мкВ}. \quad (9)$$

Данная оценка показывает, что для рассматриваемой конфигурации измерительной цепи погрешность, вызываемая конечным значением подавления синфазного сигнала, является доминирующей и более чем на порядок превосходит остальные составляющие.

В таком случае и максимальный динамический диапазон измерителя сопротивления будет ограничиваться именно уровнем $CMRR$ входного каскада.

Автором предложен способ снижения влияния неидеальности ($CMRR \neq \infty$) входного дифференциального каскада АЦП путем создания с помощью цифроаналогового преобразования в циклах калибровки «нуля» ($I = 0$) уровней синфазного сигнала, идентичных тем, которые присутствовали в циклах преобразования при замкнутом ключе S_3 ($I \approx (U_{REF} / (R_0 + R_x))$).

Тем самым обеспечивается выполнение условия идентичности напряжений смещения в циклах измерения и аддитивной коррекции.

Величина синфазного сигнала в цикле преобразования напряжения на R_x в первом приближении без учета сопротивлений соединительных проводов и ключа S_3 вычисляется по результатам первых двух циклов преобразования по формуле

$$U_{сфR_x} = \frac{1}{2} U_{REF} \frac{R_x}{R_0 + R_x}. \quad (10)$$

Соответственно в цикле преобразования напряжения на резисторе R_0

$$U_{сфR_0} = U_{REF} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{R_0}{R_0 + R_x}\right). \quad (11)$$

Экспериментальное исследование показало, что предложенное техническое решение способно обеспечить снижение погрешности от неидеальности $CMRR$ в 20...30 раз. При этом высоких метрологических требований к узлу цифроаналогового преобразователя не предъявляется. В макетных образцах использовались встроенный в микроконтроллер 12-разрядный ЦАП, а также цифро-аналоговый преобразователь по структуре ШИМ-ФНЧ (широтно-импульсный модулятор – фильтр нижних частот).

Положительный эффект разработанного метода измерения сопротивления обмоток реле постоянному току заключается в том, что с его помощью достигнут широ-

кий динамический диапазон при одном пределе измерения с заданным уровнем относительной погрешности.

Во втором подразделе произведены разработка и анализ структуры измерителя ЭДС самоиндукции обмоток реле с применением метода развертывающего измерительного преобразования.

В момент отключения напряжения от обмотки электромагнитного реле ток в ней из-за наличия индуктивности L резко измениться не может. Поэтому в катушке возникает ЭДС самоиндукции $e_{си}$, образовавшаяся за счет накопленной энергии во время импульса рабочего напряжения

$$e_{си} = -L \frac{di}{dt}, \tag{12}$$

где L – индуктивность обмотки; di/dt – скорость изменения тока в обмотке.

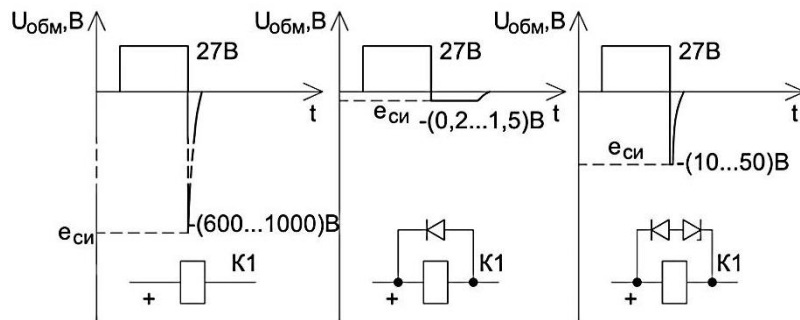


Рисунок 2. Переходные процессы в цепи управления реле

Типичный вид переходных процессов в цепи управления реле с различной конфигурацией цепи шунтирования показан на рисунке 2.

Функциональная схема измерителя ЭДС самоиндукции реле и временные диаграммы работы представлены на рисунке 3.

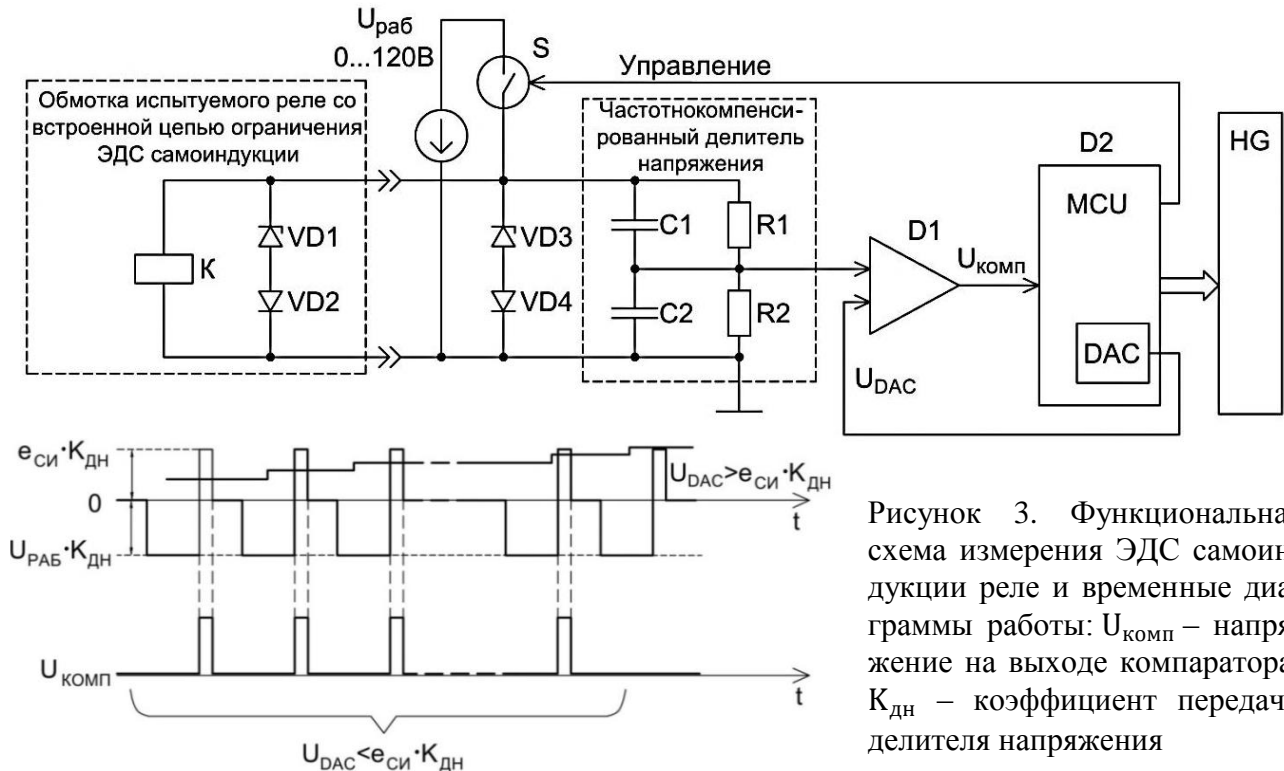


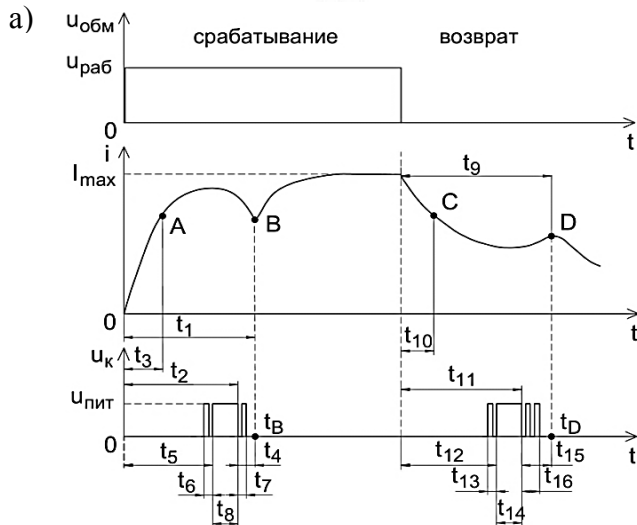
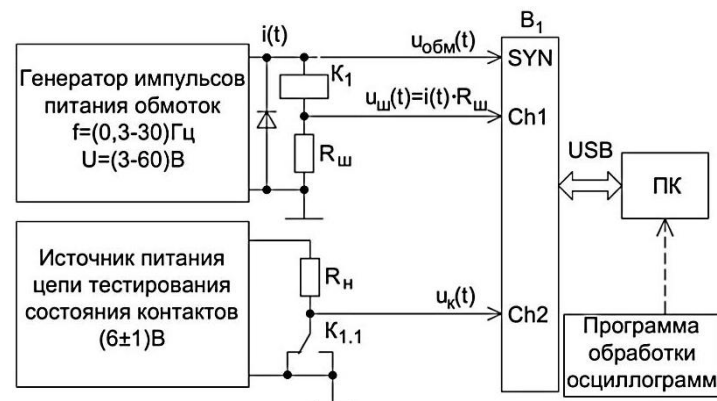
Рисунок 3. Функциональная схема измерения ЭДС самоиндукции реле и временные диаграммы работы: $U_{комп}$ – напряжение на выходе компаратора; $K_{дн}$ – коэффициент передачи делителя напряжения

Работает измеритель следующим образом. С помощью внешнего генератора формируется импульсный периодический сигнал на обмотке реле $U_{раб}$, в одной из фаз которого генерируется ЭДС самоиндукции $e_{си}$. Эта ЭДС в каждом периоде сравнивается с известным ступенчато возрастающим напряжением U_{DAC} , которое формируется цифро-аналоговым преобразователем пропорционально входному коду. Шаг возраст-

тания этого напряжения известен и стабилен. Выполняемое сравнение длится до тех пор, пока это дискретно возрастающее напряжение не превысит ЭДС самоиндукции. Значение кода на входе цифро-аналогового преобразователя является выходной величиной и соответствует ЭДС самоиндукции.

Автоматизация процесса измерения амплитуды ЭДС самоиндукции позволяет использовать измеритель для оперативной проверки реле новых типов, содержащих элементы ее ограничения.

В третьей главе, посвященной измерению динамических характеристик реле, разработаны методики неразрушающего автоматизированного косвенного измерения времени трогания, движения подвижной системы и времени совместного движения контактной и подвижной систем герметичных электромагнитных реле в комплексе с другими динамическими характеристиками.



б)

Рисунок 4. а) Структурная схема устройства осциллографического контроля динамических характеристик реле: K_1 – исследуемое реле, ПК – персональный компьютер, $R_{ш}$ – сопротивление шунта, $R_{н}$ – сопротивление нагрузки, $u_{ш}$ – напряжение шунта, $u_{к}$ – напряжение в цепи контактов; б) Осциллограммы сигналов $u_{обм}(t)$, $i(t)$, $u_{к}(t)$ и определяемые динамические характеристики реле $t_1 \dots t_{16}$ при воздействии напряжения $u_{обм}$

Различные фазы работы реле можно проследить по временным диаграммам переходных процессов, протекающих в его цепи управления и контактной системе, фиксируемых с помощью разработанного устройства осциллографического контроля (рисунок 4а).

Предложенная методика подразумевает использование цифровой обработки сигналов с целью определения координат характерных точек по графикам зависимостей от времени тока в обмотке $i(t)$, напряжений на контактах $u_{к}(t)$ и цепи управления реле $u_{обм}(t)$ (рисунок 4б).

График $i(t)$ характеризует динамику работы подвижной системы реле. Зависимость $u_{к}(t)$ характеризует состояние контактов: замкнутое, когда $u_{к} \approx 0$, и разомкнутое при $u_{к}$, равном напряжению питания контактной цепи $u_{пит}$. При срабатывании реле его подвижная система до момента начала своего движения (точка «А» на рисунке 4б) находится в статическом состоянии. На этом этапе упрощенная модель цепи управления реле может рассматриваться как система с сосредоточенными параметрами. Тогда нарастание тока в обмотке описывается классическим уравнением электротехники для последовательной LR-цепи

$$i(t) = \frac{U_{\text{раб}}}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (13)$$

где $\tau = L/R$ – постоянная времени цепи, L и R индуктивность и активное сопротивление обмотки, $U_{\text{раб}}$ – напряжение, прикладываемое к обмотке.

С началом движения подвижной системы изменяется потокосцепление и, как следствие, увеличивается индуктивность обмотки, что вызывает появление в цепи катушки дополнительной противоЭДС, которая искажает исходную экспоненциальную зависимость тока в катушке. На данном этапе модель цепи управления реле можно рассматривать как систему с переменными параметрами. В процессе перемещения подвижной системы до момента ее останова (точка «В» рисунка 4б) происходит переход контактов от одного замкнутого состояния к другому (зависимость $u_k(t)$). На завершающей стадии в соответствии с формулой (13) с момента останова подвижной системы ток в обмотке i снова начнет изменяться по экспоненте и будет стремиться к своему максимальному значению $I_{\text{max}} = U_{\text{раб}}/R$.

С момента прекращения подачи напряжения на обмотку (график $u_{\text{обм}}(t)$) подобным поэтапным образом происходит возврат реле. При этом зависимость тока в обмотке $i(t)$ в периоды, когда подвижная система находится в статическом состоянии, будет иметь вид

$$i(t) = \frac{U_{\text{раб}}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (14)$$

Перемещение подвижной системы происходит на участке CD (рисунок 4б) с последующим стремлением тока в обмотке к нулевому уровню.

С работой подвижной системы связана следующая группа характеристик: время движения подвижной системы при срабатывании t_1 и возврате t_9 ; время совместного хода подвижной системы и контактов (после замыкания контактов) t_4, t_{15} ; время трогания подвижной системы при срабатывании t_3 и возврате t_{10} . В настоящее время в герметичных реле данные характеристики не могут быть определены явным образом. Для этого приходится использовать косвенные измерения, что вызывает определенные проблемы. Поэтому даже нормативными документами, причем, как отечественными, так и зарубежными, несмотря на очень высокую информативность указанных динамических характеристик, их измерение не предусматривается. Фактически для определения указанных характеристик необходимо зафиксировать моменты времени, соответствующие началу (точки «А» и «С» рисунка 4б) и окончанию (точки «В» и «D») движения подвижной системы при срабатывании и возврате на графике $i(t)$.

Для определения времени трогания в каждой точке выборки $i(t)$, устанавливаемой автоматически с учетом частоты дискретизации осциллографа, рассчитывается постоянная времени $\tau(t)$ по формуле

$$\tau(t) = -\frac{t-t_0}{\ln\left(\frac{I_{\text{макс}}-i(t_0)}{I_{\text{макс}}-i(t)}\right)}, \quad (15),$$

где t_0 – время в начальной точке, соответствующее началу анализируемого участка, $I_{\text{макс}}$ – максимальное значение тока, $i(t_0)$ – значение тока в начальной точке. Далее находится диапазон изменения разности $t - t_0$, в котором значение постоянной времени цепи обмотки можно принять неизменным.

Для примера на рисунке 5а представлен график изменения постоянной времени $\tau(t)$ для реле РЭК60.

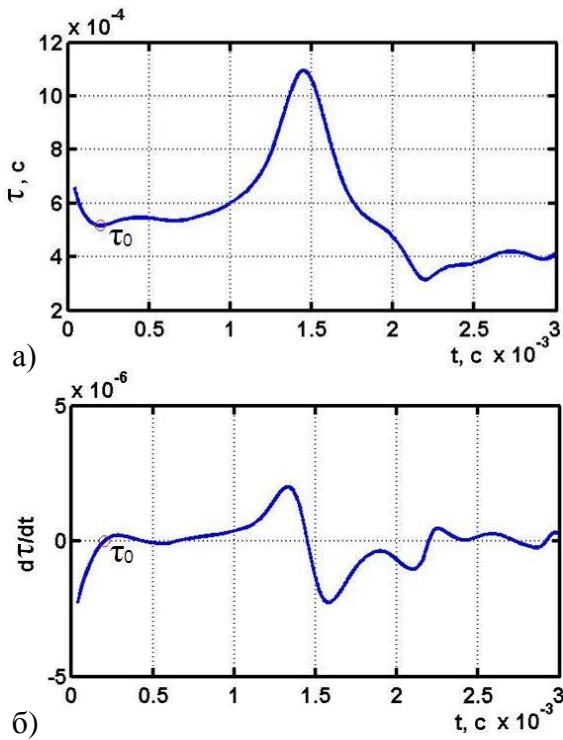


Рисунок 5. а) График изменения постоянной времени $\tau(t)$ цепи обмотки реле РЭК60; б) график изменения производной $\tau(t)$

Методика определения времени движения подвижной системы реле t_4 и t_{15} основана на фиксации моментов времени при достижении током в обмотке своего локального минимума при срабатывании и локального максимума при возврате (второй экстремум, точки В и D на рисунке 4б), где берет начало второй экспоненциальный участок $i(t)$. Для определения локального минимума тока при срабатывании и возврате реле вычисляется производная $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ и находятся моменты времени t_B и t_D , в которых она меняет знак

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{i(t+\Delta t) - i(t)}{\Delta t}. \quad (16)$$

На рисунке 7а представлен график изменения тока в обмотке. На рисунке 7б приведен график изменения производной временной функции тока реле при его срабатывании.

Момент остановки подвижной системы соответствует второму экстремуму и обозначен буквой В. В результате время совместного движения подвижной системы и контактов при срабатывании реле вычисляется по формуле $t_4 = t_B - t_2$. Аналогично для процесса возврата $t_{15} = t_D - t_{11}$ (рисунок 4б).

За постоянную времени цепи обмоток на участке до начала движения подвижной системы принимается значение локального минимума τ_0 . С данным вычисленным значением τ_0 по формуле (13) строится расчетная кривая тока $i_p(t)$ без учета влияния движения якоря (рисунок 6) в дополнение к реальной кривой тока $i(t)$.

Для определения момента времени, соответствующего отклонению тока в обмотке от экспоненциальной зависимости, строится график разности $\Delta i(t) = i(t) - i_p(t)$ (рисунок 6).

При движении по графику от момента остановки якоря (точка «В» на рисунке 6) к его началу, определяется момент времени $t_{тр}$, когда разность $\Delta i(t)$ становится меньше некоторого порогового значения $I_{пор}$. В практических расчетах с учетом реальных условий удовлетворительные результаты были получены при $I_{пор} = 0,01 \cdot \Delta i_{\max}$, где Δi_{\max} – максимальное значение разности $i(t) - i_p(t)$.

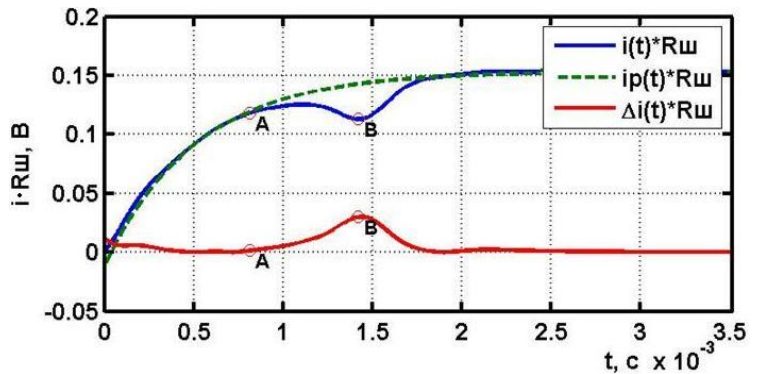


Рисунок 6. Графики изменения тока в обмотке реле $i(t)$ с расчетной «кривой» тока $i_p(t)$ (без учета движения якоря) и график разности между расчетным и реальным изменением тока в обмотке

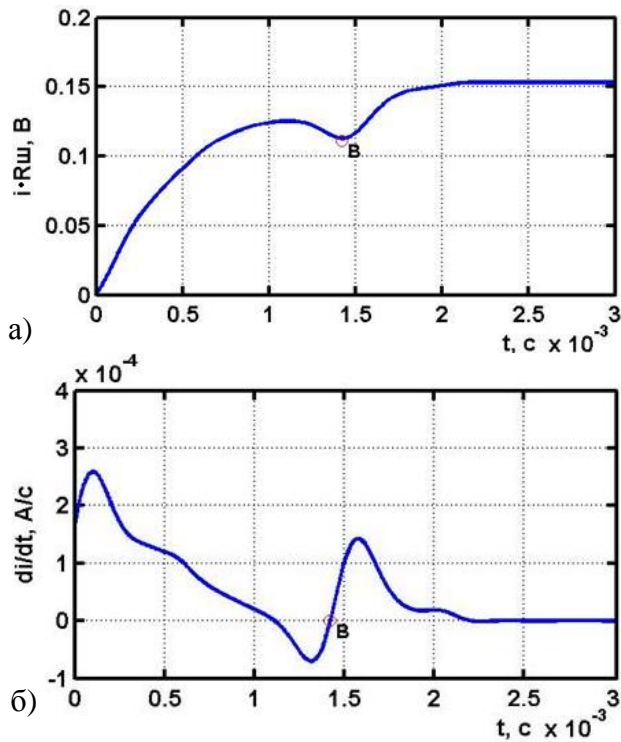


Рисунок 7. а) График изменения тока в обмотке; б) график изменения производной временной функции тока в обмотке

Обработка графиков $i(t)$ и $u_k(t)$ обеспечивает определение времени совместного движения подвижной и контактной систем. Проведенные эксперименты полностью подтвердили гипотезу о возможности косвенного определения динамических параметров подвижной системы магнитопровода реле.

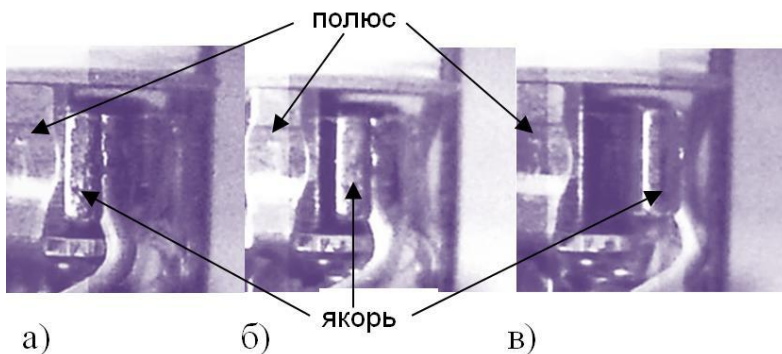


Рисунок 8. Видеокadres с фиксацией моментов времени: а) трогания, б) движения и в) остановки подвижной системы реле с фиксацией номеров видеокadres

напряжения на обмотке. Обработка видеoinформации о состоянии светодиода и подвижной системы в сопоставлении с нумерацией видеокadres позволила обеспечить непосредственное измерение длительностей интервалов времени и подтвердить достоверность результатов предложенной методики, основанной на применении косвенных измерений. Важно отметить, что непосредственное измерение с использованием видеoinформации требует разгерметизации реле и в данном случае применялось только для оценок достоверности предложенного метода косвенного измерения.

Следующая группа исследуемых динамических характеристик реле включает: время срабатывания t_2 ; время возврата t_{11} ; время дребезга размыкающего и замыкающего контактов t_6, t_7, t_{13}, t_{16} ; время перелета контактов t_8, t_{14} ; время размыкания размыкающего контакта t_5 ; время размыкания замыкающего контакта t_{12} , определяется по графикам $u_k(t)$ и $u_{обм}(t)$ (рисунок 4б). Фиксация моментов замыкания, размыкания контактов и моментов начала и окончания подачи напряжения на обмотку производится путем сравнения напряжений на контактах и обмотке с опорными уровнями.

Таким образом, используя математическую обработку массива цифровых данных, соответствующих процессу изменения тока в обмотке реле $i(t)$, можно определить моменты начала и окончания движения подвижной системы, а в конечном итоге время ее движения и трогания.

Для метрологической оценки результатов измерения времени трогания и движения подвижной системы проводился эксперимент по сравнению значений, полученных с помощью разработанной методики и посредством скоростной макровидеосъемки (рисунок 8).

В поле зрения видеокамеры встраивался миниатюрный светодиод, предназначенный для ввода в видеокادر яркого сигнала наличия

Ввиду особой важности данных динамических характеристик реле были проведены дополнительные исследования способов метрологической оценки разработанной методики с помощью измерения электромагнитной индукции в магнитопроводе реле. В качестве элемента, фиксирующего изменение магнитного потока, использовался датчик индукционного типа, установленный в непосредственной близости от исследуемого реле. Наибольшая информативность была достигнута при фиксации датчика сверху кожуха исследуемого реле. Изначально датчик использовался в серийном производстве, но его применение в процессах контроля и регулировки реле было признано неэффективным ввиду высокой трудоемкости установки и фиксации датчиков. Однако он оказался незаменим для реализации процессов калибровки.

На рисунке 9 первый график показывает изменение тока в обмотке, а второй – ЭДС U_s , создаваемую обмоткой индукционного датчика во время движения подвижной системы реле.

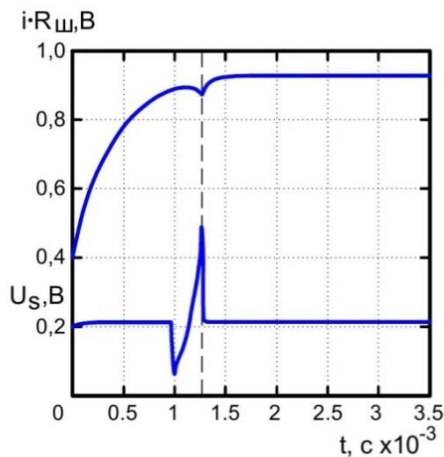


Рисунок 9. Осциллограмма тока в обмотке реле РЭК24 и напряжения на индукционном датчике, установленном сверху кожуха

В отличие от видеосъемки использование индукционных датчиков в принципе не требует разгерметизации реле.

Совместное применение видеосъемки и индукционных датчиков позволило установить оценку предела абсолютной погрешности измерения в соответствии с предлагаемыми методиками на уровне ± 10 мкс, что вполне удовлетворяет современным потребностям производства.

Использование предложенных методик косвенных измерений динамических параметров реле позволило повысить качество выпускаемой продукции за счет выявления дефектных и потенциально ненадежных экземпляров, а также исключить применение разрушающих методов контроля при анализе работы подвижной системы. Описанные методики послужили основой для создания соответствующего программного модуля в разработанном при участии автора программном обеспечении «Программа определения временных параметров реле».

программном обеспечении «Программа определения временных параметров реле».

Четвертая глава посвящена разработке методики выявления наиболее информативных параметров, влияющих на ресурс и надежность работы слаботочных герметичных электромагнитных реле, и прогнозирования ресурса (количества безотказно выполненных коммутаций).

Для этих целей использован теоретический аппарат технической диагностики – теории распознавания и контролеспособности. Прогнозирование (распознавание) ресурса реле производилось вероятностно-статистическими методами с применением обобщенной формулы Байеса.

Для эксперимента были использованы две выборки одностабильных реле РЭС47: обучающая и тестовая. Процесс обучения алгоритма классификации предусматривает формирование диагностической матрицы (базы данных) на основе предварительного статистического материала обучающей выборки реле, состоящего из множества значений параметров, разбитых на интервалы K_{jv} , где j – номер параметра, v – номер интервала параметра. В качестве диагностических признаков использованы основные наиболее значимые электрические и динамические параметры реле: $U_{ср}$ – напряжение срабатывания; $U_{возвр}$ – напряжение возврата; R_k – сопротивление це-

пи контактов; $\Delta U_{\text{ср}}, \Delta U_{\text{возвр}}, \Delta R_{\text{к}}$ – разница между минимальными и максимальными значениями при многократных измерениях $U_{\text{ср}}, U_{\text{возвр}}$ и $R_{\text{к}}$ соответственно; $t_1 \dots t_{16}$ – динамические характеристики, перечисленные выше; $R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции элементов реле. Диапазон изменения значения каждого параметра разбит на 2-4 интервала. В отличие от предыдущих известных исследований по прогнозированию ресурса, выполненных на основе методов дискриминантного анализа и использования крайне ограниченного количества динамических характеристик, в диссертационной работе использована значительно расширенная гамма как электрических, так и динамических параметров с учетом изменений их значений с течением времени.

Обучающая выборка реле подвергалась разрушающим испытаниям на износостойкость. По их результатам определялся ресурс каждого экземпляра реле. Диапазон безотказно выполненных коммутаций всей обучающей выборки разбивается на необходимое количество прогнозируемых ресурсов S_i , выбираемых по результатам ресурсных испытаний, где i – номер прогноза. Для взятой выборки реле полученный диапазон разбит на 4 прогнозируемых ресурса: $S_1 < 7 \cdot 10^3$, $S_2 = (7 \dots 15) \cdot 10^3$, $S_3 = (15 \dots 23) \cdot 10^3$, $S_4 > 23 \cdot 10^3$.

На основании предварительно определенных параметров реле и прогнозов S_i определялась априорная вероятность каждого прогноза $P(S_i)$ и вероятность $P(K_{jv}/S_i)$, зависящая от появления интервала v признака K_j в реле с прогнозом S_i

$$P(S_i) = N_i/N, \quad P(K_{jv}/S_i) = (N_{jv}/N_i), \quad (17)$$

где N_i – количество реле с состоянием S_i , N – общее количество испытуемых реле, N_{jv} – количество реле с состоянием S_i и имеющих признак K_{jv} . Вероятность $P(S_i)$ для четырех прогнозов S_i в исследовании обучающей выборки составила: $P(S_1) = 0,19$; $P(S_2) = 0,28$; $P(S_3) = 0,39$; $P(S_4) = 0,14$. Значения вероятности $P(K_{jv}/S_i)$ были определены и занесены в базу данных для каждого интервала признаков, встречающегося при данном ресурсе.

Для определения наиболее вероятного прогноза рассчитываются диагностические веса Z_{S_i} каждого интервала K_{jv}

$$Z_{S_i}(K_{jv}) = \log \frac{P(K_{jv}/S_i)}{\sum_{i=1}^n P(S_i) P(K_{jv}/S_i)}. \quad (18)$$

С использованием полученных значений диагностического веса произведен расчет общей диагностической ценности $Z_s(K_j)$ каждого признака K_j

$$Z_s(K_j) = \sum_{i=1}^n Z_{S_i}(K_{jv}) P(S_i). \quad (19)$$

По наибольшим значениям $Z_s(K_j)$ в обучающей выборке реле РЭС47 были определены наиболее информативные параметры для прогнозирования надежности: $t_{\text{др}}$ – время дребезга контактов, $\Delta R_{\text{к}}$ – разница между минимальными и максимальными значениями сопротивления цепи контактов при многократных измерениях, $t_{\text{сх}}$ – время совместного движения подвижной системы и контактов. Выявлено, что одним из наиболее значимых для обеспечения высокой надежности оказался электрический параметр $\Delta R_{\text{к}}$.

Далее были произведены измерения параметров каждого экземпляра реле из тестовой выборки. Используя значения наиболее информативных признаков $K_{\text{компл}}$, состоящих из значений $t_{\text{др}}, \Delta R_{\text{к}}, t_{\text{сх}}$, проведена классификация реле по методу Байеса всей тестируемой выборки. Для примера приведем результаты расчета апостериорных вероятностей экземпляра реле, имеющего следующие значения наиболее информативных параметров (комплекса признаков): $t_{\text{др}} = 0,26$ мс; $\Delta R_{\text{к}} = 19$ МОм; $t_{\text{сх}} = 0,13$ мс.

В результате расчета по формуле Байеса получаются следующие значения апостериорных вероятностей рассматриваемых четырех ресурсов $P(S_1/K_{\text{компл}})=0,0015$; $P(S_2/K_{\text{компл}})=0,016$; $P(S_3/K_{\text{компл}})=0,59$; $P(S_4/K_{\text{компл}})=0,38$.

В соответствии с максимальным значением наибольшей вероятности данный экземпляр реле должен быть отнесен к прогнозу S_3 . Это означает, что прогнозируемый ресурс рассматриваемого реле составит от 15 до 23 тысяч безотказно выполненных коммутаций.

Для оценки достоверности прогнозирования тестовая выборка реле также была подвергнута контрольному разрушающему испытанию на износостойкость. Относительное число реле, у которых был неправильно оценен ресурс, не превысило 6% от их общего количества.

Разработанная методика положена в основу созданной компьютерной «Программы классификации реле по надежности», получившей свидетельство о государственной регистрации. Она позволяет автоматически определять наиболее информативные параметры реле и оценивать ресурс реле по значениям диагностических признаков. Для формирования исходных данных – расширенной базы данных диагностических признаков в приведенных исследованиях была использована интегрированная информационная система контроля качества, включающая в себя ряд разработанных при участии автора измерительных систем.

Пятая глава посвящена практической реализации результатов работы, отраженных в предыдущих главах.



Рисунок 11. Измерительная система СО-11

Для измерения сопротивления обмотки постоянному току в соответствии с методом, приведенным в главе 2, разработана и внедрена в производстве, общим количеством более 50 экземпляров измерительная система СО-11 (рисунок 11).

Она позволяет производить измерения сопротивления обмотки в диапазоне от 1 Ома до 100 кОм на одном пределе измерений с относительной погрешностью менее 1% и пересчетом измеренного значения на температуру 20°C.

Аналогичный канал измерения сопротивления обмоток использован в измерительной системе УИПР-У1 (рисунок 12).

Система внедрена в производство общим количеством более 90 экземпляров. Она позволяет измерять сопротивление обмоток, сопротивление цепей контактов, временных параметров, напряжений и токов срабатывания и возврата. Данная измерительная система используется в десятках различных организаций и предприятий РФ и СНГ.

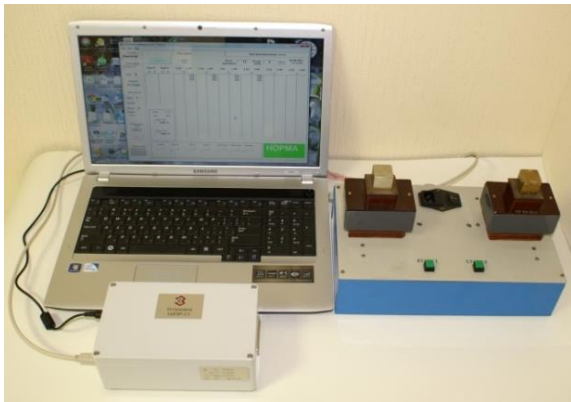


Рисунок 12. Измерительная система УИПР-У1

Методики измерения времени трогания, движения подвижной системы и времени совместного движения контактной и подвижной систем реле, разработанные в главе 3, реализованы в системе комплексного автоматизированного неразрушающего контроля и измерения динамических характеристик УТР, внедренной в производство в количестве трех экземпляров на предприятии ОАО НПК «Северная заря» (г. Санкт-Петербург). Главное окно программы устройства УТР представлено на рисунке 13.

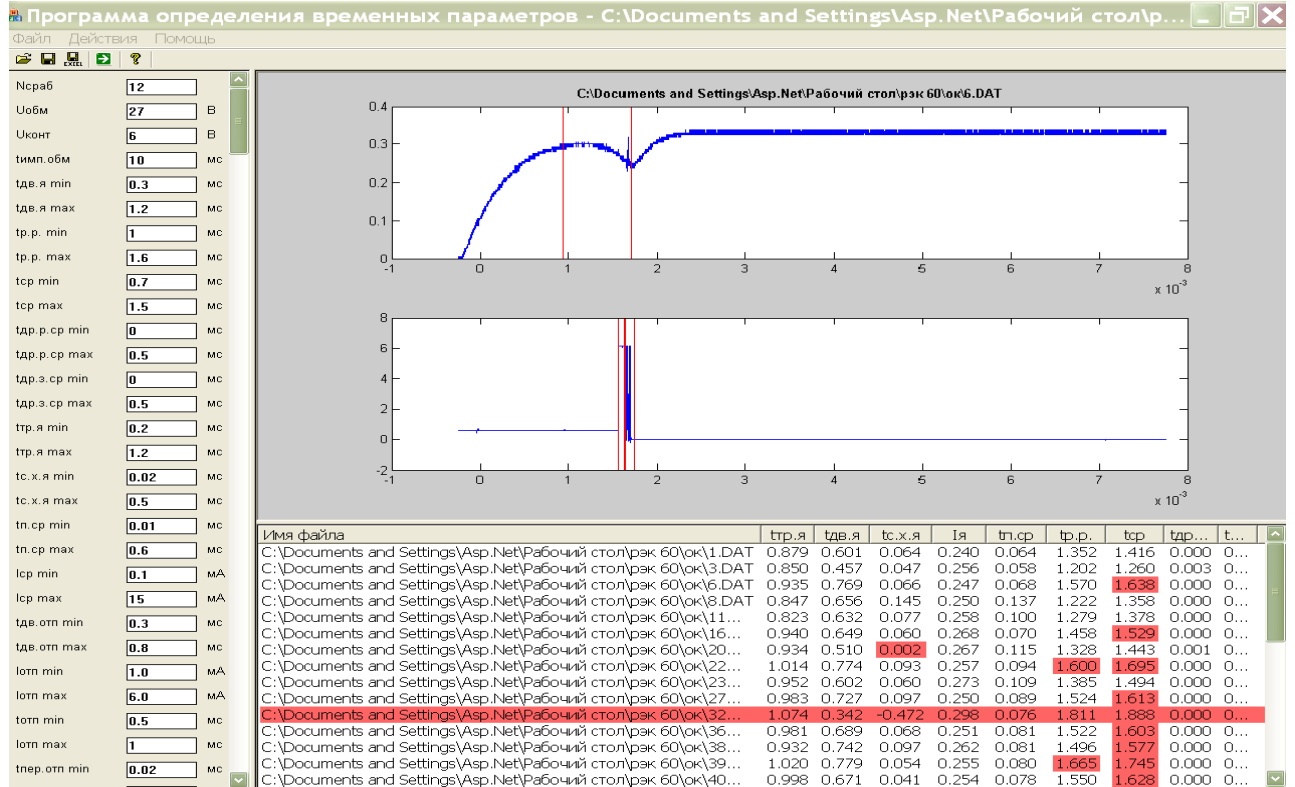


Рисунок 13. Главное окно программы, содержащее развернутые осциллограммы и результаты измерения динамических характеристик реле



Рисунок 14. Измерительная система КДР-2

Для измерения ЭДС самоиндукции обмоток реле в соответствии с методикой, предложенной в главе 2, разработана измерительная система КДР-2 (рисунок 14).

Она внедрена в количестве пяти экземпляров на предприятии ОАО НПК «Северная заря» (г. Санкт-Петербург). Внедрение данной системы входило в число мероприятий по подготовке производства новых типов реле РЭК84, РЭК94 и РПК30 со встроенными элементами ограничения. Разработанный измеритель

амплитуды ЭДС самоиндукции обмоток реле позволяет осуществлять автоматизированные измерения в широком диапазоне от 0,1 до 60 В.

Для проведения испытаний реле по установлению количества безотказно выполненных коммутаций, результаты которых используются для прогнозирования ресурса в соответствии с методикой, предложенной в главе 4, разработана измерительная система НР-31. Фотография системы представлена на рисунке 15.



Рисунок 15. Измерительная система HP-31 для ресурсных испытаний

Измерительная система позволяет производить групповые испытания реле с общим числом контактных групп до 196. Установка внедрена на отбраковочных испытаниях различных типов реле на предприятии ОАО НПК «Северная заря».

Для каждой измерительной системы приведены и описаны функциональные схемы и основные технические характеристики.

В приложениях приведены таблицы с результатами проведенных экспериментов и испытаний, акты о внедрении.

Основные результаты диссертационной работы

1. Произведен аналитический обзор методов контроля качества слаботочных электромагнитных реле. Описаны, классифицированы применяемые в технологических процессах производства и исследованиях реле средства измерений и испытательное оборудование. Установлено, что для повышения качества и освоения новых типов реле в серийном производстве необходимо разработать новые методы и средства автоматизированного неразрушающего контроля их цепей управления и динамических характеристик.

2. Разработан и исследован метод измерения сопротивления постоянному току с гарантированной точностью в расширенном динамическом диапазоне. Предложены и исследованы способы автоматической коррекции аддитивной погрешности измерения. Выявлены источники погрешностей измерения и произведено структурное усовершенствование измерителя, позволившее значительно снизить влияние аддитивных составляющих погрешностей его входных цепей. Практическая реализация метода осуществлена в сотнях измерительных систем СО-11, УИПР-У1, внедренных в серийное производство реле.

3. Разработана методика неразрушающего автоматизированного измерения времени трогания, движения подвижной системы реле и времени совместного движения их подвижной и контактной систем в комплексе с динамическими характеристиками, определяемыми по состоянию контактной цепи. Спроектирована и внедрена в производство реле измерительная система УТР, реализующая предложенную методику. Создана компьютерная программа для автоматического определения динамических характеристик реле, на которую получено свидетельство о государственной регистрации. Предложены способы метрологической калибровки систем измерения, построенных в соответствии с разработанной методикой, позволившие дать оценку абсолютной погрешности измерения динамических характеристик на уровне ± 10 мкс, что является приемлемым показателем для подобных измерений.

4. Предложена методика оценки ресурса и выявления наиболее информативных параметров, влияющих на надежность работы реле. Она основана на применении вероятностно-статистического подхода и использовании значений расширенной номенклатуры диагностических признаков, получаемых неразрушающими методами с помощью разработанных в диссертационном исследовании измерительных систем.

На программу, реализующую данную методику, получено свидетельство о государственной регистрации. Разработана измерительная система для проведения периодических, типовых и отбраковочных испытаний реле на износостойкость (ресурс), позволившая провести контрольные разрушающие испытания для оценки достоверности прогнозирования ресурса неразрушающими методами.

5. Разработаны и внедрены в производство электромагнитных герметичных реле измерительные системы СО-11, КДР-2, УИПР-У1, УТР, НР-31, в которых используются результаты диссертационного исследования. Организовано серийное производство указанных измерительных систем. Их применение позволило увеличить точность, производительность испытательных процедур, а также более чем в 10 раз сократить общую номенклатуру применяемых средств контроля. Предложены структура и принципы построения интегрированной информационно-управляющей системы контроля качества реле на основе разработанных измерительных систем.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Лавров В.А. Прибор для измерения электродвижущей силы слаботочных электромагнитных реле // Приборы. – 2014. – №10. – С. 10-14.
2. Клементьев А.В., Лавров В.А. Цифровой Омметр с расширенным динамическим диапазоном // Датчики и системы. – 2013. – №8. – С. 42-45.
3. Лавров В.А., Дурнев А.В. Методы и средства диагностического контроля слаботочных электромагнитных реле // Надежность. – 2015. – №1. – С. 39-45.
4. Дурнев А.В., Лавров В.А. Автоматизация контроля динамических характеристик реле // Контроль. Диагностика. – 2015. – №5. – С. 41-46.

Научные работы в других изданиях

5. Лавров В.А. Автоматизация измерения электрических параметров цепи контактов слаботочных электромагнитных реле // Сборник докладов международной научной конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии». – Липецк: издательский центр «Де-факто», 2010. – т. 2. – С. 57-61.
6. Лавров В.А. Аппаратура контроля электрической изоляции герметичных электромагнитных реле // Сборник научных трудов пятой международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010». – СПб: издательство СПбГПУ, 2010. – С. 268-273.
7. Лавров В.А. Состояние и перспективы развития средств контроля электрической изоляции // Сборник научных трудов пятой международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010». – СПб: издательство СПбГПУ, 2010. – С. 289, 290.
8. Лавров В.А., Клементьев А.В. Технология испытаний реле на кратковременное пропускание предельных токов // Сборник трудов третьей международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2011». – СПб: издательство СПбГПУ, 2011. – С. 48-50.
9. Лавров В.А. Программное обеспечение для неразрушающего контроля электромагнитных реле // Сборник трудов третьей международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2011». – СПб: издательство СПбГПУ, 2011. – С. 46-48.

10. Лавров В.А. Автоматизированная система контроля параметров электрической изоляции электромагнитных реле // Сборник трудов четвертой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2013». – СПб: издательство СПбГПУ, 2013. – С. 43-47.

11. Лавров В.А. Прибор обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках миниатюрных реле // Сборник трудов четвертой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2013». – СПб: издательство СПбГПУ, 2013. – С. 47, 48.

12. Программа определения параметров электрической дуги: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611842 от 12 февраля 2014 г. / Дурнев А.В., Лавров В.А. // Бюл. №3 от 20.03.2014.

13. Программа определения временных параметров реле: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611726 от 07 февраля 2014 г. / Дурнев А.В., Лавров В.А. // Бюл. №3 от 20.03.2014.

14. Программа классификации реле по надежности: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611842 от 12 февраля 2014 г. / Дурнев А.В., Лавров В.А. // Бюл. №2 от 20.02.2014.

15. Лавров В.А. Совершенствование технологии контроля качества и диагностики электромагнитных реле // Сборник трудов пятой международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире – 2015». – СПб: издательство СПбГПУ, 2015. – С. 69-74.