

УДК 621.313.333: 658.562

А.Н.ДУДКИН, А.П.МАТЯЛИС, О.П.МУРАВЛЕВ

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Обеспечение и совершенствование качества и надежности электрических машин является важной народно-хозяйственной проблемой. Решению этой проблемы посвящены научно-исследовательские работы, проводимые в ТПУ с 1962 г. под руководством профессоров Г.А.Сипайлова, Э.К.Стрельбицкого, Ю.П.Похолюкова и О.П.Муравлева. Полученные результаты позволили создать ряд методик, стандартов по методам испытаний, контроля технологии, расчету, оценке и обеспечению показателей качества и надежности. При проведении исследований подготовлено несколько поколений ученых, которые работают не только в Томском политехническом университете, но и по всей России. Проводимые в университете работы по менеджменту качества и надежности являются перспективными на многие десятилетия следующего века.

Обеспечение и совершенствование качества промышленной продукции является важнейшей народнохозяйственной проблемой, от успешного решения которой зависят темпы производительности труда, эффективности производства и внедрение достижений технического прогресса. Необходимость решения этой проблемы не зависит от социального строя в стране. В передовых, наиболее развитых капиталистических странах вопросами качества занимаются систематически, хорошо их финансируют и считают составной частью национальной политики. Следует отметить, что в последние годы в России стали уделять больше внимания сертификации, стандартизации, менеджменту качества промышленной продукции.

Развитие научно-исследовательских работ по надежности и качеству в Томском политехническом институте началось с 1962 г., когда эта тематика была включена в план работ Государственного комитета по электротехнике по теме «Повышение надежности и экономичности электрических машин». В дальнейшем работа проводилась по различным Постановлениям Совета Министров СССР.

Первоначально руководителями были утверждены заведующий кафедрой электрических машин и аппаратов ТПИ к.т.н., доцент Г.А.Сипайлов и к.т.н., доцент Э.К.Стрельбицкий. С самого начала работ по этой теме были привлечены аспирант Ю.П.Похолюков и старший преподаватель О.П.Муравлев. Идеологом работы был Э.К.Стрельбицкий, который возглавил ее с 1964 г. Э.К.Стрельбицкий защитил докторскую диссертацию «Исследование надежности и качества электрических машин» в 1967 г. После его отъезда из Томска в 1971 г. работа разделилась на два направления – исследование надежности и управление качеством электрических машин. Первое направление стало выполняться на кафедре электроизоляционной и кабельной техники под руководством Ю.П.Похолюкова, который в 1978 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей».

Второе направление возглавил О.П.Муравлев, защитивший докторскую диссертацию «Научные основы обеспечения качества при проектировании и изготовлении низковольтных асинхронных двигателей» в 1986 г.

Теоретические и экспериментальные исследования надежности систем изоляции низковольтных обмоток содержат обширный спектр различных работ. Было изучено влияние технологии обмоточно-изолирующих работ на состояние электрической изоляции. Установлено, что в процессе изготовления обмоток на отдельные слои главной изоляции и особенно изоляции обмоточных проводов наносится существенное количество сквозных повреждений (проколов, порезов, трещин). Такие повреждения принято называть дефектами и их количество на единице площади слоистой или на единице длины обмоточного провода – дефектностью. Исследования износа систем низковольтной изоляции показали, что дефектность в процессе эксплуатации возрастает, при-

чем скорость дефектообразования при постоянных эксплуатационных нагрузках является константой.

Сравнение уровня воздействующих на элементы изоляции эксплуатационных напряжений (с учетом величин коммутационных перенапряжений) с величиной пробивного напряжения изоляции, не имеющей сквозных повреждений, показало, что отказ изоляции низковольтных обмоток возможен только при существовании в системе изоляции дефектов. В дальнейшем это было подтверждено экспериментально. Были разработаны математические модели для расчета вероятности отказа систем изоляции, учитывающие влияние на отказы вида изоляции, конструкции обмоток, технологических факторов и эксплуатационных нагрузок. В моделях принят следующий механизм отказа. Отказ представляет собой возникновение короткого замыкания между токоведущими частями, которое возникает в результате пробоя (перекрытия на поверхности) промежутков в местах дефектов под действием коммутационных перенапряжений и рабочего напряжения.

Импульсы коммутационных перенапряжений кратковременны, и не каждое перекрытие по поверхности изоляции промежутка между токоведущими частями приводит к возникновению короткого замыкания, т.е. к отказу обмотки. Отказ наступает тогда, когда возникший при воздействии коммутационного перенапряжения искровой разряд поддерживается рабочим напряжением. Это положение также подтверждено экспериментами.

Указанный подход позволил разработать математические модели отказов, адекватно учитывающие влияние на отказы не только основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, но и влияние на отказы окружающей среды: температуры, относительной влажности, давления.

Для ряда современных систем изоляции низковольтных обмоток проведена количественная оценка износа в процессе эксплуатации. Определены скорости дефектообразования в зависимости от температуры обмотки, частоты включений, вибраций, а также для некоторых систем изоляции при воздействии агрессивных сред.

Проведенные исследования позволили разработать ряд методик, стандартов предприятий по методам испытаний, контроля технологии, расчету и обеспечению показателей надежности обмоток асинхронных двигателей, а также разработать отраслевой стандарт: ОСТ 16 0.800.821-88 «Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения».

В отраслевом стандарте приведены методики определения исходных данных, справочные данные и методики расчета показателей надежности систем изоляции асинхронных двигателей с всыпными обмотками и обмотками с жесткими секциями. Методики учитывают влияние на показатели надежности конструктивных факторов (коэффициента заполнения паза, диаметра обмоточного провода, длины вылета лобовой части, средней длины витка, числа элементарных витков в эффективном, толщины и вида изоляции, числа параллельных ветвей и др.) и эксплуатационных факторов (среднего значения и среднего квадратического отклонения температуры обмотки, частоты включений, уровня вибраций, температуры, влажности и давления окружающей среды). Такая методика позволяет на стадии проектирования, производства и эксплуатации проводить оценку влияния как конструкции, так и технологических режимов обмоточно-изолирующих работ на показатели надежности, а также обеспечивать на стадии проектирования и производства оптимальные показатели.

Проведенные исследования и разработанные математические модели позволили выработать критерии для оценки технологических процессов. Поэтому дальнейшие работы были направлены на разработку информационно-советующей системы для обеспечения выпуска двигателей с требуемыми показателями надежности. В рамках направления этих работ разработаны методики и средства (приборы) пооперационного контроля обмоточно-изолирующих работ, которые могут быть использованы как отдельно, так и для создания микропроцессорных информационных систем с целью регулирования технологии и обеспечения на стадии производства требуемых показателей надежности.

Разработана система встроенного в технологический процесс автоматизированного операционного контроля технологии обмоточно-изолировочных работ при изготовлении всыпных обмоток асинхронных двигателей, которая включает в себя следующие приборы:

1. Прибор контроля дефектности изоляции эмалированных проводов в состоянии поставки, разработанный в ТИАСУРе. Прибор предназначен для считывания числа сквозных повреждений в изоляции эмалированных проводов диаметром от 0,3 до 2,5 мм и позволяет автоматически и непрерывно определять число дефектов на изоляции единицы длины провода до его технологического использования.

2. Прибор контроля повреждаемости изоляции провода в процессе изготовления обмоток. Прибор обеспечивает непрерывный автоматизированный контроль количества сквозных повреждений изоляции (сдиров, порезов, проколов) в процессе изготовления обмоток двигателей с высокой оси вращения до 250 мм. Обеспечивается контроль повреждений на технологических операциях намотки на шаблон, втягивания в пазы, бандажирования и формовки лобовых частей.

3. Прибор контроля степени заполненности свободного пространства обмотки пропиточным составом после технологической операции пропитки – сушки. Прибор позволяет оперативно осуществлять контроль качества пропитки обмоток, осуществлять статистический контроль технологического процесса и выдавать рекомендации по улучшению его параметров при ухудшении качества.

Введение автоматического пооперационного контроля основных технологических процессов обмоточно-изолировочных работ совместно с программой расчета показателей надежности систем изоляции позволяет создать информационно-советующую систему, позволяющую влиять на технологию, с целью повышения показателей надежности двигателей.

Исследования в области надежности и технологии производства намоточных изделий на кафедре ЭИКТ продолжаются. В последнее время разработаны первые варианты математических моделей для расчета вероятности отказа изоляции обмоток высоковольтных асинхронных двигателей для нефтепогружных электронасосов, а также модели для расчета отказа изоляции обмоток низковольтного электрооборудования при различном виде намотки: рядовой, шахматной, «дикий».

В области технологии обмоточно-изолировочных работ ведутся работы по созданию автоматических систем проектирования технологических процессов. Для этого проводится математическое моделирование и оптимизация технологических процессов и продолжаются работы по исследованию технологических процессов производства обмоток.

В частности, достаточно широко ведутся работы по технологическому процессу пропитки-сушки обмоток, т.к. это один из основных процессов, обеспечивающих надежность изоляции.

Кроме того, продолжаются работы по оценке совместимости компонентов электроизоляционных систем намоточных изделий, обеспечивающих надежность этих систем.

Развитие работ по качеству электрических машин в нашем университете можно разделить на три периода. При рассмотрении этого вопроса следует иметь в виду, что надежность в широком смысле является одним из показателей качества электрических машин. В начале 60-х годов на первом месте были работы по надежности, а в 80-х годах, как и в настоящее время, все встало на свои места, и отношение к надежности уравновешенное.

Первый период (1962 – 1972 гг.) определяется работами в первую очередь по надежности электрических машин под руководством Э.К.Стрельбицкого. В этот период работало первое поколение его учеников: Ю.П.Похолков, О.П.Муравлев, А.Я.Цирулик, А.С.Гитман, Ю.М.Башагуров, В.С.Стукач, Б.А.Иткин, З.Ф.Идрисов. Они впервые разработали ряд математических моделей надежности для электрических машин переменного и постоянного тока. Научно-исследовательская работа проходила в тесном сотрудничестве с промышленностью – на заводе и в СКБ «Сибэлектромотор» (г.Томск) и на заводе «Электромашина» (г.Прокопьевск). Теоретические разработки были доведены до инженерных методик расчета надежности, которые применялись на предприятиях электротехнической промышленности как обязательные на уровне стандартов.

Второй период (1972 – 1986 гг.) связан с разработкой системы управления качеством при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин под руководством О.П.Муравлева. По этой тематике защищено свыше 20 кандидатских диссертаций. Диссертацион-

ные работы А.Д.Немцева, Ю.М.Гринберга, В.В.Днепровского, А.Г.Вэрэш, Т.С.Шелеховой посвящены изучению точности технологических процессов изготовления асинхронных двигателей и разработке мероприятий по обеспечению качества. Для двигателей постоянного тока над этими вопросами работал А.П.Муравлев. Все исследования проводились на заводах, в лабораториях с использованием физических моделей.

Разработка моделей прогнозирования конструкций и показателей качества асинхронных двигателей представлены в работах О.Л.Рапопорта и В.М.Педикова.

Системный подход к обеспечению качества асинхронных двигателей начинается с работ Н.А.Жукова, В.М.Игнатовича, О.Г.Онученко с 1976 г.

Эти работы, как и последующие, характеризуются разработкой по результатам исследований нормативно-технической документации, которая использовалась на заводах электротехнической промышленности СССР. Среди разработанных документов следует отметить отраслевой стандарт ОСТ 16.0.801.164-84. Отраслевая система управления качеством двигателей асинхронных и синхронных свыше 56 до 355 габарита включительно.

Количество показателей качества, интересующих промышленность и другие отрасли народного хозяйства, со временем расширяется и разрабатываются новые математические модели, на основе которых совершенствуется проектирование и изготовление электрических машин. Д.И.Чащин успешно разрабатывает систему обеспечения надежности подшипниковых узлов асинхронных двигателей при их изготовлении и эксплуатации. Изменяются и применяемые методы исследований показателей качества – О.Ф.Шапкина при исследовании влияния контроля на формирование качества при изготовлении асинхронных двигателей переходит от натурного эксперимента к вычислительному, используя имитационное моделирование на ЭВМ.

Оценку влияния технологических погрешностей на эксплуатационную надежность получил в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований В.И.Кувайцев, тем самым заполнил недостающее звено в комплексных исследованиях. Этот период завершился подготовкой и защитой докторской диссертации О.П.Муравлевым.

Третий период начинается с 1987 г. и характеризуется, с одной стороны, тем, что наряду с вероятностными методами процессов, определяющих надежность подшипниковых узлов асинхронных двигателей, учитывается реальный характер физических процессов, например, отказ консистентной смазки и возникновение усталостных разрушений материала подшипника. Повышение требований к уровню качества и надежности асинхронных двигателей, увеличение интенсивности воздействия эксплуатационных факторов привело к необходимости разработки методов диагностики, которые рассмотрены в работах Т.Д.Карминской, А.В.Брылева и М.В.Копанева.

Повышение технического уровня, учет экологических требований при эксплуатации тесным образом связаны со снижением уровня шума и вибрации. Обеспечением заданных виброшумовых характеристик взрывозащищенных асинхронных двигателей на стадии проектирования и изготовления успешно занимался В.Г.Глушков.

Самым большим достижением последних лет стала разработка О.О.Муравлевой и О.Ф.Шапкиной математической модели, связывающей материалоемкость асинхронного двигателя с точностью технологических процессов изготовления. Это является новым, нетрадиционным путем совершенствования асинхронных двигателей.

Перспектива работ по менеджменту качества при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин, включая и вопросы надежности, просматривается не только для ближайшего будущего, но и на многие годы вперед. Основные направления работ связаны с ресурсосбережением при проектировании, изготовлении и эксплуатации; технической диагностикой при изготовлении и эксплуатации; распространением полученных результатов исследований на все типы электрических машин, включением в системы автоматизированного проектирования совершенных методов проектирования с учетом точности технологических процессов; созданием высоконадежных асинхронных двигателей.