

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Попова Александра Владимировича «Исследование и разработка методов расчёта и эксплуатационной надёжности изоляции обмоток высоковольтных асинхронных двигателей нефтехимического производства», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

На рассмотрение представлена рукопись диссертации объемом 138 страниц и автореферат объемом 23 страницы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы и 1 приложение.

### **Актуальность темы диссертации.**

Трёхфазные асинхронные двигатели (АД) общего назначения являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения. Асинхронные электроприводы составляют около 95% общего количества электроприводов, а АД потребляют более половины производимой в нашей стране электроэнергии. Поэтому эффективный контроль показателей качества и надёжности этих двигателей в процессе производства и после их изготовления, своевременная диагностика причин разладки технологического процесса и основанное на этих результатах управление качеством изготовления электродвигателей являются актуальными задачами, особенно, для нефтехимического производства.

С увеличением нагрузок в эксплуатации, уменьшением ресурса элементов машин, отклонениями в системе планово-предупредительного ремонта происходит увеличение удельных нагрузок на детали и узлы АД, что приводит к снижению их надёжности.

Анализ показывает, что существующие методы расчёта надёжности на этапе проектирования не учитывают свойства структуры и функциональные связи между элементами электромеханической системы, в результате имеет место прохождение скрытых дефектов в эксплуатацию.

В связи с этим задача разработки методов расчёта надёжности изоляции АД и развития методов описания существующей структуры и её меж эле-

ментных свойств является актуальной, решение которой позволит на этапе проектирования снизить уровень прохождения скрытых дефектов АД в эксплуатацию.

### **Новизна и научное значение диссертации**

Разработанные методы моделирования и расчёта надёжности АД дают возможность использовать их при построении структурных схем для сложных конструкций электромеханических систем, отдельные элементы которых испытывают как механические, так электрические нагрузки.

Разработаны основные ограничения и допущения для формирования структурно-функциональных моделей, адекватно описывающих надёжность конструкции обмотки статора.

Предложены дифференциальные уравнения, характеризующие вероятностные состояния изоляции катушек обмотки статора, учитывающие межэлементные связи конструкции узла, позволяющие определить рациональные варианты структурных схем и параметров элементов.

Разработана методика расчёта интенсивности отказов АД по причине повреждения изоляции обмотки статора при дискретном изменении её температуры в процессе эксплуатации.

### **Практическая ценность и реализация результатов.**

Методы расчёта могут быть использованы при совершенствовании системы планово-предупредительного ремонта и эксплуатации путём расчёта рациональных сроков ремонта и определения его объёма. Результаты используются на производствах ПАО «Нижекамскнефтехим», г. Нижнекамск для оценки надёжности и остаточного ресурса высоковольтных АД, формирования ежегодного плана капитального ремонта и профилактического обслуживания. Методические разработки, опыт планирования экспериментальных работ и их результаты используются в учебном процессе кафедры «Электротехнические комплексы и системы» федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

### **Достоверность и обоснованность.**

Степень достоверности и обоснованности результатов и выводов диссертации достигается применением основных теорем теории вероятности и математической статистики, базируется на согласованности результатов моделирования и данных экспериментальных исследований, полученных в условиях производственного эксперимента на базе ПАО «Нижекамскнефтехим» для 108 АД мощностью от 250 до 5700 кВт.

### **Личный вклад автора.**

Попов А.В. – специалист по электромеханике, им и в соавторстве опубликовано 15 работ, из них 8 в изданиях рекомендованных ВАК.

Автору диссертации принадлежит постановка задачи исследования, разработанные математические модели и аналитические соотношения, обработка результатов экспериментальных исследований.

### **Основные результаты и выводы.**

На основании результатов проведённых аналитических и экспериментальных исследований, анализа и классификации элементной базы АД по конструктивному признаку установлены законы функций плотности распределения нагрузок и надёжности. Предложенные методы и алгоритмы расчётов для детального структурного анализа конструкций узлов с учётом элементной базы системы позволяют определить рациональные уровни надёжности на этапе их проектирования.

Доказано, что режим нагрузки АД в производственных условиях характеризуется Пуассоновским потоком и удовлетворяет условиям эргодичности, подчиняется закону Гаусса. Установлено влияние перегрузок в эксплуатации на нагрев изоляции паза статора и её ресурс.

Максимальное отклонение параметров надёжности элементов паза статора, полученные расчётным путём по разработанным методикам с использованием структурно-функциональных моделей, относительно экспериментальных данных не превышает – 5%.

Для обмотки статора АД нефтехимического производства установлено следующие: наибольшую интенсивность отказов имеют случаи пробоя изоляции катушки паза, наименьшую интенсивность имеют повреждения витковой изоляции и случаи пробоя изоляции на корпус.

Разработанные модели надёжности, методы расчёта, их опытная эксплуатационная проверка в производственных условиях даёт основание считать их адекватными, а полученные оценки параметров надёжности изоляции АД – состоятельными.

Исследования надёжности АД с использованием разработанных в работе алгоритмов и моделей структурно-функциональных схем с учётом свойств межэлементных связей позволяет в дальнейшем совершенствовать данное направление для случаев, когда отдельные элементы конструкции электро-механических систем испытывают одновременно механические и электрические нагрузки, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

### **Замечания по содержанию и оформлению работы**

1. Бесперебойность электроснабжения является одним из главных требований, предъявляемых к энергохозяйствам во всех отраслях. Надёжность электроснабжения обеспечивается использованием апробированных проектных решений, применением надёжного электрооборудования и аппаратуры управления, внедрением прогрессивных методов контроля и диагностики, своевременным проведением различного вида ремонтов.

Используя полученные результаты, можно обойтись без аварийного отключения, дефект был выявлен?

2. Каждый выпускаемый заводом электродвигатель подвергают приёмосдаточным испытаниям. В программу этих испытаний входят: измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками; определение сопротивления при постоянном токе; испытания изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками на элек-

трическую прочность; испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность.

Почем возникают скрытые дефекты изоляции в пазу статора?

3. В работе автор утверждает, что 95% отказов АД это повреждение изоляции обмотки статора.

Однако, известна работа, в которой на основе диагностики АД, основанной на анализе спектра потребляемого тока статором, утверждается, что причина – это эксцентриситет ротора или рост сопротивления стержней в клетке ротора вплоть до их обрыва.

4. В большинстве нефтегазодобывающих предприятий скважины сгруппированы в кусты скважин. Это удобно с точки зрения их оборудования коммуникаций, обслуживания и т.д. Для сбора нефтяного и газового конденсата используют дожимные насосные и компрессорные станции. Мощные насосы приводятся в действие АД.

Статистика энергоснабжения по видам повреждений электрооборудования показывает, что почти половина отключений (43%) происходила без повреждения электрооборудования. Повреждение опор, изоляторов, часто связанные с проведением различного рода работ, вызвали 35% отключений. По причинам связанных с неисправностями коммутационной аппаратуры (выключатели и разъединители) произошло 6% отключений, из-за повреждений трансформаторов и кабелей 2%. Отключений из-за электродвигателей не было.

5. В приложении 1 приводятся сведения о ремонтах высоковольтных асинхронных двигателей. На самом деле в таблице синхронные машины занимают ~ 15%.

6. В работе есть несколько замечаний по оформлению, например, формула (3.6) записана неправильно. Введены сокращения ВАЭ и ВБР, которые автором используются не всегда.

Несмотря на отмеченные замечания, диссертация является законченной научно-исследовательской работой, написанной автором самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публич-



ной защиты, и свидетельствует о личном вкладе А.В. Попова в науку. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Предложенные А.В. Поповым в диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями, содержит важные результаты для решения проблем эксплуатационной надежности электрических машин.

В диссертации отсутствует материал без ссылки на авторов и источники заимствования.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Попова Александра Владимировича на тему «Исследование и разработка методов расчёта эксплуатационной надёжности изоляции обмоток высоковольтных асинхронных электродвигателей нефтехимического производства», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» удовлетворяет критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор,  
зав. лабораторией сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники ОИВТ РАН

Копылов Сергей Игоревич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, лаборатория сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, тел. (495) 485-8345,  
e-mail: kopylovs56@yandex.ru

Подпись д. т. н., проф. Копылова Сергея Игоревича удостоверяю:

Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.

/Амиров Р.Х./

« 20 » октября 2016 г.