

Секция «Энергетика»  
Подсекция «Электроснабжение промышленных предприятий»  
25 апреля 2007 г., 13 час. 35 мин., ауд. 301 к. «Д»  
Научный руководитель – д.т.н., профессор Хомутов О.И.  
Секретарь – к.т.н., доцент Гутов И.А.

### Содержание

1. Панасенко М.А., Тонких В.Г., Хомутов С.О. Организация технического обслуживания асинхронных двигателей на основе их диагностики
2. Смирнов А.А., Веденев В.Н., Хомутов С.О. Диагностика состояния статорной обмотки асинхронного двигателя по характеру спектрального состава его внешнего магнитного поля
3. Свиных А.С., Шерстобитов В.Ю., Хомутов С.О. Повышение надежности электродвигателей при ремонте
4. Тонких В.Г., Веденев В.Н., Хомутов С.О. О возможности применения обобщенного параметра состояния изоляции при диагностике асинхронных электродвигателей
5. Гутов И.А., Жуйков А.В., Ишаев А.Ю., Никитин А.Е., Старухин Р.С. Моделирование электрических сетей на ЭВМ в учебных целях
6. Кобозев Е.В., Грибанов А.А. Комплексная оценка воздействующих факторов как основа прогноза вероятности безотказной работы электродвигателей
7. Компанец Б.С., Старухин Р.С., Белицын И.В. Метод расчета параметров эллиптических полей для выполнения требований нормативных документов
8. Бакулин С.А., Гилев А.А., Гревцов Д.А., Колегаев С.А., Рыбаков В.А. Определение величины послеремонтных повреждений асинхронных электродвигателей и прогнозирования их остаточного ресурса
9. Мартко Е.О., Бараков А.Н., Рыбаков В.А. Методика расчета процессов выхода из строя и ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве

## ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ ДИАГНОСТИКИ

Панасенко М.А. – студент, Тонких В.Г. – аспирант, Хомутов С.О. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Анализ результатов многочисленных исследований причин выхода электродвигателей из строя показал, что наибольший процент отказов в процессе их эксплуатации связан с ухудшением состояния межвитковой изоляции (до 80%). При этом контролировать величину сопротивления изоляции, как некоего распределенного параметра, с целью обеспечения длительной и безотказной работы асинхронных двигателей (АД) практически невозможно.

Как известно, для поддержания работоспособности или исправности электродвигателя на протяжении всего срока службы при его применении, хранении и транспортировании применяется комплекс мероприятий, называемый техническим обслуживанием (ТО). Иными словами, эксплуатация оборудования начинается с момента его выхода с территории завода-изготовителя и заканчивается сдачей его в переработку на предприятия по утилизации промышленных отходов. Рассмотрим более подробно стадию жизненного цикла изделия, на которой реализуется, поддерживается или восстанавливается его качество.

Основная цель технического обслуживания заключается в обеспечении требуемого уровня надежности работы оборудования в течение установленного срока службы с наилучшими технико-экономическими показателями, наиболее важными из которых являются потери электроэнергии и КПД.

Поскольку в себестоимость готовой продукции входят затраты на ТО, то вопрос о необходимом объеме технического обслуживания в настоящее время является, в большинстве случаев, актуальным. Распространены три варианта проведения ТО:

- практически без обслуживания (по принципу «не трогай, пока не сломается»);
- согласно плано-предупредительной системе обслуживания и ремонта (ППР);
- обслуживание с ремонтом по мере необходимости.

Первый вариант выполнения ТО характерен для вспомогательного электрооборудования – освещения, вентиляции и электронагревательных устройств. Стоимость такого оборудования, как правило, невелика, что позволяет иметь на предприятии его необходимый резерв и проводить, в случае необходимости, быструю замену.

Обслуживание по второму варианту применяется для основного и большей части вспомогательного оборудования. ППР предусматривает плановые (по графику) осмотры и ремонт электрического и электромеханического оборудования. При этом контроль за текущей нагрузкой, качеством электроэнергии и другими режимными параметрами не предусматривается. Функции контроля за отклонением режимных параметров от расчетных возлагаются на системы защиты оборудования.

Основным недостатком системы ППР является возможность отправки в ремонт исправного оборудования, поскольку оценка его износа осуществляется косвенным путем по количественным показателям. Для электрических машин и трансформаторов основным критерием является время работы без учета реальной нагрузки и т.д. А т.к. стоимость ТО входит в себестоимость продукции, то стремление к уменьшению издержек производства приводит к желанию уменьшить стоимость ТО за счет рационализации ремонта.

В связи с вышесказанным, в начале 90-х годов прошлого столетия в мировую практику начал внедряться третий вариант ТО, который обеспечивает необходимый уровень надежности работы оборудования при минимальной стоимости обслуживания. Применение данного варианта ТО требует контроля режимов работы оборудования и условий окружающей среды, который осуществляется с помощью датчиков, связанных с информационно-измерительной системой предприятия или с системой диагностики работы оборудования. Эти системы на основе математических моделей надежности обрабатывают полученную информацию и выдают данные по уровню надежности и необходимости ремонта оборудования.

К достоинствам такого подхода к ТО относится выведение из эксплуатации только того оборудования, ремонт которого объективно необходим. Таким образом, в первую очередь данный способ обслуживания распространяется на наиболее ответственное и дорогостоящее оборудование.

Поскольку стоимость диагностических систем для мониторинга состояния изоляции электрооборудования весьма велика, применять их целесообразно лишь для диагностирования крупных электрических машин (синхронных генераторов, компенсаторов и двигателей переменного тока), простой или отказ которых может привести к большому экономическому ущербу. Поэтому система ППР остается наиболее распространенной [1].

Как известно, методы и средства оценки состояния машин и энергетического оборудования развивались поэтапно. Сначала использовались средства контроля различных параметров, затем мониторинга, и, на последнем этапе, системы диагностики и прогноза технического состояния. Внедрение каждого последующего вида систем дает пользователю новые возможности для перехода на обслуживание машин и оборудования по фактическому состоянию [2].

Для проведения ТО электродвигателей по их фактическому состоянию авторами была разработана система по оценке надежности и прогнозированию работоспособности АД на основе статистики отказов двигателей, теории информации и данных диагностики. Так, показатели надежности, полученные статистически, а также данные диагностирования позволяют точно определять текущее техническое состояние АД, вести их мониторинг, и прогнозировать изменения параметров.

После проведения диагностики с помощью разработанного математического аппарата теории информации определяется дефектность двигателя. Кроме того, в зависимости от обнаруженной комбинации дефектов и параметра надежности, определенного статистически, выдается прогноз безопасного срока эксплуатации электродвигателя, выраженный в дате следующего измерения, когда этот прогноз необходимо будет уточнить. При этом рассматривается наихудший из возможных сценариев развития дефектов, что обеспечивает повышенную надежность прогноза безотказного срока службы узла [3].

В результате анализа распределения отказов электрооборудования авторами была подобрана универсальная аналитическая функция – интенсивность отказов, с помощью которой удалось получить характеристики безотказной работы для АД различных типов. Данная универсальная аналитическая функция называется кривой жизни и представляет собой изменение надежности исследуемого оборудования за счет внешних воздействий в условиях эксплуатации.

Используя предложенную систему исследования надежности АД с помощью диагностических и статистических данных появилась возможность перейти на обслуживание АД по фактическому состоянию, что позволяет сокращать затраты на техническое обслуживание, эксплуатацию электродвигателей, оптимизировать складской резерв, уменьшать трудозатраты. Точность данной системы, разработанной по гранту Президента РФ № МК-7964.2006.8, тем выше, чем точнее будут параметры диагностики и статистической информации [4].

#### Список литературы

1 Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимов, М.В. Антонов; под ред. Н.Ф. Котеленца. – М.: Академия, 2003. – 384 с.: ил. ISBN 5-7695-1281-4.

2 Баркова, Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/sovrstost/index.htm>.

3 Система автоматической диагностики DREAM for Windows. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/catalog/dfwe.htm>.

4 Зонов, П.В. Перспективные ресурсосберегающие технологии в системах электрического транспорта. – Режим доступа: <http://center.nstu.ru/stend-2006/thes22.htm>.

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ХАРАКТЕРУ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ЕГО ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Смирнов А.А. – студент, Веденев В.Н. – аспирант, Хомутов С.О. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Практика эксплуатации асинхронных двигателей (АД) показывает, что их выход из строя часто обусловлен повреждением статорной обмотки. При этом самым распространенным повреждением обмотки являются межвитковые и межфазные замыкания.

В настоящее время для решения проблемы своевременного выявления данных дефектов с целью предотвращения возникновения аварийных остановок в технологическом процессе широко используется метод вибродиагностики АД. Однако этот метод имеет недостаток, т.к. вибрация электродвигателя, в большинстве случаев, является «вторичным» явлением при неисправности. Кроме того, параметры вибрации двигателя (амплитуда, частота, ускорение) зависят от свойств основания, на котором закреплен АД, а также вибраций сопряженного с электродвигателем механизма и устройств, расположенных в непосредственной близости от диагностируемого АД.

Из вышесказанного следует, что исследуемый авторами метод диагностики двигателя на основе его внешнего магнитного поля (ВМП) должен обеспечивать более точные результаты, а также возможность проведения диагностики без исключения АД из рабочего цикла. При этом, в рассматриваемом контексте, наибольший интерес представляет электромагнитная диагностика межвитковых и межфазных замыканий, как наиболее труднодиагностируемых.

Для определения дефектности АД введем унифицированную шкалу деления, на которой покажем степень износа изоляции обмотки статора. Для построения данной шкалы проанализируем процесс ухудшения изоляции с последующим образованием межвитковых и межфазных замыканий. Обратимся к физическим явлениям и процессам, связанным с возникновением замыканий обмотки статора электродвигателя.

Весь процесс образования межвитковых и межфазных замыканий можно разделить на несколько этапов. Первый этап – это период работы двигателя до точечного обугливания изоляции, т.е. наиболее продолжительный период, зависящий от условий эксплуатации АД.

В ходе эксплуатации изоляция обмотки статора подвергается интенсивному старению, которое представляет собой сложный физико-химический деградиционный процесс. Явление старения изоляции включает в себя механизмы теплового, электрического, механического, влажностного и химического старения, в результате чего происходит постепенное ухудшение ее диэлектрических свойств. Следствием этого является увеличение тока утечки через изоляцию обмотки и возрастание тока в одной из фаз.

Второй этап – это период от точечного обугливания изоляции до появления электрического соединения между витками. Данный этап характеризуется тем, что его продолжительность больше зависит от режима эксплуатации двигателя (кратковременный, повторно-кратковременный и т.п.) и от его нагруженности (недогрузка, номинальная загрузка и т.п.), но менее зависит от условий окружающей среды.

Третий этап – это период от появления электрического соединения между витками до момента выгорания обмотки и полного выхода из строя АД.

Для построения шкалы дефектности авторами были проведены эксперименты с ускоренным старением изоляции, для чего обмотка подвергалась термическому воздействию в камере теплоты и влаги [1]. При этом степень ее дефектности определялась по скорости изменения температуры листов электротехнической стали статора АД от комнатной 20°C до рабочей температуры – 80°C.

Многочисленные опыты показали, что 100% дефектный двигатель нагревается до 80°C за 5 секунд, при этом 100% дефектностью АД считалось состояние, при котором отключение АД от сети тепловым реле происходило не более, чем через 10 секунд с момента пуска.

На основании данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, была разработана шкала дефектности обмотки статора АД (рисунок 1).

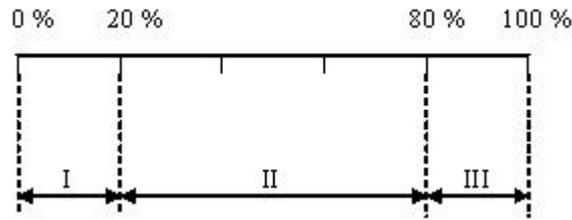


Рисунок 1 – Шкала дефектности обмотки статора АД с делением по этапам

Кроме того, опыты показали, что для различных двигателей амплитуды гармоник ВМП, рассматриваемые в качестве диагностических параметров, различны при одинаковой степени дефектности. В связи с этим, встал вопрос поиска универсального критерия оценки.

Амплитуды всех высших гармоник зависят от величины питающего АД напряжения, одной из основных характеристик которого является частота, равная частоте основной гармоники, присутствующей во внешнем магнитном поле (50 Гц) [2]. Тогда, авторами было введено понятие коэффициента гармоники  $K_n = A_n / A_1$ , где  $A_n$  – амплитуда гармоники порядка  $n$ ;  $A_1$  – амплитуда основной гармоники. При этом критерием оценки состояния изоляции обмотки статора АД выступает сумма коэффициентов диагностических гармоник.

На основании выполненных исследований по гранту Президента РФ № МК-7964.2006.8 с использованием различных двигателей (по мощности и числу пар полюсов) были построены зависимости величины критерия оценки  $K$  от дефектности обмотки статора АД для различных этапов развития дефекта (рисунок 2), позволяющие определять текущее состояние дефектности изоляции асинхронного двигателя.

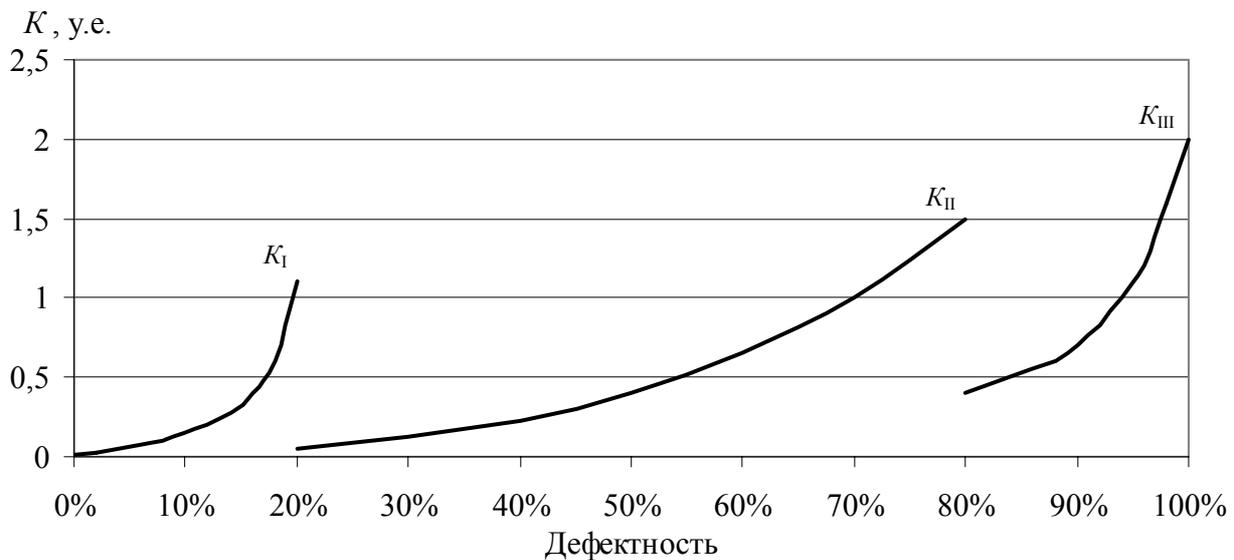


Рисунок 2 – Графики зависимостей критериев оценки  $K$  в у.е. для различных периодов развития дефекта для однополюсного асинхронного двигателя.

#### Список литературы

1 Гутов, И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: Дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул., 1998. – 259 с. : ил.

2 Геллер, Б.Н. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б.Н. Геллер, В.Г. Гамата; под общ. ред. З.Г. Каганова. – Пер. с англ. – М.: Энергия, 1981. – 352 с. : ил.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Свининых А.С., Шерстобитов В.Ю. – студенты, Хомутов С.О. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время на промышленных предприятиях для электропривода технологических механизмов широко используются асинхронные электродвигатели (АД).

Асинхронные двигатели представляют собой наиболее распространенный тип электрических машин. Ежегодно в России изготавливаются миллионы АД, которые потребляют около 40% всей производимой в стране электроэнергии. Таким образом, повышение качества и надежности такой массовой продукции является важной народнохозяйственной задачей.

Простота конструкции асинхронных электродвигателей, а, в последнее время, и простота управления ими, способствует расширению сферы их применения для привода различных технологических механизмов во всех случаях, когда нет технических ограничений. Благодаря этому, асинхронные электроприводы составляют около 95% общего количества электроприводов, а в сельскохозяйственном производстве они являются основным электрифицированным средством механизации трудоемких процессов. В сельском хозяйстве наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели общего назначения мощностью от 0,75 до 7,5 кВт, составляющие более 50% всего парка. Поэтому вопросы повышения надежности и долговечности АД, как наиболее ответственного звена в комплексе технологического оборудования, являются наиболее важными.

Под надежностью электрической машины понимается ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях применения. Следовательно, надежность машины характеризуется вероятностью ее безотказной работы в течение определенной наработки [1].

Анализ известных способов поддержания эксплуатационной надежности изоляции АД, основными из которых являются ее капитальный ремонт, техническое обслуживание, периодическая диагностика, обеспечение надежной защитой, показывает, что основными мероприятиями, способствующими созданию базового ресурса работы изоляционной системы, являются ее пропитка и сушка специальными диэлектрическими составами.

В основе существующих технологий проведения восстановительных работ лежит опыт их рационализации, результатом которого в настоящее время является следующая последовательность технологических операций: деструкция связующего и удаление обмотки, операции обмоточно-изолирующих работ, предварительный нагрев и сушка изоляции обмотки, заполнение обмоток специальными диэлектрическими составами, сушка.

В результате исследования существующих технологий пропитки и сушки изоляции можно прийти к выводу о том, что качество изоляции обусловлено, в первую очередь, используемыми методами пропитки и сушки, а также качеством выполнения отдельных технологических операций. Для технологического процесса пропитки и сушки изоляции характерна особенность, заключающаяся в зависимости качества выполнения последующих операций от качества предыдущих.

Целью исследования, выполняемого авторами, служит выявление параметров, которые оказывают максимальное влияние на качество восстановленной изоляции, а также получение математической зависимости, назначением которой является оценка качества изоляции электродвигателя в зависимости от условий проведения ремонта и определение на ее основе рациональных режимов процесса восстановления изоляции АД.

При изучении процесса скоростной вакуумной пропитки и сушки изоляции статора АД, как одного из перспективных методов ремонта электрических двигателей, применялись два подхода к исследованию. Первый подход заключался в проведении анализа данных эксперимента; второй – исходил из строго теоретического рассмотрения проблемы.

Основным достоинством первого способа исследования является достоверность получаемых частных результатов в пределах точности, допускаемой техникой эксперимента. Для анализа экспериментальных данных был выбран информационно-логический анализ, ввиду

того, что он позволяет получить достоверный результат даже при большой степени разнообразия исходной информации.

При обработке данных эксперимента основное внимание уделялось изучению непосредственной связи между величинами, которые представляли наибольший практический интерес, а именно рассматривалась зависимость определенного показателя качества изоляции от технологических параметров процесса ремонта, таких как давление, температура пропитки, температура сушки, скорость набора вакуума, количество вакуумных ударов, время пропитки, время сушки. Результатом проведенной работы явилась математическая модель, отражающая зависимость исследуемых параметров на конечное качество ремонта АД. В рассматриваемом случае показателем качества был взят обобщенный диагностический параметр (ОДП), представляющий собой время релаксации затухающих колебаний в обмотках электрической машины. Главным достоинством выбранного диагностического параметра является то, что значение данного параметра может быть измерено на любом технологическом этапе восстановления изоляции обмотки статора электродвигателя, а учитывая то, что ОДП заменяет целый набор частных показателей качества, можно утверждать что данный параметр довольно полно отражает реальное состояние изоляции обмотки [2].

Основной недостаток описанного подхода к исследованию заключается в ограниченной ценности его результатов. В отличие от опыта, позволяющего изучать свойства только конкретного единичного явления, теоретическая физика обладает таким аппаратом исследования, который дает возможность рассматривать наиболее общие свойства явлений, характерных для класса явлений в целом.

Другими словами, теоретические исследования процессов тепломассопереноса в обмотках электрических двигателей при их пропитке и сушке были построены на применении системной методологии к анализу процессов переноса энергии и массы вещества, протекающих в твердых капиллярно-пористых телах. Явления переноса энергии и вещества при пропитке и сушке обмоток электродвигателей подчиняются общим закономерностям термодинамики необратимых процессов, поэтому применение теории тепломассопереноса представляется наиболее актуальным, позволяющим наиболее полно охарактеризовать рассматриваемый процесс [3]. Итогом теоретического исследования явилось получение математических зависимостей, описывающих наиболее общие свойства процесса пропитки и сушки изоляции обмоток АД.

Математическая физика дает в форме системы дифференциальных уравнений самые общие связи между величинами, характеризующими явление. Эти связи настолько общие, что их невозможно непосредственно применять при изучении конкретного процесса. Таким образом, только совместное использование обоих подходов к исследованию позволит полно и точно описать технологический процесс восстановления изоляции АД скоростным вакуумным методом.

В результате работы по гранту Президента РФ № МК-7964.2006.8 полученные математические модели позволили выявить рациональные режимы скоростной вакуумной пропитки и сушки, обеспечивающие максимальное качество восстановленной изоляции, а также способы снижения материальных и энергетических затрат.

#### Список литературы

- 1 Гук, Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с: ил. ISBN 5-283-04387-8.
- 2 Грибанов, А.А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе: Дис ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2001. – 250 л.: ил.
- 3 Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ПАРАМЕТРА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Тонких В.Г., Веденев В.Н. – аспиранты, Хомутов С.О. – к.т.н., профессор  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

На сегодняшний день остается актуальной задача создания новых приборов и методов диагностики асинхронных двигателей (АД), т.к. без этого невозможно повышение надежности данного типа электрооборудования путем внедрения активной стратегии ремонтов по его фактическому состоянию. В свою очередь, экономическое положение агропромышленного комплекса страны требует максимального использования рабочего ресурса узлов и деталей, но, в то же время, сведения к минимуму аварийных отказов. Такой подход становится особенно актуальным в условиях рыночной экономики, т.к. позволяет не только снизить экономические затраты благодаря уменьшению количества аварийных простоев и рациональному использованию ресурса запасных частей, но и сократить общее время ремонтных операций и технического обслуживания, повышая их эффективность.

С другой стороны, внедрение новейших методов диагностики связано с возникновением ряда существенных трудностей. Так, например, контроль за состоянием оборудования подразумевает наличие высококвалифицированных специалистов в области технической диагностики, способных правильно трактовать данные, полученные в результате измерений. Однако отсутствие на предприятиях АПК достаточного количества специалистов требуемого профиля и должного уровня организации делает затруднительным решение задачи повышения эффективности технологических процессов обслуживания и ремонта АД.

Таким образом, целью работы является разработка методики диагностики асинхронных двигателей, позволяющей определять фактическое состояние АД на основе комплексного подхода к спектральному анализу их внешнего магнитного поля (ВМП). Тем не менее, на проявление в спектре внешнего магнитного поля гармонических составляющих влияет множество факторов, вследствие чего затруднительно выявить аналитическую зависимость между различными стадиями развития дефекта и изменением спектра ВМП АД при условии одновременного развития дефектов различной природы (рисунок 1). Ситуация еще более усложняется при учете таких факторов, как флуктуации нагрузки и увлажнение изоляции.

Ввиду вышесказанного, на первый взгляд может показаться, что спектр ВМП АД в реальной обстановке носит исключительно хаотичный характер и практического применения предлагаемый метод диагностики найти не сможет, т.к. невозможно определить диагностические параметры и критерии оценки состояния. Для разрешения этой проблемы авторы предлагают рассмотреть изменение спектра ВМП АД в результате развития различных дефектов в рамках информационного процесса. Предполагается, что в спектре ВМП АД имеется необходимая информация о конкретных дефектах. Помимо нее, безусловно, присутствует прочая информация, обусловленная причинами, рассмотренными выше, и уровнем магнитного шума. В результате, задача сводится к вычлениению «нужной» информации. Очевидно, что между величиной полезной информации о дефекте и уровнем развития дефекта существует прямая зависимость. Для практического расчета удобно применить информационно-логический анализ.

Как статистика, так и теория информации имеют дело с разнообразием элементов некоторой совокупности, но их подход к задачам совершенно различен. Статистика пытается выяснить, что же можно все-таки утверждать или сделать, несмотря на разнообразие. Теория информации рассматривает разнообразие как положительное явление, без которого такие операции, как отбор, связь, спецификация, были бы невозможны; эта теория стремится выяснить, чего можно достичь благодаря некоторой степени разнообразия. Разнообразие свойственно каждому природному явлению. Если обозначить некоторую функцию через  $A$ , то каждое значение функции можно выразить через  $a_i$ , т.е. ранжировать. Не зная закономерности изменения  $A$ , мы можем принять, что появление  $a_i$  есть случайное событие; тогда частоты появления каждого ранга  $A = a_i$  есть оценка условной вероятности  $p(a_i)$ .

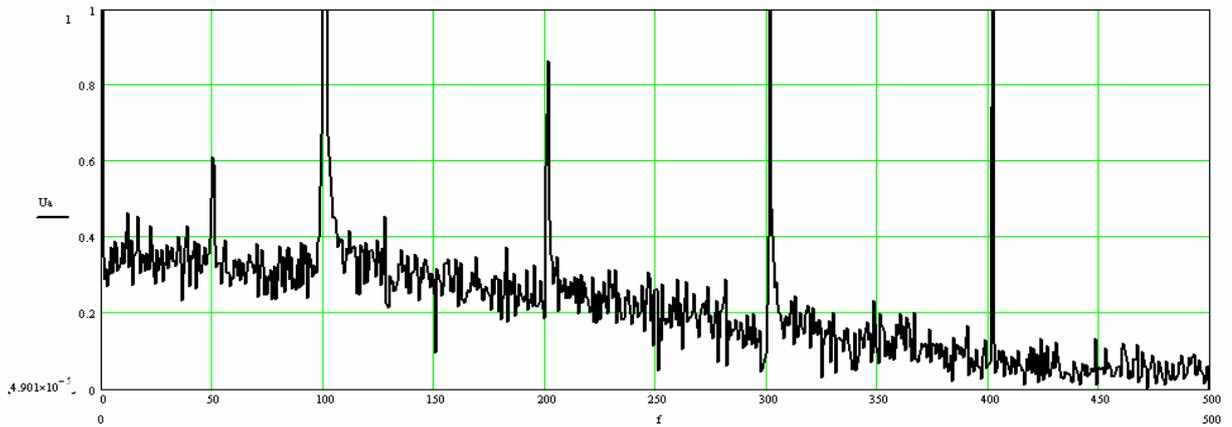


Рисунок 1 – Спектр ВМП АД при дефекте обмотки статора, ротора, подшипникового узла

Наше суждение о появлении того или иного значения функции  $A$  в какой-то мере неопределенно. Величину этой неопределенности можно оценить количественно. Она обозначается как  $H(A)$  для явления  $A$  или  $H(B)$  для параметра  $B$ , и определяется по формуле:

$$H(A) = -\sum p(a_i) \cdot \log_2 p(a_i). \quad (1)$$

Суть данного выражения можно изложить так: неопределенность появления разных значений функции  $A$  равна сумме произведений вероятности появления каждого ранга  $p(a_i)$  на двоичный логарифм этой же вероятности. Максимального значения неопределенность явления достигает при равновероятности всех его состояний. Единица измерения неопределенности называется «бит». Если изучается зависимость явления  $A$  от параметра (фактора)  $B$ , необходимо учесть также и неопределенность фактора  $B$ , которая находится таким же образом по условной вероятности появления каждого ранга  $p(b_j)$ . Обозначение  $b_j$  показывает, что число рангов  $B$  может быть произвольным и отличаться от числа рангов появления  $A$ . В этом случае вероятность рангов  $a_i$  в каждом ранге  $b_j$  обозначается через  $p(a_i/b_j)$ . Для каждого  $b_j$  можно рассчитать неопределенность:

$$H(A/b_j) = -\sum p(a_i/b_j) \cdot \log_2 p(a_i/b_j). \quad (2)$$

Если между явлениями  $A$  и  $B$  существует зависимость, то  $H(A) \neq H(A/b_j)$ . Разность этих величин служит мерой того, насколько наше суждение об  $A$  при  $b_j$  становится более определенным, чем при знании только распределения  $A$ . Эта мера обозначается как  $J(A/b_j)$  и называется информацией об  $A$ , содержащейся в  $b_j$ . Количество информации  $T(A,B)$ , поступающей от параметра  $B$  к явлению  $A$ , оценивается следующим образом:

$$T(A,B) = \sum p(b_j) \cdot J(A/b_j). \quad (3)$$

Значение  $T(A,B)$  зависит не только от связи между  $A$  и  $B$ , но и от величин их неопределенностей. Чем больше неопределенность факторов, тем большее количество информации передается к явлению. Для устранения влияния величины  $H$  вводится коэффициент эффективности передачи информации фактором  $B$  к явлению  $A$ :

$$K(A,B) = \frac{T(A,B)}{H(B)}. \quad (4)$$

Предложенный метод, разработанный по гранту Президента РФ № МК-7964.2006.8, позволяет решать одновременно широкий спектр задач на пути к созданию диагностического оборудования. Универсальный информационный параметр легко обрабатывается и регистрируется. Критерий оценивания реального состояния можно записать в виде функции:

$$D = H_0 e^{-a \frac{I_0}{I}}, \quad (5)$$

где  $D$  – уровень дефектности АД,  $H_0$  – неопределенность системы при ее исходном состоянии,  $I_0$  – количество исходной информации нового двигателя,  $I$  – количество фактической информации.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ЭВМ В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ

Гутов И.А. – к.т.н., доцент,

Жуйков А.В., Ишаев А.Ю., Никитин А.Е., Старухин Р.С. – студенты

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время в процессе обучения широко используются компьютерные технологии. Они находят свое применение во всех видах учебного процесса: на лекционных и практических занятиях, при выполнении лабораторных работ. Выполнение студентами лабораторных работ на ЭВМ является важным средством более глубокого изучения учебного материала и приобретения практических навыков.

При изучении таких сложных технических систем, как электрические сети, и режимов их работы возникает необходимость моделирования, как самих объектов, так и тех процессов, которые в них протекают. Это актуально не только в научных целях, но и в учебном процессе при изучении соответствующих дисциплин, поскольку очень сложно и трудоемко исследовать реальный объект. Обычно при решении этих задач необходимо сделать большое количество вычислений, поэтому в этом случае целесообразно использовать возможности ЭВМ. В учебном процессе необходимо использовать существующие инженерные, научные или учебные программы и специально разработанные учебно-методические комплексы.

Моделирование электрических сетей и их режимов работы можно производить с помощью лабораторных стендов или ЭВМ. Использование лабораторных стендов имеет ряд недостатков. Лабораторный стенд имеет большие габариты, на нем можно моделировать только ограниченный набор схем электрических сетей и их параметров. Стоимость лабораторных стендов довольно высока, кроме того требуются затраты на обслуживание и ремонт, квалифицированный обслуживающий персонал. При выполнении опытов на стендах лабораторная работа выполняется не индивидуально, а группой студентов, при этом значительное время занимает сборка моделируемой схемы и проведение измерений для получения экспериментальных данных.

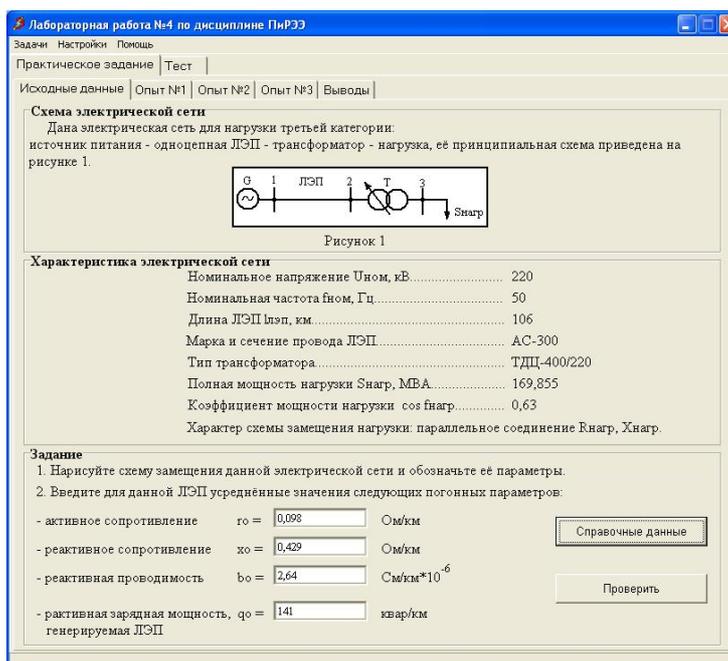
Моделирование на ЭВМ электрических сетей и их работы является наиболее эффективным и рациональным методом с точки зрения универсальности исследований. Компьютерное моделирование позволяет решать сложные и трудоемкие математические задачи. При моделировании на ЭВМ можно обеспечить индивидуальный подход при задании исходных данных для каждого студента, экономию времени при получении экспериментальных данных с сохранением содержания работы, акцентирование внимания на творческой работе - анализе экспериментальных данных и выявлении зависимостей. Разработанное программное обеспечение можно использовать как в дисплейных классах и лабораториях, так и при дистанционном обучении и самостоятельной работе.

На кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» АлтГТУ им. И.И. Ползунова в 2006 - 2007 годах было разработано программное обеспечение для выполнения лабораторных работ по курсу «Передача и распределение электрической энергии». Данные программы реализованы на персональной ЭВМ в операционной системе MS Windows. Для создания программного продукта использовалась интегрированная среда разработки Borland Delphi.

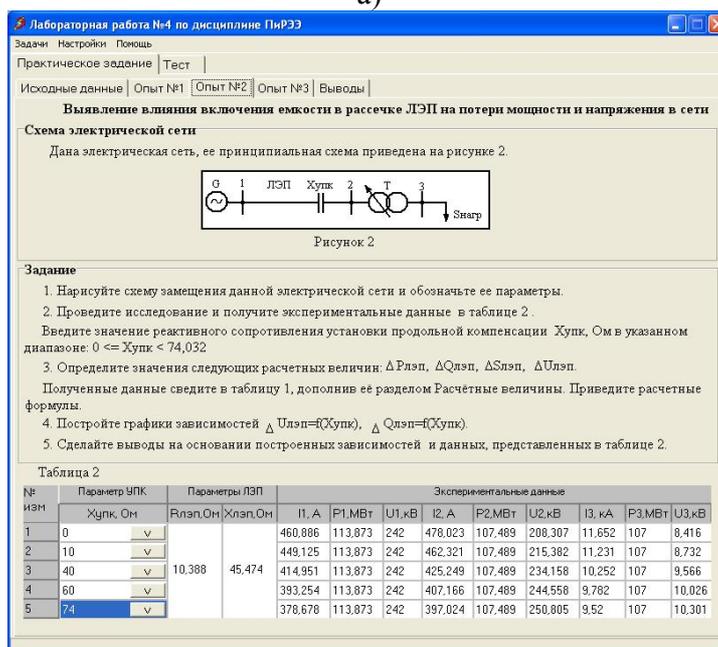
Пакет программ состоит из трех основных программ. Программы содержат следующие разделы: теоретический материал, задание на лабораторную работу, практическое задание, справочный материал, тест – проверка знаний, информация о программе и помощь – инструкция пользователя. Примеры рабочих окон программы с исходными данными и результатами опыта представлены на рисунке 1.

В качестве практического задания пользователю предлагается выполнение одной из следующих лабораторных работ: «Моделирование элементов электрических сетей»; «Выявление закономерностей изменения потерь мощности и напряжения в электрической

сети»; «Выявление влияния емкостных элементов на потери мощности и напряжения в электрической сети».



а)



б)

Рисунок 1 – Рабочие окна программы: а) с исходными данными; б) с результатами опыта

Разработанные программы предлагают простой и удобный стандартный интерфейс, который предусматривает диалоговый режим работы, использование меню и справочных данных. Пользователю представляется не только текстовая, но и графическая информация. Вывод экспериментальных данных производится в форме таблиц, что позволяет студенту легко воспринимать эту информацию, использовать ее для расчетов и составления отчета о проделанной работе.

Студенты имеют возможность индивидуально получить исходные данные, выполнить практическое задание, проведя ряд опытов и получить экспериментальные данные необходимые для дальнейших расчетов, просмотреть все формы, ознакомиться с

информацией о разработчиках, а также с подробной инструкцией пользователя. Удобный интерфейс значительно облегчает работу с программами.

С помощью разработанного программного обеспечения моделируется разомкнутая электрическая сеть, состоящая из источника питания, линии электропередачи (ЛЭП), трансформатора и нагрузки третьей категории по степени надежности электроснабжения, а также включенных устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. На примере данной простейшей электрической сети студенты изучают методы электрического расчета режимов работы, проводят анализ и выявляют основные закономерности изменения потерь мощности и напряжения в сети в зависимости от ее параметров и различных емкостных элементов.

Исходными данными для проектирования данной электрической сети являются параметры нагрузки: полная мощность, ее коэффициент мощности и расстояние от источника питания до нагрузки. По этим данным проектируется электрическая сеть, производится выбор номинального напряжения и оборудования электрической сети: сечения проводов ЛЭП, трансформатора, устройств продольной и поперечной компенсации.

Далее производится точный электрический расчет параметров режимов работы сети, в результате которого получают экспериментальные данные. Электрический расчет производится на основе соответствующих схем замещения элементов электрической сети. Схема замещения ЛЭП представлена в виде П-образной схемы, трансформатора – Г-образной схемы, а нагрузки – параллельного или последовательного соединений активного и реактивного сопротивлений.

На основе полученных экспериментальных данных можно провести анализ зависимостей потерь мощности и напряжения от изменения параметров сети: активного и реактивного сопротивлений нагрузки и ЛЭП, мощности компенсирующих устройств, реактивной мощности, генерируемой ЛЭП, коэффициента мощности нагрузки, а также напряжения источника питания.

Данное программное обеспечение имеет ряд особенностей: позволяет использовать базу данных по оборудованию электрических сетей; эту базу данных можно дополнять в соответствии с современной номенклатурой изделий; использование программ обеспечивает мобильность и общедоступность выполнения лабораторных работ не только в лабораториях, но при самостоятельной работе, ее можно использовать при дистанционном способе обучения; при получении экспериментальных данных отсутствуют погрешности измерений в отличие от выполнения лабораторной работы на стенде; для проведения эксперимента не требуется специальных знаний по работе стенда, не касающихся напрямую предмета исследования; индивидуальность исходных данных для выполнения лабораторной работы каждым студентом; программное обеспечение разработано, исходя из требований модульно-рейтингового обучения, программы содержат не только практические задания, но и теоретический материал, и систему контроля знаний.

В ходе работы авторами обоснована рациональность внедрения компьютерного моделирования электрических сетей в процесс обучения. Пакет программ имеет цель закрепить и систематизировать знания, полученные студентами по дисциплине. Внедрение и широкое использование специализированных учебно-методических программных комплексов является одной из задач информатизации и интенсификации образовательного процесса в высших учебных заведениях. Разработанное программное обеспечение предназначено для использования в учебном процессе студентами специальности «Электроснабжение (по отраслям)» всех форм обучения. Использование данной разработки дает возможность обеспечить качественно новый уровень проведения лабораторных работ, как по содержанию, так и по методике. Это способствует активизации самостоятельной работы студента, учебно-познавательной деятельности, повышает эффективность и качество труда студентов и преподавателей.

# КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ КАК ОСНОВА ПРОГНОЗА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Кобозев Е.В. - аспирант, Грибанов А.А. - к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В настоящее время, в результате спада промышленного производства, снизилась обеспеченность промышленных предприятий электрическим оборудованием, особенно электрическими машинами. Кроме того, техническое обслуживание данного электрооборудования часто проводится несвоевременно, а его ремонт осуществляется не всегда удовлетворительно. Задача повышения эффективности производства не может быть успешно решена без повышения надежности работы электрооборудования и, в частности, электродвигателей, как наиболее распространенного типа электрических машин.

В свою очередь, показатели надежности и безотказности любой электроэнергетической системы, в том числе и столь сложного объекта как асинхронный двигатель, зависят от условий и режимов эксплуатации, а также применяемых методов и средств его технического обслуживания и ремонта. Отказы электродвигателей по их физической природе являются следствием физико-химических процессов, непосредственно или косвенно влияющих на работоспособность элементов и возникновение повреждений, которые определяются: типом используемого материала, местом протекания процесса, видом энергии, определяющей характер процесса, эксплуатационным и ремонтным воздействием, внутренним механизмом процесса.

Отказы технических устройств по их физической природе - следствие физико-химических процессов, непосредственно или косвенно влияющих на работоспособность элементов и возникновение отказов; определяются: типом материала; местом протекания процесса; видом энергии, определяющей характер процесса; эксплуатационным воздействием; внутренним механизмом процесса. С позиций энергоэнтропийной концепции опасности следует выделить три источника воздействия:

- действие энергии окружающей среды, включая человека, выполняющего функции оператора или технического персонала;
- внутренние источники энергии, связанные как с рабочими процессами, протекающими в системе, так и с работой отдельных частей системы;
- потенциальная энергия, которая накоплена в материалах и элементах системы в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливке, монтажные напряжения).

Другими словами, различные виды энергии вызывают в элементах асинхронного двигателя процессы, связанные со сложными физико-химическими явлениями, приводящими к деформации, износу, поломке, коррозии и другим видам повреждений, изменяющих выходные параметры АД. Данные процессы, приводящие к изменению начальных свойств двигателя, протекают в материалах, из которых изготовлены его элементы, а также в смазочных и других материалах, участвующих в рабочем процессе.

Такие свойства изоляционных материалов, как механические, электрические и магнитные существенно зависят от температуры и влажности окружающей среды, механических напряжений, напряженности электрического поля, газовой среды, рассеиваемой мощности, длительности работы и других воздействующих факторов. Причем для многих элементов АД накопление энергии внешних воздействующих факторов является монотонным.

Используя связь между нагрузкой и плотность потока энергии воздействующего фактора, зная время воздействия, можно получить вероятность безотказной работы за это время при данном воздействующем факторе, а также определить значения интенсивности отказов элементов. Полученная оценка вероятности в отличие от обычно применяемых позволяет учесть эффект превалирующих воздействующих факторов с помощью энергетической характеристики воздействия, определяющей количество "внесенной" энергии воздействия, а также допустимые пределы изменения и статистические характеристики элемента, определяющие его способность противостоять воздействующим факторам. Таким образом, в основе прогноза вероятности

безотказной работы асинхронных электродвигателей, помимо прочего, лежит количественная оценка степени влияния как отрицательных, так и положительных воздействующих факторов.

Основными факторами воздействия на изоляцию электрических двигателей внешней среды являются влияние окружающего изоляцию газа (например, воздуха), а также действие влаги, содержащейся в воздухе, газе или попадающей на изоляцию в виде жидкости. Кроме того, возможно абразивное действие пыли, содержащейся в воздухе. Механическим воздействиям изоляция подвергается как во время изготовления и ремонта, так и во время эксплуатации. Уровень механических воздействий с ростом мощности двигателей непрерывно возрастает и увеличивается опасность механического повреждения изоляции.

В свою очередь, воздействия, направленные на восстановление изоляции, складываются из извлечения старой обмотки, укладки новой, ее пропитки и сушки. Существующие методы извлечения обмотки из пазов статора (кроме механического способа) требуют размягчения или разрушения слоя связующего, пропитывающего изоляцию и скрепляющего обмотку с железом статора электродвигателя. Применяемые способы разложения связующего используют механизмы термоокислительной или химической деструкции, которые приводят к значительному снижению к.п.д. двигателей.

В процессе изготовления и ремонта электродвигателей, после укладки в пазы статора, обмотки пропитываются лаком или компаундом с последующей сушкой, при этом происходит заполнение пропитывающим составом воздушных промежутков между проводниками и пазовой изоляцией, а также пор изоляционных материалов с последующей полимеризацией основы лака. В результате, улучшается теплопроводность обмоток за счет уменьшения воздушных прослоек между проводниками и стенками паза сердечника, повышается нагревостойкость, влагостойкость изоляции, электрическая и механическая прочность изоляции.

Однако при любом ремонте электродвигатель подвергается механическим и термическим воздействиям, которые определенным образом нарушают его внутреннюю структуру, что негативным образом влияет на параметры его дальнейшей эксплуатации.

Использование, в данном случае, информационно-логического анализа при малом количестве априорных данных, даст более точные результаты по сравнению с регрессионными методами, которые трудно применять из-за большого множества сочетаний различных факторов, влияющих на вероятность безотказной работы двигателя. Кроме того, информационно-логический анализ позволяет оценить и неучтенные факторы, что делает прогноз более достоверным.

Таким образом, количественная оценка степени влияния как отрицательно, так и положительно воздействующих факторов на изоляцию ЭД, проведенная на основе применения информационно-логического анализа, а также последующий прогноз вероятности безотказной работы электродвигателей позволят спланировать не только сроки и объемы технического обслуживания и ремонта, но и весь жизненный цикл электрических двигателей с момента их поступления до списания, что, в свою очередь, значительно сократит расходы на ТОиР и повысит надежность работы электрооборудования. Более того, данная количественная оценка даст возможность оптимизировать параметры технологического процесса восстановления изоляции статорных обмоток.

#### Список литературы

1 Надежность технических систем и техногенный риск: Электронное учебное пособие. – Режим доступа: [http://oksion.ru/uchebnik\\_nadezhnost\\_tehnicheskikh\\_sistem/index.html](http://oksion.ru/uchebnik_nadezhnost_tehnicheskikh_sistem/index.html). – Загл. с экрана.

## МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Компанеец Б.С., Старухин Р.С. – студенты, Белицын И.В. – к.п.н., доцент  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Для контроля уровня электромагнитной обстановки вокруг электроустановки в нормативных документах [1, 2] заявлены напряженность электрического и магнитного поля. Для двух- и более фазных электроустановок под ними понимается действующие (эффективные) значения напряженностей  $E_{max}$  и  $H_{max}$ , где  $E_{max}$  и  $H_{max}$  - действующие значения напряженностей по большей полуоси эллипса или эллипсоида. Однако в литературе нет аналитических выражений для их определения, поэтому на практике эти значения получают перебором различных значений времени в периоде одного колебания, что нерационально, поэтому задача аналитического расчета полуосей эллиптического электрического (магнитного) поля является актуальной.

В случае если переменное электрическое поле можно рассматривать только в плоскости, например  $xOy$ , что возможно в случае плоскопараллельного электрического поля, напряженность в любой точке можно представить в виде проекций на координатные оси плоскости

$$E_x = A \sin(\omega t + \alpha); \quad (1)$$

$$E_y = B \sin(\omega t + \beta) = B \sin(\omega t + \alpha + \beta - \alpha), \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  амплитудные значения напряженности переменного поля по осям  $x$  и  $y$ .

Уравнения (1) (2) представляют собой параметрическую форму записи уравнения эллипса.

Преобразовав (1, 2) используя формулы сложения, и учитывая основное тригонометрическое тождество, получим

$$\frac{E_y}{B} = \frac{E_x}{A} \cos(\beta - \alpha) + \sqrt{1 - \left(\frac{E_x}{A}\right)^2} \sin(\beta - \alpha).$$

Обозначим  $\beta - \alpha = \gamma$  и преобразуем последнее выражение:

$$\left(\frac{E_x}{A}\right)^2 - 2 \frac{E_x}{A} \frac{E_y}{B} \cos(\gamma) + \left(\frac{E_y}{B}\right)^2 = \sin^2(\gamma). \quad (3)$$

Уравнение (3) является каноническим уравнением эллипса (рис. 1), оси которого произвольно ориентированы относительно координатных осей.

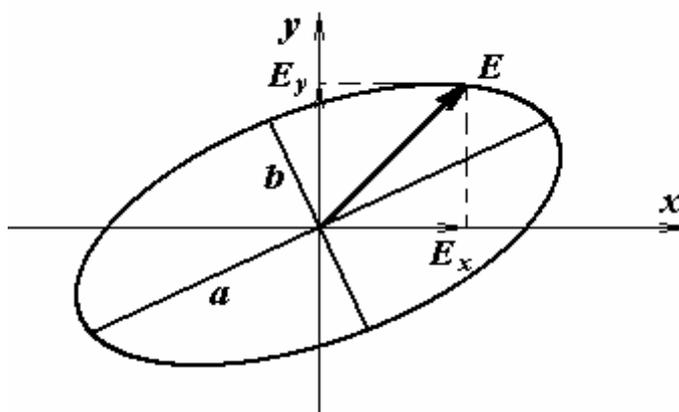


Рисунок 1 - Эллиптическая поляризация электрической волны

Определим большую и малую полуось эллипса. Очевидно, что напряженность в этих направлениях достигает максимального и минимального значения, поэтому для их нахождения достаточно исследовать функцию напряженности электрического поля, или квадрата напряженности на экстремум. Напряженность поля в любой момент времени

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2$$

$$f(t) = E^2 = A^2 \sin^2(wt + \alpha) + B^2 \sin^2(wt + \beta). \quad (4)$$

Найдем первую производную функции:

$$\frac{df}{dt} = w[A^2 2 \sin(wt + \alpha) \cos(wt + \alpha) + B^2 2 \sin(wt + \beta) \cos(wt + \beta)];$$

$$\frac{df}{dt} = w[A^2 \sin(2wt + 2\alpha) + B^2 \sin(2wt + 2\beta)].$$

Используя формулы сложения

$$\frac{df}{dt} = w[A^2(\sin 2wt \cos 2\alpha + \cos 2wt \sin 2\alpha) + B^2(\sin 2wt \cos 2\beta + \cos 2wt \sin 2\beta)].$$

Определим аргумент, при котором функция достигает экстремальных значений, для этого приравняем производную к нулю,  $\frac{df}{dt} = 0$

$$A^2(\sin 2wt \cos 2\alpha + \cos 2wt \sin 2\alpha) + B^2(\sin 2wt \cos 2\beta + \cos 2wt \sin 2\beta) = 0.$$

Сделаем замену  $\cos 2wt = \sqrt{1 - \sin^2 2wt}$  и  $\sin 2wt = x$ , получим

$$\frac{df}{dt} = w[A^2(x \cos 2\alpha + \sqrt{1 - x^2} \sin 2\alpha) + B^2(x \cos 2\beta + \sqrt{1 - x^2} \sin 2\beta)].$$

Определим  $x$  при которых функция достигает экстремальных значений, для этого приравняем производную к нулю,  $\frac{df}{dt} = 0$ .

$$\begin{aligned} A^2(x \cos 2\alpha + \sqrt{1 - x^2} \sin 2\alpha) + B^2(x \cos 2\beta + \sqrt{1 - x^2} \sin 2\beta) &= 0; \\ A^2 x \cos 2\alpha + A^2 \sqrt{1 - x^2} \sin 2\alpha + B^2 x \cos 2\beta + B^2 \sqrt{1 - x^2} \sin 2\beta &= 0; \\ x(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta) + \sqrt{1 - x^2}(A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta) &= 0; \\ x^2(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta)^2 = 1 - x^2(A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2 &= 0; \end{aligned}$$

$$\frac{1 - x^2}{x^2} = \frac{1}{x^2} - 1 = \frac{(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta)^2}{(A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2};$$

$$\frac{1}{x^2} = \frac{(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta)^2 + (A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2}{(A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2};$$

$$x = \pm \frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta}{\sqrt{(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta)^2 + (A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2}} = C;$$

Обозначим  $\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta}{\sqrt{(A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta)^2 + (A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta)^2}} = C$ . (5)

Тогда  $\sin 2wt = \pm C$ , решая это простейшее уравнение, получим:

$$wt = \pm \frac{1}{2} \arcsin(C) \quad (6)$$

Можно получить другое решение путем выражения  $\sin wt$  и  $\cos wt$  через  $\operatorname{tg} wt$ :

$$\sin(2wt) = \pm \frac{\operatorname{tg}(2wt)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}} \quad \cos(2wt) = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}};$$

$$\begin{aligned} A^2 \left( \frac{\operatorname{tg}(2wt)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}} \cos 2\alpha + \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}} \sin 2\alpha \right) + \\ + B^2 \left( \frac{\operatorname{tg}(2wt)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}} \cos 2\beta + \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(2wt)}} \sin 2\beta \right) = 0 \end{aligned}$$

$$A^2 \operatorname{tg}(2\omega t) \cos 2\alpha + A^2 \sin 2\alpha + B^2 \operatorname{tg}(2\omega t) \cos 2\beta + B^2 \sin 2\beta = 0 ;$$

$$\operatorname{tg}(2\omega t) (A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta) = -A^2 \sin 2\alpha - B^2 \sin 2\beta .$$

Сделаем замену  $\operatorname{tg}(2\omega t) = x$ , получим

$$x = -\frac{A^2 \sin 2\alpha + B^2 \sin 2\beta}{A^2 \cos 2\alpha + B^2 \cos 2\beta} = C_1. \quad (7)$$

Тогда  $\operatorname{tg} 2\omega t = C_1$ , решая это простейшее уравнение, получим

$$\omega t = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}(C_1). \quad (8)$$

Следовательно, после таких замен остается только одно решение для минимума или максимума, в зависимости от начальных фаз колебаний  $\alpha$  и  $\beta$ .

Полученные решения позволяют определить угол  $\omega t$  при котором функция напряженности электрического поля (4) достигает либо минимума или максимума, дополнительный минимум или максимум  $\omega t$  определяется путем добавления  $\pi/2$  к поскольку минимум и максимум у эллипса смещены друг относительно друга на 90 градусов (рис.1). Полученные решения (6) и (8) позволяют аналитически определить параметры ЭМП регламентированные нормативными документами на стадии проектирования электроустановок. Такое решение не может считаться полностью аналитическим, поскольку оно не указывает сразу на оба решения.

#### Список литературы

1 ССБТ. "Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах". ГОСТ 12.1.002-84.

2 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191-03.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Бакулин С. А., Гилев А. А., Гревцов Д. А, Колегаев С. А. – студенты,  
Рыбаков В. А. – старший преподаватель

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

Актуальным для любого предприятия является безотказная работа установленных электродвигателей и, соответственно, бесперебойность технологического процесса. Для разрешения данной задачи необходимо их качественное техническое обслуживание в процессе эксплуатации и проведение ремонтных работ высококвалифицированным персоналом с учётом всех требований существующих технологий ремонта.

Отсутствие качественного и своевременного ремонта и научной организации эксплуатации электрических машин является причиной того, что не в полной мере обеспечивается бесперебойная работа производственных механизмов в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте, это не позволяет сократить ежегодную потребность народного хозяйства страны в новых электрических машинах. Таким образом, очевидна рациональность повышения экономической эффективности использования и ремонта электрических машин.

Проблема качественного ремонта и эксплуатации становится ясной, если учесть, что в промышленности на долю асинхронных электродвигателей приходится более 60 % всей энергетической мощности. Вследствие эксплуатации двигателя периодически выходят из строя, если вовремя не вывести их в ремонт, то это может привести к авариям на производстве и массовому недовыпуску продукции а соответственно к финансовым затратам. После проведения ремонтных работ срок его службы меньше времени, которое двигатель выработал до выхода из строя. Чтобы качественно изменить данную ситуацию и

продлить срок службы двигателей было решено подробно провести анализ данной проблемы.

Основную часть электрических машин ремонтируют сами потребители, причем ремонт ведется по упрощенной технологии, с низкой производительностью труда и высокой себестоимостью. На сегодняшний день после трёх-четырёх ремонтов двигатель выходит из строя и дальнейшему ремонту не подлежит, т. к. полностью приходит в негодность листовая сталь сердечника статора из-за её деформации.

Согласно использованной технологии ремонта асинхронных электрических двигателей, применяем следующие этапы: деструкция связующего, укладка новой обмотки в пазы, сушка до пропитки, пропитка обмотки специальным диэлектрическим составом, сушка после пропитки.

Из всех этапов малоизученным является деструкция и её влияние на дальнейшую работу электродвигателя. При извлечении обмотки двигателя из сердечника сталь статора получает повреждения, которые значительно сокращают срок службы асинхронного двигателя.

Проанализировав периодическую литературу за последние 5 лет в данной области, а также существующую литературу (справочные и учебные материалы) было обнаружено, что в них упоминается о существовании проблемы остаточных повреждений после ремонта, но не определяется их глубина. Таким образом, исследование объёмов остаточных повреждений является актуальной задачей.

Целью данной научной работы является совершенствование существующих методов деструкции связующего для уменьшения повреждений в стали статора и тем самым увеличения срока службы АД.

Объектом исследования являются процессы разрушения стали, протекающие в статоре при различных методах деструкции.

Предмет исследования состоит в определении остаточных повреждений в стали сердечника статора АД при деструкции его обмотки при различных температурах и типов лака.

Задачами исследования является:

- проанализировать ситуацию, сложившуюся в области поддержания и восстановления работоспособности асинхронных двигателей в процессе их эксплуатации и ремонта;
  - исследовать статистику разрушения листов стали и связанных с этим убытков на предприятиях сельхозпроизводителей;
  - экспериментально и теоретически исследовать процесс разрушения с целью выявления наилучших параметров протекания процесса извлечения обмотки статора АД;
  - провести анализ существующих методов деструкции АД;
  - разработать инженерную методику практического применения усовершенствованных (улучшенных) методов извлечения обмотки из паза статора;
  - обосновать экономическую эффективность использования полученных рекомендаций;
- Научная новизна:
- определена склеивающая способность лака между пластинами статора;
  - разработана методика анализа остаточных повреждений в стали асинхронных двигателей;
  - определено влияние остаточных повреждений на дальнейший срок службы АД.

Данный способ анализа величины остаточных повреждений стали статора электродвигателя позволяет определить целостность лака между пластинами, подверженных деформации. Следствием чего являются блуждающие токи, повышение температуры, снижение КПД и коэффициента реактивной мощности электродвигателей, возрастает потребление мощности. Следовательно, есть возможность своевременно определить необходимость следующего ремонта, что в свою очередь продлит срок службы ЭД и снизит материальные затраты.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ И РЕМОНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Бараков А.Н., Мартко Е.О. – студенты, Рыбаков В.А. – старший преподаватель  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул)

В процессе эксплуатации электрооборудование теряет свои первоначальные свойства. Происходит непрерывное изменение исходных технико-экономических и эксплуатационных характеристик вследствие нарастающего износа, что приводит к простоям, которые нарушают производственный ритм и резко ухудшают экономические показатели предприятий.

Практика свидетельствует о том, что бесперебойная работа и надлежащее техническое состояние оборудования при максимально выгодных трудовых, финансовых и материальных затратах обеспечиваются рациональной организацией технического обслуживания и ремонта.

Анализ ситуации, сложившейся на сегодняшний день, показывает, что разработанная ранее Единая система планово-предупредительных ремонтов (ЕСППР), существование которой до 1991 года определяло контроль за техническим состоянием и ремонтом оборудования, не применима в условиях свободных рыночных отношений, существующих в настоящее время в связи с разукрупнением предприятий (в том числе до фермерских хозяйств) инвестиции со стороны государства не сопоставимы с уровнем инвестиций до 1991 года, оборотные фонды хозяйств малы, за счет высокой стоимости горючесмазочных материалов, электроэнергии и низкой цены на сельскохозяйственную продукцию. ЕСППР в свою очередь жестко предписывает периодичность и качество ремонтных мероприятий, что приводит к высокой степени стандартизации созданных с ее помощью ремонтных графиков. Четкое следование данным графикам требует регулирования высокого уровня финансового положения хозяйств агропромышленного комплекса (АПК), а возможность их коррекции для каждого предприятия системой не предусмотрено.

Таким образом, все выше сказанное является доказательством того, что выбранная нами тема является актуальной на сегодняшний день.

В ходе многочисленных исследований, проведенных как за рубежом, так и в нашей стране, было выработано множество теоретических подходов к управлению системами массового обслуживания. Данные методы, в своем развитии, прошли длинный путь от использования простейших эмпирических формул, до применения математического аппарата теории случайных функций и разработки дорогостоящих программных продуктов, осуществляющих планирование.

Методы планирования ремонтов развивались вслед за развитием математической теории массового обслуживания, основные положения которой изложены в работах Пуассона Н.В и Эрланга А.К.

Были также предложены следующие методы:

– организация обменного фонда электрических машин [4];

Данный метод является трудоемким, при изменении какого-либо из параметров обменного фонда, приходится обновлять базы данных, пересчитывать все параметры. Прогнозирование не точное, вследствие чего возможны потери от простоя электрооборудования. Для внедрения данной методики в АПК требуется наличие высококвалифицированных рабочих широкого профиля. В данный момент молодые специалисты всеми способами стараются отклониться от работы на селе по многим причинам, в частности из-за низкого уровня оплаты труда.

– внедрение индустриальных методов ремонта (1985 – 1987), осуществленный путем применения системы типовых директивных технологических процессов, впервые успешно примененный на Харьковском заводе транспортного машиностроения имени Малышева [1];

Методика не применима к сельскому хозяйству, так как требуемые компоненты для ремонта поставляются с завода изготовителя, следовательно, в сегодняшних условиях свободных рыночных отношений их себестоимость возрастет в разы. В настоящее время нехватка

денежных средств и скудное финансирование АПК не позволит осуществлять закупку запасных частей по полученной в связи с доставкой себестоимости.

– создание и эксплуатация гибких автоматизированных производств (1985 – 1987) [3].

В данной системе все ее элементы являются тесно взаимосвязанными, как, например, конвейер: несколько роботов сваривает детали поочередно в заданной части. Использование до 90-х годов гибких автоматизированных производств, безусловно, эффективно. Их уязвимая сторона: выход из строя одного агрегата, как правило, приводит к отказу автоматизированного производства в целом. Обеспечение их безотказной работы и высокого качества продукции – острейшая проблема повышения надежности техники.

Показатели действительного состояния объекта и его работоспособности в некоторый момент времени несут, главным образом, информацию о функционировании объекта в прошлом и не позволяют говорить о поведении объекта в предстоящий период эксплуатации.

Дополнение системы ППР диагностическим методом контроля за состоянием энергооборудования и сетей позволит получить существенную экономию рабочей силы, материалов и денежных средств и т.д. [5].

В настоящее время основным направлением в диагностике электрических машин является вибродиагностика. Методы вибродиагностики позволяют получить подробную информацию о техническом состоянии объекта и основываются на анализе временных и спектральных характеристик вибраций.

В нашем случае метод вибродиагностики является наиболее приемлемым, поскольку он позволяет без вмешательства в производственный процесс, провести диагностирование двигателя. Вследствие чего можно определить вероятность отказа и последующего ремонта электрооборудования, следовательно рассчитать все возможные убытки и затраты.

На основе теории массового обслуживания нами были определены следующие критерии работы ремонтных организаций [2], позволяющие оценить эффективность обслуживания:

- предельные вероятности состояний системы  $p_0 \dots p_n$ ;
- вероятность того, что заявка окажется в очереди  $p_{оч}$ ;
- среднее число занятых каналов  $k$ ;
- среднее число заявок в очереди  $L_{оч}$ ;
- среднее число заявок в системе  $L_{сист}$ ;
- среднее время пребывания заявки в системе  $T_{сист}$ ;
- среднее время пребывания заявки в очереди  $T_{оч}$ .

В процессе работы для расчёта определённых выше критериев оптимальности нами была разработана математическая модель процесса ремонта электродвигателей АПК.

Математическая модель состоит из варьируемого числа обслуживающих единиц, которые называются каналами обслуживания. В качестве «каналов» в нашем случае фигурируют рабочие места, обслуживающие неисправные электродвигатели. Системы массового обслуживания могут быть одноканальными или многоканальными. В нашей модели используются оба случая.

Для облегчения математического анализа работы СМО, мы приняли случайный процесс, протекающий в системе, марковским. Граф состояний приведен на рисунке 1. У каждой стрелки проставлены соответствующие интенсивности потоков событий. Действительно, по стрелкам слева направо систему переводит всегда один и тот же поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ ; по стрелкам справа налево систему переводит поток обслуживаний, интенсивность которого равна  $\mu$ , умноженному на число занятых каналов.

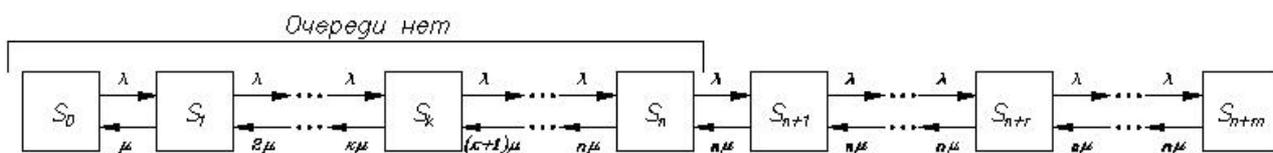


Рисунок 1 – Граф состояний

Таким образом, удалось сравнительно просто описать работу СМО с помощью аппарата обыкновенных дифференциальных уравнений и выразить в явном виде основные характеристики эффективности обслуживания через параметры СМО потока неисправных электродвигателей.

На основе созданной модели, с учётом статей затрат была получена функция оптимизации.

$$\Phi = n \cdot C_0 + C_1 \cdot \left( \frac{\rho^{n+1}}{n \cdot n!} p_0 \cdot \frac{1 - (m+1)\chi^m + m\chi^{m+1}}{(1-\chi)^2} + \rho \left( 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} p_0 \right) \right) + C_2 \cdot \left( \frac{\rho^n p_0}{n \mu n!} \cdot \frac{1 - (m+1)\chi^m + m\chi^{m+1}}{(1-\chi)^2} + \frac{1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} p_0}{\mu} \right)$$

где  $C_0$  – заработная плата ремонтного персонала, зависящая от квалификации, руб.;

$C_1$  – затраты на ремонт двигателя, руб.;

$C_2$  – убытки от простоя двигателя, руб./сутки;

$m$  – число мест в очереди;

$n$  – число каналов.

Задав предварительно начальные условия: интенсивность поступления электродвигателей, требующих ремонта, квалификацию ремонтного персонала и ряд других параметров, различных для каждого типа электродвигателя, определить в виде графических зависимостей (на рисунке 2 представлен один из графиков) наилучшее, с экономической точки зрения, соотношение суммарных затрат в виде денежных средств на ремонт электродвигателей по отношению к квалификации рабочих и их необходимого количества, степень занятости рабочего времени персонала ремонтной организации, время нахождения электродвигателя в ремонте.

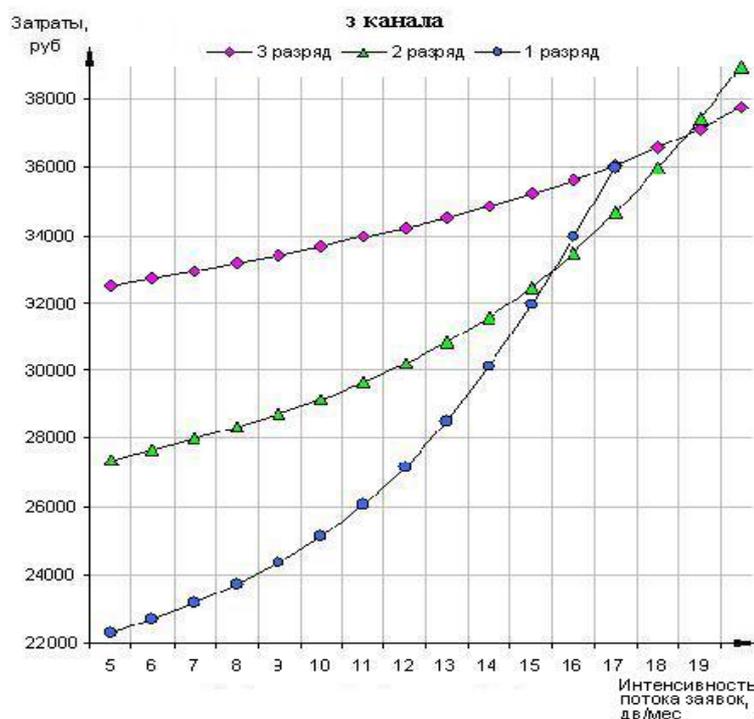


Рисунок 2 – График зависимости затрат на ремонт двигателей от интенсивности потока заявок

В настоящее время нами разрабатывается компьютерная программа, которая позволит при данном значении интенсивности потока неисправных электродвигателей определять минимальные значения затрат на ремонт электродвигателя.

#### Список литературы

1. Борисов Ю.С. Организация ремонта и технологического обслуживания оборудования. М.: Машиностроение, 1978. – 359 с.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
3. Ерохин Н.И., Хохлачев Ю.К. Задачи ремонтного производства в условиях развития энергетического машиностроения // Энергомашиностроение. 1986. №9.
4. Кудрин Б.И. Организация электроремонта на промышленных предприятиях в современных условиях. 2003.
5. Синягин Н.Н., Афанасьев Н.А., Новиков С.А. Система планово предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.