

На правах рукописи



ГЛАЗЫРИНА ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ПОТРЕБЛЯЕМЫХ ТОКОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Полищук Владимир Иосифович**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Ещин Евгений Константинович**
доктор технических наук, профессор,
Кузбасский государственный технический
университет им. Т.Ф. Горбачева, профессор
кафедры прикладных информационных
технологий

Терехин Вячеслав Борисович
кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», Северский
технологический институт, доцент кафедры
электроники и автоматики физических
установок

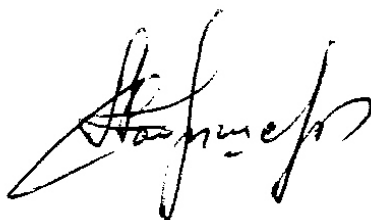
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
федеральный университет» (СФУ)

Защита состоится «12» декабря 2012 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «9» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На электрических станциях России и мира в приводах механизмов собственных нужд в основном применяется асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Надежная работа механизмов собственных нужд является одним из основополагающих факторов безостановочной работы электрической станции в целом.

Высоковольтные короткозамкнутые АД на электрических станциях работают в тяжелых условиях пуска, как следствие эти двигатели имеют высокие значения отказов, и одним из слабых узлов у них является обмотка ротора.

Согласно основным положениям стратегии развития электроэнергетики России на период до 2020 г. предполагается увеличение угольных электростанций страны, при этом увеличится коэффициент использования АД с тяжелыми условиями пуска, что снижает надежность как самой машины, так и обмотки ротора в частности. Наиболее распространенным повреждением «беличьей клетки» является обрыв ее стержней, что составляет более 80 % всех повреждений обмотки ротора. В тоже время ущерб при эксплуатации АД с несимметричной обмоткой ротора выражается в повышенном расходе электроэнергии. При этом, стоимость перерасхода электроэнергии за год работы АД с дефектом в обмотке ротора нередко превышает его стоимость.

В настоящее время повреждения обмотки ротора выявляются в основном в период капитальных ремонтов. Большая периодичность ремонтов не позволяет своевременно определить дефекты обмотки ротора, что часто приводит к работе АД с оборванными стержнями и другими дефектами. При эксплуатации таких АД возрастают потребляемая мощность и вибрация, что сказывается на продолжительности работы подшипников и тепловом режиме работы машины.

Существующие на сегодняшний день методы функционального контроля не нашли широкого применения на АД собственных нужд станций, поскольку разработанные устройства обладают низкой чувствительностью к обрыву одного стержня и при этом не имеют четких диагностических критериев дефекта.

Поэтому разработка методов и устройств функциональной диагностики состояния обмоток ротора мощных АД является актуальной задачей.

Объектом исследования является электрооборудование электростанций, в состав собственных нужд которых входят высоковольтные АД.

Предметом исследования является диагностика повреждений короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных АД собственных нужд тепловых электрических станций.

Идея работы заключается в повышении эффективности эксплуатации АД электростанций за счет внедрения системы функциональной диагностики обмотки ротора.

Цель работы заключается в разработке интеллектуальной системы функциональной диагностики короткозамкнутой обмотки ротора АД на основе вейвлет-разложения модуля результирующего вектора токов статора.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработка методики математического моделирования АД с короткозамкнутым ротором для расчета токов в его обмотках при обрыве стержней «беличьей клетки»;

- обоснование способа определения дефектов короткозамкнутой обмотки ротора, основанного на кратномасштабном вейвлет-анализе токов статора АД;

- разработка способов и алгоритмов для определения величины скольжения АД на основе спектрального анализа токов статора;
- разработка алгоритмов и прикладных программ, реализующих устройства функциональной диагностики повреждений «беличьей клетки» ротора АД на базе штатных измерительных средств.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись методы теории электрических машин, дифференциальных и интегральных исчислений, гармонического анализа, вейвлет-преобразований и нечеткой логики. Исследования проводились в программных средах Matlab/Simulink и Mathcad.

Научная новизна:

- разработана математическая модель АД с короткозамкнутым ротором, дающая возможность рассчитывать токи в обмотках ротора и статора практически во всех эксплуатационных режимах при повреждениях «беличьей клетки» с точностью, достаточной для реализации систем функциональной диагностики;
- теоретически обоснованы диагностические признаки повреждений «беличьей клетки» ротора, основанные на кратномасштабном вейвлет-анализе токов статора АД;
- развита методика определения скольжения ротора по компонентам спектрального анализа токов статора;
- обоснован критерий перехода короткозамкнутой обмотки АД из исправного состояния в неработоспособное.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование построения систем функциональной диагностики «беличьей клетки» ротора АД;
- диагностические признаки определения дефектов обмотки ротора;
- методики определения скольжения ротора и частоты тока в обмотке ротора;
- математическая модель АД с короткозамкнутым ротором, позволяющая рассчитывать токи ротора и статора во всех эксплуатационных режимах при повреждениях «беличьей клетки».

Практическая значимость диссертации заключается в следующем:

- получено комплексное решение, позволяющее организовать систему функциональной диагностики короткозамкнутой обмотки ротора АД на основе обработки массивов мгновенных значений токов статора;
- разработаны алгоритмы определения скольжения ротора на основе штатных измерительных средств
- разработана процедура настройки контроллера на основе нечеткой логики для функциональной диагностики состояния ротора АД.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: корректным использованием фундаментальных положений теоретических основ электротехники, математического анализа, теории электрических машин, планированием и проведением натурного эксперимента.

Реализация результатов работы. Разработанные в диссертации научные положения внедрены в: ООО «Мехатроника–Софт», в учебном процессе на кафедре «Электрические сети и электротехника» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы выносимой на защиту докладывались и обсуждались на: XV, XVI и XVII международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (г. Томск, 4–8 мая 2009 г., 12–16 апреля 2010 г., 18–22 апреля 2011 г.); IV Международной научно-технической

конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 13–16 октября 2009 г.); Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 28–29 апреля 2010 г.); Отраслевой научно-технической конференции «Технология автоматизации атомной энергетики и промышленности» (г. Северск, 17–21 мая 2010 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г. Томск, 25–28 мая 2010 г.); IV Международной научно-технической конференции «IV чтения Ш. Шокина» (г. Павлодар, 14–16 ноября 2010 г.); Отраслевой научно - технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности» (г. Северск, 16–20 мая 2011 г.).

Публикации. Результаты выполненных исследований изложены в 22 научных трудах, в том числе: 4 статьях в периодических изданиях по перечню ВАК РФ («Электричество», «Известия ВУЗов. Электромеханика», «Известие Томского политехнического университета», «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока»), 9 патентах на изобретения и полезную модель РФ, 9 статьях в материалах конференций.

Личный вклад. Решения задач исследования, научные положения, вынесенные на защиту, основные выводы и рекомендации принадлежат автору. В [1] автором предложен и исследован информативный признак повреждения обмотки ротора АД на основе вейвлет-разложения результирующего модуля тока статора и обоснован интегральный критерий аварийного состояния обрыва стержня ротора. В [2, 6-13] автором определена взаимосвязь между гармоническим составом тока статора, частотой тока ротора и величиной скольжения. В [3] автор проработал вопрос чувствительности интеллектуальной диагностической системы к воздействию сильных импульсных помех. В [4] автор предложил методику настройки нечеткой экспертной базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 120 страницах машинописного текста. Содержит 43 рисунка, 8 таблиц, список использованных источников из 102 наименований и 2 приложения на 2 страницах, в которых изложены материалы, относящиеся к практической реализации.

Основное содержание работы.

Во введении обоснованы актуальность и цель работы. Отражена ее научная новизна и практическая ценность. Указаны методы исследований и положения, выносимые на защиту. Сделан вывод о необходимости разработки методов и устройств функциональной диагностики состояния обмоток ротора мощных АД.

В первом разделе рассмотрены особенности конструкции роторов АД, а также причины и механизм повреждения их обмоток. Сделан анализ известных технических решений. Выяснено, что на сегодняшний день не существует простых и чувствительных функциональных диагностических признаков, которые удовлетворяли бы всем требованиям, предъявляемым к системам диагностики внутренних повреждений высоковольтных АД. Определены наиболее перспективные пути решения задачи построения функциональной диагностики короткозамкнутой обмотки роторов высоковольтных АД.

Второй раздел посвящен созданию методики математического описания динамических режимов АД на основе системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши для m -фазной системы координат при несимметрии роторных цепей.

Для нахождения токов двигателя при заданных начальных условиях решается

система дифференциальных уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа для каждой фазы двигателя рис. 1. Уравнение для фазных обмоток статора:

$$U_{s1} = R_s i_{s1} + \frac{d\Psi_{s1}}{dt};$$

$$U_{s2} = R_s i_{s2} + \frac{d\Psi_{s2}}{dt};$$

.....

$$U_{sm} = R_s i_{sm} + \frac{d\Psi_{sm}}{dt}.$$

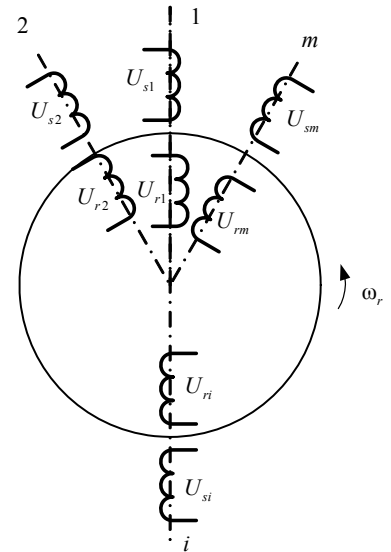
Уравнения для фазных обмоток ротора:

$$0 = R_r i_{r1} + \frac{d\Psi_{r1}}{dt};$$

$$0 = R_r i_{r2} + \frac{d\Psi_{r2}}{dt};$$

.....

$$0 = R_r i_{rm} + \frac{d\Psi_{rm}}{dt},$$



где индексы $s1, s2, \dots, sm$ соответствуют обмоткам статора, индексы $r1, r2, \dots, rm$ соответствуют обмоткам ротора; m - количество фаз АД, равное количеству стержней $m = z_2$.

Для решения системы дифференциальных уравнений численными методами ее приводят к нормальной форме Коши.

Рис. 1. Пространственная модель АД в m – фазной системе координат

Электрическая часть АД описывается в соответствии со вторым законом Кирхгофа и в матричном виде в форме Коши:

$$\frac{d[\Psi]}{dt} = [U] - [R][I],$$

где $[\Psi]$ – вектор потокосцеплений; $[R]$ – матрица сопротивлений; $[U]$ – вектор напряжений; $[I]$ – вектор токов.

Токи определяются по закону Ампера:

$$[I] = [L]^{-1}[\Psi],$$

где $[L]$ – матрица индуктивностей состоящая из матрицы индуктивностей ротора; матрицы взаимных индуктивностей между фазами ротора, матрицы взаимных индуктивностей между статором и ротором.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, может быть определен из токов статора и ротора:

$$M_e = \frac{3}{n} z_p [I_s]^T \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_e} [I_r],$$

где n – синхронная скорость вращения.

Моделирование обрыва стержня обмотки ротора осуществляется введением высокоомного добавочного сопротивления в матрицу сопротивлений.

Имитационная модель АД представлена на рис. 2.

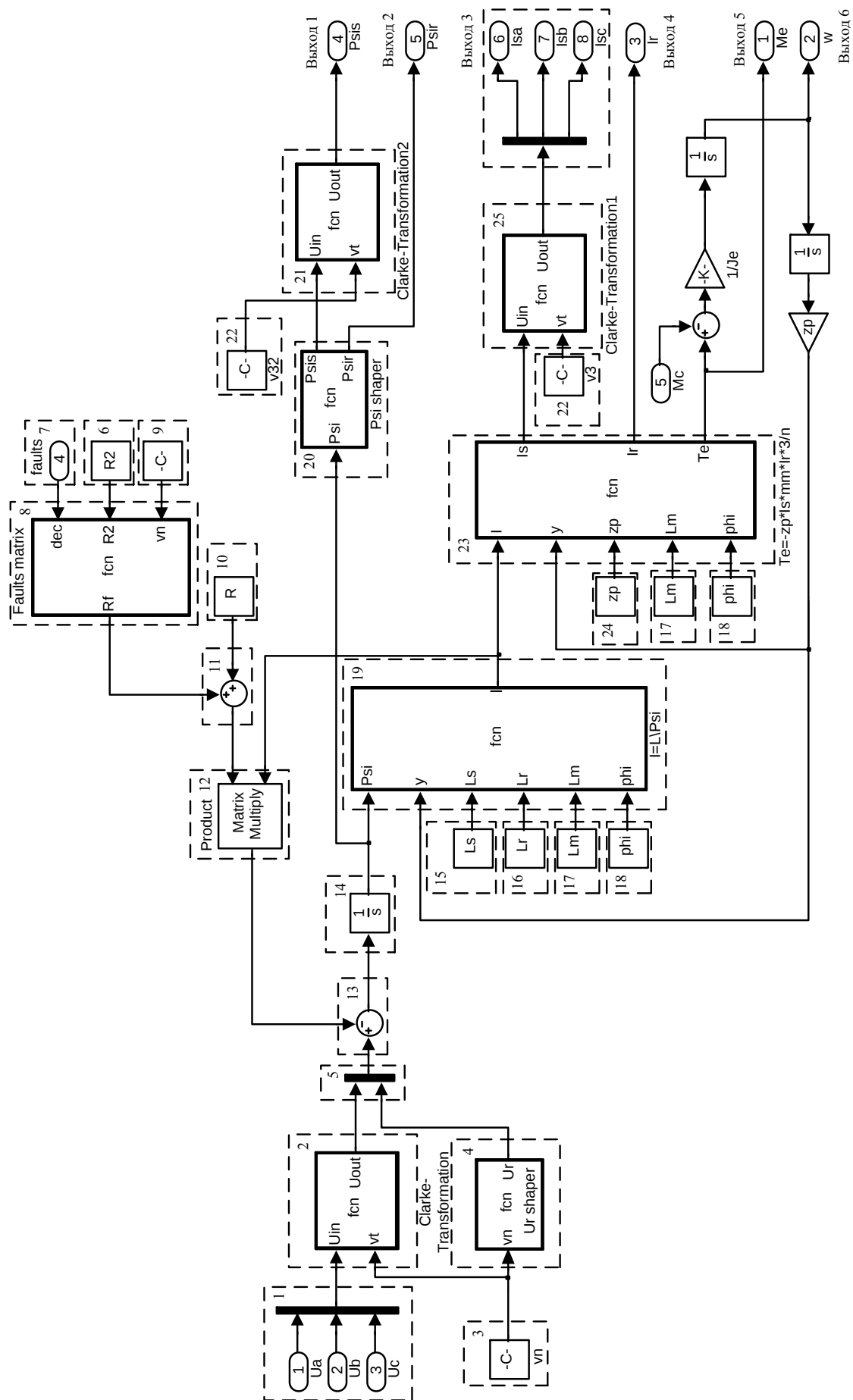


Рис. 2. Схема имитационной модели асинхронного двигателя с повреждениями стержней ротора

Сравнение результатов эксперимента и математического моделирования

показало, что погрешность при моделировании пуска не превышает 15 %, а в нормально нагруженном режиме при обрыве одного стержня «беличьей клетки» находится на уровне 7-10 %. Это вполне удовлетворяет требованиям к адекватности математического моделирования при разработке устройств функциональной диагностики АД.

При проведении исследования скольжение определялось на основе известного отношения

$$s_1 = f_{p1} / f_c$$

где s_1 – скольжение, f_{p1} – частота тока в роторе. Поскольку непосредственно измерить частоту тока в короткозамкнутом роторе невозможно, то для ее определения применялся гармонический анализ токов статора.

Угловая скорость вращения ротора и скольжение определялись по спектральному составу тока (токов) в обмотке (обмотках) статора. Известен эффект модуляции тока статора вращающимся магнитным полем ротора. Согласно теории амплитудной модуляции в токе статора появляются спектральные составляющие, как гармониками от частоты питающей сети f_c , так и с частотами верхних f_b и нижних f_n боковых полос. Приоритет автора на разработанный метод идентификации скорости вращения и скольжения закреплен патентами Российской Федерации [6-13].

Было обосновано наличие определенной связи между частотой f_p и частотой одной из составляющих тока статора. Исследования проведены на компьютеризированном лабораторном электромеханическом стенде рис. 3.

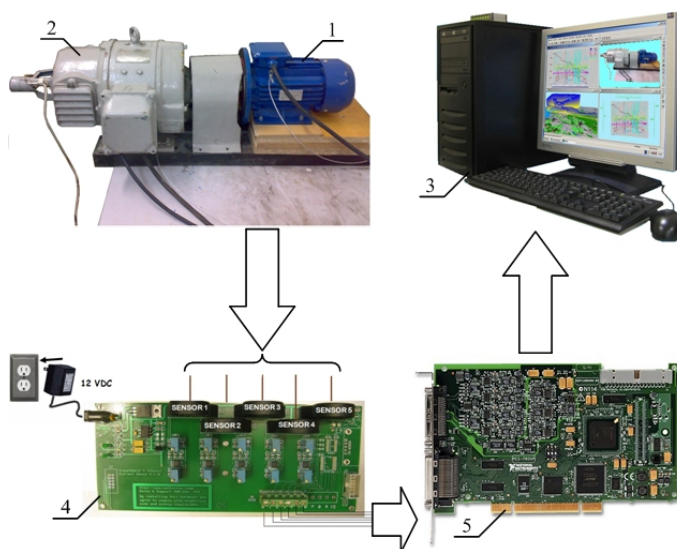


Рис. 3. Экспериментальная установка

1 – АД; 2 – машина постоянного тока; 3 – компьютер; 4 – коннектор; 5 – плата ввода/вывода

В третьем разделе теоретически обоснована необходимость применения вейвлет-преобразования для выявления диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки АД. Повреждение стержня ротора вызывает перераспределение токов в целых стержнях. Расчеты токов в стержнях «беличьей клетки» при обрыве стержня показывают, что существенное увеличение тока происходит в стержнях, ближайших к оборванному. Искажение симметрии распределения токов в «беличьей клетки» вызывает характерные пульсации магнитного потока, пронизывающего статорные обмотки, что должно вызывать модуляцию в токах фаз статора.

В разделе показано, что вейвлет-анализ является одним из оптимальных математических инструментов, способных исследовать нестационарные процессы, которые характерны для работы АД с наличием повреждения в стержне короткозамкнутого ротора.

Выявлено, что амплитудная модуляция тока фазы статора, вызванная обрывом одного стержня незначительна по сравнению с амплитудой тока фазы, более информативным является анализ результирующего модуля вектора токов статора.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований по определению диагностического признака повреждения «беличьей клетки» ротора АД, разработан алгоритм работы системы функциональной диагностики, обоснован интегральный критерий аварийного состояния обрыва стержня ротора, приведен принцип построения диагностики на базе контроллера с использованием нечеткой логики.

Результаты разложения на составляющие осциллограмм обобщенного вектора тока статора приведены на рис. 4 и 5.

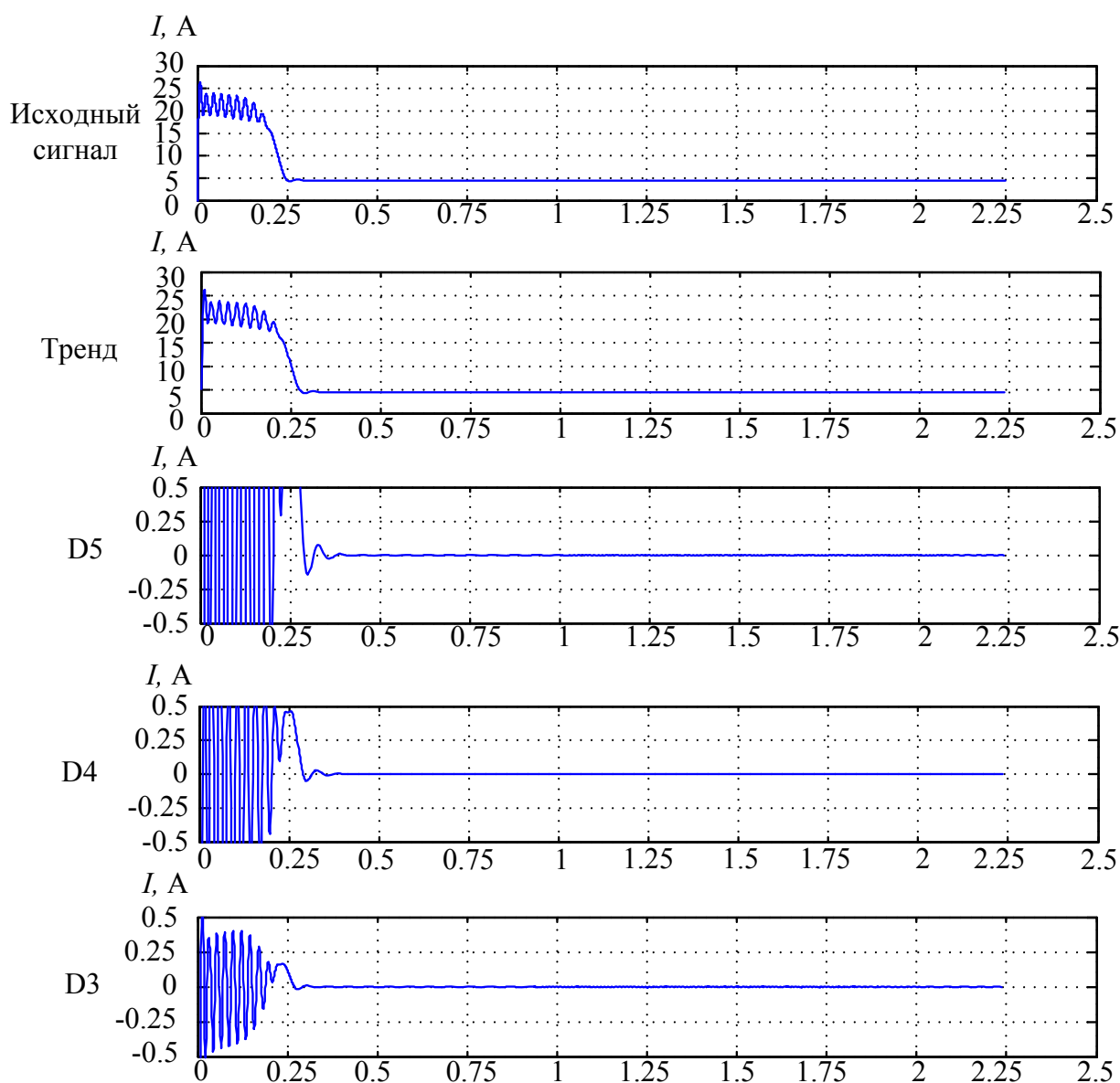


Рис 4. Осциллограмма модуля обобщенного вектора тока статора пуска исправного АД и разложение ее на составляющие

На данных рисунках изображены графики составляющих сигнала,

восстановленных из коэффициентов декомпозиции уровней D3 – D5, а так же исходный сигнал и тренд сигнала, полученный вычитанием из исходного сигнала составляющих, восстановленных по коэффициентам разложения D3 – D5. Проведен анализ отдельных составляющих модуля обобщенного вектора тока статора при обрыве различного числа стержней. На рис. 4. представлено разложение модуля результирующего вектора тока статора неповрежденного АД. Все коэффициенты детализации имеют колебания только в период переходного процесса АД в момент его пуска. С окончанием переходного процесса, затухают и колебания кривых восстановленных из детализирующих коэффициентов.

Из осциллограмм на рис. 5 и 6 видно, что при появлении обрыва одного стержня не значительно повышается амплитуда на уровнях декомпозиции D3, причем увеличение числа оборванных стержней не ведет к дальнейшему увеличению амплитуды данных колебаний. Это вызвано тем, что токи в пазах статорной обмотки и в стержнях ротора стремятся к тому, чтобы создаваемые ими магнитные поля были направлены встречно и компенсировали друг друга.

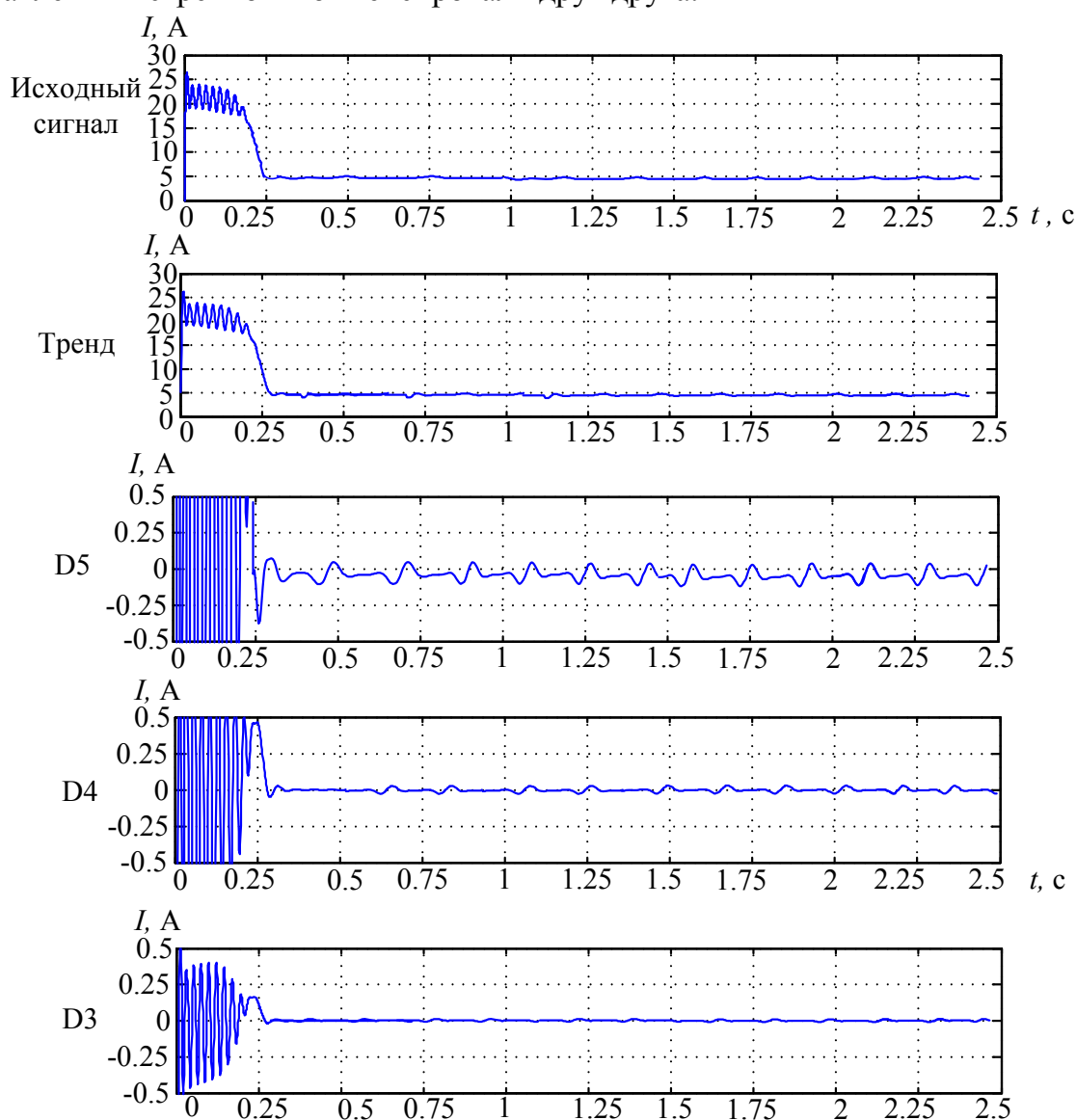


Рис. 5. Осциллограмма модуля обобщенного вектора тока статора пуска АД при обрыве одного стержня ротора и разложение ее на составляющие

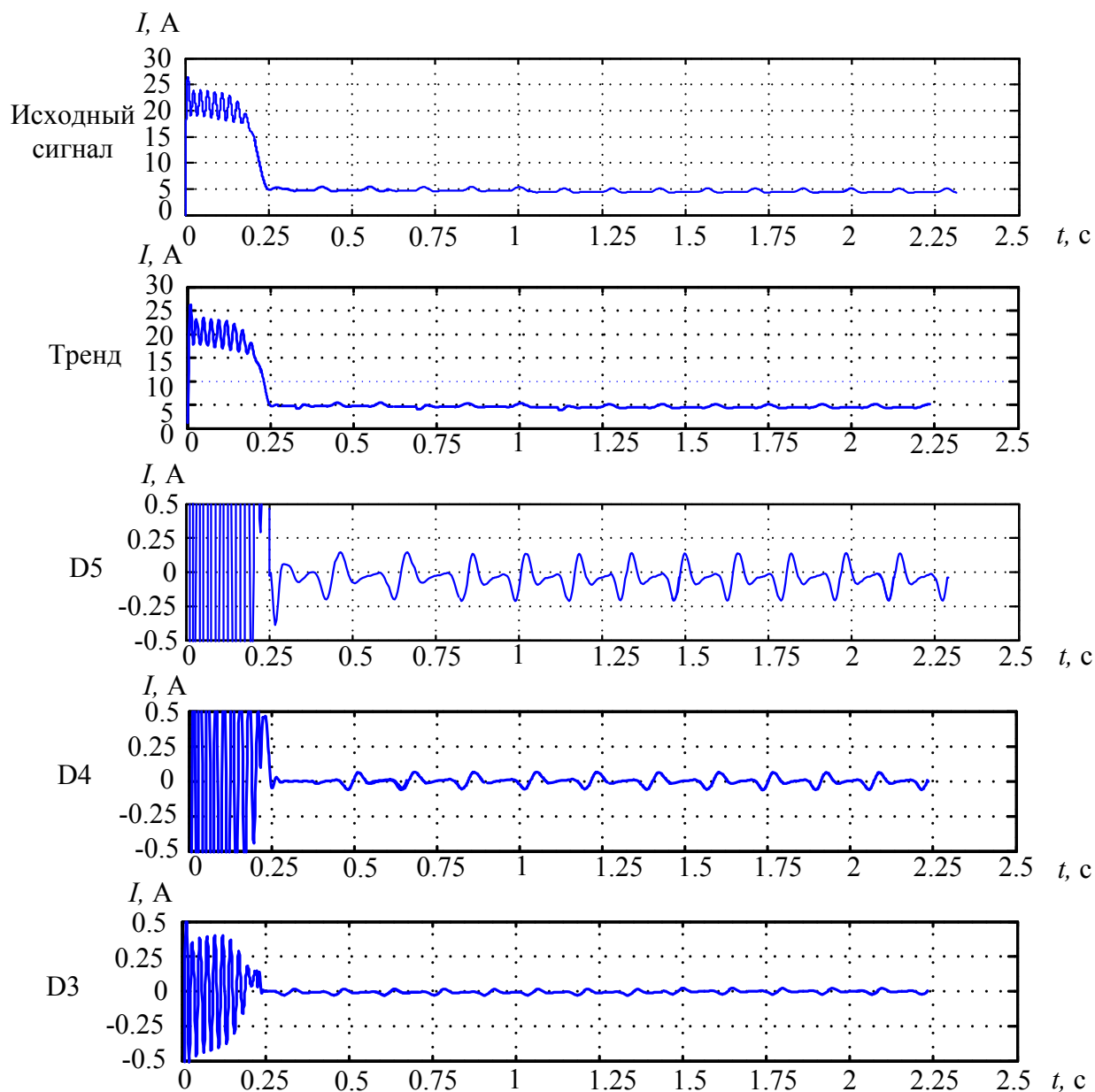


Рис. 6. Осциллограмма модуля обобщенного вектора тока статора пуска АД при обрыве двух стержней ротора и разложение ее на составляющие

Анализ осциллограмм показывает, что среди составляющих модуля результирующего вектора тока статора на уровнях разложения D3 не удается выделить диагностических признаков обрыва стержней ротора.

Из анализа приведенных на рис. 5 и 6 графиков следует, что компоненты D4 – D5 отражают число оборванных стержней ротора увеличением амплитуды пульсаций. Данное наблюдение служит однозначным признаком того, что информация об обрыве стержней ротора содержится в модуле результирующего вектора тока статора. Изменение амплитуды пульсаций компонент D5 является более предпочтительным диагностическим признаком, и может быть использовано для выявления повреждения ротора в диагностической системе.

На основе сравнительного анализа теоретических и экспериментальных методов распознавания аварийного состояния наиболее перспективным для реализации принято интегральное значение (рис. 7,б) компоненты D5 (рис. 7,а) вейвлет разложения модуля результирующего вектора тока статора. Для определения

интегрального критерия аварийного состояния обрыва стержня ротора S конкретного АД необходимо иметь обоснованную величину шага по времени δt . Шаг δt напрямую зависит от времени переходного процесса пуска АД.

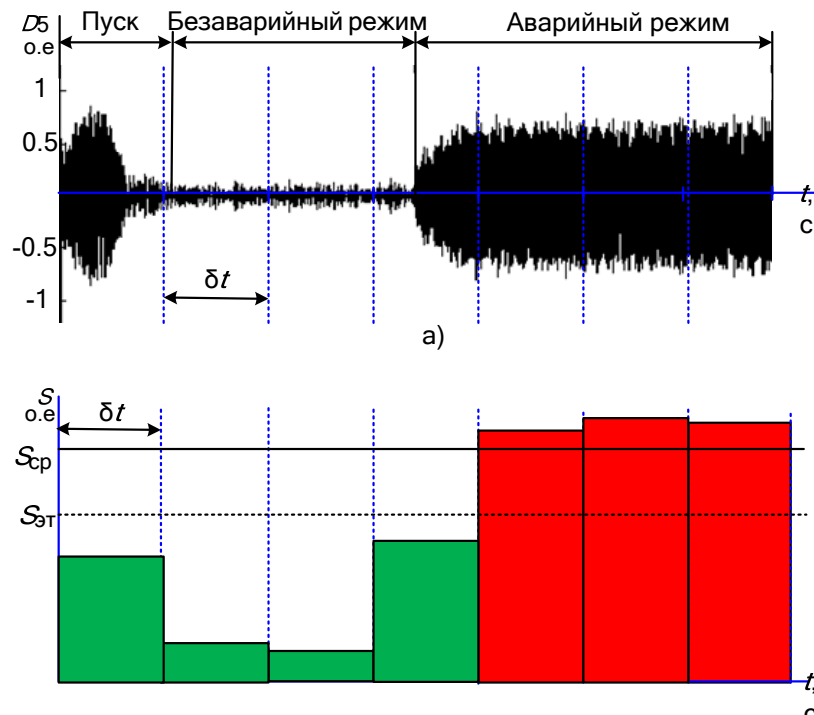


Рис. 7. Определение аварийного состояния

а) – детализирующий компонент D5 вейвлет разложения; б) – интегральное значение компонента D5 вейвлет разложения

При этом δt должно быть достаточно большим для отстройки от переходных процессов и достаточно малым для обеспечения чувствительности и быстродействия диагностической системы.

Шаг δt предлагается определять следующим образом: δt

$$\delta t = k_3 \cdot \sqrt[3]{T_3 \cdot T_2 \cdot T_M},$$

где k_3 – коэффициент запаса равный 1,1...1,2; T_3 – эквивалентная постоянная времени АД; T_2 – постоянная времени роторной цепи АД; T_M – механическая постоянная времени АД.

На основании математического моделирования диагностического детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$ в течении времени δt в установившемся аварийном нормально нагруженном режиме находится эталонная величина интегрального критерия определения аварийного состояния:

$$S_{\text{эт}} = \int_t^{t+\delta t} |D5| \cdot dt.$$

Уставка срабатывания $S_{\text{ср}}$ при обрыве стержня устанавливается как:

$$S_{\text{ср}} = S_{\text{эт}} \cdot k_H^{-1}$$

где k_H – коэффициент надежности равный 1,3.

Для повышения надежности и предотвращения неправильных действий функциональной диагностической системы вследствие наведения помех в канале связи датчиков или в результате других причин, используется счетчик, который после

трехкратного превышения S величины S_{cp} выдает сигнал о наличии повреждения.

Значительно повышает степень достоверности оценки состояния машины автоматизированная система диагностики, основанная на правилах нечетких множеств. Эта система предоставляет в помощь эксперту своего рода «искусственный интеллект», который может автоматически проводить диагностику машины на основе данных мониторинга.

Основное преимущество, системы диагностики в том, что она более полно отражает состояние диагностируемого объекта. И на основании результатов анализа человек - оператор может принять решение о дальнейшей эксплуатации двигателя

Упрощенная структура диагностической системы на основе нечеткой логики представлена на рис. 8.

На блок « $|IS|$ » поступают, от датчиков тока, фазные токи статора. В нем формируется модуль результирующего вектора тока статора $IS(t)$ по формуле:

$$IS(t) = \frac{2}{3} \sqrt{I_A(t)^2 + I_B(t)^2 + I_C(t)^2}$$

Сформированный модуль раскладывается на частотные составляющие методом вейвлет разложения, и происходит выделение детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$, которая, через задержку времени Δt , поступает на блок « I_{cp} » для определения среднего значения амплитуды детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$ за каждый период по формуле:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T D5(t) dt,$$

Задержка времени осуществляется для отстройки диагностической системы от переходного режима, возникающего в момент пуска АД. Среднее значение амплитуды детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$ подается на вход нечеткого контроллера состояния ротора. На основании величины среднего значения амплитуды детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$ происходит анализ состояния короткозамкнутого ротора. Результат анализа выводится на «экран состояния ротора АД».

Основой диагностической системы является нечеткий контроллер состояния ротора АД. Его упрощенная схема представлена на рис. 9.

Работа нечеткого контроллера состояния ротора разбивается на три этапа:

1) Фазификация – преобразование входных

абсолютных значений в лингвистические; 2) Логическое заключение с использованием предварительно составленной базы знаний; 3) Дефазификация –

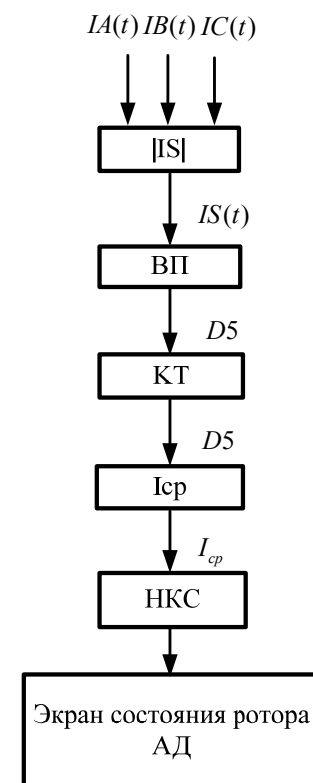


Рис. 8. Упрощенная структура диагностической системы на основе нечеткой логики

$|IS|$ – блок формирования модуля результирующего вектора тока статора; ВП – блок вейвлет-преобразования; КТ – выдержка времени; I_{cp} – блок выделения среднего значения амплитуды детализирующего коэффициента вейвлет разложения $D5$; НКС – нечеткий контроллер состояния.

преобразование выходных лингвистических значений в абсолютные.

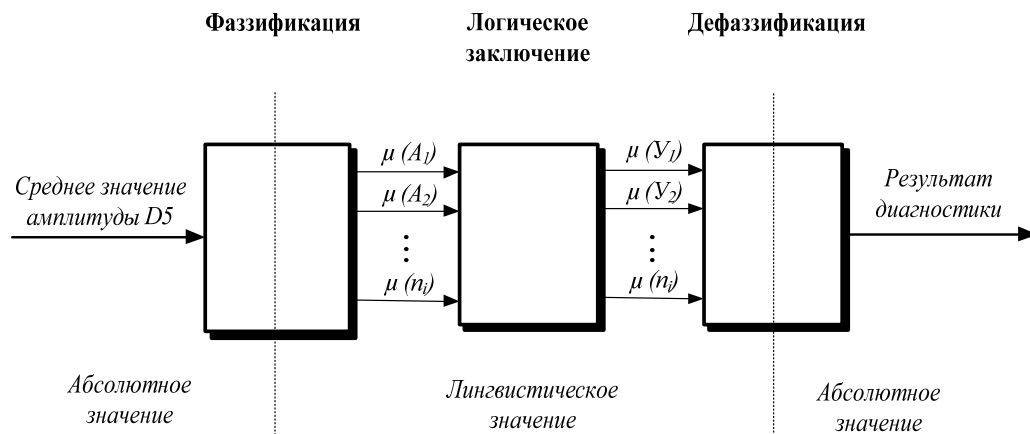


Рис. 9. Упрощенная схема нечеткого контроллера состояния ротора

Фаззификация преобразования компоненты D5 осуществляется следующим образом – средняя величина амплитуды преобразуется в лингвистическое значение, представленное четырьмя термами.

Лингвистическая переменная «Средняя величина амплитуды» определяется четырьмя множествами: Z – «нулевая», PS – «положительная малая», PM – «положительная средняя», PB – «большая положительная» (БП).

Каждое абсолютное значение средней величины амплитуды определяет для данных множеств комбинацию степеней принадлежности. Число термов, их форма и область определения формируются из особенностей изменения амплитуды компоненты D5 при различных повреждениях короткозамкнутого ротора АД рис. 10.

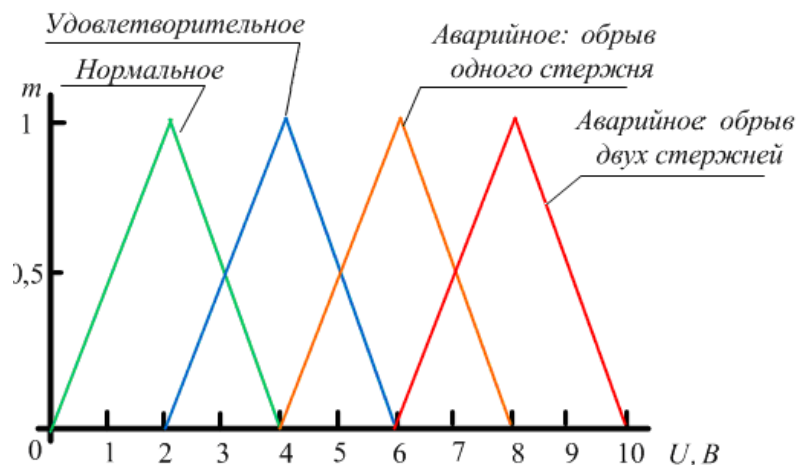


Рис. 10. Термы - множества выходной лингвистической переменной

Логическое заключение предполагает формирование выходной лингвистической переменной с помощью предварительно составленной базы знаний. База знаний составляется опытным экспертом из прикладной области на основании ассоциативных правил и заключений, которыми бы стал пользоваться человек-оператор при управлении данным процессом. Составляются ассоциативные правила, оформленные в виде таблицы или в текстовой форме.

Заключительный этап предполагает дефаззификацию – перевод выходного значения из лингвистического в абсолютный вид. Для этого был применен метод центра тяжести. В качестве значения выходной переменной использована координата

(абсцисса) центра тяжести площади результирующего терм-множества выходной лингвистической переменной (рис.11.). В нашем случае выходной переменной будет сигнал постоянного напряжения. Значение напряжения этого сигнала соответствует состоянию ротора АД.

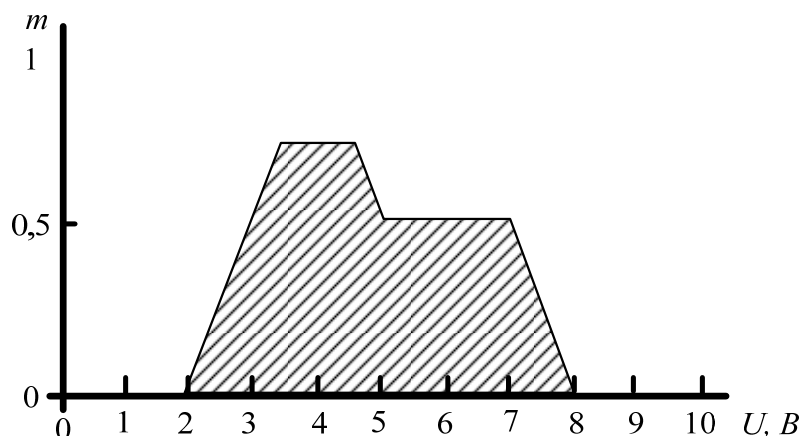


Рис. 11. Дефаззификация выходной переменной

Вычисление координаты центра тяжести производится по следующей формуле:

$$U_{вых} \approx \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i \cdot \eta_i}{\sum_{i=1}^k \mu_i} = \frac{\mu_1 \cdot \eta_1 + \mu_2 \cdot \eta_2}{\mu_2 + \mu_1}$$

Результаты диагностики отображаются на экране состояния ротора рис. 12 (неповрежденный ротор).

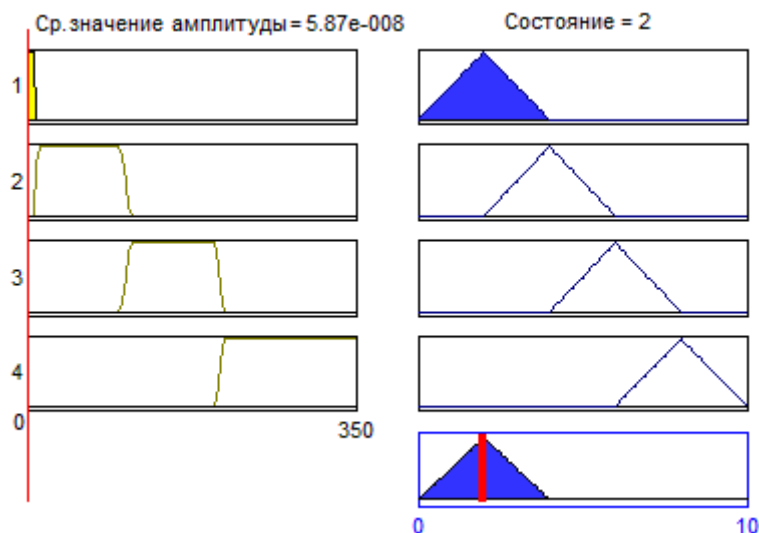


Рис. 12. Экран состояния при неповрежденном роторе

На рис. 13 сведены результаты диагностики поврежденного ротора при одном (рис. 13,а), и двух оборванных стержнях (рис. 13,б).

В строке «состояние» показывается напряжение постоянного сигнала на выходе диагностической системы. По величине напряжения можно судить о состоянии короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя.

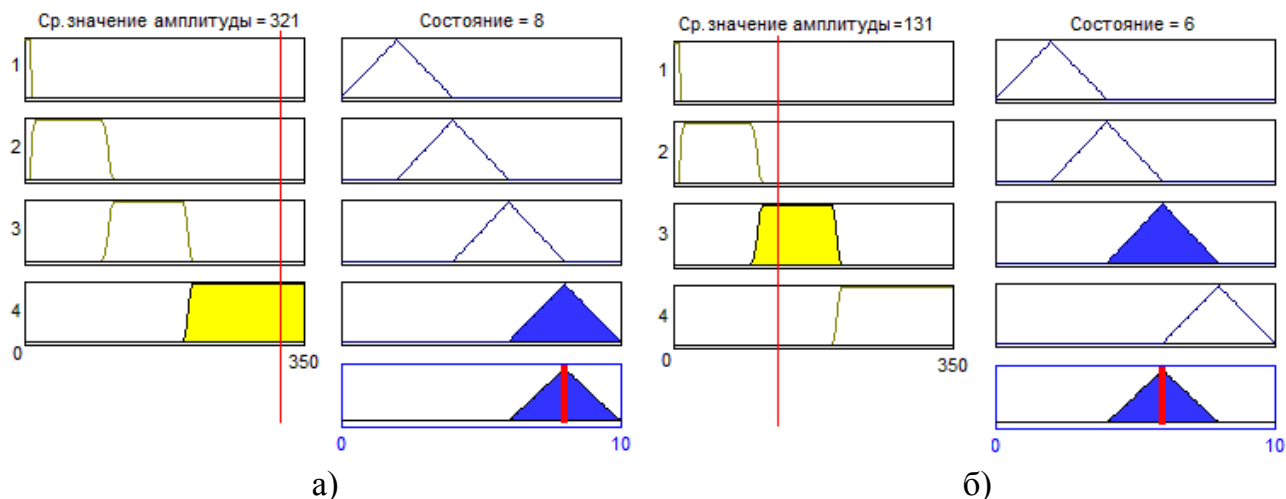


Рис. 13. Экран состояния поврежденного ротора
а) обрыв двух стержня, б) обрыв одного стержней

Данная автоматизированная система диагностики позволяет проанализировать состояние короткозамкнутого ротора. Выявить обрыв стержней, а так же осуществлять оперативный контроль физических характеристик.

Заключение

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача, связанная с повышением эксплуатационной надежности АД электростанций. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Выявлено, что высокий уровень интенсивности отказов АД по вине повреждений «беличьей клетки» на пылеугольных электростанциях обусловлен тяжелыми условиями работы и пуска, при этом отказ электроприводов механизмов собственных нужд может привести как к снижению вырабатываемой мощности, так и к полному останову энергоблока;

2. Разработана методика расчета токов в АД при несимметрии обмотки ротора с погрешностью около 10 %, на основе системы дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши для m -фазной системы координат, приведенной к ротору.

3. Усовершенствованы способы измерения скорости вращения вала АД и частоты тока в обмотке ротора на основе спектрального анализа токов статора.

4. Доказана возможность диагностирования неисправностей АД в эксплуатационных режимах работы посредством выявления локальных особенностей изменения спектрального состава во временных осциллограммах обобщенного вектора тока с использованием вейвлет-анализа.

5. Предложен критерий определения момента перехода короткозамкнутой обмотки АД из исправного состояния в неработоспособное.

6. Разработана автоматизированная система диагностики, основанная на правилах нечетких множеств, позволяющая значительно повысить степень достоверности оценки состояния обмотки ротора АД.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в периодических изданиях рекомендованных ВАК

1. Глазырина, Т.А. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин / Т.А.Глазырина, В.И.Полищук [и др.] // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 42–45.

2. **Глазырина, Т.А.** Определение частоты вращения и скольжения асинхронного двигателя по спектральному составу токов в обмотках статора / Т.А.Глазырина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 23–26.

3. **Глазырина, Т.А.** Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех / Т.А.Глазырина [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2011. – № 2. – С. 282–285.

4. **Глазырина, Т.А.** Динамика электропривода с нечетким регулятором / Т.А.Глазырина [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – т. 316. – № 4. – С. 168–173.

Патенты РФ на изобретения и полезные модели

5. Пат. на полезную модель № 121086 РФ, МПК G01R 31/34. Устройство для диагностики электродвигателей переменного тока // **Т.А. Глазырина, А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2012116366/28; заявл. 23.04.2012; опубл. 10.10.2012. Бюл. № 28.

6. Пат. на изобретение № 2390036 РФ, МПК G01R 31/34, H02K 17/02. Способ определения скольжения асинхронного двигателя с фазным ротором // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009116526/28; заявл. 29.04.2009; опубл. 20.05.2010. Бюл. № 14.

7. Пат. на изобретение № 2397505 РФ, МПК G01R 31/34. Способ определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009128384/28; заявл. 28.07.2009; опуб. 20.08.2010. Бюл. № 23.

8. Пат. на изобретение № 2405161 РФ, МПК G01R 23/00. Способ определения частоты тока ротора асинхронного двигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009128783/28; заявл. 27.07.2009; опуб. 27.11.2010. Бюл. № 33.

9. Пат. на изобретение № 2405162 РФ, МПК G01R 23/00. Способ определения частоты тока ротора асинхронного двигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009128897/28; заявл. 27.07.2009; опуб. 27.11.2010. Бюл. № 33.

10. Пат. на полезную модель № 87807 РФ, МПК G01R 31/34. Устройство для определения скольжения асинхронного двигателя с фазным ротором // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009116401/22; заявл. 29.04.2009; опуб. 20.10.2009. Бюл. № 29.

11. Пат. на полезную модель № 89247 РФ, МПК G01R 31/34. Устройство для определения скольжения ротора асинхронного электродвигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009128481/22; заявл. 22.07.2009; опуб. 27.11.2009. Бюл. № 33.

12. Пат. на полезную модель № 89714 РФ, МПК G01R 23/02. Устройство для определения частоты тока ротора асинхронного двигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский политехнический университет»; – № 2009128985/22; заявл. 27.07.2009; опуб. 10.12.2009. Бюл. № 34.

13. Пат. на полезную модель № 89715 РФ, МПК G01R 23/02, G01R 23/16. Устройство для определения частоты тока ротора асинхронного двигателя // **Е.И. Гольдштейн, Т.А. Глазырина**; заявитель и патентообладатель «Томский

политехнический университет»; – № 2009129590/22; заявл. 31.07.2009; опуб. 10.12.2009. Бюл. № 34.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций

14. **Глазырина Т.А.** Диагностика обрыва фазы статора асинхронного двигателя с использованием искусственной нейронной сети / Т.А.Глазырина [и др.] // IV чтения Ш. Шокина: Материалы IV Международной научно-технической конференции; Павлодар, 14–16 ноября 2010 г. – Павлодар: ПГУ, 2010. – С. 132–133.

15. **Глазырина Т.А.** Методы on-line диагностики асинхронного двигателя по токам статора / Т.А.Глазырина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т 1. Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика, Томск, 6–8 Октября 2011. – Томск: СПБ Графикс, 2011 – С. 321–323.

16. **Глазырина Т.А.** Очистка от шума сигналов в диагностических комплексах и каналах обратных связей электропривода / Т.А.Глазырина [и др.] // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18–22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011 – Т. 1 – С. 544–545.

17. **Глазырина Т.А.** Методы мониторинга состояния цепей ротора асинхронного двигателя по токам статора / Т.А.Глазырина // Энергосберегающие технологии: материалы Международной молодёжной конференции, Томск, 28–30 июня 2011. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – Т. 2 – С. 129–130.

18. **Глазырина Т.А.** Проблемы и методы диагностики повреждений стержней роторов короткозамкнутых асинхронных двигателей / Т.А.Глазырина [и др.] // Энергосберегающие технологии: материалы Международной молодёжной конференции, Томск, 28–30 июня 2011. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011–Т. 1 – С. 182–183.

19. **Глазырина Т.А.** Современные методы и подходы диагностики асинхронного электродвигателя / Т.А.Глазырина [и др.] // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова, Томск, 12–14 октября 2011. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – С. 41–43.

20. **Глазырина Т.А.** Один из путей определения скольжения асинхронного двигателя в бездатчиковом электроприводе / Т.А.Глазырина [и др.] // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Томск, 13–16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 181–185.

21. **Глазырина Т.А.** Динамика следящего электропривода постоянного тока с нечётким регулятором / Т.А.Глазырина [и др.] // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2010.– 351 с.

22. **Глазырина Т.А.** Методы диагностики цепей ротора асинхронного двигателя на основе анализа токов и напряжений статора / Т.А.Глазырина // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы Отраслевой научно - технической конференции, Северск, 16–20 Мая 2011. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2011 – С. 44–45.