

На правах рукописи

ВЯТКИНА Ольга Сергеевна

**ЦИФРОВАЯ ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ
ВНУТРЕННИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Вологодском государственном техническом университете (ВоГТУ) на кафедре «Электроснабжение».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Булычев Александр Витальевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Попков Евгений Николаевич

- кандидат технических наук, доцент
Беляков Юрий Сергеевич

Ведущая организация - ОАО «Вологдаэнерго»

Защита состоится «25» мая 2007 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29) в аудитории 325 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «20» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронные электродвигатели составляют основу наиболее массовых приемников электрической энергии в современных электрических системах. Стремление максимально полно использовать их нагрузочные возможности в условиях все более динамичных и разнообразных режимов работы привело к повышению риска возникновения внутренних повреждений. Ежегодно 10-20% общего парка электродвигателей выходит из строя. Каждый день возникают несколько тысяч повреждений в электродвигателях, которые вызывают нарушения технологических процессов, создают опасные возмущения в электрических системах и приводят к угрожающему росту опасности их развития в крупные аварии с катастрофическими последствиями.

Традиционные средства релейной защиты электродвигателей развивались исторически параллельно с электромеханическими измерительными механизмами измерительных приборов на базе общей теории применительно к стационарным входным сигналам. Поэтому большинство алгоритмов традиционных защит основано на контроле интегральных (действующих или средних) значений токов и напряжений. Этот стационарный подход требует длительного наблюдения за процессами в аварийных ситуациях для принятия правильного решения о состоянии контролируемого объекта.

Дефицит времени, отводимого для выявления повреждений в современных электрических системах, вызывает необходимость выполнять анализ состояния контролируемого объекта в условиях не завершившихся переходных процессов. При этом требования к средствам защиты электродвигателей повышаются, и традиционные решения часто оказываются не приемлемыми. Требуется новый нестационарный подход к построению средств релейной защиты электродвигателей, основанный на представлении контролируемых объектов более точными математическими моделями, пригодными для реализации динамического контроля.

В этой связи совершенствование защит наиболее массовых приемников электрической энергии в электрических системах на основе нового нестационарного подхода играет важную роль в достижении высокой надежности электроснабжения и представляет собой крупную и актуальную научно-техническую задачу.

Исследования по теме диссертации выполнялись в соответствии с целевыми научно-техническими программами: «Повышение надежности, экономичности и экологичности энергетической системы России» и «Энергосбережение».

Цель работы - разработка новой защиты асинхронных электродвигателей от внутренних замыканий, обладающей новыми свойствами, повышающими чувствительность и эффективность действия в нестационарных условиях.

Основные научные результаты и их новизна:

1. Создана новая защита асинхронных электродвигателей от внутренних коротких замыканий, обладающая новыми свойствами, повышающими чувствительность и эффективность в части выявления витковых и междуфазных замыканий в обмотках контролируемых электродвигателей в нестационарных условиях. Проведены всесторонние исследования вновь созданной защиты. Результаты исследований подтвердили правомерность теоретических положений, принятых при создании защиты.
2. Осуществлена разработка программного обеспечения для цифровой системы защиты, обеспечивающего быстрое выявление внутренних повреждений в обмотках контролируемого электродвигателя в условиях переходных процессов. При построении алгоритма и управляющей программы использован принцип работы самонастраивающейся математической модели асинхронного электродвигателя.
3. Разработаны итерационные алгоритмы определения параметров математической модели контролируемого электродвигателя на основе численных методов решения коэффициентной обратной задачи динамики по доступным для измерения сигналам. При этом получено приемлемое для релейной защиты быстроедействие при достаточной степени адекватности модели и контролируемого электродвигателя.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Создан экспериментальный образец защиты и всесторонне исследован на физической модели асинхронного электродвигателя. Получены основные характеристики, подтвердившие преимущества разработанной защиты.
2. С целью исследования поведения защиты проведено математическое и физическое моделирование процессов работы. Для этого создана лабораторная установка, позволяющая на физической модели контролируемого электродвигателя имитировать нормальные режимы электродвигателя, витковые и междуфазные короткие замыкания с

различным числом замкнувшихся витков, регистрировать данные о предаварийных и аварийных процессах и использовать для их обработки наиболее совершенные средства вычислительной техники.

3. Результаты исследований использованы при выполнении научно-исследовательских работ Вологодского государственного технического университета по заказу ведущих разработчиков цифровых средств релейной защиты и учтены при разработке алгоритмов работы серийных блоков микропроцессорной релейной защиты.
4. Материалы теоретических, методических и практических разработок используются в учебном процессе и научно-исследовательских работах Вологодского государственного технического университета, а также в учебном центре «Энергетик» при повышении квалификации инженерно-технических работников Вологодской области.

Достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием обоснованных методов математического моделирования, методов решения обратных задач динамики, совпадением результатов, полученных путем математического и физического моделирования, с результатами проведенных натурных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на межвузовских электронных научно-технических конференциях «Молодые исследователи – Вологодской области» (г. Вологда, 1999), «Молодые исследователи – региону» (г. Вологда, 2000), «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии» (г. Воронеж, 2001), «Вузовская наука - региону» (г. Вологда, 2002), на общероссийских научно-технических конференциях «Вузовская наука - региону» (г. Вологда, 2003, 2006), а также на заседаниях кафедры «Электроснабжение» ВоГТУ и кафедры «Электрические станции и автоматизация электрических систем» СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Общий объем работы – 151 страница. Список литературы содержит 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отражена научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы цель и задачи исследования и показана структура диссертации.

В первой главе дан анализ современного состояния и тенденций развития методов и технических средств защиты электродвигателей от внутренних замыканий. Сформулированы требования к быстродействующим защитам, устанавливаемым на электродвигателях, для выявления внутренних повреждений.

Внутренние повреждения, возникающие в электродвигателе, приводят к изменению его параметров и, следовательно, вызывают изменение режима. Переход электродвигателя в новый режим неизбежно сопровождается переходным процессом, характер которого определяется его активными и реактивными параметрами, а также степенью изменения режима.

Из-за дефицита времени, отводимого на оценку параметров контролируемого объекта, релейная защита должна выявлять повреждения, как правило, в условиях интенсивных переходных процессов.

В этих условиях известные средства релейной защиты не могут обеспечить выявление отдельных междуфазных и витковых замыканий в обмотках электродвигателей с необходимой степенью достоверности, точности и быстродействия.

Проведен анализ работы наиболее распространенной токовой защиты, реализованной на электромагнитных реле, в условиях переходных режимов. Установлено, что основным измерительный элемент защиты - электромагнитное реле реагирует на интегральное действующее значение переменного тока в катушке реле и имеет достаточно высокую точность срабатывания только в установившихся (статических) моногармонических режимах. Таким образом, традиционные токовые защиты оценивают состояние контролируемого объекта по действующему значению тока в обмотках.

В переходных режимах ток в катушке реле токовой защиты может содержать не только периодическую составляющую основной частоты, но еще и апериодическую (квазипостоянную) составляющую и переменные составляющие с другими частотами. Эти составляющие оказывают разное влияние на работу реле, что обуславливает появление существенных динамических погрешностей.

Другие известные защиты, основанные на контроле симметричных составляющих тока статора, фазового сдвига между током и падением напряжения, также как и базовая токовая защита, требуют для достоверной работы длительного наблюдения за аварийными процессами.

Кроме этого, в схемах защит, использующих контроль параметров магнитного поля электродвигателя, необходимы специальные кольцевые преобразователи, встроенные в обмотки, что не всегда приемлемо по инженерно-экономическим причинам.

Таким образом показано, что для получения приемлемой для релейной защиты точности оценки состояния контролируемого объекта в переходных режимах необходимо использование более точной математической модели, учитывающей динамические параметры.

Исследования асинхронных двигателей при внутренних повреждениях в обмотках, выполненные путем математического и физического моделирования, позволили установить, что для целей релейной защиты от внутренних замыканий трехфазный асинхронный электродвигатель целесообразно представлять тремя эквивалентными двухполюсниками с последовательными $R-L$ – параметрами и описывать соответствующими дифференциальными уравнениями.

Проведен сравнительный анализ значений эквивалентных параметров асинхронных машин в режимах нормального пуска, самозапуска, холостого хода, номинальной нагрузки при витковых и междуфазных замыканиях в обмотках статора. Оценены возможные диапазоны изменения параметров во всех режимах и выявлены отличительные особенности значений эквивалентных $R-L$ – параметров, характеризующих нормальные и аварийные режимы. Это позволило доказать принципиальную возможность выявления внутренних замыканий в обмотках асинхронных машин по факту выхода значений эквивалентных $R-L$ – параметров за пределы установленных допусков.

Во второй главе предложен новый метод выявления внутренних замыканий в обмотках асинхронного электродвигателя и разработан алгоритм действия защиты, в основу которого положен принцип работы самонастраивающейся программной математической модели контролируемого электродвигателя.

В соответствии с принятым нестационарным подходом, основой математической модели контролируемого асинхронного электродвигателя может служить эквивалентный $R-L$ двухполюсник, параметры которого

приведены к обмотке статора (рис.1). На рисунке приняты следующие обозначения: M – контролируемый электродвигатель; TA и TV – измерительные трансформаторы тока и напряжения, соответственно; E_c и Q – э.д.с. источника питания и выключатель, соответственно; $u_M(t)$ и $i_M(t)$ – напряжение питания и ток модели контролируемого электродвигателя; $u_{дв}(t)$ и $i_{дв}(t)$ – напряжение питания и ток контролируемого электродвигателя; $R_{эк}$ и $L_{эк}$ – эквивалентные входные активное сопротивление и индуктивность электродвигателя относительно зажимов обмотки статора.

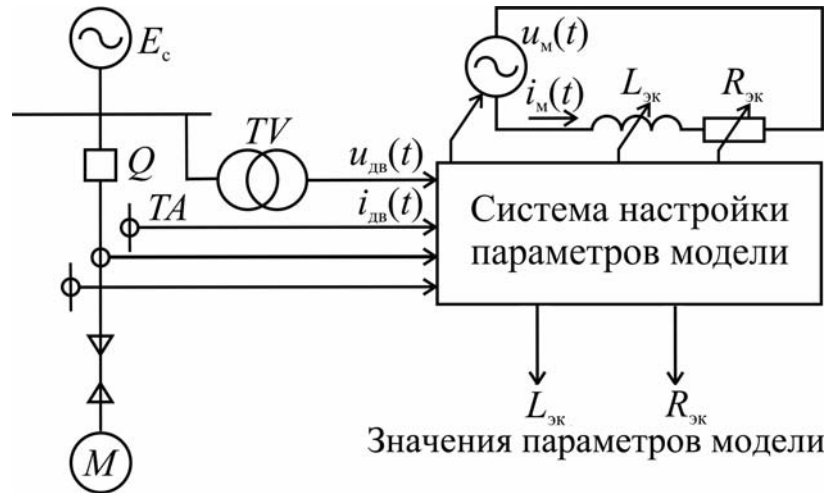


Рис.1

Система настройки параметров модели – это программно-аппаратный комплекс, который обеспечивает подбор параметров математической модели так, чтобы ток модели совпадал с током контролируемого электродвигателя (в соответствующем масштабе и с определенной степенью близости).

Исходное дифференциальное уравнение, описывающее принятую схему, можно записать так:

$$u_M(t) = R_{эк} i_M(t) + L_{эк} \frac{di_M(t)}{dt}. \quad (1)$$

Решение этого уравнения представляет собой ток математической модели i_M контролируемого электродвигателя.

Процесс определения параметров $L_{эк}$ и $R_{эк}$ сводится к решению корректной коэффициентной обратной задачи, т.е. к отысканию постоянных коэффициентов дифференциального уравнения по известным значениям его решения.

Иначе обратную задачу можно сформулировать следующим образом:

- Известна математическая модель контролируемого объекта, выраженная уравнением (1).

- Задано его начальное состояние в момент времени $t=0$ начальными значениями параметров: $i_m(0)$, $R_{\text{ЭК}}(0)$, $L_{\text{ЭК}}(0)$, $\psi(0)$, где $\psi(0)$ – значение фазового угла сдвига периодической составляющей тока относительно напряжения питания.
- Назначена требуемая траектория движения объекта, в качестве которой выступают напряжение и ток контролируемого асинхронного электродвигателя, которые регистрируются в виде осциллограмм и могут считаться непрерывными функциями: $u_{\text{дв}}(t)$, $i_{\text{дв}}(t)$ при $t \geq 0$

Требуется:

- Найти такие параметры (коэффициенты) модели $R_{\text{ЭК}}$ и $L_{\text{ЭК}}$ при $t \geq 0$, которые заставляют двигаться решение модели по назначенной контролируемым объектом траектории: $i_m(t) = i_{\text{дв}}(t)$ при $t \geq 0$.
- Определить оптимальные показатели процесса управления: время достижения заданной окрестности квазистационарного состояния и степень близости модели и объекта.

Решение задачи на базе цифровой вычислительной техники удобно находить итерационным методом. В конечномерном вещественном пространстве параметров H ищется функция $\underline{y} \in H$ как решение операторного уравнения

$$A\underline{y} = f. \quad (2)$$

Здесь A - линейный положительный оператор, действующий в указанном пространстве; f – входной сигнал - ток $i_{\text{дв}}(t)$ контролируемого объекта; \underline{y} – вектор параметров электродвигателя $R_{\text{ЭК}}$ и $L_{\text{ЭК}}$.

Начиная с некоторого начального приближения $\underline{y}_0 \in H$ последовательно определяются приближенные решения $\underline{y}_1, \underline{y}_2, \dots, \underline{y}_K, \dots$ уравнения (2), где K – номер итерации.

$$B_K \frac{\underline{y}_{K+1} - \underline{y}_K}{\tau_{K+1}} + A\underline{y}_K = f_K, \quad K = 0, 1, \dots,$$

где B_K – линейный положительный оператор; τ_{K+1} – итерационные параметры.

Поскольку правая часть уравнения (2) задана с погрешностью ε , то вместо f известно f_ε - ток модели $i_m(t)$: $f - f_\varepsilon \leq \varepsilon$.

Это приближенное решение можно обозначить \underline{y}_K , причем параметр K естественно связать с уровнем погрешности в задании правой части, т.е. $K=K(\varepsilon)$:

$$A\underline{y}_K = f_\varepsilon.$$

Для нахождения решения задачи используется минимизация функционала невязки, выступающего критерием близости объекта и модели. В качестве невязки может быть применена мгновенная ошибка:

$$\varepsilon(t) = i_{\text{дв}}(t) - i_{\text{м}}(t),$$

где $i_{\text{дв}}(t)$ - мгновенный ток двигателя; $i_{\text{м}}(t)$ - мгновенный ток модели.

Для обеспечения однозначности настройки модели выбран функционал, обладающий единственным минимумом в пространстве настраиваемых параметров, то есть он представляет собой четную функцию:

$$E = \int_0^t |\varepsilon(t)| dt, \quad E = \frac{\sum_{n=0}^N |\varepsilon|}{N},$$

где N - число отсчетов времени.

На рис.2 показана функциональная схема устройства защиты.

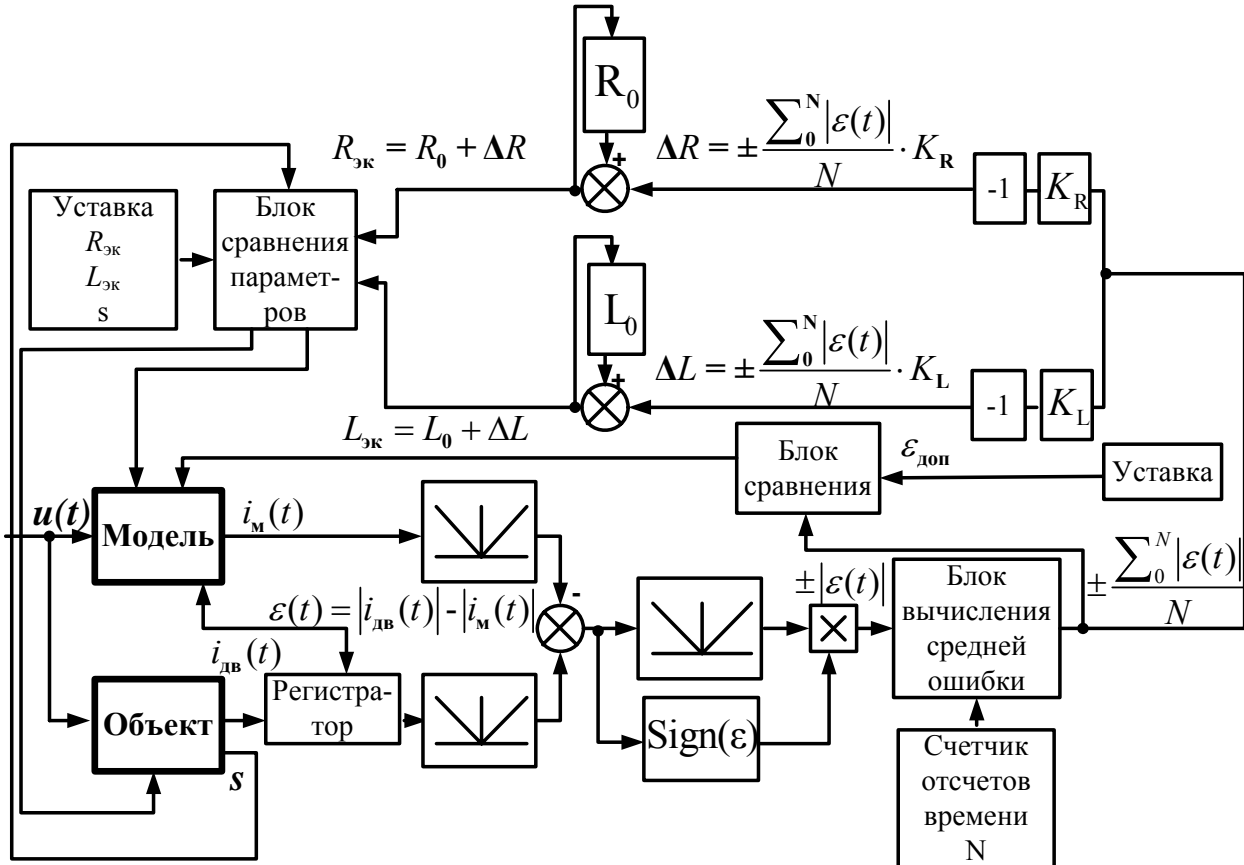


Рис.2

На модель и объект воздействует напряжение питания $u(t)$ в соответствующих масштабах. Выходным сигналом модели является расчетный ток $i_m(t)$, соответствующий текущим значениям параметров модели. Выходным сигналом объекта является ток $i_{дв}(t)$. Регистратор обеспечивает синхронную запись значений токов модели и объекта. Для каждого из двух полученных токов определяется их модульное значение. Вычисляется мгновенная выходная ошибка $\varepsilon(t) = |i_{дв}(t)| - |i_m(t)|$. Рассчитанное значение ошибки раскладывается на две составляющих: модуль и знак. Модуль ошибки в дальнейшем используется для формирования функционала, а знак – для определения направления коррекции параметров. Полученные значения мгновенных ошибок накапливаются в блоке вычисления средней ошибки, на второй вход которого с помощью счетчика подается количество отсчетов времени за период наблюдения. Происходит вычисление средней абсолютной ошибки. Значение этой ошибки подается на вход блока сравнения, в котором оно сравнивается с допустимым значением ошибки.

Если полученная средняя ошибка не превышает значения $\varepsilon_{доп}$, процесс подбора параметров останавливается. В противном случае процесс коррекции параметров продолжается, и полученная средняя ошибка умножается на коэффициенты усиления K_R и K_L . В результате на выходе блоков K_R и K_L формируются приращения каждого из определяемых параметров.

$$\Delta R = \pm \frac{\sum_0^N |\varepsilon(t)|}{N} \cdot (-K_R);$$

$$\Delta L = \pm \frac{\sum_0^N |\varepsilon(t)|}{N} \cdot (-K_L).$$

Отрицательные знаки перед коэффициентами усиления предусмотрены для определения направления коррекции исходных параметров, в зависимости от знака получаемой средней абсолютной ошибки.

Полученные приращения со знаком плюс или минус прибавляются к параметрам, рассчитанным на предыдущем шаге. На первом шаге расчетов используются пусковые параметры. На последующих шагах расчета эти параметры корректируются:

$$R_{эк} = R_0 + \Delta R; \quad L_{эк} = L_0 + \Delta L.$$

Полученные значения параметров подаются на соответствующие входы блоков сравнения параметров, где сравниваются с уставками, т.е. осуществляется проверка условий:

$$\begin{cases} R_{\text{эк}} < R_{\text{доп}}; \\ L_{\text{эк}} < L_{\text{доп}}; \\ s < 1, \end{cases}$$

где $R_{\text{доп}}$ и $L_{\text{доп}}$ – эквивалентные допустимые параметры.

При выполнении условий формируется предупреждение о внутреннем коротком замыкании и сигнал на отключение электродвигателя. Процесс определения параметров $R_{\text{эк}}$ и $L_{\text{эк}}$ повторяется до тех пор, пока средняя абсолютная ошибка не достигнет минимально установленного значения $\varepsilon_{\text{доп}}$.

В третьей главе рассмотрены практические алгоритмы действия защиты, базирующиеся на изложенных теоретических предпосылках, и дано описание реализующей их компьютерной программы.

Ядром цифровой защиты является математическая модель контролируемого электродвигателя, параметры которой можно настраивать (подбирать) с помощью управляющей программы.

Для создания управляющей программы использована система численной математики MatLab. Данная система позволяет преобразовывать управляющую программу в исполняемый .exe – файл. При этом обработка данных выполняется на базе компьютера, связанного с контролируемым электродвигателем через блок аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Кроме того, предоставляется возможность компилировать созданную программу на один из языков программирования и использовать для управления микроконтроллеры известных фирм производителей (Motorola MPC555, Texas Instruments C6000 DSP).

Управляющая программа, подробное описание функций, возможностей и интерфейса которой приведено в диссертации, содержит основные блоки:

1. Запрос на ввод номинальных параметров контролируемого асинхронного электродвигателя и параметров питающей сети; проверка корректности введенных данных.
2. Расчет уставок на основе номинальных эквивалентных параметров.
3. Обращение к заранее сформированному файлу с массивом данных о токах и напряжениях контролируемого электродвигателя согласно определенным каналам на плате АЦП; определение частоты дискретизации.
4. Переход из системы отсчетов платы АЦП в систему именованных единиц.
5. Выделение фазы с максимальным значением амплитуды тока путем сравнения амплитудных значений токов отдельных фаз.

6. Определение момента возникновения переходного режима.

7. Проецирование полученного значения времени на массивы данных, содержащие мгновенные значения токов и напряжений в поврежденной фазе, с целью определения начального значения тока и начальной фазы тока.

8. Вычисление мгновенных значений тока в соответствии с математической моделью и сравнение их со значениями тока контролируемого объекта.

9. При выполнении условия совпадения (с допустимой погрешностью) мгновенных значений токов модели и объекта производится отображение новых значений эквивалентного активного сопротивления, эквивалентной индуктивности и осциллограмм токов модели и объекта.

10. Сравнение параметров контролируемого электродвигателя с допустимыми значениями и вывод резюме об отсутствии или наличии повреждения.

Программа ориентирована на оценку параметров широкого класса асинхронных электродвигателей с номинальной мощностью до 5 МВт. В ней предусмотрены процедуры расчета уставок и начальных условий для поиска решений по вводимым номинальным параметрам двигателей.

Интерфейс представляет собой систему различных меню, позволяющих последовательно вводить номинальные параметры асинхронного электродвигателя, и выбирать способ отображения результатов, выводимых на экран. Для примера на рис. 3 показан вид экрана.

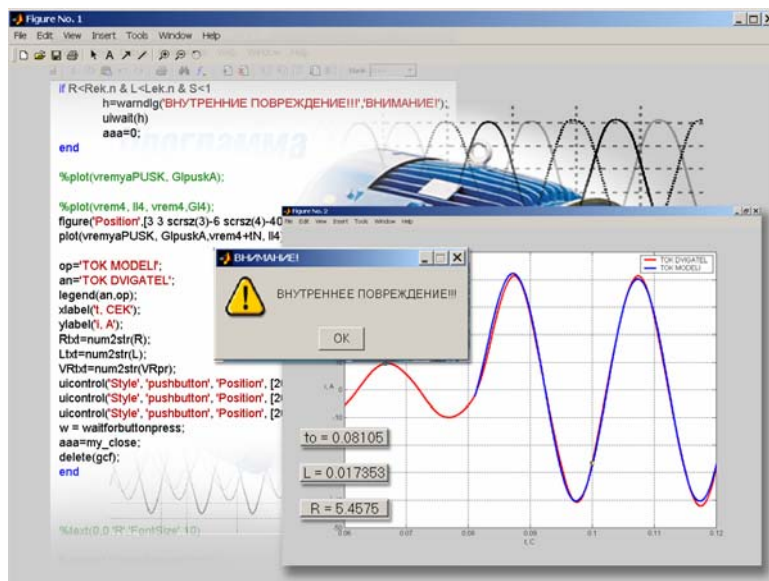


Рис.3

Определены показатели быстродействия программы. Так, обычный компьютер средней производительности тратит на полный цикл решения задачи

не более 0.06 с, а специализированное микропроцессорное устройство может решать эту задачу за время менее 0.01 с.

В четвертой главе рассмотрены результаты исследования разработанной защиты на физической модели контролируемого электродвигателя.

Для исследования процессов, возникающих в электродвигателях при повреждениях обмоток, и проверки функционирования вновь разработанной защиты в условиях, приближенных к реальным, создана специальная лабораторная установка.

Ее основа – это физическая модель трехфазного асинхронного электродвигателя, созданная на базе основных узлов серийных машин АИР100S4У3 (Первая модель) и 4А80В4У3 (Вторая модель) в соответствии с условиями подобия (рис.4).

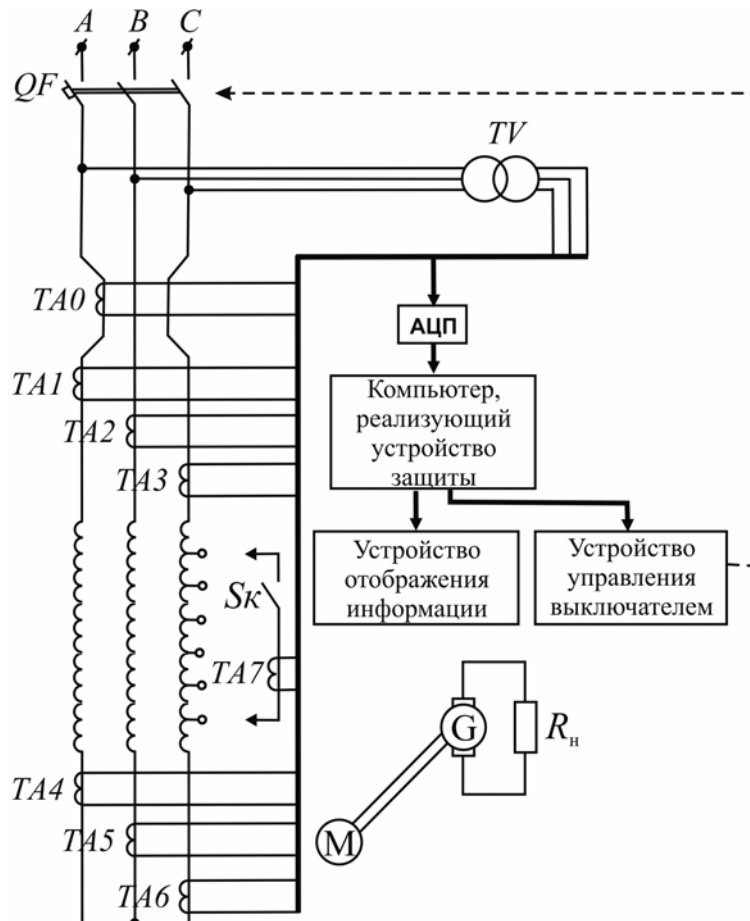


Рис.4

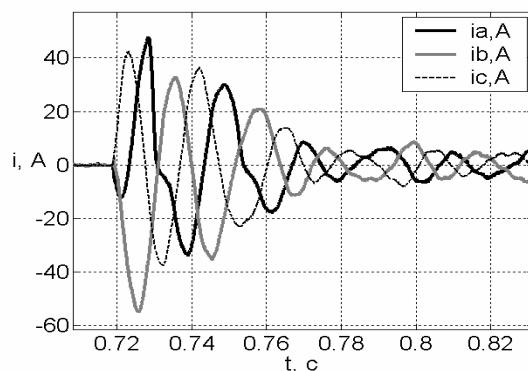
Эквивалентом механической нагрузки асинхронного электродвигателя служит генератор постоянного тока с параллельным возбуждением (ПБСТ - 52 мощностью 4,1 кВт). Измерение и регистрация сигналов производится компьютером в цифровом виде через многоканальный блок аналого-цифровых преобразователей (АЦП) L-761 ЗАО «Л-Кард». Блок АЦП выполнен в виде платы расширения, устанавливаемой внутри конструктива компьютера на

локальную шину PCI. Управление платой (задание частоты дискретизации, номеров опрашиваемых каналов, режима работы и диапазона входных сигналов) производится программным путем.

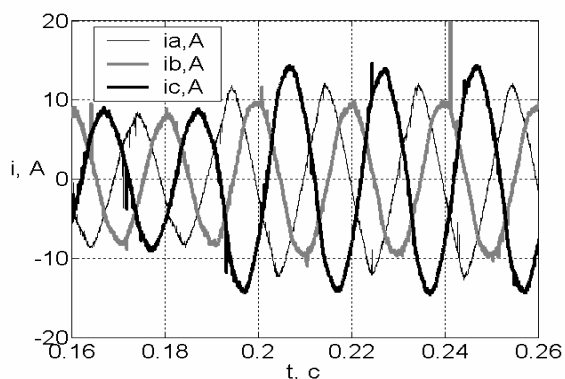
Трехфазная обмотка статора модельных электродвигателей выполнена по специальному проекту. Обмотка одной из фаз (условно фазы С) содержит 6 отводов (отпаяк). Витковые и междуфазные замыкания моделируются путем попарного замыкания соответствующих выводов обмоток.

Исследовались следующие стационарные и переходные режимы:

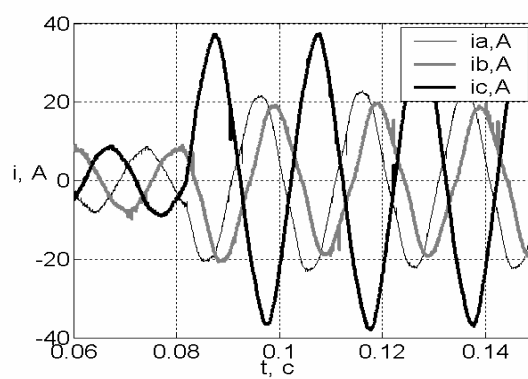
1. Пуск электродвигателя в нормальных и тяжелых условиях.
2. Холостой ход.
3. Работа со стационарной и переменной механической нагрузкой.
4. Внезапное междуфазное короткое замыкание в обмотке в разных режимах (при пуске, холостом ходе, работе с нагрузкой и др.)
5. Внезапное витковое замыкание с различным числом замкнувшихся витков в разных режимах.
6. Пуск при устойчивом витковом и междуфазном замыкании в обмотке.
7. Стационарные и переходные процессы при ненормальных параметрах источника питания (несимметрия, изменение частоты и уровня напряжения).



а)



б)



в)

Рис.5

На рис. 5 показаны наиболее характерные исходные осциллограммы токов, полученные в ходе исследований: токи при пуске электродвигателя без механической нагрузки (а); токи при внезапном витковом замыкании в режиме работы с нагрузкой при замыкании малого числа витков (б); токи при внезапном витковом замыкании в режиме работы с нагрузкой при замыкании большого числа витков (в).

Файлы осциллограмм, полученных во всех предусмотренных программой исследований режимах, сохранены в специальной базе данных. Это позволяет использовать их многократно, без повторного воспроизведения режимов на физической модели.

Во всех режимах сигналы, пропорциональные токам и напряжениям физической модели контролируемого электродвигателя, подаются на входы защиты. При этом имеется возможность наблюдать промежуточные сигналы, формируемые защитой. На рис.6 показаны отдельные осциллограммы токов, полученные на физической модели и сформированные в самонастраивающейся модели контролируемого электродвигателя в защите: (а) - токи в стационарном режиме при номинальной нагрузке; (б) - токи при внезапном витковом замыкании при номинальной нагрузке электродвигателя.

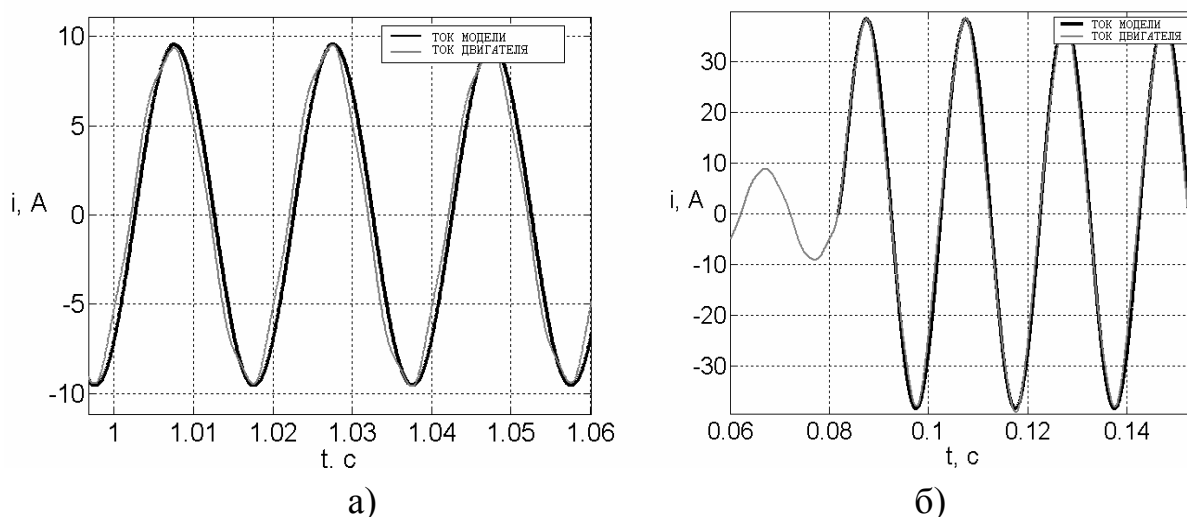


Рис.6

Из сравнения полученных осциллограмм следует, что защита обеспечивает достаточно высокую степень совпадения исходных токов и токов, сформированных в самонастраивающейся модели контролируемого электродвигателя в защите.

Кроме этого в таблице показаны численные значения максимального разброса $R-L$ параметров контролируемого электродвигателя, полученные путем теоретического анализа на основе паспортных данных, опытным путем

из опытов короткого замыкания и холостого хода, и в самонастраивающейся модели в защите по исходным осциллограммам токов физической модели.

Таблица

Название режима	Максимальное значение разброса параметров			
	Для первой модели электродвигателя		Для второй модели электродвигателя	
	$\varepsilon_R, \%$	$\varepsilon_L, \%$	$\varepsilon_R, \%$	$\varepsilon_L, \%$
1. Холостой ход	8,4	5,3	0	4
2. Установившийся режим при номинальной нагрузке	2,9	0	-	-
3. Пуск на холостом ходу	8,04	0	4,7	2,1

Из результатов сравнительного анализа следует, что разработанная защита обеспечивает контроль эквивалентных $R-L$ параметров электродвигателя с максимальной относительной погрешностью не более 10%. Это вполне приемлемо при выявлении внутренних междуфазных и витковых коротких замыканий средствами релейной защиты.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность выполнения разработанной защитой всех основных функций, приемлемую точность работы, правомерность использования предложенных алгоритмов действия и допущений, принятых в процессе разработки.

В приложениях приведены осциллограммы токов и напряжений при витковых замыканиях в асинхронных двигателях, алгоритм работы управляющей программы в виде блок-схемы с элементами листинга программы, включающими основные процедуры программирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана защита асинхронных электродвигателей, обладающая новыми свойствами, повышающими чувствительность и эффективность в части выявления внутренних коротких замыканий в обмотках контролируемых электродвигателей в нестационарных условиях. Изготовлен экспериментальный образец защиты и всесторонне исследован на физической модели асинхронного электродвигателя. Получены основные характеристики, подтвердившие преимущества разработанной защиты.

2. Разработано программное обеспечение для цифровой системы защиты, обеспечивающее быстрое выявление внутренних повреждений в обмотках контролируемого электродвигателя в условиях переходных процессов. В основу алгоритма и управляющей программы положен принцип работы самонастраивающейся математической модели асинхронного электродвигателя, позволяющий путем непрерывного контроля параметров выявлять внутренние и другие короткие замыкания.
3. Разработаны итерационные алгоритмы определения параметров математической модели контролируемого электродвигателя на основе численных методов решения коэффициентной обратной задачи динамики по доступным для измерения сигналам. При этом получено приемлемое для релейной защиты быстродействие при достаточной степени адекватности модели и контролируемого электродвигателя. Общее время цикла регистрации сигналов и вычисления параметров не превышает 0,06 с.
4. Проведены исследования защиты путем математического и физического моделирования процессов работы. Для этого создана лабораторная установка, позволяющая на физической модели контролируемого электродвигателя имитировать нормальные режимы электродвигателя, витковые и междуфазные короткие замыкания с различным числом замкнувшихся витков, регистрировать данные о предаварийных и аварийных процессах и использовать для их обработки современные наиболее совершенные средства вычислительной техники. Результаты исследований подтвердили работоспособность защиты во всех возможных режимах работы контролируемого электродвигателя и правомерность допущений, принятых при анализе и синтезе защиты.
5. Результаты исследований использованы при выполнении научно-исследовательских работ Вологодского государственного технического университета по заказу ведущих разработчиков цифровых средств релейной защиты и учтены при разработке алгоритмов работы блоков микропроцессорной релейной защиты. Материалы теоретических, методических и практических разработок используются в учебном процессе и научно-исследовательских работах Вологодского государственного технического университета и в учебном центре «Энергетик» при повышении квалификации инженерно-технических работников Вологодской области.

Публикации по теме диссертации в рецензируемых научных журналах

1. Булычев, А.В. Входные преобразователи ток-напряжение для релейной защиты / А.В. Булычев, О.С. Вяткина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – №2. – С.81 - 82.

Публикации по теме диссертации

2. Патент РФ №2297167. МПК H02H7/08. Способ защиты асинхронного двигателя от витковых замыканий / А.В. Булычев, К.А. Воеводин, О.С. Вяткина, Е.В. Несговоров. Оpubл. в БИ. – 2007. – №11.
3. Вяткина, О.С. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей / О.С. Вяткина, Е.В. Несговоров // Первая областная межвузовская научная конференция «Молодые исследователи – Вологодской области»: Тезисы докладов. – Вологда: ВоГТУ. – 1999. – С. 38 - 39.
4. Вяткина, О.С. Методы и программные средства для исследования переходных процессов в синхронных машинах // Вторая областная межвузовская научная конференция «Молодые исследователи – региону»: Тезисы докладов. – Вологда: ВоГТУ. – 2000. – С. 10 - 11.
5. Вяткина, О.С. Применение современных программных средств для расчета однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Материалы межвузовской электронной научно-технической конференции «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии». – Вологда: ВоГТУ. – 2001. – С. 34 - 35.
6. Вяткина, О.С. Изучение свойств электрических машин с помощью математических пакетов / О.С. Вяткина, Е.В. Несговоров // Материалы межвузовской электронной научно-технической конференции «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии». – Вологда: ВоГТУ. – 2001. – С. 160 - 161.
7. Булычев, А.В. Перспективы использования методов идентификации в системах релейной защиты / А.В. Булычев, О.С. Вяткина, Е.В. Несговоров // Материалы третьей региональной межвузовской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». – Вологда: ВоГТУ. – 2002. – С. 97 - 99.
8. Булычев, А.В. Оценка качества процесса идентификации / А.В. Булычев, О.С. Вяткина // Материалы первой общероссийской научно-технической

- конференции «Вузовская наука - региону». – Вологда: ВоГТУ. – 2003. – С. 204 - 207.
9. Булычев, А.В. Выявление витковых замыканий в обмотках статора электродвигателя на основе методов идентификации параметров / А.В. Булычев, О.С. Вяткина, Е.В. Несговоров, Н.А. Сошенин // Вестник ВоГТУ. Научный журнал. – Вологда: ВоГТУ. – 2004. – №4. – С. 31 - 37.
10. Булычев, А.В. Метод контроля параметров асинхронных двигателей для защиты от внутренних коротких замыканий / А.В. Булычев, О.С. Вяткина // Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». В 2-х томах. – Вологда: ВоГТУ. – 2006. – Т1. – С. 184 - 187.
11. Булычев, А.В. Физическое моделирование витковых замыканий в асинхронном двигателе / А.В. Булычев, О.С. Вяткина // Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». В 2-х томах. – Вологда: ВоГТУ. – 2006. – Т1. – С. 187 - 194.

Лицензия ЛР №020717

Подписано в печать 17.04.2007 г.
Печать офсетная бумага офисная
Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 Заказ 165

Отпечатано РИО ВоГТУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15