

На правах рукописи

КИБАРТЕНЕ Юлия Викторовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМОВ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ
НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ**

Специальность 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Томск - 2010

Работа выполнена в Инновационном Евразийском университете
(г. Павлодар, Республика Казахстан)

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Инновационного Евразийского университета
Мельников Виктор Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бекишев Рудольф Фридрихович

кандидат технических наук, доцент
Орлов Юрий Александрович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический
университет» (г. Омск)

Защита диссертации состоится «19» мая 2010 г. в 15⁰⁰ часов на заседании
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.269.11 при Томском политехническом университете в ауд. 217 8-го
учебного корпуса по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55
или на сайте: www.lib.tpu.ru.

Автореферат разослан «___» марта 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций

_____ Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Требования повышения надежности и энергетической эффективности технологических процессов и оборудования предопределяют постановку и решение научно-технических задач по созданию новых эффективных систем автоматического управления и регулирования (САУ) с синхронными электродвигателями (СД). Желаемая надежность и эффективность во многом определена свойствами электрической машины, а именно, параметрами синхронного двигателя, точные значения которых необходимы для формирования требуемых статических и динамических режимов.

В действительности реальные параметры электродвигателей могут значительно отличаться от паспортных данных, а также данных, приводимых в справочной и технической документации, клиентских и наладочных формулярах. Это отличие может достигать 5...20 и более процентов.

Отличие реальных параметров от расчетных оказывает значительное влияние на статические и динамические показатели САУ с СД, серьезно ухудшая показатели надежности и энергетической эффективности технологического объекта.

Это особенно актуально, например, для питательных электронасосов и тяго-дутьевых машин тепловых электростанций и котельных; мельнично-размольных систем топливоприготовления, горно-обогажительного, металлургического и цементного производства; насосных агрегатов перекачивающих станций трубопроводного транспорта и водоводов (каналов); компрессорных и воздуходувных агрегатов металлургического производства и объектов энергетики; основных и вспомогательных механизмов горно-транспортных систем.

Решением проблемы определения параметров электрических машин и синхронной машины, в частности, занимались многие ведущие отечественные и зарубежные исследователи: Горев А.А., Гольдберг О.Д., Копылов И.П., Костенко М.П., Постников И.М., Сипайлов Г.А., Вольдек А.И., Рогозин Г.Г., Beckert U., Wolfgang A. H., Kertzscher J. и другие. Однако существующие методы не могут в полной мере выявить все необходимые электрические параметры, требуя, в большинстве случаев, многочисленных и сложных дополнительных манипуляций с электрическими машинами.

Это вызывает необходимость создания специального инструмента, позволяющего простыми средствами осуществлять идентификацию параметров СД. Таким инструментом может стать созданный научно-обоснованный метод, разработанные алгоритмы и технические реализации, обеспечивающие эффективную идентификацию параметров обмоток СД различных конструктивных модификаций в режиме с неподвижным ротором.

Указанные обстоятельства определили выбор **объекта исследования**, которым является синхронный электромеханический преобразователь энергии – синхронный электродвигатель, а также **предмета исследования** – идентификации параметров синхронного электродвигателя в режиме с

неподвижным ротором.

Целью диссертационной работы является разработка метода определения параметров синхронных электродвигателей различного конструктивного исполнения путем идентификации электрических параметров обмоток в режиме с неподвижным ротором.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие научные **задачи**:

1 Разработка научно обоснованных имитационных моделей синхронных электродвигателей различного конструктивного исполнения в среде MATLAB, учитывающих основные свойства СД при осуществлении идентификации электрических параметров обмоток.

2 Разработка метода и алгоритмов идентификации, позволяющих определять весь комплекс электрических параметров синхронных электродвигателей различной конструкции.

3 Формулировка и обоснование требований к качеству тестового сигнала при идентификации электрических параметров СД.

4 Разработка технических решений идентификации электрических параметров, позволяющих проводить физический эксперимент.

5 Оценка эффективности разработанного метода идентификации через анализ результатов эксперимента.

6 Анализ тепловых режимов в процессе идентификации электрических параметров обмоток синхронных двигателей различного конструктивного исполнения при неподвижном роторе, доказывающий отсутствие перегрева обмоток и ненужность применения дополнительных средств охлаждения.

Методы исследований базируются на методах теории автоматического управления, идентификации, планирования эксперимента, цифровой обработки сигналов. Для решения поставленных задач использовалась программная среда MATLAB с приложениями Power System Blockset и Simulink.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием при теоретическом анализе методов, базирующихся на фундаментальных положениях теории электрических машин переменного тока, теории электромеханических преобразователей энергии, теории автоматического управления и регулирования, методов математического моделирования динамических систем, численных методов решения задач управления и оптимизации, а также результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна работы:

1 Разработаны и исследованы имитационные модели СД различного конструктивного исполнения, полученные на основе анализа процессов электромеханического преобразования энергии и используемые для моделирования в MATLAB.

2 Разработан метод идентификации электрических параметров СД при неподвижном роторе, отличающийся от известных возможностью определения всех электрических параметров СД.

Основные положения, защищаемые автором.

1 Метод идентификации электрических параметров СД.

2 Методика проведения эксперимента идентификации, включая программно-техническое обеспечение.

Практическая ценность работы.

1 Разработаны алгоритмы идентификации и созданы компьютерные программы, используемые для обработки результатов эксперимента.

2. Разработаны схемные решения для проведения идентификации электрических параметров СД.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты теоретических исследований используются в учебном процессе при подготовке инженеров и бакалавров на кафедрах «Электроэнергетика» Инновационного Евразийского университета и «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова. Кроме того, результаты работы приняты к внедрению в ТОО «Павлодартехэнерго», г.Павлодар, Казахстан.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных конференциях: «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», Благовещенск, 2000 г.; «Электромеханические преобразователи энергии», Томск: ТПУ, 2001 г.; «Математические модели и информационные технологии в социально-экономических и экологических системах», Луганск (Украина): ВГУ, 2001 г.; «3 Международная (14 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу», Нижний Новгород, 2001 г.; «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения», Новочеркасск: Южно-Российский государственный университет, 2001 г.; «Наука-Техника-Технологии на рубеже третьего тысячелетия», Находка, 2001 г.; «Энергоресурсосберегающие технологии Прииртышья», Павлодар (Казахстан), 2001 г.; «Социальные и экономические аспекты развития региона: потенциал, проблемы и перспективы», Павлодар, 2001 г. и 2003 г.; «Казахстан в 3-м тысячелетии: качество образования в современных условиях», Павлодар, 2001г.; 14th Int. Conference «Process Control», Bratislava (Словакия) 2003 г.; «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития», Томск: ТУСУР, 2007 г.; «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», Благовещенск: Амурский государственный университет, 2008 г.

Диссертация одобрена на расширенном заседании кафедр электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета, «Электроэнергетика» Инновационного Евразийского университета и «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 печатных работ, из них 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК, 5 патентов на изобретение республики Казахстан, 1 монография.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 148 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе выполнен обзор существующих способов определения параметров, которые полностью определяют регулировочные, пуско-тормозные и эксплуатационные режимные показатели синхронных машин. При определении параметров синхронной машины применяют известные методы: холостого хода и короткого замыкания (Гольдберг О.Д., Горев А.А., Копылов И.П., Костенко М.П., Постников И.М.); малого скольжения (Гольдберг О.Д. и Горев А.А.); с поворотом фаз (Гольдберг О.Д., Горев А.А., Постников И.М.); отрицательного возбуждения (Гольдберг О.Д.); нагрузки с измерением угла между ЭДС машины и напряжением (Горев А.А., Постников И.М., Копылов И.П.), а также осциллографический и статический методы (Гольдберг О.Д., Горев А.А., Постников И.М.).

Анализ возможностей идентификации параметров показал, что для успешного синтеза алгоритмов оценивания и идентификации объекта целесообразно предварительное выявление свойств управляемости, наблюдаемости и идентифицируемости (Бесекерский В.А., Попов Е.П., Воронов А.А., Гроп Д., Киричков В.Н., Сейдж Э.П., Мелса Дж. Л., Сильвестров А.Н., Чинаев П.И., Красовский А.А., Цыпкин Я.З., Штейнберг Ш.Е., Эйкхофф П.). Управляемость, наблюдаемость и идентифицируемость определяются из математического описания объекта в пространстве состояния методом переменных состояния с помощью векторно-матричного представления, как описано в работах (Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г., Воронов А.А., Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В., Красовский А.А., Цыпкин Я.З.). Необходимое и достаточное условие полной управляемости по Калману определено в работах Воронова А.А., Красовского А.А. и др. Идентификацию Linke Gerald, Гроп Д., Киричков В.Н., Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л., Сильвестров А.Н., Чинаев П.И., Красовский А.А. трактуют как получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта. Задачу идентификации можно рассматривать (Эйкхофф П.) как отыскание или оценку некоторого вектора параметров объекта – параметров синхронного двигателя. Основываясь на имеющейся априорной информации Becker T., Гроп Д., Сильвестров А.Н., Чинаев П.И., Красовский А.А. и Эйкхофф П. предлагают: оценивание по методу наименьших квадратов, марковские оценки, оценивание методом максимального правдоподобия и байесовские оценки. Эффективность идентификации во многом зависит от удачно выбранных языка и структуры модели, которые целиком базируются на теоретических априорных предпосылках (Цыпкин Я.З., Штейнберг Ш.Е., Эйкхофф П. и др.). А объект будет являться идентифицируемым, если по измерениям координат состояния

объекта критерий идентифицируемости удовлетворяет условиям, сформулированным Вороновым А.А. и Красовским А.А.

Проанализированы также достоинства и недостатки известных методов и технических решений, позволяющих определять параметры синхронной машины. Сформулирована необходимость и целесообразность разработки новых методов и алгоритмов определения параметров обмоток синхронной машины, реализуемых в режиме с неподвижным ротором. Для этого предложено, рассматривая синхронную машину в режиме с неподвижным ротором как динамический объект, использовать методы параметрической идентификации динамических систем, а также свойств наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости динамической системы.

Во второй главе рассмотрены модели СД различных конструкций, а именно, неявно- и явнополюсного СД с демпферными обмотками и без таковых, реализованных на основе математического описания обобщенного электромеханического преобразователя энергии в системе d, q -координат.

В соответствии с принятыми допущениями, математическое описание синхронного электродвигателя представлено в виде

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_d}{dt} \\ \frac{d\psi_q}{dt} \\ \frac{d\psi_f}{dt} \\ \frac{d\psi_D}{dt} \\ \frac{d\psi_Q}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} ;$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_f & x_{fD} & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_{fD} & x_D & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} ; \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n (i_d \psi_q - i_q \psi_d) ;$$

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} .$$

где u, ψ, i — напряжение, потокосцепление и ток; r, x — активное и индуктивное сопротивление обмотки; M, M_c — электромагнитный момент и момент статического сопротивления; p_n — число пар полюсов; ω — частота вращения; J_Σ — суммарный момент инерции электродвигателя; индексы: d, q — статорная обмотка по продольной d и поперечной q осям; f — обмотка возбуждения; D, Q — демпферная обмотка по продольной d и поперечной q осям; ad, aq — взаимные влияния статорной обмотки и обмотки ротора по продольной d и поперечной q

осям; fD – взаимное влияние обмотки возбуждения и демпферной обмотки по оси d .

Приведенная модель (1) соответствует описанию явнополюсного СД с демпферными обмотками.

Модель явнополюсного СД без демпферных обмоток (2) получим, исключив параметры демпферной обмотки из матрицы коэффициентов уравнений системы (1).

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_d}{dt} \\ \frac{d\psi_q}{dt} \\ \frac{d\psi_f}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ad} \\ 0 & x_q & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix}.$$

Приняв в (1) $x_d=x_q$ и $x_{ad}=x_{aq}$, получим математическое описание неявнополюсного СД с демпферными обмотками, а из (2), при тех же условиях, получим модель неявнополюсного СД без демпферных обмоток.

Необходимыми условиями для обеспечения успешной идентификации параметров синхронного электродвигателя в режиме с неподвижным ротором являются следующие специальные требования к входным и выходным сигналам: входной сигнал должен возбуждать все собственные колебания объекта, а выходной сигнал должен содержать достаточно информации об объекте. Другими словами объект должен быть управляемым, наблюдаемым и идентифицируемым. Кроме того, сигналы должны принадлежать к классу постоянно возбуждающих.

Исследования свойств управляемости, наблюдаемости и идентифицируемости синхронного двигателя показали, что матрицы управляемости, наблюдаемости и идентифицируемости определены в виде (3)...(5)

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{r_a}{x_d} & 0 & \frac{r_a x_{ad}}{x_d x_f} & \frac{r_a (r_f x_{ad}^2 + r_a x_f^2)}{x_d^2 x_f^2} & 0 & -\frac{r_a x_{ad} (r_a x_f + r_f x_d)}{x_d^2 x_f^2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{r_a}{x_q} & 0 & 0 & \left(\frac{r_a}{x_q}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{r_f x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & -\frac{r_f}{x_f} & -\frac{r_f x_{ad} (r_a x_f + r_f x_d)}{x_d^2 x_f^2} & 0 & \frac{r_f (r_a x_{ad}^2 + r_f x_d^2)}{x_d^2 x_f^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$N = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_d} & 0 & \frac{x_{ad}}{x_d x_f} & \frac{-r_d x_f^2 - r_f x_{ad}^2}{x_d^2 x_f^2} & 0 & \frac{x_{ad}(r_d x_f + r_f x_{ad})}{x_d^2 x_f^2} & \frac{r_d^2 x_f^3 - r_f^2 x_{ad}^2 x_d^2}{x_d^3 x_f^3} & 0 & \frac{r_d r_f x_{ad}(x_d x_f - x_{ad}^2) + x_{ad}(r_d^2 x_f^2 - r_f^2 x_{ad}^2)}{x_d^3 x_f^3} \\ 0 & \frac{1}{x_q} & 0 & 0 & \frac{r_a}{x_q} & 0 & 0 & \frac{r_a^2}{x_q^3} & 0 \\ \frac{x_{ad}}{x_d x_f} & 0 & \frac{1}{x_f} & \frac{x_{ad}(r_d x_f + r_f x_{ad})}{x_d^2 x_f^2} & 0 & \frac{-r_d x_{ad}^2 - r_f x_d^2}{x_d^2 x_f^2} & \frac{r_d r_f x_{ad}(x_d x_f - x_{ad}^2) + x_{ad}(r_d^2 x_f^2 - r_f^2 x_{ad}^2)}{x_d^3 x_f^3} & 0 & \frac{r_f^2 x_d^3 - r_d^2 x_f x_{ad}^2}{x_d^3 x_f^3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I = \begin{bmatrix} \Psi_d & \frac{r_a(x_{ad}\Psi_f - x_f\Psi_d)}{x_d x_f} & \frac{r_a r_f x_{ad}(x_{ad}\Psi_d - x_d\Psi_f) + r_d^2 x_f(x_f\Psi_d - x_{ad}\Psi_f)}{x_d^2 x_f^2} \\ \Psi_q & -\frac{r_a}{x_q}\Psi_q & \left(-\frac{r_a}{x_q}\right)^2 \Psi_q \\ \Psi_f & \frac{r_f(x_{ad}\Psi_d - x_d\Psi_f)}{x_d x_f} & \frac{r_a r_f x_{ad}(x_{ad}\Psi_f - x_f\Psi_d) + r_f^2 x_d(x_d\Psi_f - x_{ad}\Psi_d)}{x_d^2 x_f^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В результате исследований (3)...(5) выявлено, что СД является управляемым, наблюдаемым и идентифицируемым. Это создает принципиальную возможность осуществления полной идентификации электрических параметров обмоток в режиме с неподвижным ротором при учете различных конструктивных особенностей СД.

Однако, реализация этой возможности неосуществима без создания специального математического аппарата и технической поддержки, поэтому в **третьей главе** разработан метод, обеспечивающий идентификацию электрических параметров обмоток СД. Метод основан на известных принципах параметрической идентификации динамических объектов, который в сочетании с использованием метода наименьших квадратов, позволяет в полной мере учитывать конструктивные особенности различных двигателей.

Получены выражения для идентификации электрических параметров обмоток явнополюсного СД с демпферной обмоткой в виде:

$$\begin{aligned} \frac{du_d}{dt} - r_a \cdot \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{T_D} \cdot (-u_d + r_a \cdot i_d) + \frac{x_d}{T_D} \cdot \frac{di_d}{dt} + \\ &+ (x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_D}) \cdot \frac{d^2 i_d}{dt^2} + \frac{x_{ad}}{T_D} \cdot \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \cdot (1 - \frac{x_{fd}}{x_D}) \cdot \frac{d^2 i_f}{dt^2}; \\ \frac{du_f}{dt} + \frac{1}{T_D} \cdot u_f - \frac{x_{ad}}{T_D} \cdot \frac{di_d}{dt} - (x_{ad} - \frac{x_{ad} \cdot x_{fd}}{x_D}) \cdot \frac{d^2 i_d}{dt^2} &= \\ &= \frac{r_f}{T_D} \cdot i_f + (r_f + \frac{x_f}{T_D}) \cdot \frac{di_f}{dt} + (x_f - \frac{x_{fd}^2}{x_D}) \cdot \frac{d^2 i_f}{dt^2}; \\ \frac{du_q}{dt} - r_a \cdot \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{T_Q} \cdot (-u_q + r_a \cdot i_q) + \frac{x_q}{T_Q} \cdot \frac{di_q}{dt} + (x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q}) \cdot \frac{d^2 i_q}{dt^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где T_D , T_Q – постоянные времени демпферной обмотки.

Выражение (6) позволяет определить следующие параметры обмоток $x_d, x_{ad}, x_D, r_D, x_{fd}, r_f, x_f, x_q, x_{aq}, x_Q, r_Q$, включая T_D и T_Q . Сверхпереходные и переходные сопротивления определяются исходя из схемы замещения СД.

Наиболее привлекательно обеспечить идентификацию электрических параметров обмоток синхронного двигателя, используя возмущения, содержащиеся в самом объекте. Однако энергетический спектр возмущений может быть слишком узким или содержать доминирующие частоты, что требует предварительного приведения его к широкополосному виду - «отбеливанию», либо периодической отсортировки для приближения спектра входного сигнала к спектру белого шума. Из-за того, что доступны лишь конечные реализации входных и выходных сигналов, точность оценивания корреляционных функций существенно ограничена.

Поэтому идентификация электрических параметров обмоток осуществляется методом активного эксперимента, т.е. путем воздействия на обмотки заторможенного синхронного двигателя специально сформированным идентифицирующим сигналом. Важнейший показатель - точность идентификации, как показали исследования, напрямую зависит от правильного выбора параметров идентифицирующего сигнала: формы, частоты и уровня напряжения. При этом необходимо учитывать, что для наилучшего отклика системы в рабочей полосе частот амплитудный спектр сигнала должен быть явно выражен, то есть иметь ненулевые спектральные составляющие. Поэтому были рассмотрены ступенчатые, импульсные, гармонические сигналы различной формы. В качестве идентифицирующего сигнала рекомендовано применение специально созданной разрывной периодической функции, приведенной на рис. 1.

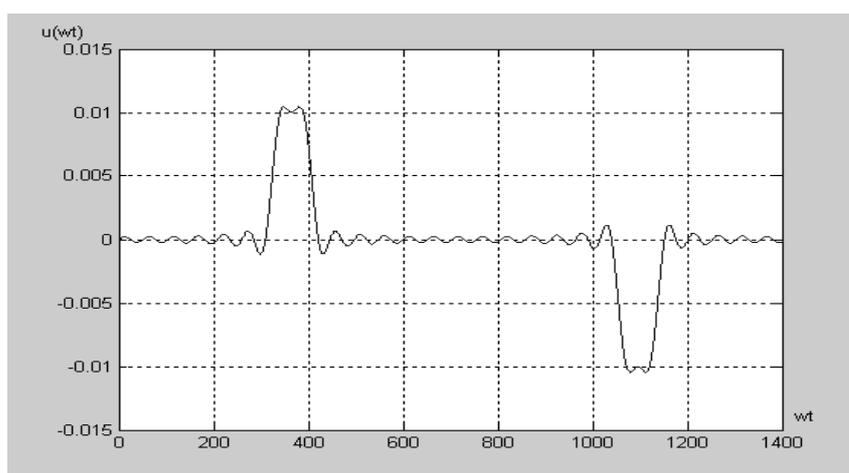


Рис. 1. Специально сформированный идентифицирующий сигнал

Величину напряжения идентифицирующего сигнала соответствующей обмотки выбирают из условий, что ток в обмотке не должен превышать номинального тока электродвигателя, должно быть исключено влияние насыщения, а ротор двигателя должен оставаться неподвижным.

В зависимости от особенностей конструкции и габаритной мощности синхронных двигателей частота напряжения идентифицирующего сигнала может быть различной, что создаст определенные трудности в его формировании. Поэтому возникает необходимость в выявлении некоторых взаимозависимостей между параметрами идентифицирующего сигнала и особенностями конструкции и мощностью синхронного двигателя.

В процессе исследований было установлено, что частота f_μ напряжения идентифицирующего сигнала должна совпадать с собственной частотой синхронного двигателя по d -, q -осям и определяется выражениями $f_{\mu d}$ и $f_{\mu q}$.

Для СД с демпферными обмотками

$$f_{\mu d} = \frac{T_d + T_D - \sqrt{(T_d - T_D)^2 - 4 \cdot \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_d \cdot x_D}\right) \cdot T_d \cdot T_D}}{2 \cdot \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_d \cdot x_D}\right) \cdot T_d \cdot T_D}; \quad (7)$$

$$f_{\mu q} = \frac{T_q + T_Q - \sqrt{(T_q - T_Q)^2 - 4 \cdot \left(1 - \frac{x_{aq}^2}{x_q \cdot x_Q}\right) \cdot T_q \cdot T_Q}}{2 \cdot \left(1 - \frac{x_{aq}^2}{x_q \cdot x_Q}\right) \cdot T_q \cdot T_Q}. \quad (8)$$

Для СД без демпферных обмоток

$$f_{\mu d} = \frac{1}{T_d}; \quad f_{\mu q} = \frac{1}{T_q}. \quad (9)$$

Частота сигнала, идентифицирующего параметры цепи возбуждения по d -оси

$$f_{\mu f} = (10 \div 100) \cdot f_{\mu d}. \quad (10)$$

Для примера показано: СД мощностью 3,5 кВт с демпферными обмотками по d - и q -осям и обмоткой возбуждения по d -оси, должен иметь частоту идентифицирующего сигнала по d -оси 1,50 Гц, а по q -оси – 2,54 Гц; для аналогичного СД мощностью 22 кВт частота идентифицирующего сигнала по d -оси – 0,23 Гц, а по q -оси – 0,93 Гц.

В четвертой главе разработаны алгоритмы идентификации электрических параметров обмоток СД в режиме с неподвижным ротором, разработаны методики и программы идентификации, даны рекомендации по технической реализации процесса идентификации, а также разработаны схемы информационно-технического процесса идентификации.

Алгоритм идентификации параметров СД (фрагменты структуры которого приведены на рис. 2) дополнительно предусматривает: задание необходимых для идентификации исходных данных; учет конструктивных особенностей СД (неявно- или явнополюсный, с демпферными обмотками или без таковых); обеспечение возможности варьирования идентифицирующего сигнала по форме, частоте, амплитуде; учет специфики передачи данных в

части шумовых воздействий, а также необходимости фильтрации сигналов.

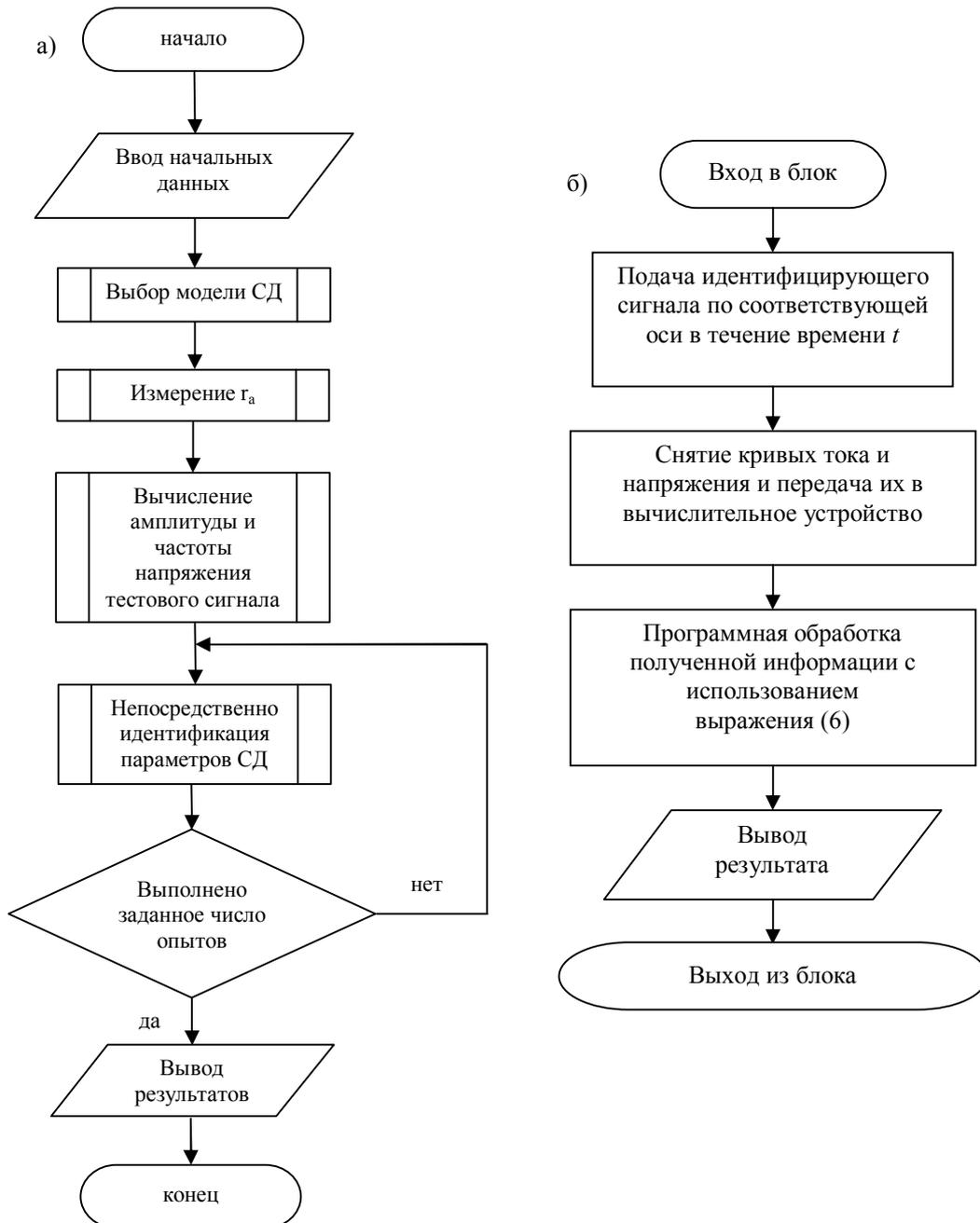


Рис. 2. Алгоритм идентификации параметров СД (а) и структура блока «Непосредственно идентификация параметров СД» (б)

Для явнополюсного СД с демпферными обмотками идентифицируются следующие индуктивные и активные сопротивления обмоток: $x_d, x_{ad}, x_D, r_D, x_{fD}, r_f, x_f, x_q, x_{aq}, x_Q, r_Q$

Для этого выполняют следующие операции:

1 Формируют идентифицирующие напряжения специальной формы и частоты u_d и u_f . На выводы С1-0 обмотки статора двигателя в режиме с неподвижным ротором (рис. 3,а) подают идентифицирующее напряжение u_d специальной формы с частотой f_{ud} . Выводы С2 и С3 обмотки статора

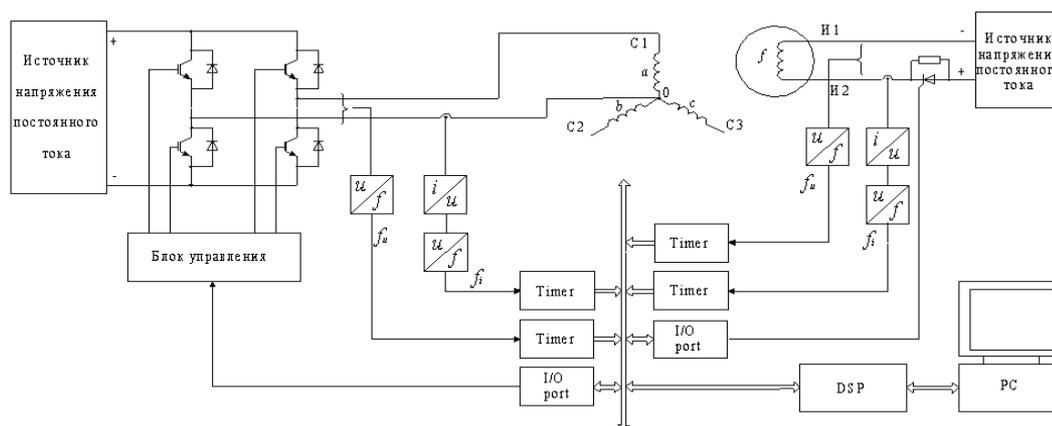
отключены. На выводы И1 и И2 обмотки возбуждения подают идентифицирующее напряжение u_f . В соответствии со схемой (рис. 3,а) измеряют напряжение, ток статора и ток возбуждения синхронного двигателя. Определяют в соответствии с выражением (6):

$\frac{1}{T_D}$, $\frac{x_d}{T_D}$, $(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_D})$, $\frac{x_{ad}}{T_D}$, $(x_{ad} - \frac{x_{ad} \cdot x_{fD}}{x_D})$ составляющие по продольной оси.

Идентифицируют: x_d , x_{ad} , x_D , r_D , x_{fD} параметры обмоток синхронного двигателя.

2 Выполняют при тех же условиях. В соответствии со схемой (рис. 3,а) измеряют напряжение, ток статора и напряжение возбуждения. Определяют в соответствии с выражением (6) $\frac{r_f}{T_D}$, $(r_f + \frac{x_f}{T_D})$, $(x_f - \frac{x_{fD}^2}{x_D})$ составляющие по продольной оси. Идентифицируют r_f , x_f параметры обмоток синхронного двигателя.

а)



б)

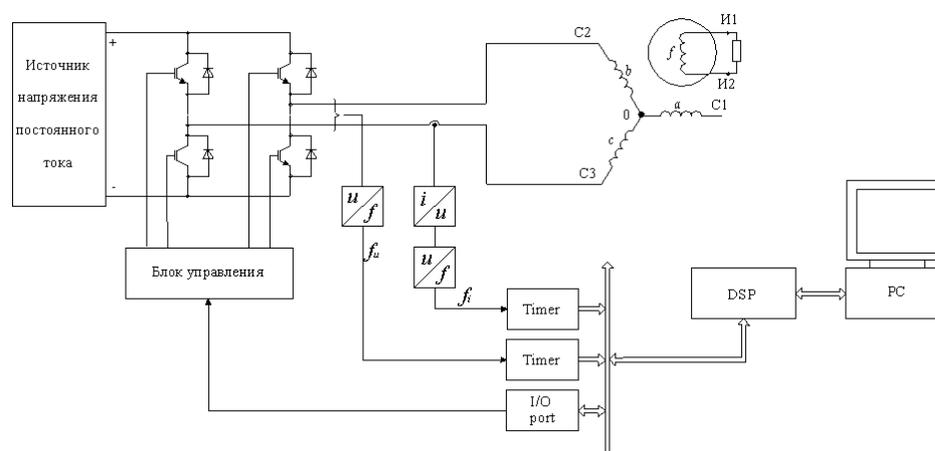


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для идентификации электрических параметров обмоток СД по d -оси (а) и по q -оси (б)

3 Формируют идентифицирующие напряжения специальной формы и частоты u_q и $f_{\mu q}$. Выводы С1-0 обмотки статора отключены. Выводы И1-И2

обмотки возбуждения отключены от питающего напряжения и подключены на дополнительное сопротивление R_f . На выводы С2-С3 обмотки статора двигателя в режиме с неподвижным ротором подают идентифицирующее напряжение u_q специальной формы с частотой $f_{\mu q}$. В соответствии со схемой (рис. 3,б) измеряют напряжение и ток статора синхронного двигателя. Определяют в соответствии с выражением (6) $\frac{1}{T_Q}$, $\frac{x_q}{T_Q}$, $(x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q})$ составляющие, по которым идентифицируют x_q , x_{aq} , x_Q , r_Q параметры синхронного двигателя.

Методика проведения идентификации для других типов СД (неявнополюсный с демпферной обмоткой, а также без демпферных обмоток) остается такой же. Изменяется только выражение (6) по которому проводится обработка результата эксперимента с учетом конструктивных особенностей СД.

Идентифицирующие сигналы с учетом внешних шумов приведены на рис. 4.

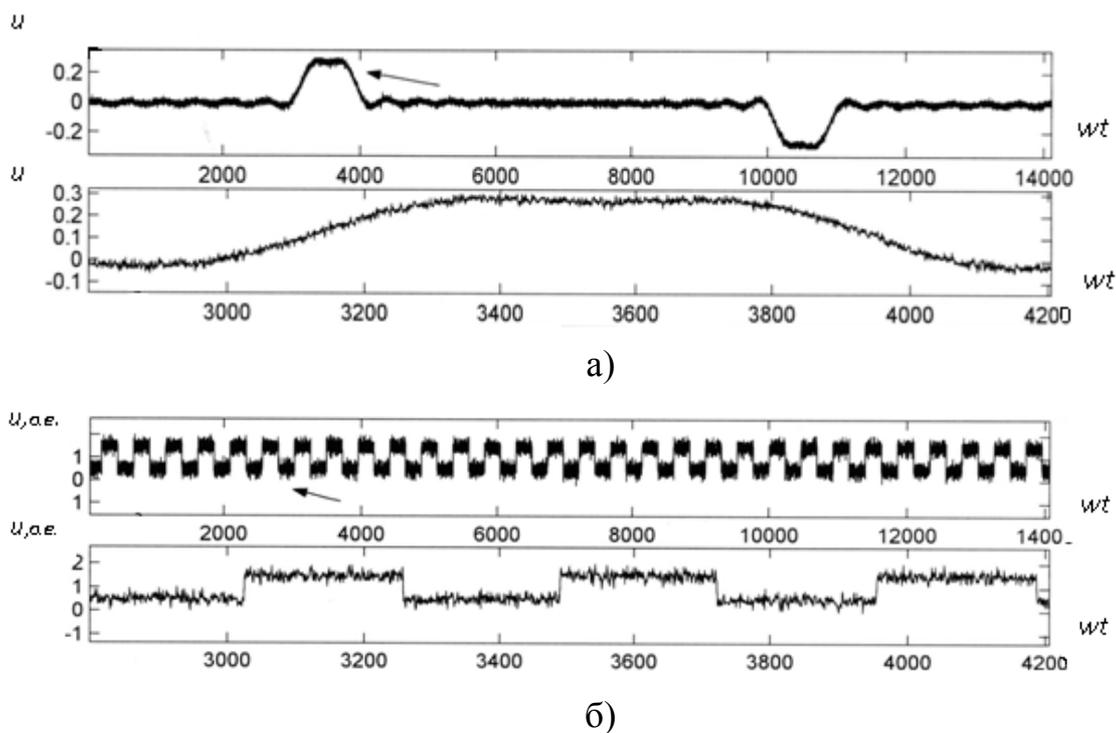


Рис. 4. Вид идентифицирующих сигналов по d -оси обмотки СД (а) и обмотки возбуждения (б)

Имитационный эксперимент проводился в программной среде MATLAB, где созданы модели экспериментальной установки. Математическое описание синхронного двигателя, источников тестового сигнала и измерителей было реализовано в виде структурной схемы в Simulink (рис. 5).

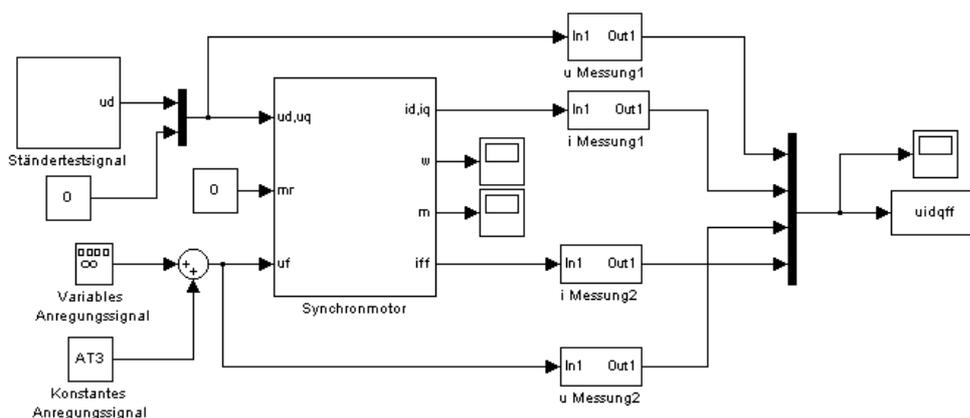


Рис. 5 - Имитационная модель идентификации параметров СД

В таблице 1 приведены результаты идентификации электрических параметров обмоток СД.

Таблица 1 – Электрические параметры обмоток СД

Параметры СД, о.е.	r_a	x_d	x_q	r_f	x_f	r_D	x_D	r_Q	x_Q	x_{ad}	x_{fD}	x_{aq}
явнополюсный СД с демпферными обмотками												
Справочные данные	0,026	0,832	0,483	0,013	0,816	0,404	0,892	0,771	0,432	0,751	0,705	0,402
Результаты эксперимента	0,026	0,831	0,484	0,014	0,813	0,386	0,889	0,764	0,446	0,749	0,704	0,401
Относительная ошибка, %	0,0	0,120	0,207	7,692	0,368	4,455	0,336	0,908	3,241	0,266	0,142	0,249
явнополюсный СД без демпферных обмоток												
Справочные данные	0,026	0,919	0,529	0,013	0,957	-	-	-	-	0,839	-	0,449
Результаты эксперимента	0,026	0,912	0,529	0,013	0,948	-	-	-	-	0,831	-	0,448
Относительная ошибка, %	0,0	0,762	0,0	0,0	0,940	-	-	-	-	0,953	-	0,223
неявнополюсный СД с демпферными обмотками												
Справочные данные	0,026	1,084	1,084	0,030	1,071	0,130	1,030	0,175	1,033	1,003	1,013	1,003
Результаты эксперимента	0,026	1,081	1,081	0,030	1,066	0,128	1,023	0,174	1,028	0,999	1,008	1,001
Относительная ошибка, %	0,0	0,277	0,277	0,0	0,467	1,539	0,679	0,571	0,484	0,398	0,494	0,199
неявнополюсный СД без демпферных обмоток												
Справочные данные	0,026	1,084	1,084	0,030	1,061	-	-	-	-	1,003	-	1,003
Результаты эксперимента	0,026	1,083	1,083	0,030	1,059	-	-	-	-	1,002	-	1,002
Относительная ошибка, %	0,0	0,092	0,092	0,0	0,189	-	-	-	-	0,099	-	0,099

В зависимости от конструктивных особенностей СД относительная ошибка идентификации параметров: явнополюсный и неявнополюсный СД без демпферных обмоток – до 1%, неявнополюсный СД с демпферными обмотками – до 2%, явнополюсный СД с демпферными обмотками – до 8% при идентификации активных сопротивлений обмоток возбуждения и демпферных.

В пятой главе выполнена оценка тепловых свойств синхронного двигателя с неподвижным ротором при идентификации электрических параметров обмоток.

На основе предложенных тепловых моделей с использованием инструмента компьютерного моделирования – среды MATLAB, проведен ряд имитационных экспериментов с СД различных конструктивных особенностей и мощностей. В результате получены данные, в достаточной мере характеризующие тепловые свойства заторможенного двигателя в процессе идентификации параметров его обмоток. Выявлено, что при действии токов и напряжений идентифицирующих сигналов температура не превышает предельной допустимых значений, обусловленных классом изоляции обмоток.

Для экспериментальной оценки тепловых свойств использована установка, содержащая заторможенный электрический двигатель, в лобовые части обмоток которого помещены термоэлектрические преобразователи типа ХК, выводы обмоток двигателя подключены к источнику напряжения идентифицирующих сигналов. Выводы термоэлектрических преобразователей подключены к измерителю-регулятору ТРМ-138, используемому в автоматизированных системах контроля и регулирования. С его помощью произведено измерение физических температурных параметров, осуществлена фильтрация измеренных параметров, а также отображение измеренных и заданных параметров на встроенном светодиодном цифровом индикаторе.

Экспериментальная оценка тепловых свойств СД с неподвижным ротором при идентификации электрических параметров осуществлялась как при подключении одной обмотки, так и при подключении двух обмоток. Показания температуры регистрировались с интервалом 60 секунд. Результаты натурального эксперимента были сведены в таблицы и обобщены в виде кривых нагрева.

Анализ полученных данных показал, что воздействие на обмотки заторможенного двигателя напряжений идентифицирующих сигналов не приводит в процессе идентификации к предельному перегреву частей синхронного двигателя. Однако, при подключении двух обмоток к источнику напряжения специальной формы температура нагрева СД может быть существенно выше, чем в случае подключения питания к одной обмотке.

В то же время, для повышения надежности и безопасности при проведении работ, связанных с идентификацией электрических параметров обмоток СД средней и большой мощности, уменьшения вероятности возникновения локальных перегревов и связанных с этим возможных точечных повреждений изоляции рекомендовано выполнять эти работы при включенном штатном независимом обдуве. Кроме того, желательно предусмотреть в конструкциях устройств идентификации электрических параметров обмоток защитные мероприятия от длительного нахождения заторможенного электродвигателя под действием идентификационных токов и напряжений в части обеспечения их автоматического отключения с возможностью повторного включения с необходимой задержкой по времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа математического описания синхронных электрических машин получены имитационные модели, учитывающие конструктивные модификации синхронных электродвигателей и предоставляющие возможность идентифицировать параметры обмоток СД на основе среды моделирования MATLAB.

2. Для осуществления этой возможности разработан метод идентификации параметров обмоток СД в режиме с неподвижным ротором.

3. На основе предложенного метода созданы специальные алгоритмы идентификации электрических параметров обмоток СД в режиме с неподвижным ротором, разработаны методики и программы идентификации, даны рекомендации по технической реализации процесса идентификации, а также схемы информационно-технического процесса идентификации.

4. Сформулированы условия выбора параметров идентифицирующего сигнала - формы, амплитуды и частоты. Показано, что точность идентификации параметров обмоток СД в значительной степени определена величиной частоты идентифицирующего сигнала, которая также зависит от мощности двигателя. Разработана методика определения частоты идентифицирующего сигнала.

5. Ошибка идентификации параметров СД по результатам имитационного эксперимента варьируется от 0,1% и более в зависимости от конструктивных особенностей СД: явнополюсный и неявнополюсный СД без демпферных обмоток – до 1%, неявнополюсный СД с демпферными обмотками – до 2%, явнополюсный СД с демпферными обмотками – до 8% при идентификации активных сопротивлений обмоток возбуждения и демпферных. Рекомендовано для снижения ошибки до уровня 3% в процессе идентификации предварительно измерять активные сопротивления указанных обмоток другими методами.

6. Выявлено, что при действии токов и напряжений идентифицирующих сигналов температура основных элементов заторможенного СД не превышает предельной допустимых значений, обусловленных классом изоляции обмоток. В то же время, с целью уменьшения вероятности возникновения локальных перегревов и связанных с этим повреждений изоляции, что особенно актуально для двигателей большой единичной мощности, рекомендованы специальные мероприятия для защиты от длительного нахождения заторможенного электродвигателя под действием идентификационных токов и напряжений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- 1 **Кибартене, Ю.В.** Синхронный электродвигатель с неподвижным ротором как объект идентификации / Ю.В. Кибартене // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009.– Т. 315. – № 4. –С. 82-84.

Патенты

- 2 Пат. 10361 РК. МПК⁷ Н 02 Р 5/34. Электропривод переменного тока / В.Ю. Мельников, В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**, Е.В. Зигангирова. Заявлено 13.12.1999; Опубл. 15.06.2001, бюл. №6. – 12 с.: ил.
- 3 Пат. 10818 РК. МПК⁷ G01L 3/10. Способ определения электромагнитного момента трехфазного неявнополюсного синхронного электродвигателя / В.Ю.Мельников, В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**, Е.В. Зигангирова. Заявлено 09.03.2000; Опубл. 15.10.2001, бюл. №10. – 4 с.: ил.
- 4 Пат. 11757 РК. МПК⁷ Н 02 Р 5/34. Электропривод переменного тока / В.Ю. Мельников, В.В. Кибартас, Е.В. Зигангирова, **Ю.В. Кибартене**. Заявлено 11.12.2000; Опубл. 15.07.2002, бюл. № 7. – 7 с.: ил.
- 5 Пат. 15208 РК. МПК⁷ G01L 3/10. Способ определения параметров синхронной машины/ В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**, В.Ю. Мельников. Заявлено 21.05.2003; Опубл. 15.12.2004, бюл. № 12. – 8 с.
- 6 Пат. 17806 РК. МПК⁷ G01R 27/00. Способ определения параметров трансформатора/ В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**, В.Ю. Мельников. Заявлено 28.02.2005; Опубл. 15.09.2006, бюл. № 6. – 3 с.

Статьи в Российских и иностранных изданиях, материалы международных и региональных конференций

- 7 Мельников, В.Ю. Имитационное моделирование как средство разработки экологически чистых, безопасных и экономичных технологий и техники / В.Ю. Мельников, В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**, Е.В. Зигангирова. // Математические модели и информационные технологии в социально - экономических и экологических системах: Сб. трудов 2 Международной науч.-практической конф. - Восточнoукраинский национальный университет. - Украина, Луганск: ВНУ, 2001. - С. 142-144.
- 8 Кибартас, В.В. Идентификация параметров синхронной машины при неподвижном роторе / В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене** // Материалы респ. науч.-теорет. конф. "Торайгыровские чтения". – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2003. - Т.3. - С. 168-173.
- 9 Melnikov, V. Device and methods of indirect measurements of electromechanical systems coordinates / V. Melnikov, Y. Zigangirova, V. Kibartas, **Y. Kibartene** // The 14th International conference “Process Control 2003”, High Tatri, Slovakia, 2003. – С. 175-178.
- 10 Кибартас, В.В. Метод идентификации параметров обмоток синхронных электродвигателей различных конструктивных особенностей/ В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене** // Вестник Павлодарского университета. – Павлодар: учреждение «Павлодарский университет», 2004. - № 1. - С. 163-168.
- 11 **Кибартене, Ю.В.** Алгоритм идентификации параметров электротехнических систем с синхронными двигателями / Ю.В. Кибартене // Интеграция науки и промышленности – решающий фактор в развитии экономики республики Казахстан: Материалы научно-практической конференции с международным

участием. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2005. – Т. 2. - С. 85-90.

- 12 **Кибартене, Ю.В.** Превышение температуры обмоток синхронного электродвигателя при экспериментальном определении его электрических параметров / Ю.В. Кибартене // Наука и образование в 21 веке: динамика развития в евразийском пространстве: Материалы международной научно-практической конференции. – Павлодар: Павлодарский университет, 2006. – Т. 3. - С. 233-235.
- 13 Мельников, В.Ю. Косвенный контроль координат неявнополюсного синхронного электродвигателя: Монография / В.Ю. Мельников, В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене**. – Павлодар: Павлодарский университет, 2005. – 144 с.
- 14 Кибартас, В.В. Алгоритмическое обеспечение идентификации электрических параметров обмоток синхронных электромеханических преобразователей / В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене** // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: Материалы Четвертой международной научно-практической конференции. - Томск: ТУСУР, 2007. – С. 37-40.
- 15 Кибартас, В.В. Технический комплекс идентификации параметров синхронных электромеханических преобразователей / В.В. Кибартас, **Ю.В. Кибартене** // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов пятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2008. – С.261-264.

Личный вклад автора заключается в том, что [1, 11, 12] написаны без соавторов; в [7] отражен опыт работы с MATLAB; в [5, 8, 10] разработан метод идентификации электрических параметров СД различной конструкции; в [6] разработан метод идентификации параметров трансформатора; в [2, 3, 4, 9] разработан способ определения косвенного контроля момента неявнополюсного СД; в [13] рассмотрен вопрос идентификации параметров СД применительно к устройствам косвенного контроля координат СД; предложен технический комплекс идентификации параметров синхронных электромеханических преобразователей [14, 15]. Личный вклад в статьях, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 50 %.