

На правах рукописи

**Ле Куанг Кыонг**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ**

**Специальность 05.09.01-Электромеханика и электрические аппараты**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет (МЭИ)».

Научный руководитель: **Амбарцумова Татьяна Трофимовна**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Маслов Сергей Ильич**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры электротехнических комплексов  
автономных объектов (ЭКАО)  
национального исследовательского  
университета (МЭИ),  
и.о. проректора по дополнительным  
формам образования национального  
исследовательского университета (МЭИ).

**Коварский Михаил Ефимович**  
кандидат технических наук, доцент,  
О.А.О. Корпорации ВНИИЭМ,  
зам. нач. научного отдела, гл. конструктор  
регулируемых электроприводов.

Ведущая организация: ООО «Русэлпром»  
109029 Россия, Москва, Нижегородская  
ул., Д.32, кор.15.

Защита диссертации состоится «18» июня 2013г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (Национальный исследовательский университет) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Учёный совет МАИ, ауд. 302 гл..

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет) «МАИ».

Автореферат разослан «16» мая 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07  
кандидат технических наук, доцент



А.Б. Кондратьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальной проблемой сегодня является разработка методов, математических и программных средств моделирования объектов электромеханики.

Асинхронный электропривод является одним из распространённых типов электропривода благодаря высокой надёжности, относительной простоте и удобству эксплуатации. В связи с этим, исследование статических и динамических режимов работы асинхронных двигателей и систем автоматического регулирования на базе асинхронных двигателей имеет большое практическое значение.

Для машин нестандартного, специализированного исполнения и машин, у которых динамический режим в процессе эксплуатации является определяющим, необходим учёт динамических режимов на стадии проектирования. Это позволяет решать задачи синтеза электрических машин с заданными свойствами, добиваться улучшения динамики систем автоматического регулирования не усложнением схем управления, а проектированием двигателей с заранее заданными статическими и динамическими показателями.

При моделировании на макроуровне нашла применение теория “обобщённой электрической машины”, где машина представляется как совокупность взаимоперемещающихся электрических цепей, находящихся в относительном движении. Выбор системы координат при моделировании представляет собой многофакторную задачу. Анализ показывает, что использование математической модели в двухфазной системе координат целесообразно в тех случаях, когда электрическая машина рассматривается как элемент

электромеханической системы. При создании алгоритмов проектирования с учётом многообразия физических процессов целесообразно применение фазной, фазной "заторможенной" системы координат.

При разработке алгоритмов макро моделирования асинхронных машин в динамике актуальной задачей является создание многоконтурной модели. Второй роторный контур может быть использован при моделировании двухклеточного двигателя, может также рассматриваться как интегральный контур вихревых токов. Введение второго контура в статорной цепи позволяет моделировать динамические режимы с учётом вихревых токов в магнитопроводе статора. Модели могут найти применение в поисковых работах по автокомпенсации реактивной мощности за счёт многоконтурности статора. Динамичность современной программной среды существенно влияет на разработку методов и средств математического моделирования. Оптимальный выбор метода решения зависит от ряда причин объективных и субъективных, не исключающих, например, навыки исследователя.

Актуальной проблемой в решении задач анализа и синтеза электромеханических устройств является многокритериальная оптимизация. Алгоритмы многокритериальной оптимизации хорошо согласуются с концепцией экспертных систем, предполагающей наличие базы знаний и интерактивный режим работы лица, принимающего решение.

В задачах проектирования электромеханических устройств хорошо зарекомендовал себя метод многокритериальной поисковой оптимизации, основанный на использовании ЛП<sub>T</sub>-последовательности. Ряд задач оптимизации статических и динамических режимов

асинхронных двигателей решался на основе оптимизационного ЛП<sub>т</sub> – метода с использованием *FORTRAN* – программ.

В условиях современной вычислительной техники и средств программирования, становятся целесообразными реализация оптимизационного метода ЛП<sub>т</sub> в программной среде *MATLAB* и создание программного комплекса на основе универсальных моделей динамики асинхронных двигателей.

Поскольку оптимизационный метод ЛП<sub>т</sub> предполагает написание в каждом случае для модели оптимизируемого объекта программы связи модели объекта с алгоритмом оптимизационного метода, большое значение приобретает разработка универсального алгоритма связи оптимизационного метода с регрессионной моделью, получаемой методом планирования эксперимента. Реализация подобного алгоритма позволит существенно расширить круг решаемых задач моделирования. Без предварительного создания программы связи с методом появляется возможность использования метода ЛП<sub>т</sub> для любого типа электромеханических устройств, работающих в режимах статики или динамики.

**Целью работы** является разработка принципов макро моделирования асинхронных машин с учётом динамики для создания эффективного по вычислительным затратам и удобного в использовании программно – алгоритмического аппарата численного моделирования задач анализа и синтеза асинхронных машин на основе современных методов компьютерного моделирования.

**Достижение цели исследования** предполагает решение следующих основных задач:

- выявление особенностей разработки и реализации численного моделирования динамических режимов асинхронных двигателей на основе применения принципов макро моделирования;

- разработка принципов макро моделирования асинхронных двигателей с учётом динамики и техники эффективной реализации соответствующих им макромоделей – подпрограмм на основе современных методов компьютерного моделирования;
- разработка методики, алгоритмов решения оптимизационных задач проектирования асинхронных машин с учётом динамики в многокритериальной постановке и их программная реализация;
- разработка универсальной методики, алгоритмов создания регрессионных моделей электромеханических устройств методом планирования эксперимента и их программная реализация;
- создание программного комплекса численного моделирования задач анализа и синтеза асинхронных машин с учётом динамики, реализующего разработанные принципы макро моделирования.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы основные положения теории электрических цепей, вычислительной математики, математического анализа, линейной алгебры, математической статистики, а также теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии, математической теории планирования эксперимента, методов многокритериальной поисковой оптимизации и современных методов реализации больших программных комплексов.

Все вычисления и графические построения производились на ПЭВМ с применением следующих универсальных программных продуктов и специализированных пакетов: *MATLAB*, *MAPLE*, *C*.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена корректным использованием соответствующих математических методов, а также сопоставлением полученных результатов математического моделирования с экспериментальными данными и с результатами, полученными другими исследователями.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующих результатах, выносимых на защиту:

- разработаны принципы макро моделирования, позволяющие наиболее эффективным способом решать задачи анализа и синтеза асинхронных машин с учётом динамики на основе возможностей вычислительной математики;
- разработаны методика и алгоритмы макромоделей подпрограмм многоконтурных асинхронных машин в двухфазной, фазовой заторможенной системе координат с учётом энергетических показателей в динамике и несинусоидального напряжения питания;
- разработаны методика и алгоритмы автоматизированного комплекса создания регрессионных моделей для любых электромеханических устройств методом планирования эксперимента;
- разработаны методика и алгоритм оптимизационного метода многокритериальной оптимизации для программной среды *MATLAB*;
- создан и экспериментально проверен комплекс программ анализа и синтеза процессов в многоконтурных асинхронных машинах, основанный на разработанных принципах макро моделирования и ориентированный на пользователей, не имеющих навыков в программировании.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в разработке моделей, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих решать задачи анализа и синтеза асинхронных машин, с учётом динамических режимов, на основе современных средств компьютерного моделирования, что даёт возможность значительно снизить временные затраты на проведение проектно-исследовательских работ, добиваться улучшения динамики электромеханических систем не усложнением схем управления, а путем проектирования двигателей с заранее заданными статическими и динамическими показателями.

Разработанные алгоритмы, программные средства являются универсальными, поскольку применимы для различных типов электромеханических устройств и не требуют от пользователя специальных навыков в программировании.

Результаты диссертационной работы используются на кафедре «Электромеханики» МЭИ при разработке курса лекций и лабораторных работ по дисциплине «математическое моделирование электромеханических устройств».

Результаты диссертационной работы предназначены для использования в разработке экспертной системы электромеханических устройств в С.Р. Вьетнам.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теоретических и расчетных исследований докладывались и обсуждались на XVII-XVIII международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2011-2012 гг.); на XIV международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Программа МКЭЭЭ-2012, 23 сентября – 29 сентября 2012, Крым - Алушта.

**Публикации.** Материалы, отражающие содержание диссертационной работы и полученные в ходе ее выполнения, представлены в 6 публикациях, в том числе в трёх статьях, опубликованных в журналах рекомендуемых ВАК РФ и в трёх тезисах докладов на конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 4 приложений. Основной текст диссертации изложен на 152 страницах машинописного текста, который содержит 80 рисунков, 14 таблиц и список литературы, включающий 62 наименований. Общий объем работы составляет 188 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, определены основные задачи исследований, показана их научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** по данным литературных источников проводится обзор состояния вопроса по моделированию динамических режимов асинхронных двигателей с постоянными и переменными параметрами при синусоидальном и несинусоидальном питании.

Дается краткий обзор численных методов решения задач, связанных с переходными процессами в электрических машинах с линейными и нелинейными параметрами.

В большинстве работ авторы приходят к выводу, что удобной моделью для исследования динамических режимов асинхронных машин является обобщенный электромеханический преобразователь энергии.

Динамические режимы работы в обобщенной электрической машине описываются системой дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнений напряжений и уравнения движения.

Для учёта эффекта вытеснения тока в обмотке ротора и вихревых токов в магнитопроводах статора и ротора, необходимо решать также уравнения, отражающие электромагнитные процессы.

В ряде работ контуры вихревых токов эквивалентруются короткозамкнутыми обмотками-контурами. В этом случае электрическая машина рассматривается как многоконтурная система и приводятся методы расчётного и экспериментального определения параметров, характеризующих работу машины.

Математические модели асинхронной машины (АМ) с учётом динамики, разрабатываются с применением различных координатных систем. Показано, что для исследования динамических режимов АМ с учётом насыщения магнитопроводов, статорных и роторных вихревых токов, вытеснения тока в стержнях ротора, несинусоидальности напряжения питания целесообразно использование математической модели в фазных заторможенных координатах.

При рассмотрении АМ как элемента электромеханической системы, при комплексной разработке системы, можно избавиться от усложнения схемы управления за счёт проектирования машины с заданными динамическими свойствами.

Решение этой задачи возможно на основе регрессионного моделирования и применения оптимизационных методов.

Разделы главы посвящены методу планирования эксперимента и многокритериальной оптимизации.

Показано, что для решения оптимизационных задач в многокритериальной постановке хорошо зарекомендовал себя метод многокритериальной поисковой оптимизации, основанный на использовании ЛП<sub>τ</sub>-последовательности. Метод хорошо согласуется с концепцией экспертных систем.

**Вторая глава** посвящена реализации моделей многоконтурных АМ в системе координат  $(\alpha, \beta)$  в программном пакете *MATLAB-Simulink*.

В главе приводятся уравнения динамики и приведённые к нормальному виду Коши уравнения АД с одним контуром на статоре и с двумя контурами на роторе, расположенными по одной оси, и с двумя контурами на статоре и роторе, расположенными по одной оси в системе координат  $(\alpha, \beta)$ .

На основе стандартных блоков пакета *Simulink*, разработаны блоки преобразования систем координат и блоки питания, с учётом несинусоидальности питания, режимов включения и чередования фаз питающего напряжения. Блоки включены в библиотеку программ пакета.

В главе приводятся структурные схемы реализации моделей в среде *Simulink*. Разработка иллюстрируется тестовым примером, подтверждающим адекватность моделирования.

Библиотека стандартных модулей в *MATLAB-Simulink* пополнена блоками анализа динамических режимов электрических машин.

**Третья глава** посвящена разработке макромоделей многоконтурных АМ на основе S-функции в программной среде *MATLAB*. Разработан набор моделей динамики АМ в двухфазной и фазной заторможенной системе координат с постоянными и переменными параметрами на основе технологии S-функции. Технология основана на описании блоков уравнений электрического равновесия (БЭУ) на языке программирования «C» с последующим взаимодействием с блоками *Simulink*, обеспечивающими связи с аппаратными средствами компьютера. Такая технология позволяет реализовать сложные модели и повысить быстродействие решения.

На основе технологии S-функции разработаны шесть многоконтурных моделей с постоянными параметрами в системе координат  $(\alpha, \beta)$  и фазной заторможенной системе координат и на их основе универсальная модель с постоянными параметрами. Разработано девять многоконтурных моделей асинхронных двигателей в фазной заторможенной системе координат с непостоянными параметрами.

Для модели с переменными параметрами структурное представление блока электрического равновесия приводится на рис. 1.

Модели включены в библиотеку стандартных модулей *MATLAB*.

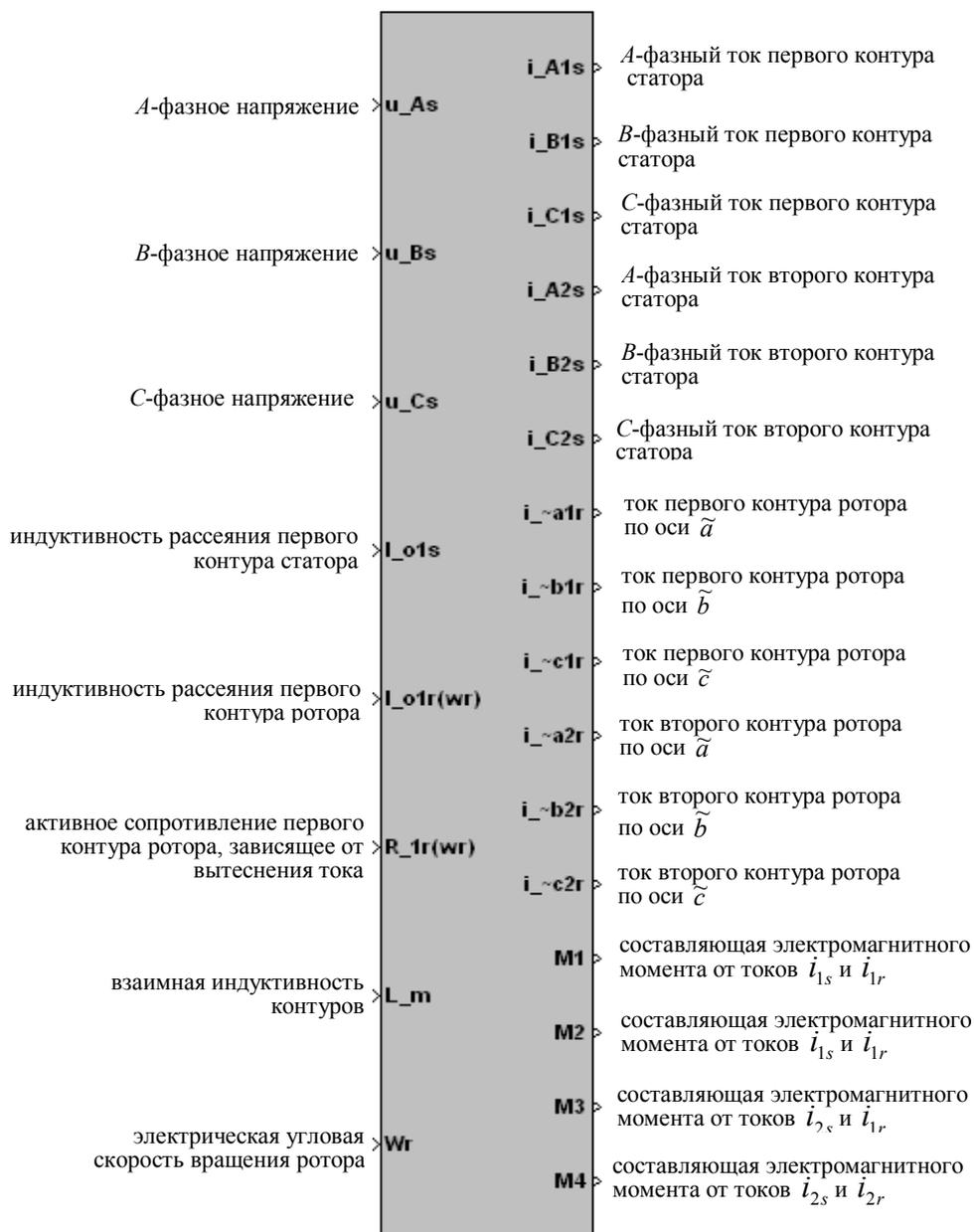


Рис.1. БЭУ АМ с двумя контурами на статоре и роторе, расположенными по одной оси, в трёхфазной заторможенной системе координат, с учётом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора и с учётом насыщения магнитопроводов по главному магнитному пути и путям потоков рассеяния.

**Четвертая глава** посвящена созданию полиномиальной модели объекта методом планирования эксперимента. При решении задач динамики существенную роль может играть применение метода планирования эксперимента. Разработаны алгоритм и программный продукт, позволяющие в автоматизированном режиме создавать регрессионные модели как первого порядка (ПФЭ), так второго порядка (ОЦКП).

Число варьируемых параметров (количество экспериментальных точек) и выходных показателей может меняться в широких пределах.

Алгоритм предполагает два варианта решения задачи: при непосредственной связи с моделью динамики и для независимого расчёта, что позволяет расширить в общем случае круг объектов моделирования.

Блок-схема алгоритма создания полиномиальной модели объекта представлена на рис.2.

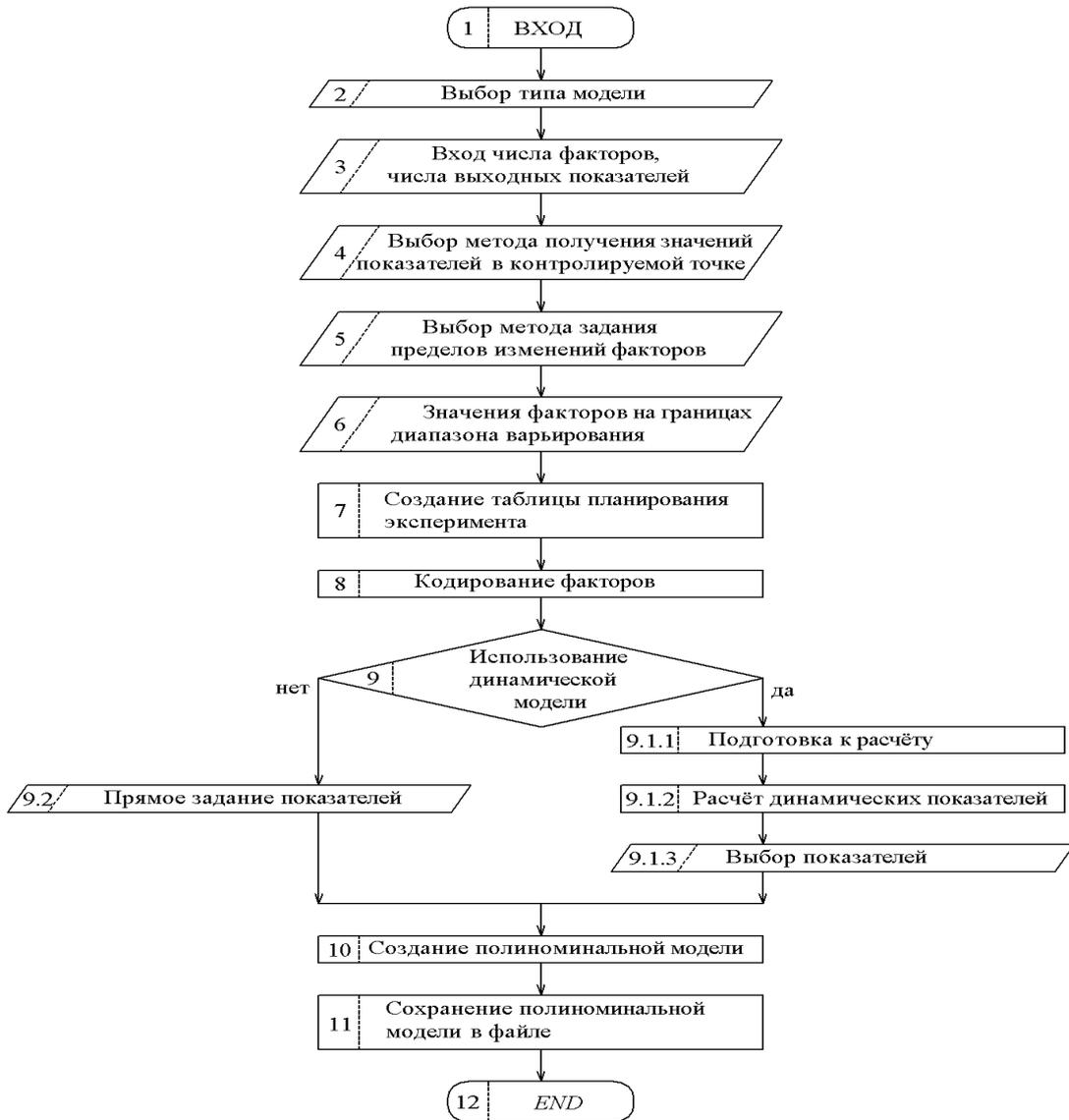


Рис. 2. Алгоритм создания полиномиальной модели объекта методом планирования эксперимента

Алгоритм универсален, применим для любого типа устройств, реализован в среде *MATLAB* и не требует от пользователя навыков в программировании.

Разработанная методика и алгоритм подтверждены численными примерами с доказательством адекватности регрессионных моделей.

**Пятая глава** посвящена многокритериальной оптимизации асинхронных двигателей с учётом динамики в программной среде *MATLAB*.

С учётом возможностей современной вычислительной техники и средств программирования, предлагается реализация оптимизационного метода ЛП<sub>τ</sub> в программной среде *MATLAB*, где создан программный комплекс на основе моделей динамики асинхронных двигателей.

Метод заключается в зондировании пространства параметров, который называют ЛП<sub>τ</sub>-поиском. В качестве пробных точек используются точки ЛП<sub>τ</sub>-последовательности, которые являются наиболее равномерно распределёнными среди всех известных в настоящее время последовательностей.

Ключевым звеном создания алгоритма ЛП<sub>τ</sub>-последовательности является разработка модуля (*genLPtPoint*) генератора ЛП<sub>τ</sub>-последовательности, в котором используется арифметический алгоритм, содержащий таблицу направляющих числителей.

Точки  $A_i$  с декартовыми координатами  $(\alpha_{i,1}, \dots, \alpha_{i,n})$  в  $n$ -мерном пространстве параметров вычисляются следующим образом:

$\alpha_{i,j} = \alpha_j^* + (\alpha_j^{**} - \alpha_j^*)q_{i,j}$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$  - номер пробной точки;  $j = 1, 2, \dots, n$  - номер параметра;  $n$  - количество параметров;  $N$  - количество пробных точек;  $\alpha_j^*$  - нижний предел значения параметра  $j$ ;  $\alpha_j^{**}$  - верхний предел значения параметра  $j$ .

Созданный модуль *genLPtPoint* используется для создания множества пробных точек ЛП<sub>τ</sub> последовательности с максимальным количеством пробных точек  $2^{20}$  (1048576) и максимальным количеством варьируемых параметров 51.

Учитывая, что оптимизационный метод ЛП<sub>τ</sub> предполагает создание в каждом случае для модели оптимизируемого объекта программы связи модели объекта с алгоритмом оптимизационного метода, разработана подсистема оптимизационного расчётного

проектирования АД на основе динамической модели. С целью универсального использования оптимизационного алгоритма разработанная подсистема на основе связи оптимизационного метода с регрессионной моделью, получаемой методом планирования эксперимента.

Подобный подход позволяет решать оптимизационные задачи с использованием ЛП<sub>τ</sub>-последовательности для любого типа устройств, имеющих регрессионные модели, без предварительного создания программы связи с методом.

В качестве примера приводятся результаты оптимизационного расчёта на основе разработанных программных средств для двигателя мощностью 3кВт (4A100S4Y3).

Число варьируемых параметров 10; диапазон изменения варьируемых параметров  $\pm 20\%$  от заданных значений; число испытаний 64; число критериев 8; число решающих критериев 2.

На основе выбранных критериальных ограничений определялись параметры Парето-оптимальных моделей.

Для решающих критериев: времени разбега - 0,114с, и максимального мгновенного значения А-фазного тока первого контура статора – 53,56А получены следующие значения параметров:

$$R_{1s} = 1,67 \text{ Ом} ; R_{2s} = 150,375 \text{ Ом} ; l_{1\sigma s} = 0,01 \text{ Гн} ; l_{2\sigma s} = 0,0018 \text{ Гн} ; M = M_s = M_r = 0,2241 \text{ Гн} ; \\ R_{1r} = 1,0001 \text{ Ом} ; R_{2r} = 37,0088 \text{ Ом} ; l_{1\sigma r} = 0,0106 \text{ Гн} ; l_{2\sigma r} = 0,0632 \text{ Гн} ; J = 0,0203 \text{ кгм}^2 .$$

**Шестая глава** посвящена анализу динамических режимов АД средней мощности на основе разработанных программных средств.

Исследовались степень влияния насыщения магнитопроводов, роторных вихревых токов, вытеснения тока в стержнях ротора на переходные процессы при различных формах напряжения питания.

Для АД, мощностью 3кВт, приводятся динамические показатели при двенадцати различных вариантах моделирования, что позволяет выбрать оптимальную модель для конкретной задачи анализа.

Результаты численных экспериментов не противоречат выводам других исследователей, а сравнение с результатами экспериментальных исследований для АД мощностью 3кВт режимов пуска и пуска с реверсом показывают большую сходимость результатов, 10%, при учёте многообразия физических процессов. Результаты моделирования пуска двигателя мощностью 3кВт (4A100S4Y3) приведены на рис.3. Для двигателей средней мощности в режимах пуска, повторного включения, реверса выполнены численные эксперименты и рассчитаны динамические показатели. Для режимов частых пусков рассчитывались показатели энергообмена в динамике.

Численные эксперименты показывают, что при несинусоидальном напряжении питания ухудшаются характеристики двигателя, уменьшается электромагнитный момент и увеличивается время разбега двигателя. Расхождения токов составляют в среднем до 8% от характеристик данного двигателя, питаемого от источника синусоидального напряжения.

Полученные результаты исследований представляют собой материал, который может быть включён в базу знаний экспертной системы.

Полученные данные исследований представляют собой материал, который может быть включён в базу знаний экспертной системы.

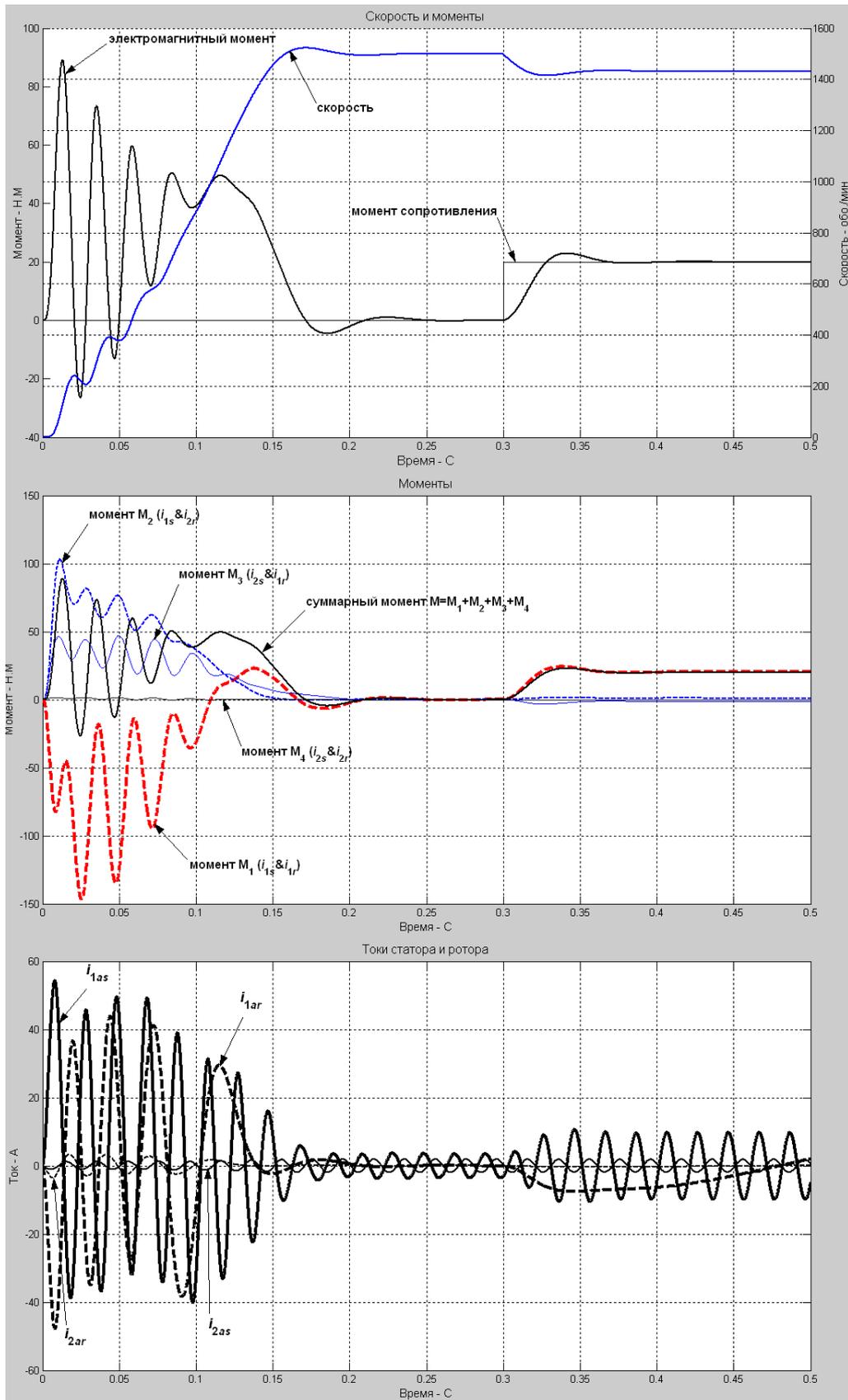


Рис. 3. Зависимости токов статорных, роторных контуров, электромагнитного момента, момента сопротивления, скорости, составляющих электромагнитного момента при пуске асинхронного двигателя,  $P=3\text{кВт}$ ,  $p=2$ , (модель четырёхконтурная).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решалась проблема создания на основе современных методов компьютерного моделирования математических и программных средств решения задач анализа и синтеза многоконтурных асинхронных двигателей с учётом динамики. Получены следующие основные научные и практические результаты:

Аналитический обзор работ, по ряду вопросов моделирования динамических режимов электромеханических устройств, позволил иметь материал для разработки алгоритмов решения задач анализа и синтеза асинхронных машин с учётом динамики, на основе современных средств компьютерного моделирования.

Разработаны модели многоконтурных асинхронных машин и блоки подсистем, необходимые для анализа динамических режимов электрических машин в среде *MATLAB-Simulink*.

Разработаны методика, алгоритм и программная реализация многоконтурных моделей асинхронных двигателей с использованием S-функции в программной среде *MATLAB*.

На основе технологии S-функции разработаны:

- Шесть многоконтурных моделей с постоянными параметрами в системе координат  $(\alpha, \beta)$  и фазной заторможенной системе координат;
- Универсальная модель с постоянными параметрами;
- Девять многоконтурных моделей в фазной заторможенной системе координат с учётом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора и с учётом насыщения магнитопроводов по главному магнитному пути и путям потоков рассеяния.

Созданные математические модели могут быть использованы для исследования, оценки динамических характеристик асинхронных машин различных видов, а также как точный элемент в прикладных задачах электропривода и автоматики.

Разработаны методика и алгоритмы создания полиномиальных моделей методом планирования эксперимента для планов первого (ПФЭ) и второго порядка (ОЦКП).

Методика позволяет создавать модели в среде *MATLAB* для двух вариантов задания исходных данных: при непосредственной связи алгоритма с моделями динамики и для независимых входных данных. Второй вариант расширяет область применения программного продукта. Алгоритм становится универсальным и применим для любого типа устройств.

Разработаны методика, алгоритм и программная реализация в среде *MATLAB* метода многокритериальной поисковой оптимизации, основанного на использовании ЛП<sub>τ</sub>-последовательности.

Разработанный алгоритм реализован как для макромоделей динамики, так и для регрессионных моделей, что расширяет класс решаемых задач и даёт возможность использования метода ЛП<sub>τ</sub> пользователю, не имеющего навыков в программировании.

Для двигателей средней мощности в режимах пуска, повторного включения, реверса выполнены численные эксперименты и рассчитаны динамические показатели.

Анализ динамических режимов АД средней мощности подтверждает адекватность моделирования и даёт материал, который может быть включён в базу знаний экспертной системы.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Амбарцумова Т.Т., Ле Куанг Кыонг. Макромоделирование многоконтурных асинхронных двигателей в среде *MatLab-Simulink* // Научно-технический и учебно-образовательный журнал “Электромеханика”. 2012. №1. с.37-42 (по перечню ВАК).**

2. Амбарцумова Т.Т. , Ле Куанг Кыонг. Макромоделирование энергосберегающих асинхронных двигателей // Научно-технический и информационно-аналитический и учебно-методический журнал “Энергобезопасность и энергосбережение”. 2012. №4. с.16-19 (по перечню ВАК).
3. Амбарцумова Т.Т. , Ле Куанг Кыонг. Многокритериальная оптимизация асинхронных двигателей с учётом динамики в программной среде MATLAB // ежемесячный теоретический и научно-практический журнал “Электричество”. 2012. №11.с.66-69 (по перечню ВАК).
4. Ле Куанг Кыонг. Моделирование многоконтурной асинхронной машины в среде Matlab // 17-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл.–М.: МЭИ, 2011.Т. 2. С. 13-14.
5. Ле Куанг Кыонг. Универсальная макромодель “многоконтурной” асинхронной машины // 18-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. – М.: МЭИ, 2012. Т. 2. С. 185-187.
6. Амбарцумова Т.Т., Ле Куанг Кыонг. Многокритериальная оптимизация асинхронных двигателей с учётом динамики в программной среде Matlab. XIV международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Программа МКЭЭЭ-2012, 23 Сентября – 29 Сентября 2012, Крым - Алушта. Тез. докл. С. 128-130.