

На правах рукописи

ЗАВЬЯЛОВ Владимир Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
«АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС»
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ**

Специальность 05.09.05 – «Теоретическая электротехника»

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Омск – 2005

2006-4
20136

На правах рукописи

ЗАВЬЯЛОВ Владимир Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
«АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС»
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ**

Специальность 05.09.05 - «Теоретическая электротехника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Омск 2005

2198336

Работа выполнена на кафедре «Электрическая техника» в Омском государственном техническом университете

Научный руководитель – Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук профессор
Ковалев Ю З

Официальные оппоненты – доктор технических наук профессор
Горюнов В И

кандидат технических наук доцент
Бакланов А А

Ведущая организация – ОАО «Сибкриотехника»
г Омск

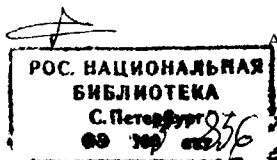
Защита состоится 8 декабря 2005г в 14 00 час на заседании диссертационного совета Д 212 178 03 в Омском государственном техническом университете по адресу 644050, г Омск, пр Мира, 11, ауд 6-340

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета

Автореферат разослан « 8 » _____ ноября _____ 2005г

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять в адрес совета университета

Ученый секретарь
диссертационного совета
к т н , доцент



А И Кириченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Реализация любым предприятием различных технических процессов, связанных с перекачкой невязких жидкостей, приводит к необходимости оптимизации режимов работы всей технологической установки перекачки жидкости, в том числе и с помощью математического моделирования. Существующее несоответствие между высоким уровнем развития теории математического моделирования отдельных элементов электродинамической системы, являющейся частью технологической установки, с одной стороны, и недостаточным количеством проблемно-ориентированных численных методов, учитывающих вычислительные особенности математических моделей установок перекачки жидкости, с другой стороны, указывает на актуальность данной работы.

Цель работы. Целью данной работы является моделирование системы «асинхронный двигатель–центробежный насос» («АД–ЦН»), а также разработка проблемно-ориентированного численного метода анализа указанной электродинамической системы на основе электромеханических и электрогидравлических аналогий.

Задачи исследований. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать математические модели отдельных устройств в составе системы перекачки жидкости.
2. Разработать совместную математическую модель системы перекачки жидкости, не требующую приведения ее к нормальной форме Коши.
3. Разработать численные канонические методы расчета со структурой и свойствами, ориентированными на решение задач, обладающих свойствами жесткости.

Научная новизна.

1. Построена совместная математическая модель электродинамической системы «АД–ЦН» на основе электромеханических и электрогидравлических аналогий.
2. Разработан проблемно-ориентированный канонический одношаговый полунявный метод 2-го порядка точности, обладающий свойством управления глобальной погрешностью Λ .
3. Получены основные вычислительные характеристики предложенного канонического метода: области точности, тип устойчивости, стратегия выбора шага, способ оценки погрешности.

Практическая ценность.

1 Разработана методика, позволяющая анализировать динамические процессы в системе «АД–ЦН» на основе электромеханических и электрогидравлических аналогий.

2. На базе разработанного канонического метода построен алгоритм на алгоритмическом языке программирования Object Pascal в среде Delphi Алгоритм реализован в компоненте Method и зарегистрирован в ОФАП.

3 Тестирование построенного алгоритма, проведенное на широком диапазоне задач, позволило определить возможности метода и область его целесообразного применения для определенного класса задач.

4. На базе разработанного метода реализован комплекс прикладных программ для расчета динамических режимов электромеханических и ветроэнергетических установок, зарегистрированный в ОФАП.

Достоверность результатов подтверждается корректным применением для теоретических выводов строгих научных положений вычислительной математики, теоретической электротехники и других наук, качественным совпадением и достаточной сходимостью результатов вычислительного и физического экспериментов, а также апробацией как предварительных, так и окончательных результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные этапы диссертации докладывались на НК «Молодые ученые на рубеже третьего тысячелетия» (Омск, 2001), МНТК «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2002, 2004), НПК «Энергетика на рубеже веков» (Омск, 2003), XI Международной студенческой школе-семинаре (Москва, 2003).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 7 программ, зарегистрированных в ОФАП

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 189 наименований. Работа содержит 147 страниц текста, 44 рисунка, 5 таблиц

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, научная и практическая значимость работы, определены цели и задачи исследований, описана реализация результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробациях работы и публикациях, описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрена электродинамическая система как часть электротехнической установки (ЭТУ), состоящей из преобразовательного устройства, электромеханического преобразователя, механизма передачи и преобразования движения и рабочего механизма, а также приведена классификация уровней моделирования системы в составе ЭТУ. Рассмотрены четыре уровня моделирования электродинамической системы (табл.1).

Таблица 1

Существующие уровни моделирования системы «АД-ЦН»

		Номинальные режимы работы элементов системы, определенные раздельно	Статические характеристики элементов, подсистемы и системы, определенные раздельно	Динамические характеристики элементов системы, определенные раздельно	Динамические характеристики подсистем и системы, полученные исследованием системы в целом
Согласование параметров элементов системы	Рабочий механизм (насос)	$P_{ен}, M_{ен}$ – номинальная мощность и момент сопротивления	$M_c=f(t)$ $P_c=f(t)$	$M_c=f(t, \varphi, w)$	$M_c=f(t, \varphi, w, \theta, H, Q)$
	Двигатель	$P_{дн}, M_{дн}$ – номинальная мощность и момент двигателя	$P_{дн}, M_{дн}$	$M_d=f(t, u, \psi)$	$M_d=f(t, u, \psi, \theta,)$
	Источник питания	P_n, U_n	$P(t), U(t)$	$P(t, \psi), U(t, \psi)$	$P(t, \psi, \theta), U(t, \psi, \theta)$
Условие согласования параметров элементов системы	$P_{дн} = P_{ен}$ $M_{дн} = M_{ен}$	$P_{дн} = P_c$ $M_{дн} = M_c$	$Jdw/dt = M_d(t, u, \psi) - M_c(t, \varphi, w)$	$Jdw/dt + w^2/2(dJ/d\varphi) = M_d(t, u, \psi, w, \theta,) - M_c(t, \varphi, w, \theta, H, Q)$	

1 уровень - моделирование каждого элемента системы или каждой подсистемы в отдельности с использованием известных математических методов и способов,

2 уровень – моделирование каждого элемента системы или каждой подсистемы в отдельности, но с последующим учётом их взаимной связи со всеми характерными признаками,

3 уровень моделирование двух-трёх основных для рассматриваемой задачи элементов как взаимосвязанных, а остальных – в отдельности,

4 уровень – моделирование электротехнической установки в целом как единой взаимосвязанной системы, состоящей из совокупности подсистем описанных с одинаковым приближением с применением соответствующих общих для всех подсистем методов, способов и приёмов моделирования

Математические модели электродинамических систем обладают целым рядом специфических свойств существенно влияющих на эффективность соответствующих численных методов. К таким свойствам относятся: обусловленность матриц дифференциальных и алгебраических уравнений, стационарность и нестационарность, линейность и нелинейность, жесткость и жесткая колебательность и т.п. Далее выполнен обзор существующих математических моделей электродинамических систем.

Рассмотрены и проанализированы численные методы моделирования электродинамических систем, используемые для решения различных задач динамики. В частности говорится о том, что существующие методы моделирования электродинамических систем делятся:

- на методы моделирования электродинамических систем на базе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ);
- методы моделирования электродинамических систем на базе дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ)

Показано, что в случае решения системы дифференциально-алгебраических уравнений процесс нахождения решения разбивается на два этапа: преобразование исходных уравнений к нормальной форме Коши и собственно решение полученной системы уравнений численными методами. Первый этап является непроеизводительным, поэтому возникает необходимость разработки нового проблемно-ориентированного численного метода на базе известных методов исследования переходных процессов, ориентированного на модели в исходной канонической форме.

Во второй главе разрабатывается математическая модель системы «асинхронный двигатель центробежный насос», схема замещения которой приведена

на рис 1 Для этого сначала рассматриваются математические модели АД и ЦН как отдельных элементов электродинамической системы

При составлении модели и рассмотрении переходных процессов асинхронных машин использовались общепринятые допущения и ограничения, связанные понятием «идеализированная машина»:

- 1) отсутствие вытеснения токов в роторе;
- 2) воздушный зазор между статором и ротором гладкий;
- 3) параметры машины в течение переходного процесса остаются постоянными;
- 4) результирующее магнитное поле вдоль воздушного зазора изменяется синусоидально.

Асинхронный двигатель представлен системой магнитосвязанных обмоток, расположенных на статоре и роторе Следует отметить, что взаимное положение этих обмоток в пространстве при вращении ротора непрерывно изменяется (рис 1) Для описания переходных процессов асинхронного двигателя были составлены уравнения электрического равновесия для напряжений контуров и уравнение равновесия моментов, действующих на ротор Таким образом, математическая модель асинхронного двигателя в естественной системе координат в матричной форме имеет следующий вид.

$$\frac{d\Psi^*}{dt} = f(i^*, t), \quad (1)$$

$$\Psi^* = f_\psi(i^*), \quad (2)$$

где $\Psi^* = [\Psi, \omega, \theta]^T$, $i^* = [i, \omega, \theta]^T$ – векторы,

$f(i^*, t)$, $f_\psi(i^*)$ – вектор-функции;

Ψ^* , i^* – векторы потокосцепления и тока соответственно;

ω, θ – частота вращения и угол поворота ротора соответственно

Современное состояние фундаментальных исследований в области теории лопастных машин и состояние моделирования режимов работы ЦН позволяют построить множество математических моделей с различными наборами исходных данных и уровнями допущений Первым шагом при исследовании ЦН является разделение различных видов машин по уровням допущений на условные категории Наиболее гибкой и удобной представляется классификация, предложенная в работе В.С. Костыгина

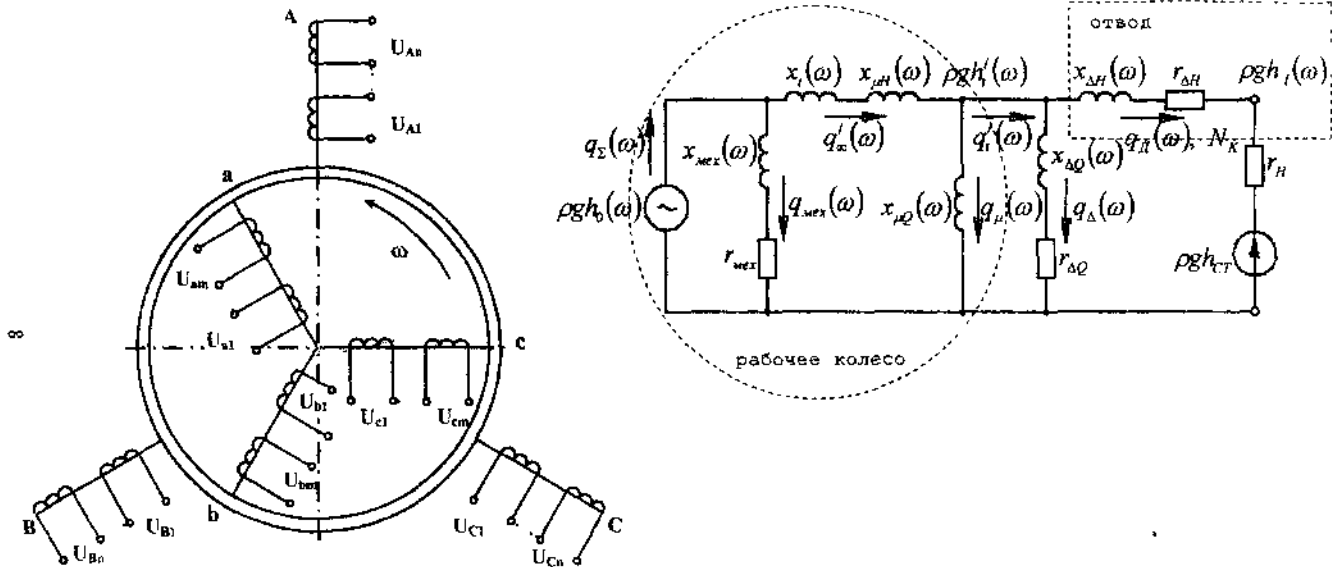


Рис 1 Схема замещения системы «АД-ЦН»

Определение 1. Идеализированным («Эйлеровским») ЦН (ИЦН) называется одноступенчатый и однопоточный ЦН с бесконечным числом ($K_1 \rightarrow \infty$) безгранично тонких лопастей для перекачивания идеальной жидкости, в котором отсутствуют потери мощности.

Определение 2. Теоретическим ЦН (ТЦН) называется аналог идеализированного ЦН, оборудованный колесом с конечным числом лопастей определенной толщины, в котором отсутствуют объемные, гидравлические и механические потери.

Определение 3. Реальным ЦН (РЦН) называется реальный аналог ТЦН с потерями мощности, работающий с однородной (ньютоновской) жидкостью, которая подчиняется закону Ньютона.

Кроме того, считается, что жидкость несжимаема, ее плотность считается постоянной ($\rho = const$), а тепловой режим — установившимся за счет отвода тепла путем теплообмена.

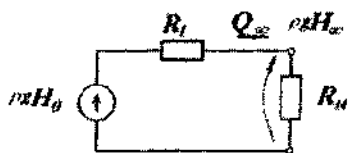


Рис 2 Схема замещения ИЦН

При построении математической модели ЦН работа Костышина взята за основу с учетом особенностей объекта исследования данной диссертационной работы, а также с учетом ограничений, предложенных в ряде существующих разработок. В результате в данной работе разработана методика, основанная на использовании электрогидравлической аналогии. В соответствии с физикой процессов в РЦН исходной является схема замещения эквивалентного ИЦН (рис. 2), которая с учетом гидравлических сопротивлений, рассеивающих энергию потерь, трансформируется в схему (рис. 1, правая часть). Применение законов Кирхгофа к последней схеме позволяет записать уравнения для нахождения мгновенных значений токов в ветвях:

$$q'_e = q_0 + q_\mu + q_\Delta,$$

$$q_{max} r_{max} + L_{max} \frac{dq_{max}}{dt} = \rho g h_0,$$

$$J_{11} \frac{dq'_i}{dt} + L_{\mu Q} \frac{dq_{\mu}}{dt} = \rho g h_0, \quad (3)$$

$$q_{\Delta} r_{\Delta Q} + L_{\Delta Q} \frac{dq_{\Delta}}{dt} - L_{\mu Q} \frac{dq_{\mu}}{dt} = 0,$$

$$q_{\Delta} r_{\Delta Q} + L_{\Delta Q} \frac{dq_{\Delta}}{dt} - \left(q_{\Delta} r_{\Delta H} + L_{\Delta H} \frac{dq_{\Delta}}{dt} \right) - q_{\Delta} r_H = \rho g h_{c1},$$

где $q_{\text{мех}}$ – расход в ветви моделирования механических потерь дискового трения;

q'_i – расход в ветви при условии использования ТЦН;

q_{μ} – расход в ветви, моделирующей потери в связи с учетом конечного числа лопастей;

q_{Δ} – расход в ветви, моделирующей объемные потери.

q_{Δ} – расход в ветви, содержащей гидравлические сопротивления спирально-го отвода и нагрузку;

$L_{\text{мех}}$ – параметр, характеризующий инерционность в ветви моделирования механических потерь,

$L_{\Delta Q}$ – параметр, характеризующий инерционность в ветви, моделирующей объемные потери.

Создание совместной модели электродинамической системы требует совокупного рассмотрения математических моделей отдельных устройств, входящих в ее состав, установления взаимосвязи между отдельными переменными, а в нашем случае и добавления уравнений связи

Таким образом, после слияния математических моделей (1)–(3) отдельных функциональных устройств воедино, а также после проведения расчетов всех параметров с учетом необходимых паспортных конструктивных и режимных параметров была получена совместная математическая модель электродинамической системы

$$\frac{d\Psi_{i,j}}{dt} = -5.6i_{i,j} + 1228i_{i,b} + 1224.6i_{i,rh} + 220,$$

$$\frac{d\Psi_{i,b}}{dt} = -5.6i_{i,b} + 1228i_{i,j} + 1224.6i_{i,j} + 220,$$

$$\frac{d\Psi_{i,rj}}{dt} = -3.27i_{i,j} + (314 - \omega)(3.917i_{i,rh} + 3.9i_{i,b}),$$

$$\frac{d\Psi_{i,rb}}{dt} = -3.27i_{i,rh} + (314 - \omega)(3.917i_{i,j} + 3.9i_{i,j}),$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 195 \left[(l_{cb} + l_{cb}) l_{cf} - (l_{cf} + l_{cf}) l_{cb} \right] - 1.657 \cdot 10^{-6} \omega (q_{\mu} + q'_{\nu}),$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = 314\omega,$$

$$\frac{dq_{\mu x}}{dt} = \frac{1}{2,123 \cdot 10^{-3}} (h_{\mu} - 4,292 \cdot 10^{-2} \cdot q_{\mu x}),$$

$$\frac{dq_{\mu}}{dt} = \frac{1}{1,111 \cdot 10^{-4}} \left(\rho g h_{\mu} - 4,654 \cdot 10^{-4} \frac{dq'_{\nu}}{dt} \right), \quad (4)$$

$$\frac{dq_{\delta}}{dt} = \frac{1}{1.207 \cdot 10^{-4}} \left(1.111 \cdot 10^{-4} \frac{dq_{\mu}}{dt} - 21.774 q_{\delta} \right),$$

$$\frac{dq_{\delta}}{dt} = \frac{1}{2,593 \cdot 10^{-4}} \left[21.774 q_{\delta} - q_{\delta} (2.6023 \cdot 10^{-4} + r_H) \rho g h_{cf} + 1.207 \cdot 10^{-4} \frac{dq_{\lambda}}{dt} \right],$$

$$\Psi_j = 3.91 l_{cf} + 3.9 l_{cf},$$

$$\Psi_{cb} = 3.91 l_{cb} + 3.9 l_{cb},$$

$$\Psi_{cf} = 3.917 l_{cf} + 3.9 l_{cf},$$

$$\Psi_{cb} = 3.917 l_{cb} + 3.9 l_{cb},$$

$$q'_{\nu} = q_{\delta} + q_{\mu} + q_{\delta}.$$

В третьей главе создается канонический одношаговый полуневявный численный метод 2-го порядка точности. Канонические методы предусматривают построение численной схемы, непосредственно ориентированной на решение смешанных дифференциально-алгебраических систем. Они отличаются от традиционных подходов отсутствием обязательной процедуры перехода от исходной математической модели вида (1)–(2) к модели в нормальной форме Коши. Согласно определению, данному в этой главе, методом интегрирования системы уравнений называется совокупность:

- а) формул интегрирования (в общем случае с переменным шагом и порядком),
- б) итерационной процедуры решения нелинейных уравнений (для неявных методов),
- в) способа оценки локальной погрешности решения,
- г) способа оценки глобальной погрешности решения,
- д) стратегии выбора порядка формулы интегрирования,
- е) стратегии выбора И/ИЛИ отброса шага,
- ж) стратегии определения гонок коммутации

Традиционное применение метода Рунге-Кутты 4-го порядка к математическим моделям в канонической форме приводит к необходимости либо четыре раза решать нелинейную систему уравнений, либо четыре раза обращаться матрицу динамических параметров на одном шаге интегрирования. Обе эти операции снижают эффективность исследований.

В связи с этим в работах Ю.З. Ковалева и И.П. Копылова предлагаются численные методы, непосредственно предназначенные для математических моделей в канонической форме и не требующие специального обращения матрицы динамических параметров. Они записываются в следующем виде:

$$i_{n+1} = i_n + h \sum_{r=1}^m C_r K_r, \quad (5)$$

$$K_r = \left[A_\varphi - a_r h A \left(i_n + h \sum_{s=1}^{r-1} \beta_{rs}' K_s, t_n + h \alpha_r' \right) \right]^{-1} \times \\ \times f \left(i_n + h \sum_{s=1}^{r-1} \beta_{rs} K_s, t_n + h \alpha_r \right), \quad r = 1, \dots, m. \quad (6)$$

Эти методы при определённом выборе их параметров в отличие от метода Рунге-Кутты могут быть A - или L -устойчивыми, что необходимо для компенсации свойства жёсткости математических моделей электрических машин.

В данной работе основной акцент сделан на построение полунеявных канонических методов. Эти методы обладают рядом преимуществ перед неявными и, в особенности, явными численными схемами. В качестве примера можно привести жесткие системы дифференциальных уравнений, при решении которых полунеявные методы особенно эффективны, так как являются A или L -устойчивыми и не приводят к увеличению размерности решаемых систем уравнений

Для построения иной численной схемы в системе уравнений согласования рядов Тейлора точного решения и формулы метода принято $C_3 = 0$. Исходя из вышесказанного, составляем систему уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= 1, \\ C_1 \alpha_1 + C_2 \alpha_2 &= \frac{1}{2}, \\ C_1 a_1 + C_2 a_2 + C_2 \beta_{21} &= \frac{1}{2}, \\ C_1 \alpha_1^2 + C_2 \alpha_2^2 &= \frac{1}{3}, \\ C_1 a_1 \alpha_1' + C_2 a_2 \alpha_2' + C_2 \alpha_2 \beta_{21} &= \frac{1}{3}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$2C_2 a_2 \beta'_{21} + C_2 \beta_{21}^2 = \frac{1}{3},$$

$$C_1 a_1 \alpha_1 + C_2 a_2 \alpha_2 + C_2 \beta_{21} \alpha_1 = \frac{1}{6},$$

$$C_1 a_1^2 + C_2 a_2^2 + C_2 a_2 \beta_{21} + C_2 a_1 \beta_{21} = \frac{1}{6}.$$

Данная система из 8 уравнений, которые, как уже упоминалось, позволяют определить только 8 параметров. Оставшиеся 2 параметра являются свободными, через которые можно выразить остальные. За свободные примем параметры α_1 и α'_1 . Тогда оставшиеся параметры определяются как

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{4(3\alpha_1^2 - 3\alpha_1 + 1)}, \\ C_2 &= \frac{3}{4} \cdot \frac{(4\alpha_1^2 - 4\alpha_1 + 1)}{(3\alpha_1^2 - 3\alpha_1 + 1)}, \\ \alpha_2 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3\alpha_1 - 2}{2\alpha_1 - 1}, \\ a_1 &= \alpha_1, \\ a_2 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3\alpha_1 - 1}{2\alpha_1 - 1}, \\ \alpha'_1 &= \frac{-1}{3} \cdot \frac{-12\alpha_1^2 + 3\alpha_1\alpha'_1 + 9\alpha_1 - 2}{(3\alpha_1 - 1)(2\alpha_1 - 1)}, \\ \beta_{21} &= \frac{-1}{3(2\alpha_1 - 1)}, \\ \beta'_{21} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{(2\alpha_1 - 1)}{(3\alpha_1 - 1)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Стратегия выбора шага была разработана на основании двух наиболее часто используемых алгоритмов выбора шага: удвоения и деления шага пополам и выбора шага в зависимости от заданной точности.

Локальная погрешность одношагового метода определяется как

$$\rho_\lambda(x_n + h_n) = y(x_n + h_n) - \tilde{y}_n, \quad (9)$$

где $y(x_n + h_n)$ – точное решение исходной задачи; \tilde{y}_n – численное решение, полученное по формуле одношагового метода при точном стартовом значении $y(x_n)$.

Для эффективного анализа динамических процессов в рассматриваемой системе необходимо использовать численные методы с повышенными свойствами устойчивости. Жесткость является неотъемлемым свойством данной математической задачи. Ряд авторов жесткую задачу называют «задача с сильно различающимися временными постоянными».

Для того, чтобы получить абсолютно устойчивое решение системы исходных уравнений, необходимо использовать такой шаг h , при котором каждое из значений $\bar{h} = h\lambda_i$ ($i=1,2, \dots, s$) лежало бы внутри области абсолютной устойчивости.

Исследование А- и L-устойчивости канонических методов проводилось в общем виде и сводилось к определению областей устойчивости методов в комплексной плоскости $(\alpha h, j\beta h)$. В результате анализа устойчивости был получен набор параметров, при котором созданный метод А- и L-устойчив $\alpha_1 = \alpha_1 = -9.19 \cdot 10^{-2}$, $C_1 = 0.192$, $C_2 = 0.808$, $\alpha_3 = 0.641$, $\alpha_4 = -0.359$, $\alpha_5 = -0.665$, $\beta_{21} = 0.282$, $\beta_{21}' = -0.309$.

Построение областей точности (рис. 3) проводилось в соответствии со стандартной методикой.

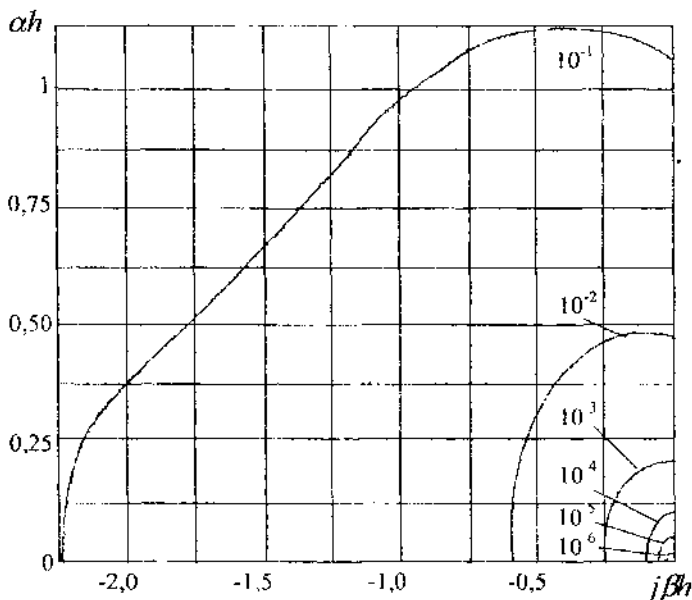


Рис. 3 Границы точности разработанного метода

В четвертой главе проводится гестирование созданного численного метода. Проверка численного метода на наборе тестовых задач есть решение целого класса реальных задач. Процесс и результаты тестирования численного метода в большой степени зависят от типа оборудования и программного обеспечения. Для гестирования на ЭВМ построен алгоритм интегрирования исходной задачи на базе канонического одношагового полунявного метода 2-го порядка точности решения систем ДАУ, реализованный в подпрограмме L_DAE. Тестирование метода заключается в определении и сравнении отдельных характеристик методов при решении с их помощью определенного набора задач. В качестве обобщенной оценки примем критерий «время-точность», в соответствии с которым наиболее эффективным считается метод, показавший наименьшее время счета при одинаковых величинах допустимых погрешностей сравниваемых методов. В качестве комплекса тестовых задач были использованы задачи, введенные Энрайтом в его работах и рекомендованные для тестирования программ, рассчитывающих переходные процессы в электрических цепях. Кроме указанных задач метод проходил апробацию при расчете переходных процессов в различных ветроэнергетических установках и электромеханических преобразователях энергии.

Проведенные исследования показали (рис. 4), что разработанный метод позволяет с необходимой точностью рассчитывать динамические режимы работы электродинамических систем, а для определенного класса задач этот метод является приоритетным.

Также с помощью разработанного метода рассчитаны динамические режимы реальной насосной установки. Кривые, полученные при исследовании этим методом вышеуказанной установки, представлены на рис. 5–9.

При анализе данных, полученных при проведении обширного тестирования построенного алгоритма, можно сделать следующие выводы:

- из всех тестируемых методов только при решении с использованием предлагаемой методики были получены результаты решения всех тестовых задач,
- время, затраченное на решение большинства задач группы А разработанным методом в сравнении с другими тестируемыми методами, является наименьшим.

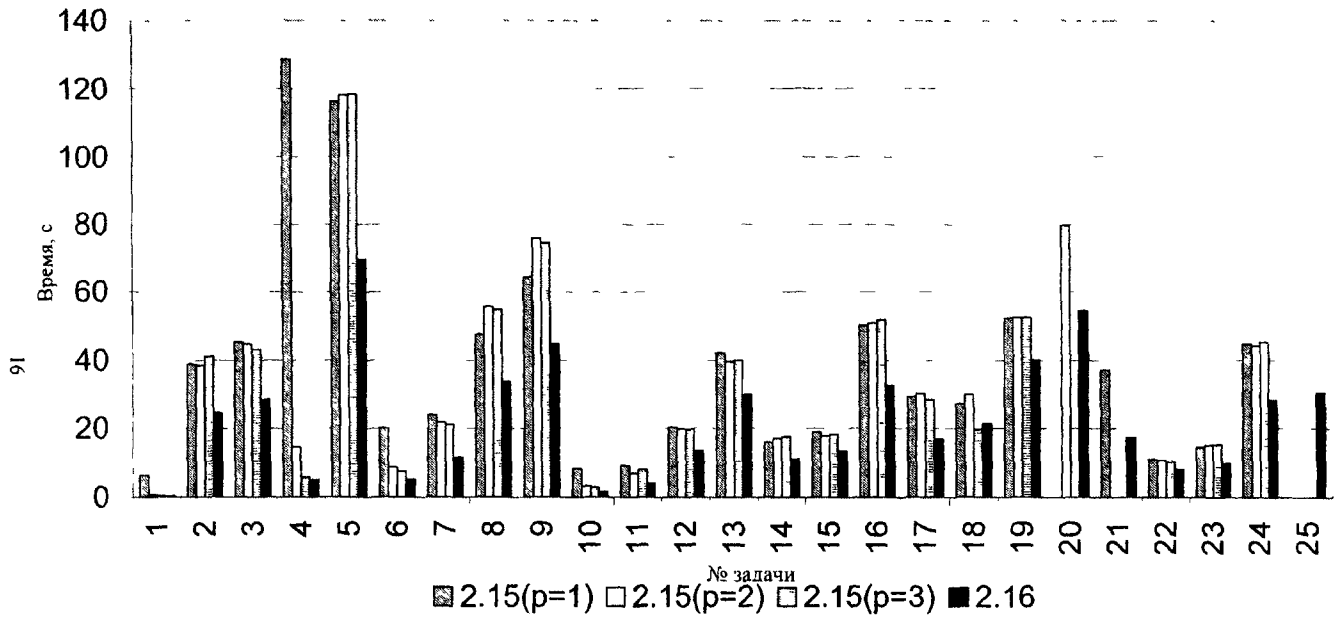


Рис 4 Сравнительная диаграмма интервалов времени, затраченных на решение задач

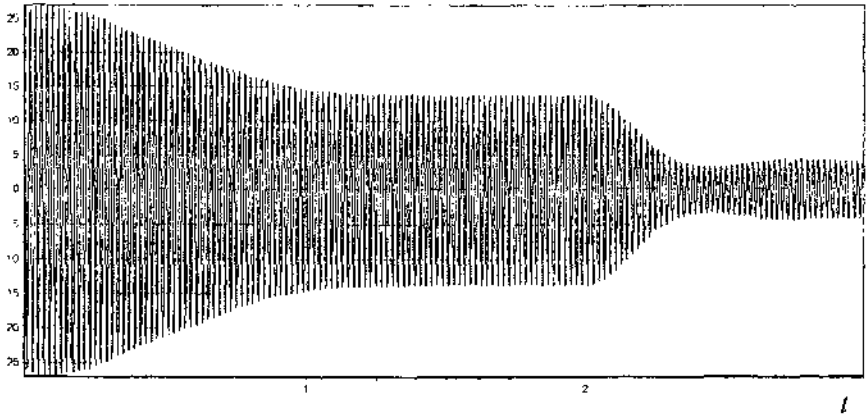


Рис 5 Ток статора i_s при сбросе нагрузки

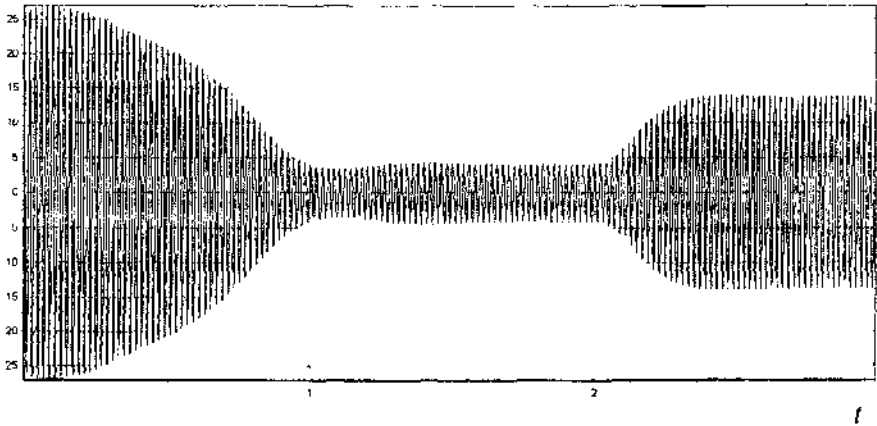


Рис 6 Ток статора i_s при набросе нагрузки

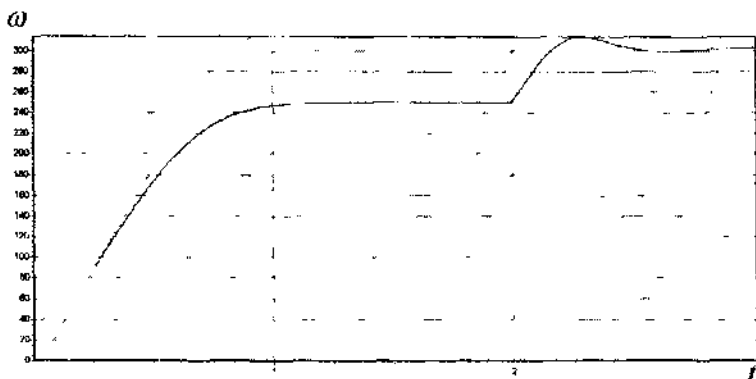


Рис 7 Угловая скорость ω при изменении нагрузки

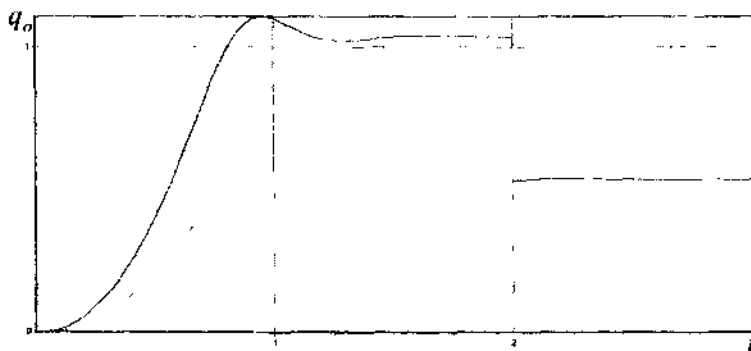


Рис 8 Действительный расход q_o при изменении нагрузки



Рис 9 Потребленная активная мощность системы P_{0a} при изменении нагрузки q_o

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Определены основные математические модели электротехнических установок перекачки невязкой жидкости, что предопределило необходимость создания специализированных методов их расчета и исследования.

2 Разработанные на основе электромеханических и электрогидравлических аналогий модели двигателя и насоса как промежуточные элементы позволяют оценить динамические процессы в каждом из них в отдельности и создать совместную математическую модель, отражающую взаимосвязь и взаимовлияние процессов в электродинамической системе.

3 Разработан канонический одношаговый полуявный метод 2-го порядка точности решения систем ДАУ для анализа динамических процессов системы «АД–ЦН», показаны возможности, определяющие его место в существующей иерархии методов расчета.

4 Проведено сравнительное исследование эффективности разработанного канонического одношагового полуявного метода 2-го порядка точности и разработанных программных продуктов с универсальными программными комплексами на базе задач Эрайта. На широком классе тестовых задач динамики показано сокращение времени расчета в области применения в среднем в 3-5 раз при приемлемой точности.

5 Построенный канонический одношаговый полуявный метод 2-го порядка точности решения систем ДАУ реализован в виде подпрограммы L_DAE и в виде компонента в ООС Borland Delphi зарегистрирован в ОФАП. На его базе создан комплекс прикладных программ для расчета динамических режимов электромеханических и ветроэнергетических установок, также зарегистрированный в ОФАП.

6 Анализ проведенных исследований позволяет установить целесообразность применения того или иного численного метода к определенному кругу решаемых задач динамики для систем «АД–ЦН».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Беляев П.В., Завьялов Е.М., Завьялов В.Е. Математические модели электромеханических систем для квазистационарного режима // Динамика систем, механизмов и машин. Мат. V Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. Кн.1. С.178–182.

2 Беляев П.В., Завьялов Е.М., Завьялов В.Е. Анализ электромеханических систем МКТ // Энергетика на рубеже веков: Сб. матер. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию ОАО «Омскэнерго» и ОмМТТ. Омск, 2003. С. 212–217.

3 Завьялов В.Е. Анализ процесса моделирования переходных и установившихся режимов работы электрических машин // Матер. науч. конф. «Молодые ученые на рубеже третьего тысячелетия», посвященной 70-летию со дня рождения академика В.А. Коптюга. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2001. С. 13–15.

4 Завьялов В.Е. Определение параметров методов расчета динамических режимов электрических машин в канонической форме // Задачи динамики электромеханических систем. Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Под ред. Ю.З. Ковалева. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. С. 82–86.

5 Завьялов В.Е., Дудина Н.А. Анализ методов расчета динамических режимов электротехнических комплексов в канонической форме // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. Кн. I. С. 148–150.

6 Завьялов Е.М., Завьялов В.Е. Стратегия выбора шага при определении параметров ЭТК // Энергетика на рубеже веков. Сб. матер. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию ОАО «Омскэнерго» и ОмМТТ. Омск, 2003. С. 185–188.

7 Татевосян А.С., Завьялов Е.М., Ковалёв В.З., Завьялов В.Е. Сравнительное тестирование программ численного решения систем дифференциально-алгебраических уравнений. М.: ВНИИЦ, 2004. № 50200400434.

8 Чертов Р.А., Завьялов В.Е. Моделирование электротехнического комплекса «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель – центробежный насос» // Новые информационные технологии: Тез. докл. XI Междунар. студ. школы-семинара. М.: МГИЭМ, 2003.

Личный вклад.

Выделить результаты, принадлежащие одному из соавторов работ [1, 2, 5] не представляется возможным. Доля каждого участника оценивается как равная. В работе 6 автором был сделан анализ существующих стратегий выбора шага при расчете систем ДАУ. В работах 7, 8 автором была представлена разработанная им модель «АД–ЦН».

Редактор Т.А. Москвитина

ИД № 06039 от 12.10.2001

Подписано к печати 28.10.2005. Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. т. 1,25

Тираж 100 экз. Заказ 692

Издательство ОмГТУ 644050 г. Омск, пр. Мира 11

Типография Ом 1У

2
3
4

7
8
9

№2 1 3 9 3

РНБ Русский фонд

2006-4

20136