

Ф 395

На правах рукописи

Фельк Зинаида Александровна

**ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ПО ЭКВИВАЛЕНТНЫМ СХЕМАМ
МЕТОДАМИ АНАЛОГИЙ И ТЕОРИИ ГРАФОВ**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации
проектирования (промышленность)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2005

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Системы управления» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук,
профессор Устюгов М.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Мокеев В.В.;
кандидат технических наук,
доцент Крушинский В.В.

Ведущая организация – ОАО «Научно-исследовательский институт по измерительной технике», г. Челябинск.

Защита состоится 28 декабря 2005 года, в 16 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, зал заседаний ученого совета № 1 (ауд. 1001).

С содержанием диссертации можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.М. Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе представлены результаты, полученные аспирантом в ходе научно-исследовательской деятельности в период с 1999 года по настоящее время, связанные с разработкой методики моделирования систем различной физической природы по эквивалентным схемами на основе метода аналогий и теории графов и созданием на ее основе программного комплекса для моделирования систем.

Проблемы создания моделей, методик и алгоритмов автоматизированного моделирования и исследования систем рассматриваются в научных трудах Арайса Е.А., Аветисяна Д.А., Беньковича Е., Веникова В.А., Джамшиди М., Дмитриева В.М., Ильина В.Н., Колесова Ю., Корячко В.П., Краснощекова П.С., Лин Пен-Мина, Логиновского О.В., Маничева В.Б., Норенкова И.П., Петрова А.А., Уварова М.Ю., Устюгова М.Н., Чапцова Р.П., Чуя Л.О. и др.

В диссертационной работе использованы подходы и методы моделирования систем различной физической природы, исследования нелинейных и нестационарных систем, представленные в научных работах Бержа К., Евстигнеева В.А., Корячко В.П., Ленка А., Маничева В.Б., Норенкова И.П., Попова Е.П. и др.

Актуальность темы. Средства автоматизации моделирования являются важнейшей составной частью систем автоматизированного проектирования, позволяя оперативно оценивать при помощи ЭВМ функционирование разрабатываемых устройств. В настоящее время существует многообразие моделирующих программных комплексов для исследования систем, отличающихся скоростью обработки данных, пользовательским интерфейсом, назначением и возможностями изучения систем различной физической природы.

Для математического моделирования технических систем различной физической природы (электрических, гидравлических, пневматических, механических, тепловых и др.) в диссертационной работе предлагается использование метода физических аналогий, который позволяет подходить к рассмотрению систем различной физической природы с единых позиций. Применение метода аналогий, основанного на выявлении и анализе существующих аналогий физических систем, значительно упрощает получение математических моделей таких систем. Согласно этому методу любой технической системе, функционирование которой описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений, можно поставить в соответствие некоторую формальную эквивалентную схему, которая описывается точно такой же системой дифференциальных и алгебраических уравнений.

Получение математических моделей сложных систем в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений представляет задачу, требующую для решения большого ресурса времени и соответствующих технических средств. Создание именно таких программ является достаточно актуальным, а применение современных технологий: объектно-ориентированные технологии, визуальное и событийное программирование, позволяет создать такой интерфейс программы гораздо легче и быстрее, что делает соответствующие программы более эффективными.

фективнее. Тем не менее, не все программные продукты предлагают пользователю возможность исследования технических систем по эквивалентным схемам, содержащих в общем случае нелинейные и нестационарные элементы.

На основании сказанного выше сформулирована основная цель диссертационной работы и задачи исследования.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методики и алгоритмического обеспечения автоматизированного моделирования технических систем различной физической природы по эквивалентным схемам на базе метода аналогий, теории графов, общей теории систем с использованием современных технологий программирования. Исследование нелинейных систем и систем, содержащих нестационарные элементы, учет топологических вырождений в схемах.

Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи:

- разработка алгоритма автоматизированного формирования фундаментальной матрицы M , матрицы контуров и сечений фундаментального дерева для эквивалентной схемы исследуемой системы, содержащей в общем случае топологические вырождения: резистивные включения, емкостные контура и индуктивные звезды;
- получение математических моделей систем, содержащих нелинейные и нестационарные элементы, на основе фундаментальной матрицы M ;
- синтез автоматизированного описания математической модели дифференциальными и алгебраическими уравнениями;
- создание программного комплекса автоматизированного моделирования нелинейных и нестационарных систем с топологическими вырождениями по эквивалентным схемам;
- исследование систем в программном комплексе «Matrix_M».

Методы исследования. В работе использовались: теория систем, теория автоматического управления, теория графов, методы численного интегрирования и методы решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, элементы теории программирования: объектно-ориентированное проектирование и программирование, RAD-технология на базе повторно используемых объектов, визуальное и событийное программирование.

Научная новизна диссертационной работы. Научной новизной работы является разработка методики моделирования систем по эквивалентным схемам на основе метода аналогий и теории графов, содержащих нелинейные и нестационарные элементы, получение математических моделей в виде совокупности дифференциальных и алгебраических уравнений, исследование систем, содержащих топологические вырождения.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Практическую ценность составляет методика и алгоритмическое обеспечение автоматизированного моделирования систем различной физической природы. В рамках поставленной задачи получены результаты:

- исследованы методы построения математических моделей систем различной физической природы;

использован метод аналогий, позволяющий подходить к моделированию различных систем с единых позиций.

предложена методика получения математических моделей систем на основе матрицы M , матрицы контуров и сечений фундаментального дерева, сформированного по эквивалентной схеме в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений.

разработан алгоритм автоматизированного получения матрицы M .

разработан алгоритм автоматизированного получения математических моделей нелинейных и нестационарных технических систем, содержащих топологические вырождения.

с помощью средств визуального программирования реализован программный комплекс «*Matrix_M*» автоматизированного построения нелинейных и нестационарных математических моделей различных технических систем по эквивалентным схемам с топологическими вырождениями.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в диссертационной работе, представлены и обсуждены на III Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах» (Санкт-Петербург, 1999), конкурсе научных проектов аспирантов (Челябинск, 2002), IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ'2003 (Томск, 2003), Международной научно-практической конференции «Снежинск и наука – 2003» (Снежинск, 2003), Международном научно-практическом семинаре “Информационные системы в практике регионального и корпоративного управления” (Челябинск, 2005).

Публикации. Базовые положения диссертации отражены в 7 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает перечень сокращений и терминов, введение, четыре главы, заключение, список литературы (145 наименований) и 10 приложений. Объем диссертации: 292 страницы (180 страниц основного текста), 38 иллюстраций, 9 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для реализации процесса моделирования систем различной физической природы наиболее целесообразными являются модели систем, используемые в САПР на макроуровне. Графическое представление исследуемых систем реализовано в виде эквивалентных схем.
2. Методика получения математической модели системы на основе метода аналогий и теории графов, позволяющая создавать единое математическое и программное обеспечение для САПР технических объектов.
3. Математический аппарат для решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений в математической модели системы.
4. Методика моделирования систем в среде объектно-ориентированных систем программирования, поддерживающих также визуальное и событийное программирование, обладающих более выразительным языком программирования, удобством составления программных компонент, их отладки и сопровождения.

5. Примеры автоматизированного моделирования систем в программном комплексе «Matrix_M».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Системы автоматизации моделирования являются важнейшей составной частью систем автоматизированного проектирования, позволяя оперативно оценивать функционирование разрабатываемых устройств и осуществлять параметрическую оптимизацию по заданным критериям. Автоматизированное моделирование технических систем позволяет ускорить и удешевить процесс проектирования, повысить качество и долговечность разрабатываемых устройств, синтезировать управляющие системы и сократить число натурных экспериментов.

Решение проблемы проектирования и управления сложных технических систем, которые в общем случае представляют собой совокупность физически неоднородных подсистем – механических, гидравлических, управляющих, информационных, требует разработки методов и алгоритмов моделирования физически неоднородных систем.

Наиболее перспективным подходом к проектированию систем является блочно-иерархический подход, который в качестве своей основы включает иерархию математических моделей (ММ) (рис. 1).

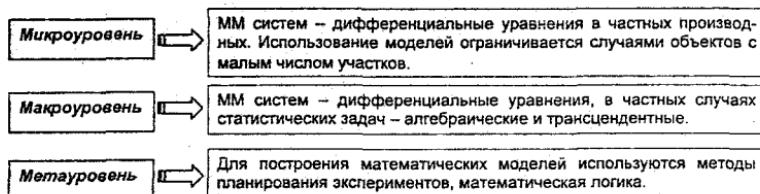


Рис.1. Классификация математических моделей в САПР

Анализ процесса моделирования технических систем и подробная классификация математических моделей, приведенные в первом разделе диссертации показали, что для моделирования систем различной физической природы наиболее целесообразными являются модели систем, используемые в САПР на макроуровне. Из исследованных методов моделирования на макроуровне наиболее удобными являются: метод узловых потенциалов, табличный метод, метод переменных состояния, для решения поставленных задач подходит метод аналогий, так как существование аналогий фазовых переменных и уравнений позволяет создать единое математическое и программное обеспечение для САПР технических объектов. Из анализа программных продуктов моделирования и исследования систем следует, что не все программные комплексы позволяют исследовать и нестационарные и нелинейные системы, включающие в общем случае топологические вырождения в своей структуре, в структуре, в связи с этим и были сформулированы задачи исследования и цель диссертационной работы.

Для математического моделирования технических систем различной физической природы используется метод физических аналогий. Метод аналогий позволяет подходить к рассмотрению систем различной физической природы с единых позиций. Применение метода аналогий, основанного на выявлении и анализе существующих аналогий физических систем, значительно упрощает получение математических моделей технических систем. Согласно этому методу любой технической системе, функционирование которой описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений, можно поставить в соответствие некоторую формальную эквивалентную схему, которая описывается точно такой же системой дифференциальных и алгебраических уравнений.

Во втором разделе диссертационной работы для реализации метода аналогий предлагается следующий набор постулатов.

1. Моделируемая техническая система заменяется совокупностью физически однородных подсистем.

2. Структура подсистемы представляется множеством элементов и связей их друг с другом – множеством узлов (вершин) и связывающих их ветвей (ребер). Состояние каждого ребра описывается фазовой переменной типа потенциала U_j , где j – номер ребра. Ребра связаны между собой посредством узлов. Состояние каждого узла характеризуется фазовой переменной типа потенциала φ_k , где k – номер узла. При этом для j -го ребра, включенного между узлами a и b , $U_j = \varphi_a - \varphi_b$.

3. Свойства элемента задаются *компонентными уравнениями*, выражающими взаимозависимости между фазовыми переменными, относящимися к ребрам и узлам данного элемента. Связи элементов друг с другом задаются *топологическими уравнениями*, связывающими однотипные фазовые переменные, относящиеся к взаимосвязанным элементам.

4. Математическая модель системы – совокупность компонентных и топологических уравнений. Форма компонентных и топологических уравнений одинакова для большинства систем различной физической природы. Это обстоятельство обуславливает наличие аналогий между разнородными физическими системами.

Технологию получения математической модели системы на примере электрической системы с помощью метода аналогий и теории графов представим следующим образом: на первом этапе электрическая система заменяется эквивалентной схемой (рис. 2), следующим этапом является формирование с помощью теории графов фундаментального дерева (рис. 3), по которому определяются контуры, сечения, хорды и ветви дерева.

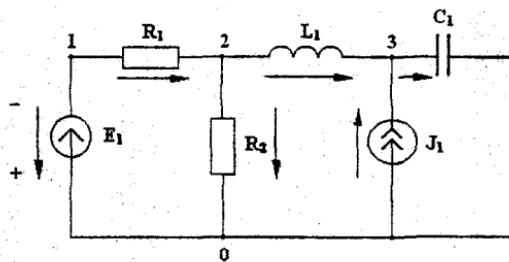


Рис. 2. Эквивалентная схема электрической системы

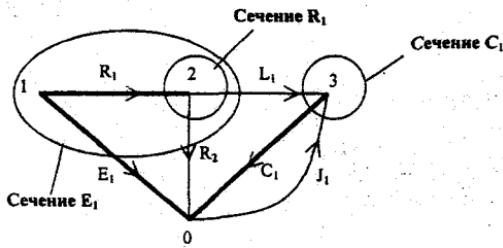


Рис. 3. Фундаментальное дерево, хорды и ветви дерева

В данном случае: E_1, C_1, R_1 – ветви; R_2, L_1, J_1 – хорды. Далее с использованием второго закона Кирхгофа записываются топологические уравнения для напряжений выбранных контуров:

$$\begin{cases} U_{R2} - E_1 + U_{R1} = 0; \\ U_{L1} + U_{C1} - E_1 + U_{R1} = 0; \\ U_{J1} + U_{C1} = 0. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} U_{R2} = -(E_1 + U_{R1}); \\ U_{L1} = -(-E_1 + U_{C1} + U_{R1}) \\ U_{J1} = -(U_{C1}). \end{cases}$$

$$\text{или } \begin{bmatrix} \frac{U_{R2}}{U_{L1}} \\ \frac{U_{L1}}{U_{J1}} \\ \frac{U_{J1}}{U_{C1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ U_{C1} \\ U_{R1} \end{bmatrix}.$$

Соотношения между напряжениями в ветвях и хордах графа представляются с помощью матрицы M контуров и сечений как: $U_X = -MU_B$,

$$\text{где } M = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & E_1 & C_1 & R_1 \\ \hline R_2 & -1 & 0 & 1 \\ \hline L_1 & -1 & 1 & 1 \\ \hline J_1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline \end{array}; \quad U_X = \begin{bmatrix} U_{R2} \\ U_{L1} \\ U_{J1} \end{bmatrix}, \quad U_B = \begin{bmatrix} E_1 \\ U_{C1} \\ U_{R1} \end{bmatrix}.$$

В общем случае матрица M , матрица контуров и сечений, блочная, содержащая 16 подблочных матриц, для которых введены строгие индексы.

$$M = \begin{array}{c|cccc} & E & C & r & \Gamma \\ \hline S & M_{SE} & M_{SC} & M_{Sr} & M_{S\Gamma} \\ R & M_{RE} & M_{RC} & M_{Rr} & M_{R\Gamma} \\ L & M_{LE} & M_{LC} & M_{Lr} & M_{L\Gamma} \\ I & M_{JE} & M_{JC} & M_{Jr} & M_{J\Gamma} \end{array}$$

где S – емкости в хордах, r – сопротивление в ветвях, Γ – индуктивности в ветвях.

Матрицы $M_{Sr}, M_{S\Gamma}, M_{R\Gamma}$ всегда нулевые, наличие ненулевых подблочных матриц $M_{SE}, M_{SC}, M_{L\Gamma}, M_{J\Gamma}, M_{Rr}$ свидетельствует о существовании в схеме топологических вырождений. Топологические вырождения представляют собой емкостные контура, индуктивные звезды, резистивные контура или сечения. Наличие топологических вырождений усложняет процедуру получения математической модели системы в нормальной форме – требуется либо решение систем линейных алгебраических уравнений на каждом шаге численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, либо предварительное устранение топологических вырождений с помощью изменений схемы. Предложенная в работе методика построения математических моделей на основе метода аналогий и теории графов, позволяет исследовать системы с любыми топологическими вырождениями.

С помощью полученной матрицы M записывается математическая модель системы в виде совокупности системы дифференциальных и алгебраических уравнений, матричная форма записи которых представлена соответственно в выражениях (1), (2).

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_C \\ \dot{I}_L \\ \dot{U}_S \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & C^{-1}M_{LC}^T & C^{-1}M_{RC}^T & C^{-1}M_{SC}^T & C^{-1}M_{JC}^T \\ -L^{-1}M_{LC} & & -L^{-1}M_{LR} & -L^{-1}M_{L\Gamma} & -L^{-1}M_{LE} \\ & & & & S^{-1} \\ & & & \Gamma^{-1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_C \\ I_L \\ U_S \\ E \\ I_T \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & -r & & & \\ \hline & 1 & -M_{Rr}^T & & \\ \hline M_{Rr} & & 1 & & \\ \hline & -R^{-1} & & ! & \\ \hline M_{L\Gamma}^T L^{-1} M_{L\Gamma} & & & r^{-1} + M_{L\Gamma}^T L^{-1} M_{L\Gamma} & \\ \hline & & M_{SC} C^{-1} M_{RC}^T & & S^{-1} + M_{SC} C^{-1} M_{SC}^T \\ \hline \end{array} \begin{bmatrix} U_r \\ I_r \\ U_R \\ I_R \\ U_\Gamma \\ I_\Gamma \\ E \\ I_J \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} & M_{LR}^T & & M_{Jr}^T \\ -M_{RC} & & -M_{RE} & \\ & & & \\ -M_{LR}^T L^{-1} M_{LC} & -M_{LR}^T L^{-1} M_{LE} & & M_{Jr}^T \\ & -M_{SC} C^{-1} M_{LC}^T & -M_{SE} & -M_{SC} C^{-1} M_{JC}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_C \\ I_L \\ E \\ E \\ I_J \\ I_J \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Одним из способов моделирования систем в современных программных средствах, таких как VisSim, RL, Matlab, является моделирование по заданной структурной схеме, которая формируется по полученным уравнениям (1), (2). Одним из преимуществ методики моделирования систем и реализованного на ее основе программного комплекса «Matrix_M», описанного в диссертационной работе является исследование систем только по эквивалентным схемам.

Для решения полученной системы дифференциальных (1) уравнений комплексе «Matrix_M» используются метод Рунге–Кутта–Мерсона, метод Эйлера, усовершенствованный метод Эйлера, метод Эйлера–Коши, метод Рунге–Кутта, подробно описанные в разд. 2. Многообразие использованных методов позволяет выбрать самый точный для решения исходной задачи, программный комплекс «Matrix_M» рассчитывает погрешность используемого метода. Для решения системы алгебраических уравнений (2) в программном комплексе «Matrix_M» используются следующие методы: метод Гаусса, метод Гаусса–Жордана, метод Крамера, метод LU–разложения, матричный метод, подробно описанные в разд. 2, для решения системы нелинейных уравнений используются метод Ньютона–Рафсона, метод Хука–Дживса, метод наискорейшего спуска, итерация неподвижной точки.

Реализация предложенной в работе методики моделирования в рамках традиционных систем программирования может быть неэффективной, так как подобные системы не позволяют выразить в программном комплексе требуемую функциональность. Более целесообразным представляется использование объектно-ориентированных систем программирования, поддерживающих также визуальное и событийное программирование, обладающих более выразительным языком программирования, удобством составления программных компонент, их отладки и сопровождения. Проведенный в третьем разделе диссертационной работы анализ существующих технологий и инструментальных средств программирования для реализации предложенной методики моделирования и исследования систем различной физической природы показал, что наиболее целесообразно выбрать инструментальную среду Borland Delphi.

В разделе 3 подробно описывается созданный программный комплекс автоматизированного моделирования, приведены рабочие формы. Программный комплекс состоит из следующих модулей: модуль формирования матрицы M , модуль исследования систем, содержащих линейные элементы; модуль исследования нелинейных систем и сложных систем. Погрешность метода интегрирования в «Matrix_M» оценивается с использованием принципа двойного просчета, при котором в начале уравнение считается с шагом h , а затем с шагом $h / 2$, затем сравниваются

значения, полученные с этими шагами. Учет нулевых элементов в модели: в случае отсутствия элемента в системе его размерность принимается равной «1», значение – «1», т.к. в программе используется обращение матриц, которые в данном случае являются разреженными. Нулевые значения указываются только в подблочных матрицах.

Нестационарные элементы в программном комплексе задаются следующим образом:

Выражение1: граница1 для t: Выражение2: граница2 для t: ВыражениеN...,
где для значения данной величины вычисляется (выражение1, если время $t <$ граница1), (выражение2, если время $t <$ граница2) ... (выражениеN – для остальных значений времени t). Границ может быть сколько угодно много, последняя граница не пишется и принимается равной бесконечности. Программа поддерживает: знаки операций: +, -, *, /, ^; параметр t ; скобки; разные форматы записи чисел, например, 1, -1, 10.0124, .235, 10.34e10...; функции – exp (е в стелени), sin., cos, tg, ctg.

Пример задания в программном комплексе выражения для нестационарного элемента: $E: 2*t:0.5:\exp(0.5-t):1:\exp(-0.5)$ означает что $E = 2t$ при t от 0 до 0.5; $E = \exp(0.5-t)$, при t от 0.5 до 1, $E = \exp(-0.5)$ при t от 1 до бесконечности.

Нелинейные зависимости в системе задаются в виде:

condition1 : expression1; condition2 : expression2; ... otherwiseExpr,

где при выполнении условия **condition1** будет считаться **expression1**, при выполнении условия **condition2 – expression2** и т. д. Если ни одно из условий не выполняется, то будет считаться выражение **otherwiseExpr**. Выражения задаются так же как и для нестационарных элементов. Условия задаются в виде $I_r < 0 \& I_r > -4$ и т.п. Можно использовать знаки сравнения =, <, >, <=, >=.

Примеры задания нелинейных зависимостей в программном комплексе «Matrix_M»: $r_1 = 4+0.1*I_{r1}; S1 = 1+0.3*\sin(I_{S1}); \Gamma1 = 0.1+0.01+\cos(U_{\Gamma1}); R1 = 5+0.1*U_{R1}$.

Нелинейные зависимости для элементов в программном комплексе «Matrix_M» задаются с использованием обозначений элементов, как в математической модели системы, а не так, как задано изначально. Для идентификации элементов системы в программе предусмотрена таблица соответствий (рис. 4).

Инструкция Матрица M Подблочные матрицы Таблица соответствий Выход									
Таблица соответствий элементов схемы									
Обозначение элементов в ММ	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>R1</td><td>R2</td><td>R1</td></tr> <tr> <td>R1</td><td>R2</td><td>L1</td></tr> </table>			R1	R2	R1	R1	R2	L1
R1	R2	R1							
R1	R2	L1							
Обозначение элементов в схеме									

Рис. 4. Таблица соответствий элементов схемы

В четвертом разделе диссертационной работы приведены результаты моделирования в программном комплексе «Matrix_M» электрической системы с топологическими вырождениями, электромеханической системы и информационной цепи. Проиллюстрируем работу программного комплекса на примере электромеханической системы, эквивалентная схема которой приведена на рис.5. Пусть имеется некоторый источник питания и нагрузка, примем в качестве источника питания якорную обмотку генератора постоянного тока, считая ЕДС источника генератора постоянной, учитывая у генератора индуктивность и сопротивление. Нагрузка – якорная обмотка двигателя, обмоткой возбуждения пренебрегаем. Взаимодействие электрической и механической подсистем моделируется трансформаторной связью и задается аналитически: $E_2 = K_E \cdot U_{C1}$, $I_1 = K_M \cdot I_{L2}$.

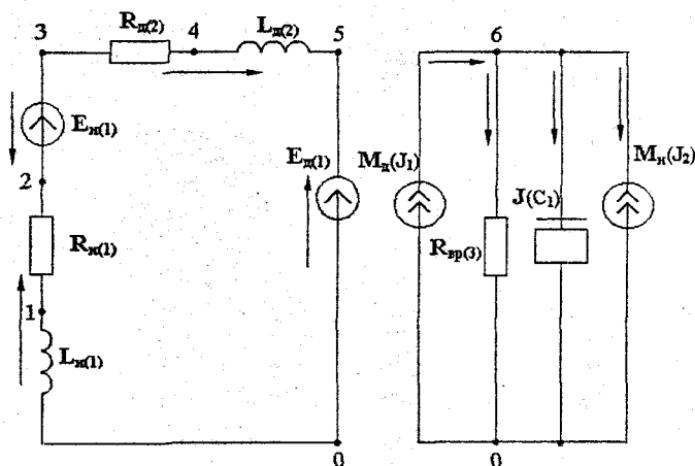


Рис. 5. Эквивалентная схема электромеханической системы

Для моделирования используем метод аналогий, переходим к обозначениям, принятым для электрических систем и теорию графов, фундаментальное дерево представлено на рис. 6.

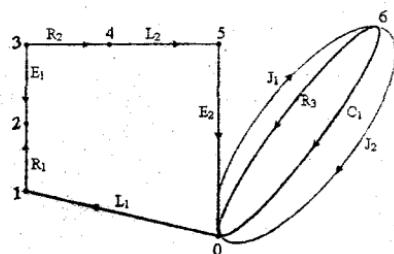


Рис. 6. Фундаментальное дерево, хорды и ветви дерева

В данном случае: R_3, L_2, J_1, J_2 – хорды, $E_1, E_2, C_1, R_1, R_2, L_1$ – ветви.

Топологические уравнения для напряжений, из которых выделяются напряжения для получения хорд, имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{R3} &= -U_{C1}; \\ U_{L2} &= -(-E_1 + E_2 + U_{L1} + U_{R1} + U_{R2}); \\ U_{J1} &= U_{C1}; \\ U_{J2} &= -U_{C1}. \end{aligned}$$

Матрица M в данном случае имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для проверки достоверности полученных в программном комплексе результатов моделирования данная электромеханическая система была исследована в программе RL, разработанной на кафедре «Системы управления», в ЮУрГУ. Для моделирования системы с помощью RL строится структурная схема (рис. 7).

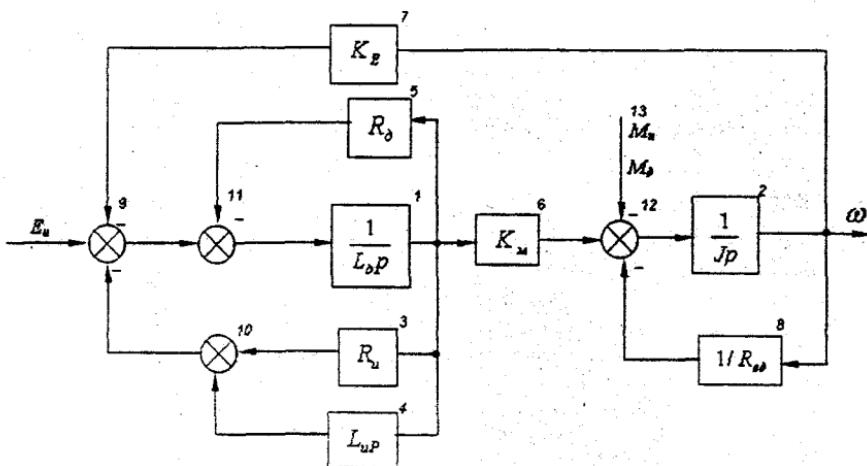


Рис. 7. Структурная схема электромеханической системы

Графики переходных процессов в системе, полученные в программе RL, отражены на рис. 8.

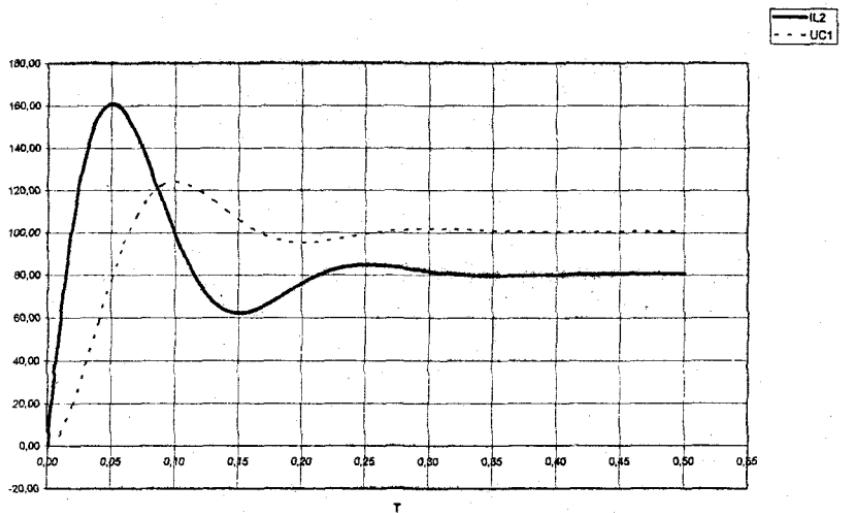


Рис. 8. Переходные процессы, результат моделирования в программе RL

Моделирование в программном комплексе «Matrix_M» осуществляется по эквивалентной схеме, в данном случае фундаментальное дерево (см. рис. 6) не строится, матрица М формируется автоматически и структурная схема (см. рис. 7) не используется как основная для моделирования электромеханической системы.

Полученная матрица М и подблочные матрицы приведены на рис. 9 и рис. 10, наличие ненулевой матрицы $M_{L\Gamma}$ свидетельствует о наличии топологических вырождений.

Матрица M						
	E1	E2	C1	R1	R2	L1
R3	0	0	-1	0	0	0
L2	-1	1	0	1	1	1
I1	0	0	1	0	0	0
I2	0	0	-1	0	0	0

Рис. 9. Матрица контуров и сечений, матрица M

Подблочные матрицы									
MSE					MSC				
E1	E2				C1				
0	0				0				
MRE					MRC				
E1	E2				C1				
R2	0				R2	1			
0	0				0	0			
MLE					MLC				
E1	E2				C1				
L2	1				L2	0			
-1	1				0	0			
MUE					MUC				
E1	E2				C1				
I1	0				I1	1			
0	0				I2	J			
MUR					MUL				
E1	E2				R1	R2			
II	0				II	0			
0	0				I2	0			
MUF					MUL				
E1	E2				C1				
II	0				II	0			
0	0				I2	0			

Рис. 10. Подблочные матрицы

Переходные процессы в системе отражены на рис. 12, пример задания параметров переходного процесса в виде аналитических зависимостей приведен на рис. 11.

Инструкция Матрица M Подблочные матрицы Таблица соответствий Выход									
Введите значения элементов системы					Выберите метод интегрирования				
E1	E2	C1	R1	R2	R3	Метод Эйлера			
27	0.224C1	0.2	0.01	0.05	0.3	Метод Рунге-Кутты			
<input type="button" value="Сохранить"/>						<input type="button" value="Далее"/>			
Выберите метода решения АУ									
Выберите метод решения НАУ									
Введите время интегрирования									
Введите шаг интегрирования									
Введите шаг печати									
Сохранить									
Введите начальные условия					Далее				
И1			И2		И1				
0	0	0							
<input type="button" value="Сохранить"/>					<input type="button" value="Далее"/>				
<input checked="" type="radio"/> Линейная система					<input checked="" type="radio"/> 9 п/б матриц				
<input checked="" type="radio"/> Нелинейная система					<input checked="" type="radio"/> 16 п/б матриц				

Рис. 11. Окно ввода параметров переходного процесса, задания трансформаторной связи между подсистемами

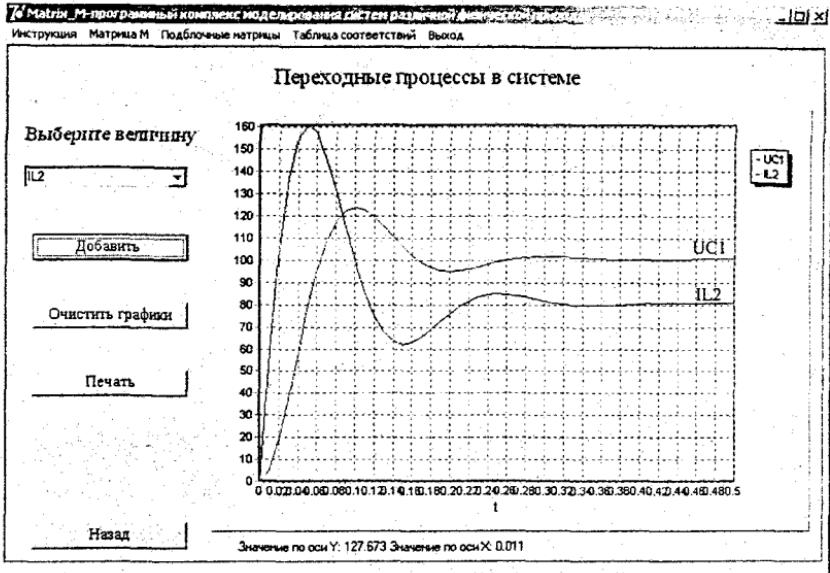


Рис. 12. Переходные процессы в электромеханической системе

Сравнительный анализ полученных результатов моделирования в программе RL и программном комплексе «Matrix_M», расчет относительной погрешности результатов приведен в диссертационной работе.

Максимальные относительные погрешности результатов: $\delta_{IL2} = 0,3093236\%$, $\delta_{Uc1} = 1,0172819\%$, что свидетельствует о достоверности результатов моделирования в программном комплексе «Matrix_M» и о возможности применения методики моделирования, изложенной в диссертационной работе для моделирования сложных технических систем.

Достоверность работы программного комплекса «Matrix_M» доказана также при моделировании электрической системы и информационной цепи.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать следующие основные выводы и получить практические результаты:

1. Анализ процесса моделирования технических систем и подробная классификация математических моделей показали, что для моделирования систем различной физической природы наиболее целесообразными являются модели систем, используемые в САПР на макроуровне.
2. Для моделирования систем на макроуровне выбран метод аналогий, так как существование аналогий фазовых переменных и уравнений позволяет создать

единое математическое и программное обеспечение для САПР технических объектов.

3. Предложенный алгоритм получения математической модели системы включает этапы: представление исследуемой системы совокупностью физически однородных подсистем → построение эквивалентной схемы подсистемы → формирование фундаментального покрывающего дерева графа полученной схемы, определение хорд и ветвей дерева с использованием метода переменных состояния → формирование матрицы M → выбор компонентных и топологических уравнений на основе метода аналогий → запись математической модели в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений.
4. Для решения систем линейных алгебраических уравнений выбрана совокупность методов: метод Гаусса, метод Гаусса–Жордана, метод Крамера, метод LU–разложения, матричный метод. При решении систем нелинейных алгебраических уравнений для целей моделирования оправдано применение методов Ньютона–Рафсона, Хука–Джанса, итерации неподвижной точки и метода наискорейшего спуска.
5. Решение систем дифференциальных уравнений в математической модели системы представлено неявными методами: метод Рунге – Кутта – Мерсона, метод Эйлера, усовершенствованный метод Эйлера, метод Эйлера – Коши, метод Рунге – Кутта, которые являются основными методами анализа переходных процессов в САПР.
6. Анализ программных продуктов моделирования систем показал, что их использование для моделирования нестационарных и нелинейных систем с топологическими вырождениями по эквивалентным схемам не является эффективным.
7. Объектно–ориентированный подход к моделированию систем наиболее адекватно соответствует современным технологиям проектирования программных средств моделирования.
8. Методика построения математических моделей систем на основе метода аналогий и теории графов справедлива не только для технических систем, но и для информационных цепей, что подтверждено результатами расчета переходных процессов в информационной цепи с помощью реализованного программного комплекса «Matrix_M».
9. Практическим результатом работы является создание программного комплекса автоматизированного построения математических моделей нелинейных и нестационарных технических систем различной физической природы по эквивалентным схемам с топологическими вырождениями, на основе алгоритма автоматизированного формирования матрицы M , в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений, автоматизация симуляции переходных процессов в системе.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. Устюгов М. Н., Надточий З. А. (Фельк З. А.) Алгоритм автоматизированного формирования матричных уравнений математических моделей систем с топологическими резистивными вырождениями // Вопросы автоматизации и управления в технических системах: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С.94–96.
2. Устюгов М. Н., Надточий З. А. Алгоритмы формирования математических моделей систем на макроуровне. Фундаментальные исследования в технических университетах // Материалы 3 Всероссийской НТК. – СПб: СПГТУ, 1999. – С.76.
3. Устюгов М. Н., Надточий З. А. Методика описания моделей систем различной физической природы матричными дифференциальными и алгебраическими уравнениями // Вопросы автоматизации и управления в технических системах: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С.110–112.
4. Устюгов М. Н., Надточий З. А. Применение метода аналогий и теории графов для построения математических моделей систем различной физической природы // Системы автоматического управления: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – С.48–53.
5. Устюгов М.Н., Фельк З.А. Комплексный подход к автоматизации построения математических моделей систем различного назначения // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – С.35–37.
6. Устюгов М.Н., Фельк З.А. Формирование матричных структурных схем для исследования технических систем // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – С.38–40.
7. Фельк З. А. Объектно-ориентированная технология моделирования технических систем. Фундаментальные исследования в технических университетах // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. «Современные проблемы атомной науки и техники» – Снежинск Челябинской области: Изд-во СГФТА, 2003. – С.201–202.