

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ресурс, производительность и надежность функционирования электромеханического оборудования определяется системой управления. Для синтеза системы управления необходимо проводить математическое моделирование, которое отражает процессы, протекающие в механической и электромеханической частях производственных установок. Данная работа посвящена созданию программного обеспечения для моделирования электромеханических систем, с целью выявления их работоспособности. Разработанная программа позволяет определить реакцию электромеханических систем на типовые входные воздействия, которые могут изменяться во времени. В процессе моделирования систем, возможно изменять коэффициенты самих уравнений. По результатам расчета программа может выводить графики любых переменных, участвовавших в процессе моделирования.

*Ключевые слова:* электромеханические системы; математическое моделирование; разработка программного обеспечения; программирование; системы управления.

A.V. Sorokin

## DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR MODELING ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The resource, performance and reliability of electromechanical equipment functioning is determined by the control system. For the synthesis of a control system, it is necessary to carry out mathematical modeling, which reflects the processes occurring in the mechanical and electromechanical parts of production plants. This work is devoted to the creation of software for modeling electromechanically systems in order to identify their performance. The developed program allows you to determine the response of electromechanical systems to typical input impacts that may vary over time. In the process of modeling systems, it is possible to change the coefficients of the equations themselves. According to the results of the calculation, the program can display graphs of any variables that participated in the modeling process.

*Keywords:* electromechanical systems; math modeling; software development; programming; control systems.

Математическое моделирование электромеханических систем – это процесс изучения динамических свойств объекта управления на основе решения дифференциальных уравнений, адекватно описывающих свойства реальных систем. Решение поставленной задачи может быть получено на основе численного решения задачи Коши, т.е. системы дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями.

Широко распространенной задачей моделирования систем управления является определения реакции систем управления на типовые входные воздей-

ствия, которые чаще всего бывают следующих типов: линейно изменяющиеся, ступенчатые, экспоненциальные, импульсные и периодические (синусоидальные, прямоугольные и т.д.). Также имеют место режимы, где необходимо менять величину или тип входных воздействий прямо в период расчета переходного процесса.

При рассмотрении поведения электромеханических систем в переходных режимах (пуск, реверс, торможение, переход из одного состояния в другое) исследователю приходится принимать во внимание нелинейности, присущие как электромеханической системе (преобразователь, электродвигатель, механические передачи, рабочий орган), так и ее системе управления. Нелинейные зависимости могут быть обусловлены следующими факторами:

1. Нелинейности характеристик электродвигателей (асинхронный электродвигатель, двигатель последовательного и смешанного возбуждения, нелинейность характеристики цепи возбуждения машины постоянного тока и др.).

2. Нелинейности, обусловленные характером нагрузки (момент статических сопротивлений).

3. Нелинейности, обусловленные конструкцией и свойствами соединений (обусловленные упругостью, зазором и люфтом).

4. Нелинейности, обусловленные диссипативными элементами (силы неупругого внутреннего сопротивления при колебательных процессах, образующие гистерезисные петли).

5. Нелинейности, обусловленные элементами системы управления (ограничение координат, релейные характеристики, нелинейные обратные связи).

6. Нелинейности функциональных воздействий (произведение или деление двух функций).

7. Нелинейности, обусловленные изменением структуры системы управления (оптимальное и адаптивное управление).

Интерпретация полученных при моделировании результатов существенно облегчается возможностью вывода переходного процесса каждой из координат в зависимости от времени отдельно или на совместном графике. Также представляет интерес вывод зависимости переменных друг от друга, где время представлено не в явном виде (динамические механическая и электромеханическая характеристики).

Наиболее распространенными программными продуктами для моделирования электромеханических систем являются: универсальная математическая система компьютерной математики MathCAD и многофункциональная интегрированная система математических и научно-технических расчетов MATLAB. К сожалению, русифицированные описания данных программных продуктов в нашей стране представлены совершенно недостаточно и неполно. Поэтому интуитивные действия пользователей наталкиваются на недостаток информации и не обеспечивают полноценного и эффективного использования этих систем. Применительно к моделированию в области электромеханических систем, MathCAD и MATLAB не создают удобства исследователю, а зачастую не могут корректно решить специализированные задачи в силу своей универсальности для широкого круга пользователей. Наиболее близок к кругу данных задач специали-

зированный модуль Simulink системы MATLAB, но и он не полностью отвечает поставленным требованиям.

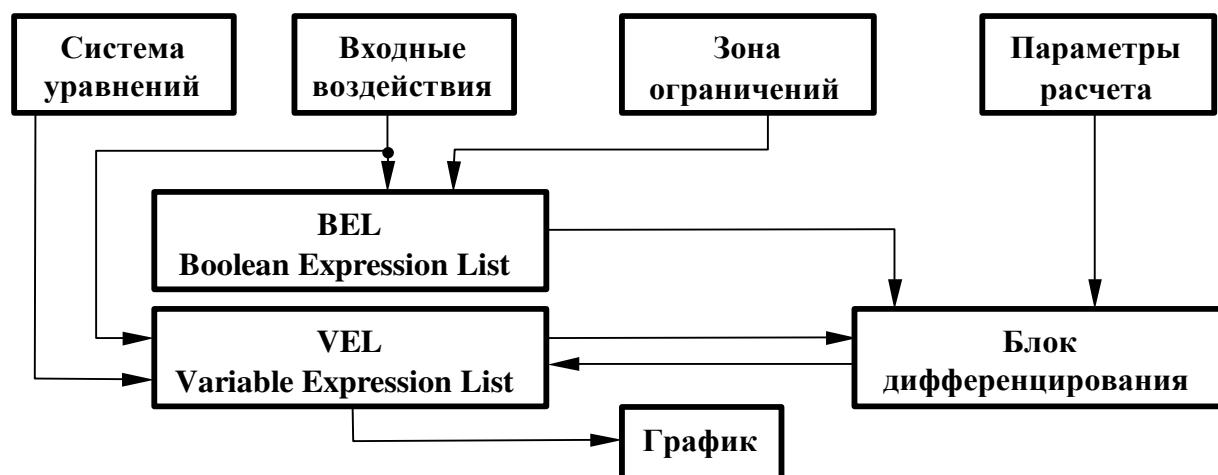
Из специализированного программного обеспечения известен комплекс специальных программ, разработанный в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете под руководством А.В. Башарина. Но этот комплекс морально устарел, а о новых его версиях информация отсутствует. Существует пакет программ для расчета систем управления «Classic Control» созданный ассоциацией университетов США, адаптированный для русскоязычного пользователя, но и он не отвечает современным требованиям, к тому же предназначен только для линейных систем. Представляет интерес разработка МГТУ им. Н.Э. Баумана «Интеграл». Удачно выполнен интерфейс программы, представлена возможность выбора метода интегрирования, имеется функция присваивания различных начальных условий, достаточно удачно решена проблема вывода результатов расчета, но не полно реализована зона ограничений для моделирования нелинейных зависимостей.

В силу того, что автору не известна программа, полностью удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к моделированию электромеханических систем, была сделана попытка создать специализированный программный продукт.

Данная разработка получила название DiFSyS. Программа разрабатывалась в среде визуального программирования Delphi, что позволило снабдить ее современным, интуитивно-понятным, интерфейсом, а также простотой и доступностью использования всех ее ниже перечисленных возможностей. Программа DiFSyS позволяет:

- создавать системы дифференциальных уравнений с практически неограниченным числом последних;
- в процессе решения системы изменять выражения самих уравнений;
- по результатам расчета систем выводить графики любых зависимостей переменных, непосредственно участвовавших в расчете;
- в диалоговом режиме вводить нелинейные уравнения любой длины и сложности с использованием математических и тригонометрических функций;
- использовать стандартные и создавать собственные входные воздействия, а также изменять их параметры в процессе расчета;
- использовать зону ограничений, которая предоставляет универсальные средства для контроля и управления переменными при расчете;
- создавать и описывать собственные переменные, а также использовать их в расчетах;
- рассчитывать практически неограниченные по времени процессы;
- выводить на график курсор для снятия конкретных значений;
- производить наложение двух и более систем;
- на графиках изменять положения координатных осей;
- использовать средства, упрощающие процесс анализа графиков;
- выводить графики на печать и копировать их в буфер межпрограммного обмена.

На рис. изображены основные компоненты программы и принцип их взаимодействия.



Основные компоненты программы

Основное ядро программы составляют два главных компонента: VEL (Variable Expression List) и BEL (Boolean Expression List), которые соответственно объединяют в себе: все переменные с их выражениями использующиеся в системе уравнений и определенные логические условия, посредством которых осуществляется контроль и управление переменными. Наличие модуля VEL вызвано необходимостью ввода нелинейных дифференциальных уравнений и входных воздействий, описывающих работу электромеханической системы. Из рис. видно, что компонент VEL содержит в себе список переменных, описывающих уравнения и список переменных, описывающих входные воздействия. Компонент BEL совмещает в себе условия, управляющие входными воздействиями и условия из зоны ограничений, которые управляют переменными VEL. Перед расчетом в блок дифференцирования передаются параметры, с которыми будет рассчитываться система.

В процессе расчета происходит взаимодействие VEL и блока дифференцирования, с передачей в последний управляющих условий из BEL, вычисляются конечные результаты, на основании которых строятся графики переходных процессов. В программе компоненты VEL и BEL представляют собой отдельно скомпилированные модули, содержащие в себе описания соответствующих классов. Объекты этих классов обладают следующими возможностями.

Объект VEL позволяет:

- на этапе выполнения программы создавать и удалять определенного рода переменные;
- присваивать переменным численные значения или математические выражения любой длины и сложности, а также вычислять их;
- использовать в выражениях тригонометрические и математические функции;
- использовать скобки с любой степенью вложенности, а также переменные ранее описанные в этом объекте.

Имя переменной может быть любой длины, содержать в себе буквы латинского алфавита и цифры, так же в имени различаются строчные и заглавные буквы, что позволяет придавать переменным наглядные имена, избавляясь тем самым от путаницы. Сами переменные представляют собой объекты определенного типа, в которых описаны поля и методы, организующие функциональность переменной. Переменные объекта VEL делятся на два так называемых вида: динамические и статические. Динамические переменные обладают вышеперечисленными возможностями, в то время как статические переменные, имеющие те же свойства, дополнительно могут использовать численные значения внутри программных переменных. При создании переменных производится жесткий контроль относительно синтаксиса имен и выражений, что положительно сказывается на устойчивости и правильности их вычислений, а также на корректности работы всей программы.

Как уже было сказано выше, переменные могут быть динамическими и статическими. Эта необходимость была вызвана тем фактом, что в выражении требовалось использование внутри – программных переменных, то есть переменных численного типа, созданных на этапе разработки программы. Выполнение этого требования было реализовано следующим образом. Каждая переменная объекта VEL имеет определенное место, куда она помещает численное значение вычисленного ею выражения. Для динамической переменной это место выделяется в оперативной памяти на этапе ее создания, а в самой переменной имеется указатель, указывающий на эту область памяти. При создании статической переменной, указателю присваивается адрес той программной переменной, в которую он должен помещать результат вычисленного этой статической переменной выражения. Таким образом, реализуется возможность управления переменными объекта VEL программными переменными и наоборот, что было необходимо для реализации высокопроизводительного способа решения системы дифференциальных уравнений.

Объект VEL позволяет:

- на этапе выполнения программы создавать и удалять логические выражения, а также вычислять их значения;
- использовать в логических выражениях математические выражения и переменные объекта VEL;
- создавать логические выражения любой степени сложности и вложенности с использованием логических слов AND и OR.

Так как объект VEL является основой контроля и управления переменными, то позволяет при получении истинного результата от вычисленного логического выражения, производить любое количество действий над переменными объекта VEL, т.е. присвоение переменным численного значения или математического выражения.

Принцип распознавания и вычисления логических выражений аналогичен принципу, заложенному в переменные объекта VEL, за исключением только того, что составляющими логического выражения являются: логические знаки или известные их комбинации, по обе стороны которых стоят числа, переменные или математические выражения и логические слова AND и OR.

Совместное использование объектов VEL и BEL дало возможность создания зоны ограничений и входных воздействий. В принципе, программа позволяет создавать практически любые воздействия начиная от стандартных и заканчивая созданными самим пользователем. Кроме этого программа позволяет создавать такие воздействия, которые в процессе расчета могут менять свои параметры. Например, можно сделать так, чтоб какое-либо периодическое воздействие в процессе расчета меняло свою амплитуду и/или период, причем меняться оно может как скачкообразно, так и достаточно плавно. Все это выполняется путем указания простого математического выражения. В программе DiFSyS с легкостью можно создать синусоидальное воздействие, которое бы в процессе расчета затухало или возрастало, меняя плюс ко всему еще и свой период.

Программа была использована для проверки работоспособности заявленных патентов [1; 2] и их применение к конкретному электромеханическому оборудованию [3–6]. Сравнение результатов моделирования с последующими натурными исследованиями дали хорошую сходимость результатов, что подтверждает работоспособность программного продукта.

Данная программа была разработана с определенным уклоном в исследование автоматизированных систем управления электроприводами, но в принципе позволяет моделировать любые динамические процессы в электромеханических системах, имеющих описание в виде системы дифференциальных уравнений. Проведено тестирование программного продукта на моделях, предложенных авторами [7–10]. В ходе проверки выяснилось, что данная программа может использоваться и в смежных областях знаний.

### **Список использованной литературы**

1. Патент 2133044 РФ, МКИ G 01 R 31/34, Т 21 С 31/04. Способ испытания электрической машины постоянного тока и устройство для его осуществления / С.С. Леоненко, Е.В. Чудогашев, А.С. Леоненко, Е.А. Дмитриев. – № 98104883/09. – Заявлено 23.03.98. – Оpubл. 10.07.98. – Бюлл. № 19.
2. Патент 2255184 Россия, МКИ E 02 F9/20, H 02 P 5/00. Способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора и устройство для его осуществления / С.С. Леоненко, Д.Е. Махно, А.В. Сорокин, А.С. Леоненко, М.В. Павлов (Россия). – № 2004114678/03. – Заяв. 13.05.2004. – Оpubл. 27.06.2005. – Бюлл. №18.
3. Иов И.А. Исследование надежности редукторов шагающих экскаваторов ЭШ 20.90 / И.А. Иов, А.С. Леоненко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 5. – С. 29–33.
4. Сорокин А.В. Система управления испытательного стенда тяговых двигателей постоянного тока / А.В. Сорокин, А.С. Леоненко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 6. – С. 133–137.
5. Сорокин А.В. Исследование системы управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях / А.В. Сорокин, И.А. Иов, А.С. Леоненко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 7. – С. 91–96.

6. Сорокин А.В. Моделирование электропривода подъема экскаватора ЭШ 20.90 [Электронный ресурс] / А.В. Сорокин // Современные тенденции в социально-экономических и гуманитарных науках: теория и практика : сб. науч. тр. / под науч. ред. Т.Г. Озерниковой, Т.Л. Муzychук. – Иркутск : Изд-во БГУ, 2017. – С. 290–296.

7. Оценка эффективности информационно-телекоммуникационных систем на основе свободного программного обеспечения / под общ. ред. А.П. Суходолова. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2013. – 152 с.

8. Архипова З.В. Концепция информационной системы мониторинга уровня развития цифровой экономики / З.В. Архипова // Baikal Research Journal. – 2018. – Т. 9, № 3. – DOI: 10.17150/2411-6262.2018.9(3).8.

9. Артамонов И.В. Моделирование отказов бизнес-транзакции с помощью окрашенных сетей Петри / И.В. Артамонов // Известия Байкальского государственного университета. – 2016. – Т. 26, № 6. – С. 1026–1030.

10. Артамонов И.В. Анализ устойчивости бизнес-транзакций с помощью цепей Маркова / И.В. Артамонов // Информационные системы и технологии. – 2015. – № 3 (89). – С. 41–46.

### **Информация об авторе**

*Сорокин Александр Васильевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедра математики и информатики, Байкальский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: sorokinav@bgu.ru.

### **Author**

*Sorokin Alexander Vasilievich* – PhD in Technical, Associate Professor, Department of Mathematics and Informatics, Baikal State University, 664003, Irkutsk, 11 Lenin St., e-mail: sorokinav@bgu.ru.