

## СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

### МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СПОСОБОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

*Д.А. Падалко*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

#### **Введение**

Для большинства автономных комплексов необходима собственная система электроснабжения, в промышленных системах распространение нашли электрические машины переменного и постоянного тока, наиболее часто используются синхронные генераторы широкого диапазона мощностей. При проектировании электромеханических систем специального назначения, возникают соответствующие вопросы обеспечения бесперебойной работы, безопасности потребителей и возможности управления при значительном изменении влияющих факторов. Решением данных вопросов необходимо заниматься на первых этапах конструирования системы, для уменьшения издержек на производство.

В настоящее время методология выбора научно-технических решений состоит из широкого выбора способов проектирования мехатронных систем специального назначения. Теория электромеханических систем возникла как обобщение постулатов и закономерностей, позволяющих применение классических методов к электротехническим объектам для изучения свойств и параметров сложных систем.

#### **Цель работы**

Целью данной работы – комплексное исследование методологии решения задач проектирования технических систем электромеханических систем и автономных систем генерирования электроэнергии, представление особенностей приведенных методов описания работы электромеханических систем с примерами реализации в пакетах прикладных программ.

#### **Представление объекта исследования как системы дифференциальных уравнений**

Классический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений является наиболее обобщенным. Поскольку математические модели абстрактны, они широко используются в системных исследованиях. Математическая модель объекта является его идеализацией, поэтому при составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов используют общепринятые ограничения и допущения, связанные с «идеализированным» объектом. Так при составлении уравнений для электрических машин считают, что машина насыщена и фазные обмотки полностью симметричны, пренебрегают потерями в стали и т.д. В связи с упрощением объекта возникает задача «настройки» математической модели на реальный объект, суть которой

состоит в определении таких значений параметров, которые дадут результат максимально приближенный к экспериментальным данным. Наибольшее распространение для решения систем дифференциальных уравнений получил метод Эйлера и его модифицированный вариант. Применительно к электротехническим системам наиболее часто используют методы Рунге-Кутты, в математических пакетах зачастую реализуют методы не ниже четвертого порядка. Реализации данного метода имеются в пакетах прикладных программ, таких как MatLAB, Mathcad, Mathematica и прочих.

В качестве примера приведем систему дифференциальных уравнений асинхронной машины в комплексной системе координат  $\alpha$ - $\beta$  включающие выражения для тока и напряжения статора, потокосцепление ротора и статора, угловую скорость ротора, момент приводного двигателя и момент инерции.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{U_{s\alpha}}{L_s} - \frac{r_s \cdot i_{s\alpha}}{L_s} + \frac{kr}{L_s} \cdot \Psi_{r\alpha} + \frac{kr}{L_s} \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{U_{s\beta}}{L_s} - \frac{r_s \cdot i_{s\beta}}{L_s} + \frac{kr}{L_s} \cdot \Psi_{r\beta} + \frac{kr}{L_s} \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = k_r \cdot r_r \cdot i_{s\alpha} - \frac{\Psi_{r\alpha}}{T_r} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = k_r \cdot r_r \cdot i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{k_r}{J_d} (\Psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) - \frac{M_{вр}}{J_d}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Решения указанной системы дифференциальных уравнений выполним с помощью пакета прикладных программ MatLab. Для этого достаточно описать систему в функции с указанием параметров электрической машины. Решение системы возможно выполнить через встроенную функцию ode45 в качестве входных параметров которой выступают: система дифференциальных уравнений, временной диапазон, начальные условия величин и точность нахождения решения. На рис. 1 укажем полученное решение для величины угловой скорости.

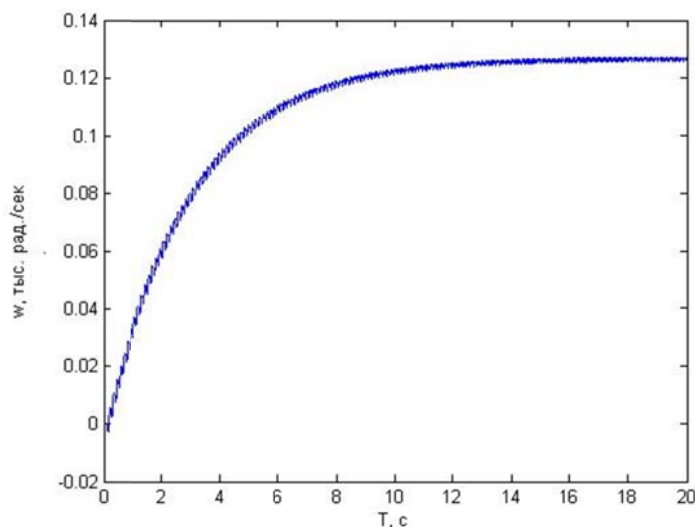


Рис. 1. График угловой скорости

## Метод визуального моделирования для описания электромеханических систем

Современный этап развития электротехнической промышленности характеризуется усложнением электромеханических систем, взаимодействий и связей между узлами. Наиболее простым в освоении и применении является метод визуального моделирования. Суть метода заключается в пошаговом воспроизведении событий происходящих в объекте в виде структурных блоков с конкретным функциональным назначением. Преимуществом таких моделей является ускоренный процесс в работе программы относительно событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени. В настоящее время наиболее популярны на практике такие языки визуального моделирования, как BPMN и UML. Применительно к моделированию электромеханических систем наибольшую популярность получил Simulink – визуальная среда моделирования, дающая возможность при помощи стандартных блок-диаграмм, строить модели динамических систем, в том числе дискретных, непрерывных и нелинейных системы. Приведем пример моделирование мехатронных системы с использованием АГ и отдельно моделирование АМ.

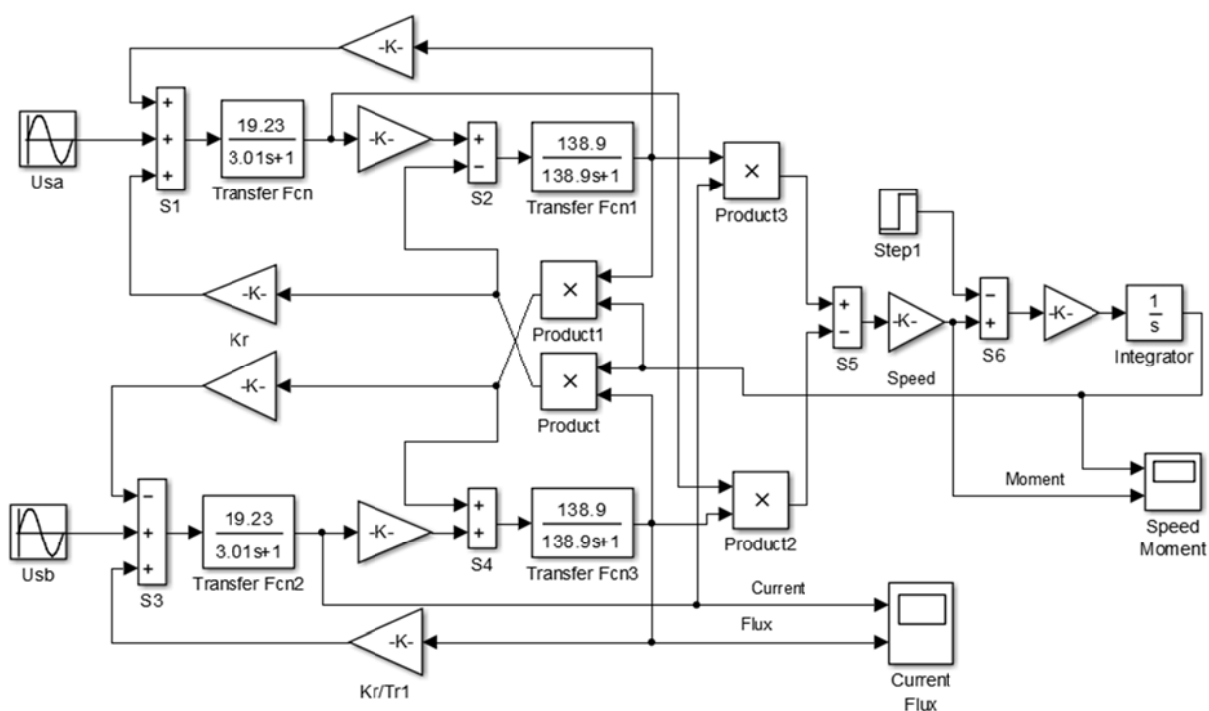


Рис. 2. Структурная схема асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

В данном случае представлена структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат. Отметим, что данная структурная схема также получена из системы уравнений в операторной форме.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = r(1 + Ts \cdot s)i_{s\alpha} - \frac{kr}{T_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + kr \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \\ u_{s\beta} = r(1 + Ts \cdot s)i_{s\beta} - \frac{kr}{T_r} \cdot \Psi_{r\beta} + kr \cdot p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha}; \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} \cdot (1 + Tr \cdot s)\Psi_{r\alpha} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \\ 0 = -k_r \cdot r_r \cdot i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} \cdot (1 + Tr \cdot s)\Psi_{r\beta} - p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\alpha}; \\ M = \frac{3}{2}pk_r(\Psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}); \\ Js\omega = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2)$$

В таком случае, как мы видим из рис. 2, мы можем получить функции момента и скорости.

Основными преимуществами визуального моделирования является возможность получения результата без знания методов Эйлера и Рунге-Кутты для решения дифференциальных уравнений и простота интеграции объекта в сложную систему без существенного увеличения времени расчета.

### **Описание научно-технических систем с позиций теории автоматического управления**

Достаточно обобщенным методом изучения научно-технических систем с точки зрения моделирования являются методы теории автоматического управления (ТАУ), они позволяют описывать динамические системы с помощью моделей в непрерывном и дискретном времени. Для этого необходимо построить функциональную схему системы или объекта, составленную по функциональному назначению элемента через типовые звенья ТАУ. То есть реализовать модель-алгоритм воспроизводящий процесс функционирования системы во времени, причем имитируются элементарными явлениями, составляющими процесс их логической структуры и последовательности протекания во времени. Реализация данного метода потребует серьезного понимания происходящих физико-математических процессов, знание преобразований физических величин в ходе работы объекта или системы. Стоит отметить, что для моделирования сложных систем необходимо использование системного подхода, дифференцируя сложную систему на гораздо более простые узлы.

В качестве примера рассмотрим создание модели асинхронного генератора с позиции теории автоматического управления. Как известно схема классического АГ включает батарею конденсаторов выступающую источником, необходимой для возбуждения, реактивной энергией. Асинхронный генератор, как электромеханическая система состоит из электрического и магнитного контуров. Наличие остаточного магнитного потока Фост приводит при вращении ротора к возникновению ЭДС  $E_{\Gamma}$  на выходе генератора, по принципу генерирования электроэнергии в машинах переменного тока генерация обуславливается выражением 3.

$$E_{\Gamma} = k \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Через батарею конденсаторов представленную звеном  $k_{ср}$ , возникает ток возбуждения, который создает магнитодвижущую силу  $F$  и соответствующий магнитный поток. Таким образом, образуется контур положительной обратной связи по магнитному потоку, способствующий процессу самовозбуждению. Амплитуда потока и ЭДС ограничиваются за счет нелинейности характеристики намагничивания. Процесс самовозбуждения характеризуется балансом фаз и амплитуд. Условия баланса амплитуд в таком случае характеризуется коэффициентом петлевого усиления больше единицы. Однако для выполнения баланса амплитуд в статорной цепи переменного тока необходимо получить емкостную составляющую тока  $I_C$  после блока дифференцирования, которая в цепи ротора «поддержит» развитие магнитного потока. Таким образом, можем получить структурную схему АГ с позиции ТАУ рис 4.

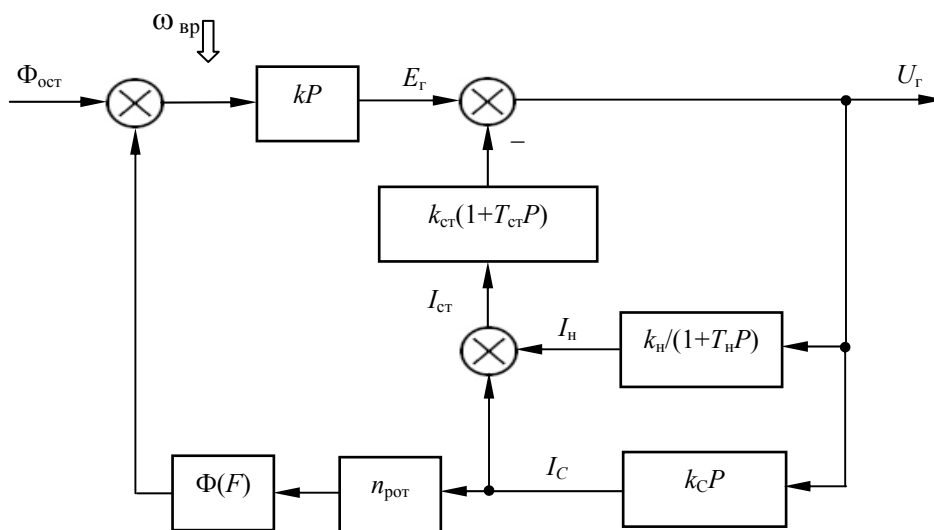


Рис. 4. Структурная схема АГ с позиции ТАУ

Представленная схема позволит получить известные в теории электрических машин условия самовозбуждения, однако, с позиций теории автоматического управления.

### Выводы

Независимо от подхода требуется понимание физики электромеханических процессов в электрической машине. Каждый из представленных методов имеют свои ярко выраженные преимущества и недостатки. Так метод представления в виде структурной схемы с позиции ТАУ, является наиболее простым со стороны представления модели и позволяет максимально обобщенно описать работу системы. Основным минусом при этом является малое число учитываемых факторов, при этом любое усложнение и более детальный учет не дает принципиальных различий выходных значений, но требует гораздо большего понимания происходящих процессов и преобразования величин на каждом этапе.

Визуальное моделирование является промежуточным звеном, требующее достаточно полное описание математической модели и позволяющее учитывать большое число факторов при этом не углубляясь в способы решения систем дифференциальных уравнений. Недостатком данного способа изучения

объектов является сложность создания сложных систем состоящих из нескольких объектов, в таком случае структурная схема сложной системы является слишком громоздкой и сложной для преобразования на некоторых из этапов. Данная проблема обходится путем использования законченных блоков и компоновки созданных объектов.

Классический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений позволяет учитывать сколь угодно большое число факторов, интегрировать объекты в сложные системы без испытывания особых трудностей проектирования. Недостатками данного способа являются необходимость знания и умения использовать методы решения систем дифференциального уравнения и высокая потребность в вычислительных и временных ресурсах.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин./ Сипайлов Г.А., Лоос А.В. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.

2. Пятибратов Г.Я., Барыльник Д.В. Моделирование электромеханических систем: Учеб. пособие// Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013.-103 с.

3. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций: Монография. – Изд-во ТПУ, 2001.

4. Дворецкий С.И. Основы математического моделирования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха: учебное пособие/ С.И. Дворецкий, С.В. Матвеева, С.Б. Путин, Е.Н. Туголуков. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2008. – 324 с.

5. Alexander G.Garganeev Principles of Electric Power Generation Based on the Self-Excited Electrical Machines Using the Perspectives of the Automatic Control Theory [Text] / Alexander G.Garganeev, Dmitry A. Padalko // Proceedings of the 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2013, Erlagol (Altai), Russia, July 1-5, 2013. – Novosibirsk: NSTU Printing Office, 2013. – p. 319 – 321.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО- ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ЦЕПИ И ОБРЫВЕ ОДНОГО ИЗ КАНАЛОВ**

*Д.А. Симон*

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс», Россия,  
Томск