

Р.Т. Шрейнер, А.А. Емельянов,
А.В. Клишин, А.В. Медведев

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОМЕНТОВ СТАТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ДВИГАТЕЛЕЙ В MATLAB

При исследовании режимов работы электрифицированных механизмов методами математического моделирования одним из важных условий получения достоверных результатов является корректный учет нагрузки на валу электрического двигателя. В теории электропривода моменты статического сопротивления механизмов подразделяются на две характерные группы: активные и реактивные. Активные моменты порождаются силами гравитации и упругой деформации и отличаются способностью вызвать движение механизма даже при отключенном двигателе. Реактивные моменты порождаются силами трения и неупругой деформации и всегда проявляют себя как силы, противодействующие движению. Они проявляют себя и в состоянии покоя, как противодействие активному усилию, развиваемому двигателем и активной составляющей момента статического сопротивления механизма.

Широко распространенным инструментом решения задач электромеханики является пакет "Matlab – Simulink", где содержится обширная библиотека моделей электрических машин [1]. Обобщенная структура таких моделей представлена на рис. 1.

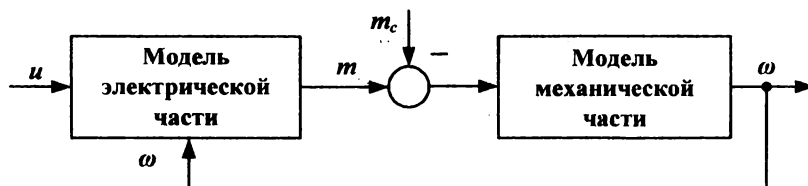


Рис. 1. Обобщенная структура моделей электрических машин

Здесь показаны два основных блока, моделирующих процессы в электромагнитных контурах машины и ее механической части. Момент нагрузки вводится в качестве независимой переменной m_c . В данной структуре внешнее воздействие m_c интерпретируется моделью как *активный момент статического сопротивления механизма*. Отсутствие блока формирования реактивной составляющей момента сопротивления ограничивает область использования подобных моделей в задачах электромеханики.

Целью данной работы является усовершенствование моделей путем создания дополнительного функционального блока, позволяющего моделировать режимы работы электрифицированных механизмов с активными и реактивными моментами статического сопротивления.

Теоретическая основа построения такого блока дана в работе [2], где приводится следующая математическая модель вычисления нагрузки на валу двигателя, как совокупности активной и реактивных составляющих момента статического сопротивления механизма:

$$m_c = \begin{cases} m_a + m_p \operatorname{sign} \omega & \text{при } \omega \neq 0; \\ f(m, m_{mp}) & \text{при } \omega = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$f(m, m_{mp}) = \begin{cases} m & \text{при } |m - m_a| \leq m_{mp}; \\ m_a + m_{mp} \operatorname{sign}(m - m_a) & \text{при } |m - m_a| > m_{mp}. \end{cases}$$

где m_a – активный момент статического сопротивления механизма;

m_p – модуль реактивного момента статического сопротивления при движении механизма;

$m_{\dot{\theta}}$ – модуль реактивного момента статического сопротивления при трогании механизма;

ω – скорость вращения вала двигателя;

m – электромагнитный момент двигателя;

m_c – результирующий момент статического сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя.

Алгоритм функционирования этого блока показан на рис.2. Правая ветвь алгоритма определяет величину и направление действия реактивной состав-

ляющей момента статического сопротивления при движении механизма, как фактора, противодействующего движению. Левая ветвь определяет величину и направление реактивной составляющей момента статического сопротивления в состоянии покоя, как равного противодействия активным усилиям со стороны двигателя и механизма. Средняя ветвь описывает ситуацию, возникающую при трогании механизма, и позволяет учесть различие сил трения в состоянии покоя и движения. Для обеспечения устойчивости численного решения уравнений модели «двигатель-нагрузка» строгие условия идентификации движения ($\omega \neq 0$) и покоя ($\omega = 0$) из выражений (1) заменены на менее жесткое условие $|\omega| > \varepsilon$, где ε – малая положительная величина.

Использование данного алгоритма позволяет корректно учесть нелинейные свойства сил трения и неупругой деформации, как при движении, так и при покое, включая условия трогания и остановки механизма.

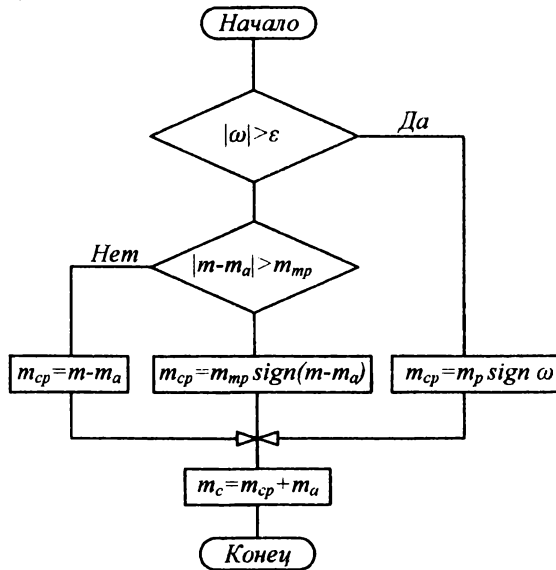


Рис.2. Алгоритм вычисления момента статического сопротивления механизма

Как следует из описанной выше математической модели, момент статического сопротивления механизма представляет собой нелинейную функцию четырех переменных $m_c = f(\omega, m_a, m_\delta, m)$. Для учета сухого и вязкого трения, а

также особенностей полезной нагрузки различных механизмов, целесообразно представление модуля реактивной составляющей момента их статического сопротивления, как комбинации постоянной составляющей, линейной, квадратичной и кубической функций скорости:

$$m_d = m_0 + a_1 \cdot |\omega| + a_2 \cdot \omega^2 + a_3 \cdot |\omega^3|, \quad (2)$$

где m_0 – постоянная составляющая модуля реактивного момента;
 a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты переменных составляющих реактивного момента сопротивления механизма.

Обобщенная структура модели электрического двигателя с блоком моделирования нагрузки приобретает вид, показанный на рис. 3. В отличие от структуры рис. 1 здесь присутствуют связи по электромагнитному моменту и скорости двигателя, необходимые для корректного вычисления в модели нагрузки реактивной составляющей момента статического сопротивления m_c на валу двигателя. Модуль реактивной составляющей формируется нелинейным блоком в соответствии с формулой (2).

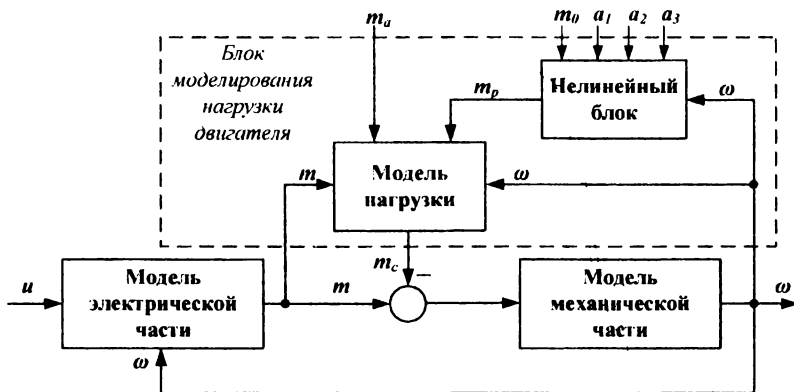


Рис. 3. Обобщенная структура модели электрического двигателя с блоком моделирования нагрузки

Для реализации усовершенствованных моделей библиотеки электрических машин в пакете "Matlab -- Simulink" разработан блок моделирования нагрузки двигателя, структура которого показана на рис. 4.

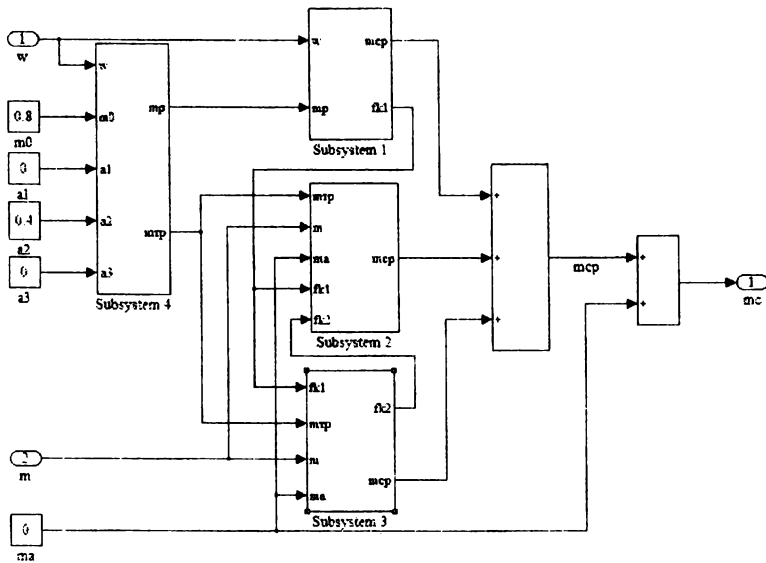


Рис.4. Блок моделирования нагрузки на валу двигателя

В соответствии с алгоритмом вычисления m_c (рис. 2), в модели нагрузки введены три подсистемы (Subsystem 1, 2, 3) моделирующие три ветви исходного алгоритма. Функциональные модели этих подсистем показаны на рис. 5, 6 и 7. Первая подсистема определяет величину и направление действия реактивной составляющей момента статического сопротивления при движении механизма. Вторая - моделирует ситуацию, возникающую при трогании механизма. Третья - моделирует величину и направление реактивной составляющей момента статического сопротивления в состоянии покоя. Блоки Relay реализуют релейную функцию $y = f(x)$, принимающую значение 1 при $x > 0$ и 0 при $x < 0$.

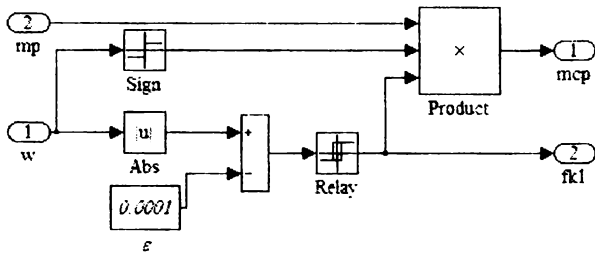


Рис.5. Функциональная модель Subsystem1

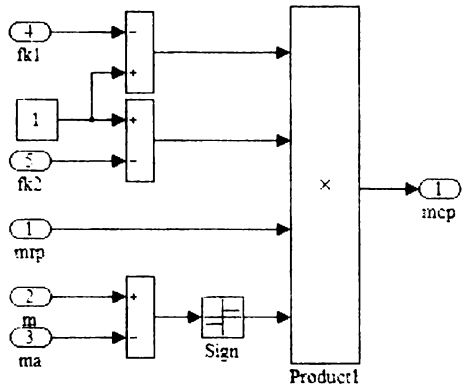


Рис.6. Функциональная модель Subsystem2

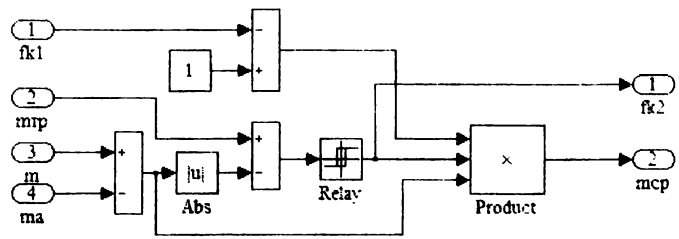


Рис.7. Функциональная модель Subsystem3

С целью учета сухого и вязкого трения и особенностей конкретных механизмов в модель нагрузки введен нелинейный блок Subsystem4, позволяющий

реализовать различные функциональные зависимости модуля реактивного момента от скорости. Соответствующая выражению (2) функциональная модель изображена на рис. 8.

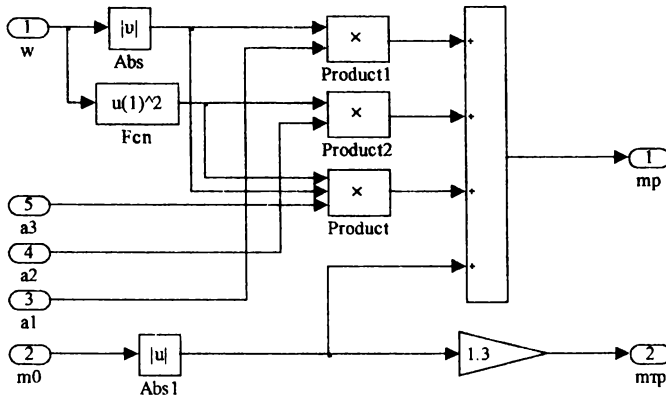


Рис.8. Функциональная модель нелинейного блока

Разработанный блок моделирования нагрузки апробирован в сочетании с моделями различных двигателей постоянного и переменного тока из приложения SimPowerSystems/Machines. В качестве иллюстрации на рис. 9 приведены результаты моделирования процессов пуска, установившегося движения и реверса электрифицированного механизма с двигателем с постоянного тока при питании от регулируемого источника напряжения. Электропривод снабжен замкнутой САР скорости с подчиненным регулированием тока якоря и формированием сигнала задания скорости от задатчика интенсивности. Графики изменения во времени величин задания скорости $\omega^*(t)$, фактической скорости $\omega(t)$, электромагнитного момента $m(t)$ и момента статического сопротивления на валу двигателя $m_c(t)$ представлены в относительных единицах. В качестве базисных величин приняты номинальные значения электромагнитного момента и скорости двигателя. Механизм характеризуется реактивным моментом статического сопротивления с постоянной и квадратичной составляющими зависимости момента от скорости. Момент трогания превышает постоянную составляющую на 30%. Принятые при моделировании численные значения параметров нагрузки m_0 , a_1 , a_2 , a_3 и величины ε показаны на рис. 4 и 5.

Как видно из графиков, модель адекватно воспроизводит соответствующие реалиям люфты в графиках скорости на начальной стадии пуска и при реверсе, пики момента статического сопротивления при трогании механизма, а также изменения момента нагрузки $m_c(t)$ при изменении скорости.

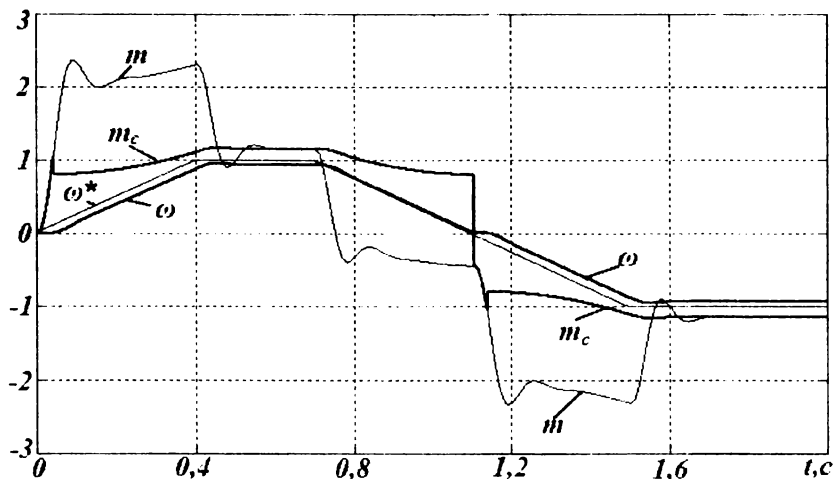


Рис.9. Временная диаграмма пуска, установившегося движения и реверса электрифицированного механизма с двигателем постоянного тока

Результаты апробации модели нагрузки подтвердили возможность моделирования режимов работы электрифицированных механизмов с различными двигателями и механизмами с активными и реактивными моментами статического сопротивления.

Библиографический список

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. [Текст] / Спб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с., ил.
2. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. [Текст] / Р. Т. Шрейнер. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО "Рос. гос. проф.-пед. ун-т", 2008. – 279 с.