

## ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ (ПАКЕТ РАСШИРЕНИЯ MATLAB)

И.А. Прошин, В.В. Бурков

В статье описывается программное средство для исследования вентильно-электромеханических систем на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а также результаты моделирования системы преобразователь – двигатель – центрифуга

Ключевые слова: математическое моделирование, вентильно-электромеханическая система, асинхронный двигатель, пакет расширения MATLAB

**Введение.** В связи с нелинейностью и сложностью математических моделей полные исследования и моделирование современных вентильно-электромеханических систем (ВЭМС) могут быть проведены только с использованием численных методов и современных методов обработки информации на ЭВМ. Анализ подобных систем выявил, что все эти системы имеют ряд ограничений: все они рассчитаны на моделирование одного статического и/или динамического процесса; ряд из них позволяют моделировать только трехфазный режим работы электродвигателя. В то время как существуют задачи, где требуется проведение множественных моделирований и графическая визуализация результата в виде поверхности. Подобная система должна соответствовать следующим требованиям:<sup>1</sup>

- позволять моделировать все режимы работы электродвигателя (трехфазный, двухфазный, выбега);
- моделировать работу ВЭМС при частотном, квазичастотном, фазоимпульсном управлении;
- выполнять моделирование при различной структуре непосредственного преобразователя энергии (НПЭ);
- допускать изменение алгоритма управления;
- позволять моделирование при различных законах изменения момента инерции нагрузки;
- выполнять расчет в относительных единицах;
- иметь широкие возможности по графической визуализации результатов;
- иметь базу характеристик электродвигателей;

- возможность сохранения результатов моделирования;

- позволять обмениваться данными с другими программами;

- иметь возможности для дальнейшего расширения функциональности с целью проведения дальнейшей обработки результатов моделирований.

### Выбор системы программирования.

Анализ показал, что наиболее удобным для выполнения вышеуказанных задач является пакет прикладных программ Matlab – он универсален, обладает широким набором функций, имеет собственный язык программирования, ориентированный на работу с матрицами, большой набор математических функций, имеет широкие возможности для графической визуализации результатов и дальнейшего расширения функциональности.

### Выбор математической модели вентильно-электромеханической системы.

Анализ математических моделей показал, что для решения поставленной задачи наиболее удобны модели рассматривающие систему двигатель – преобразователь как единое целое. Из проанализированных работ было выбрано описание, предложенное в работах Прошина И.А [1]. Данное математическое описание рассматривает систему двигатель – преобразователь как последовательное соединение преобразователя числа фаз и модулятора. Отличительная особенность данной модели состоит в представлении выходного напряжения преобразователя единственным гармоническим колебанием с дискретно управляемой начальной фазой, что позволяет рассматривать все непосредственные преобразователи энергии на основе одной структурной схемы, а задачи синтеза моделей и исследования системы управления техническими объектами с произвольной структурой преобразователя решать на единой

---

Прошин Иван Александрович - ПГТА, д-р техн. наук, профессор, тел. (8412) 49-61-59

Бурков Всеволод Валерьевич – ПГТА, аспирант, тел. (8412) 43-77-24

методологической и математической основе [1]. Использование такого подхода позволяет при помощи изменения одного параметра управлять частотой выходного напряжения, а применение этой модели даст возможность моделировать большинство из существующих структур НПЭ.

При соединении обмоток асинхронной машины звездой без нулевого провода для рассматриваемой системы возможны следующие состояния:

■ включены ПЭ (переключающие элементы) во всех фазах двигателя;

■ выключены ПЭ во всех фазах двигателя;

■ выключены ПЭ в фазе А;

■ выключены ПЭ в фазе В;

■ выключены ПЭ в фазе С.

Три последних состояния системы “ТК – АМ” соответствуют двухфазному режиму работы двигателя, поэтому системы уравнений, описывающих эти состояния, подобны. Первое состояние системы эквивалентно симметричному трёхфазному режиму работы АМ, второе – режиму выбега.

Математическая модель асинхронной машины в симметричном режиме при общепринятых допущениях в двухфазной системе координат  $\alpha, \beta$  с учётом насыщения магнитной системы имеет вид [2]:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} &= U_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} &= U_{1\beta} - R_1 i_{1\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} &= -(i_{m\alpha} - i_{1\alpha}) \cdot R_2 - p_{\Pi} \omega \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} &= -(i_{m\beta} - i_{1\beta}) \cdot R_2 + p_{\Pi} \omega \psi_{2\alpha}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c \cdot \text{sign} \omega),\end{aligned}\quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \frac{\omega_0 x_m}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 \cdot x_2} \cdot (\psi_{2\alpha} \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}),$$

$$i_{m\alpha} = \frac{\omega_0}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 x_2} \cdot (x_2 \psi_{1\alpha} + x_1 \psi_{1\beta}), \quad (2)$$

$$i_{m\beta} = \frac{\omega_0}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 x_2} \cdot (x_2 \psi_{1\beta} + x_1 \psi_{2\beta}),$$

$$i_{1\alpha} = \frac{\omega_0}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 x_2} \cdot [(x_m + x_2) \psi_{1\alpha} - x_m \psi_{2\alpha}],$$

$$i_{1\beta} = \frac{\omega_0}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 \cdot x_2} \cdot [(x_m + x_2) \psi_{1\beta} - x_m \psi_{2\beta}],$$

$$i_m = \sqrt{i_{m\alpha}^2 + i_{m\beta}^2}, \quad x_m = f(i_m),$$

где:  $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$  - проекции обобщённого вектора напряжения статора на соответствующие оси  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}$  - проекции обобщённого вектора потокосцепления статора на соответствующие оси;

$\psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$  - проекции обобщённого вектора потокосцепления ротора;

$i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  - проекции обобщённого вектора тока статора;

$i_{m\alpha}, i_{m\beta}$  - проекции обобщённого вектора намагничивающего тока;

$i_m$  - модуль вектора намагничивающего тока;

$R_1, R_2$  - активные сопротивления статорной и роторной цепей;

$p_{\Pi}$  - число пар полюсов;

$\omega$  - скорость ротора;

$\omega_0$  - синхронная скорость;

$M$  - электромагнитный момент;

$x_1, x_2, x_m$  - индуктивные сопротивления статора, ротора и намагничивающего контура;

$i_a, i_b, i_c$  - токи АМ в трёхфазной системе координат;

$M_c, J$  - момент сопротивления и момент инерции, соответственно.

Значительное упрощение системы уравнений для двухфазного режима достигается применением метода колеблющихся координат путём совмещения обесточенной фазы с осью  $\alpha$ . Такое совмещение осуществляется поворотом координатных осей в дискретные моменты времени на угол  $\pm 2\pi/3$ .

В двухфазном режиме работы АМ при совмещении оси  $\alpha$  с фазой А система уравнений приводится к виду [2]:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} &= \frac{x_m}{x_m + x_2} \cdot \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} &= U_{1\beta} - i_{1\beta} \cdot R_1, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} &= -i_{m\alpha} \cdot R_2 - p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} &= -(i_m - i_{1\beta}) \cdot R_2 + p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c \cdot \text{sign} \omega),\end{aligned}\quad (3)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_{\Pi} \cdot \omega_0 \cdot \frac{x_m \cdot \psi_{2\alpha} \left( \psi_{1\beta} - \frac{x_m}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\beta} \right)}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 \cdot x_2},$$

$$i_{m\alpha} = \frac{\omega_0}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\alpha}, \quad i_{m\beta} = \frac{\omega_0 \cdot (x_2 \cdot \psi_{1\beta} + x_1 \cdot \psi_{2\beta})}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 \cdot x_2},$$

$$i_{1\alpha} = 0, \quad i_{1\beta} = \frac{\omega_0 \cdot [(x_m + x_2) \psi_{1\beta} - x_m \cdot \psi_{2\beta}]}{x_m (x_1 + x_2) + x_1 \cdot x_2},$$

$$i_m = \sqrt{i_{m\alpha}^2 + i_{m\beta}^2}, \quad x_m = f(i_m).$$

Для режима выбега справедлива следующая система уравнений [2]:

$$\frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -i_{m\alpha} \cdot R_2 - p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta},$$

$$\frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -i_{m\beta} \cdot R_2 + p_{\Pi} \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha},$$

$$\psi_{1\alpha} = \frac{x_m}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\alpha},$$

$$\psi_{1\beta} = \frac{x_m}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\beta},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_s \cdot \text{sign} \omega),$$

$$M = 0, \quad i_{1\alpha} = 0, \quad i_{1\beta} = 0,$$

$$i_{m\alpha} = \frac{\omega_0}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\alpha}, \quad i_{m\beta} = \frac{\omega_0}{x_m + x_2} \cdot \psi_{2\beta},$$

$$i_m = \sqrt{i_{m\alpha}^2 + i_{m\beta}^2}, \quad x_m = f(i_m).$$

Для перехода от одной двухфазной системы к другой введем оператор поворота  $w$ , принимающий значение равное +1 при повороте на  $2\pi/3$  и -1 при повороте на  $4\pi/3$ . Тогда значения переменных  $x'_\alpha$ ,  $x'_\beta$  в новой системе координат могут быть вычислены на основе следующих формул [2]:

$$x'_\alpha = -0,5x_\alpha - w \frac{\sqrt{3}}{2} x_\beta,$$

$$x'_\beta = -0,5x_\beta + w \frac{\sqrt{3}}{2} x_\alpha.$$

#### Разработка структуры приложения.

Учитывая структуру математической модели (1)-(4) и особенности поставленной задачи, было решено выделить следующие программные модули:

1. Ad.m – выполняет вычисление правых частей системы уравнений описывающих асинхронный электродвигатель.
2. Coord2d.m – выполняет переход от одной двухфазной системы координат к другой
3. Coord2d3d.m – выполняет переход от двухфазной системы координат к трехфазной;
4. Tk.m – определяет состояние тиристорного коммутатора;

5. Enn.m – определяет номер структуры по которой будет производиться вычисление.

6. ww.m – вычисление значения оператора поворота;

7. Xmm.m – вычисление сопротивления контура намагничивания в зависимости от тока намагничивания;

8. adtool.m – модуль обеспечивающий работу графического интерфейса основного окна программы.

9. graphresult.m – модуль отвечающий за графическую визуализацию результатов моделирования;

10. resultmanager.m – модуль отвечающий за сохранение, отбор, сортировку результатов моделирований полученных ранее.

По заданной структуре был разработан пакет расширения к системе математического моделирования Matlab. Разработанное программное средство зарегистрировано в РОСПАТЕНТ (свидетельство № 2004611397) [3].

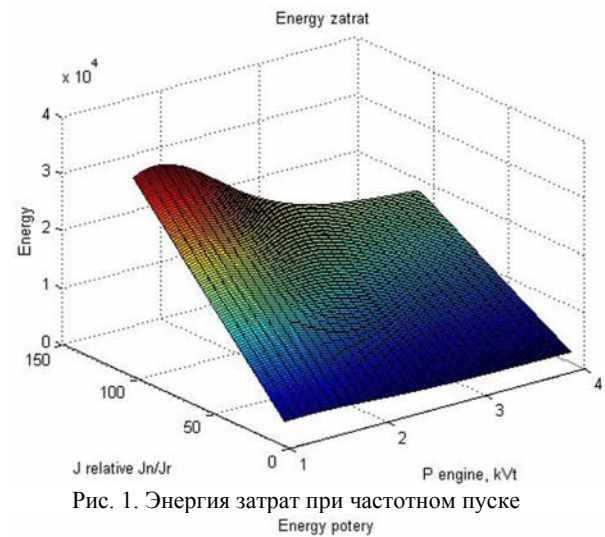


Рис. 1. Энергия затрат при частотном пуске

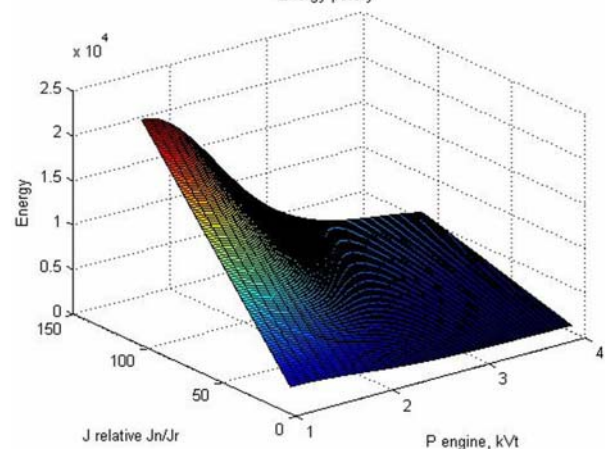


Рис. 2. Энергия потерь при частотном пуске

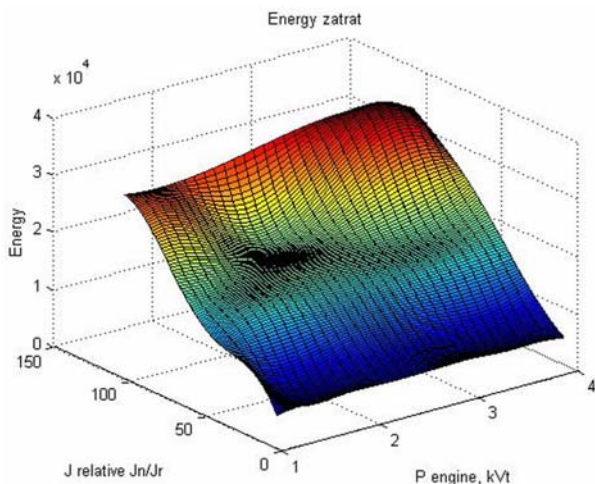


Рис. 3. Энергия затрат при комбинированном (квазичастотное управление и фазоимпульсное управление) пуске

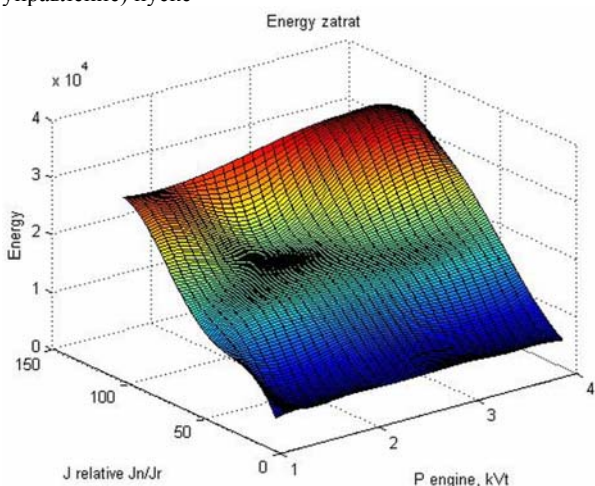


Рис. 4. Энергия потерь при комбинированном (квазичастотное управление и фазоимпульсное управление) пуске

При помощи разработанного пакета програм были проведены исследования системы вентильный преобразователь – асинхронный двигатель – центрифуга. Для формирования более четкой картины энергетической эффективности того или иного способа управления исследование характеристик производилось при варьировании мощности электродвигателя,

момента инерции нагрузки и алгоритма управления. Для сопоставительного исследования были выбраны частотное управление как наиболее эффективное и комбинированное управление, сочетающее в себе квазичастотное и фазоимпульсное управление, как самый дешевый способ.

Моделирование было проведено из расчета использования асинхронных двигателей серии 4А мощностью от 1,1 до 4 кВт. Результат этих исследований приведен на рис. 1-4.

Сопоставление энергетических характеристик позволяет сделать следующие выводы

1. При малых мощностях двигателя частотное управление эффективнее комбинированного в среднем на 20 – 25 % с ростом мощности двигателя энергетическая эффективность частотного возрастает, что связано с импульсным характером пускового момента при комбинированном управлении.

2. Применение комбинированного способа управления для ВЭМС с тяжелыми условиями пуска позволяет использовать двигатели с относительно малой мощностью и добиваться довольно высоких энергетических характеристик и низкой стоимости решения задачи в целом при условии, что не требуется высокой точности управления частотой вращения ротора во время установившегося режима работы.

#### Литература

1. Прошин И.А. Управление непосредственным преобразованием электрической энергии книга первая. – Пенза, 2002. 334 с.
2. Прошин И.А. Управление в вентильно-электрохимических системах книга вторая математическое моделирование вентильно-электрохимических систем. – Пенза: ПТИ, 2002. 307 с.
3. Прошин И.А., Бурков В.В., Кутузов Е.А., Усманов В.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611397.

Пензенская государственная технологическая академия

### PROGRAM MEANS OF RESEARCH GATED-ELECTROMECHANICAL SYSTEMS ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE (THE PACKAGE OF EXPANSION MATLAB)

I.A. Proshin, V.V. Burkov

In article described the software for research of gated-electromechanical systems on the basis of the asynchronous engine with a short-circuited rotor, and also results of modelling of system the converter – engine – centrifuge

Key words: mathematical modelling, gated-electromechanical systems, asynchronous engine, package of extension MATLAB