

УДК 62.503.51, 62.503.54, 62.503.55.

**СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ  
И ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ**

**А.С. Ляпин**

Представлены основные особенности и преимущества электропривода с машиной двойного питания. Разработана структурная модель и получены динамические характеристики электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментом.

**Ключевые слова:** электропривод, машина двойного питания, прямое управление моментом, структурная модель.

**Введение**

Длительное время основной тенденцией развития электроприводной техники является замена ненадежного, дорогого и сложного в обслуживании привода постоянного тока частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Это обусловлено такими достоинствами асинхронного электропривода, как высокая надежность, простая конструкция, низкая стоимость, высокие динамические и энергетические показатели [1, 2]. В настоящее время, благодаря новым алгоритмам управления, которые удастся реализовать на базе современной микропроцессорной техники, а также интенсивному развитию устройств силовой электроники асинхронный электропривод стал главным типом регулируемого электропривода [3].

Для частотно управляемых электроприводов с асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором большой мощности альтернативой является использование привода на основе АД с фазным ротором (иначе, машины двойного питания (МДП)). Такой тип ротора был разработан русским электротехником, основоположником техники трехфазного тока М.О. Доливо-Добровольским специально для асинхронных двигателей большой мощности [4]. Преимущества электропривода с машиной двойного питания (ЭМДП) обусловлены тем, что управление осуществляется по цепи ротора путем изменения мощности скольжения, величина которой зависит от глубины регулирования скорости. Структурная схема ЭМДП представлена на рис. 1. При соответствующей реализации ЭМДП может работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. ЭМДП при использовании его в качестве исполнительного механизма (двигательный режим) обладает рядом существенных достоинств по сравнению с другими типами современных приводов, а именно:

- высокое быстродействие;
- возможность регулирования реактивной мощности в питающей сети;

- возможность поддержания оптимального коэффициента мощности привода при изменении нагрузки;
- возможность реализации двухзонного регулирования угловой скорости, в том числе выше синхронной.

При работе ЭМДП в качестве генератора он имеет следующие существенные преимущества:

- возможность стабилизации выходного напряжения (амплитуды и частоты) при непостоянной скорости вращения вала генератора путем изменения параметров напряжения питания роторных обмоток;
- мощность управления и полупроводникового преобразователя (ПП на рис. 1) меньше мощности преобразуемой машиной и зависит от диапазона регулирования скорости вращения ротора;
- высокий КПД;
- возможность регулирования коэффициента мощности в сети.

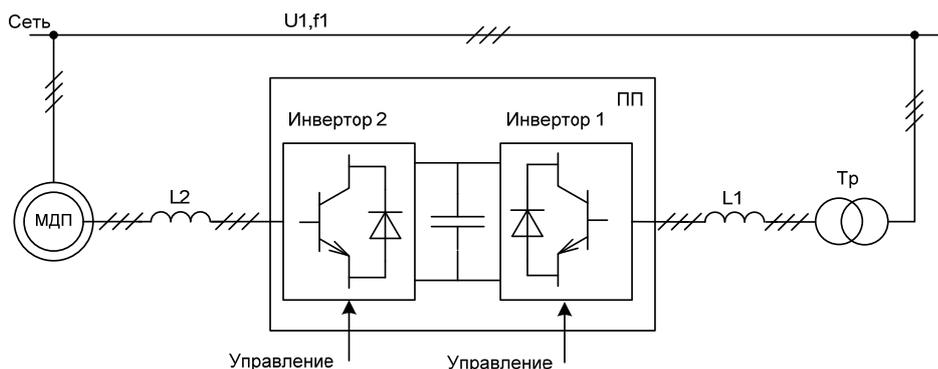


Рис. 1. Структурная схема ЭМДП

Наиболее целесообразно применение генераторов на основе ЭМДП большой мощности в случаях, в которых подводимая к ротору механическая энергия изменяется в процессе работы в ограниченных пределах, например, в возобновляемых источниках энергии (ветрогенераторы, гидрогенераторы), валогенераторных установках, нагрузочных устройствах двигателей внутреннего сгорания.

Электропривод с МДП еще не получил широкого распространения в отечественной промышленности. Приведенные выше преимущества показывают перспективность его внедрения. Однако прежде необходимо произвести более глубокие теоретические и практические изыскания с применением современных программных и аппаратных решений.

Целью работы является получение и анализ электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментом по цепи ротора. Предложена структурная схема электропривода в пакете Matlab Simulink.

#### Математическое описание асинхронного ЭМДП с прямым управлением моментом

При разработке структурной модели ЭМДП за основу возьмем систему уравнений, записанную в произвольно вращающейся системе координат  $\omega_k$  с использованием метода обобщенного (пространственного) вектора [5]:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_k \psi_1; \\
 U_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_k - p\omega) \psi_2; \\
 \psi_1 &= L_1 i_1 + L_m i_2; \\
 \psi_2 &= L_2 i_2 + L_m i_1,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $U_1, U_2$  – векторы напряжений статора и ротора;  $\psi_1, i_1, \psi_2, i_2$  – векторы потокосцеплений, токов статора и ротора;  $R_1, L_1, R_2, L_2$  – активные сопротивление и индуктивность статора и ротора соответственно;  $L_m$  – главная индуктивность намагничивающего контура;  $\omega_k$  – угловая скорость вращения системы координат;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $p$  – число пар полюсов машины.

Адаптированный для ЭМДП метод прямого управления моментом (DTC – direct torque control) осуществляется регулированием модуля и пространственного положения вектора потокосцепления  $\psi_2$  путем изменения его проекций  $\psi_{2x}, \psi_{2y}$ . Для упрощения математического описания и реализации прямого управления моментом целесообразно ориентировать систему координат  $\omega_k$  по вектору  $\psi_1$  ( $\psi_{1x} = 0$ ).

С учетом принятой ориентации системы координат выполним преобразование системы уравнений (1). Полученную систему дополним уравнениями равновесия моментов, выражением электромагнитного момента, записанного через выбранные переменные состояния, и уравнениями, связывающими модули векторов напряжения статора, потокосцепления ротора и их проекции на оси координат. В результате получим систему уравнений, описывающую протекающие электромагнитные процессы в МДП:

$$\begin{aligned} \omega_k &= \frac{-u_{1x} - \frac{k_2}{T_1 \sigma} \psi_{2x}}{\psi_{1y}}; \\ u_{1y} &= \frac{1}{T_1 \sigma} \psi_{2y} - \frac{k_2}{T_1 \sigma} \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= u_{2x} - A\psi_{2x} + [\omega_k - p\omega] \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= u_{2y} - A\psi_{2y} + \frac{k_1}{T_2 \sigma} \psi_{1y} - [\omega_k - p\omega] \psi_{2x}; \\ u_{1x} &= \sqrt{|\mathbf{U}_1|^2 - u_{1y}^2}; \\ \psi_{2y} &= \sqrt{|\boldsymbol{\Psi}_2|^2 - \psi_{2x}^2}; \\ |\boldsymbol{\Psi}_1| &= \psi_{1y} = \text{const}; \\ M &= C\psi_{1y}\psi_{2x}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= (M - M_n). \end{aligned} \tag{2}$$

В системе (2) приняты следующие обозначения:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}, T_2 = \frac{L_2}{R_2}, k_1 = \frac{L_m}{L_1}, k_2 = \frac{L_m}{L_2}, \sigma = 1 - k_1 k_2, A = \frac{1}{T_2 \sigma}, C = \frac{3}{2} \frac{k_1 p}{\sigma L_1}.$$

#### Структурная модель ЭМДП с прямым управлением моментом и его динамические характеристики

Для разрабатываемой модели необходимо синтезировать реализующую метод прямого управления момента систему управления, которая будет формировать напряжения питания обмоток ротора. Такая система должна иметь два отдельных канала управления. Один канал содержит релейный регулятор и осуществляет стабилизацию модуля вектора потокосцепления ротора, величина которого задается на входе канала. Второй канал, помимо релейного, содержит пропорциональный (П) или пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, который по сигналу скоростной ошибки формирует сигнал задания электромагнитного момента ЭМДП. По значению ошибки момента, полученному в результате сравнения заданного и текущего электромагнитного момента, релейным регулятором определяется величина соответствующей проекции вектора напряжения ротора.

С учетом перечисленных положений и системы уравнений (2) в пакете Simulink разработана структурная модель ЭМДП (для двигателя 20HP (15 kW 400V 50Hz  $T_1=0,3032$  с,  $T_2=0,2952$  с,  $J=0,102$  кг·м<sup>2</sup>) из библиотеки пакета SimPower System). Разработанная модель представлена на рис. 2. В модели для увеличения скорости моделирования релейные блоки представлены последовательным соединением блоков усиления с большим коэффициентом передачи и насыщения.

В части 1 модели реализованы четвертое и шестое уравнения системы (2), на вход подается сигнал задания модуля вектора потокосцепления ротора. В части 2 на вход модели поступает сигнал задания скорости вращения ротора машины и реализуются вычисления согласно третьему, восьмому и девятому уравнениям. В части 3 на вход модели подается вектор напряжения питания статора и выполняются вычисления в соответствии с незадействованными уравнениями системы (2).

На рис. 3, 4 приведены результаты моделирования, полученные на разработанной структурной модели электропривода с машиной двойного питания.

По переходным процессам в ЭМДП при скачкообразном управляющем воздействии видно, что момент изменяется практически скачком (нижняя диаграмма), это свидетельствует о высоком быстродействии исследуемого электропривода. В момент времени 0,6 с к валу прикладывается момент нагрузки. Как видно из графиков, обработка этого возмущающего воздействия выполняется без запаздывания.

При использовании ПИ-регулятора в канале формирования заданного момента переходный процесс протекает с небольшим перерегулированием, и скоростная ошибка, вызванная приложенным внешним моментом, интегральной составляющей регулятора сводится к нулю.

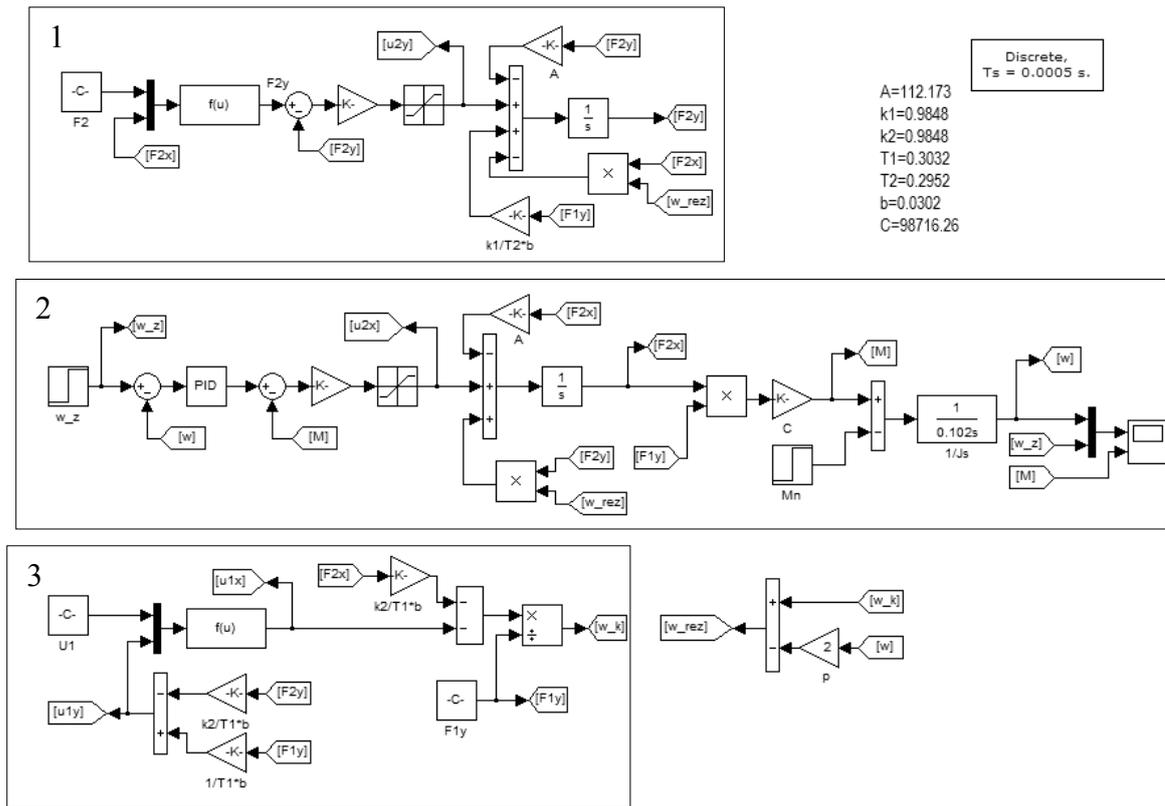


Рис. 2. Структурная модель ЭМДП с DTC управлением

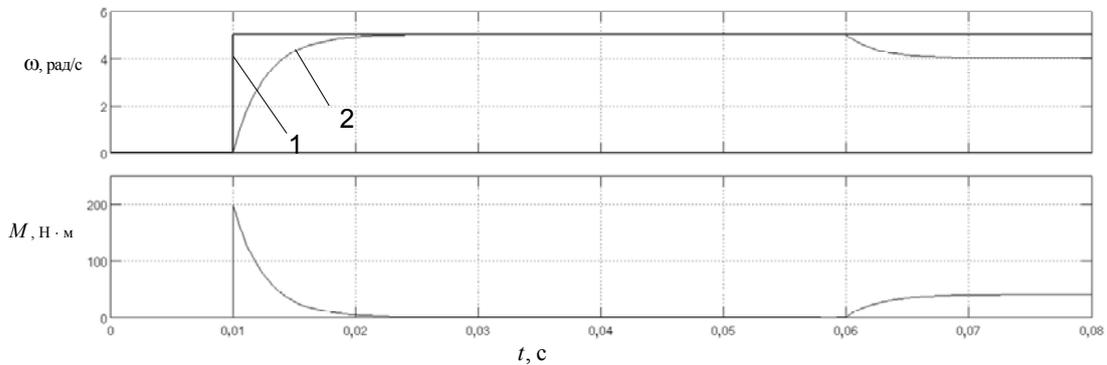


Рис. 3. Переходный процесс в ЭМДП с DTC-управлением (с П-регулятором): 1 – сигнал задания скорости; 2 – фактическая скорость

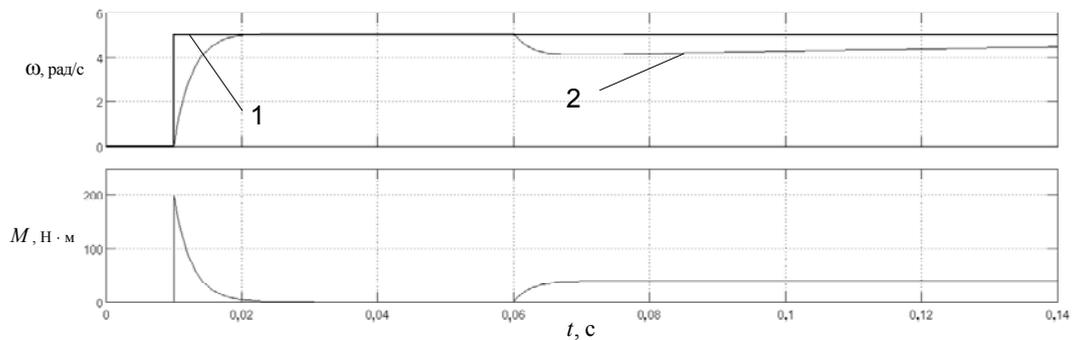


Рис. 4. Переходный процесс в ЭМДП с DTC-управлением (с PI-регулятором): 1 – сигнал задания скорости; 2 – фактическая скорость

### Заключение

Рассмотренная в данной работе структурная модель электропривода с машиной двойного питания с прямым управлением моментом позволяет получить необходимые динамические характеристики и является базой для создания более сложной виртуальной модели, учитывающей более полно протекающие процессы в элементах привода. На виртуальной модели могут быть получены статические характеристики и более детально проанализированы особенности работы исследуемого электропривода.

### Литература

1. Соколовский Г.Г. Электропривод переменного тока с частотным регулированием. – М.: АCADEMIA, 2006. – 265 с.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
3. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное состояние и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб: СПЭК, 2004. – 64 с.
4. Белькинд Л.Д., Конфедератов И.Я., Шнейберг Я.А. История техники – М.: – Л.: ГЭИ, 1956. – 493 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Корона-Век, 2008. – 368 с.

*Ляпин Анатолий Сергеевич* – Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, аспирант, swatin1@rambler.ru