

*А.С. Коваль, к.т.н., доц.; Л.В. Жесткова, ст. пр.;  
В.С. Яшин, асп.; А.И. Артеменко, асп.  
(Белорусско-Российский университет, г. Могилев)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ СДПМ С ПОВЕРХНОСТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ МАГНИТОВ НА РОТОРЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА**

Синхронные двигатели с постоянными магнитами, в том числе с поверхностным расположением магнитов на роторе (СДПМ), широко используются в промышленных системах электропривода. Они обладают высокой надежностью, хорошими регулировочными возможностями в широком диапазоне регулирования скорости при неизменном магнитном потоке и постоянном моменте нагрузки. Их применение позволило для ряда механизмов отказаться от использования промежуточного редуктора. Вместе с тем СДПМ могут обеспечивать и регулирование скорости вверх от номинальной (СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе в диапазоне примерно до 1:2) при сохранении мощности нагрузки.

Все модели электропривода на базе СДПМ при регулировании скорости с постоянством момента и неизменным магнитным потоком имеют контур регулирования тока статора  $I_q$  [1]. В случае двухзонного регулирования в системе регулирования электропривода на базе СДПМ должен появиться контур регулирования составляющей тока  $I_d$  с возможностью ограничения полного тока двигателя и составляющей тока статора  $I_q$ . Эта специфика и определяет особенности построения системы регулирования электропривода в этом случае на базе СДПМ.

Блок-схема электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе с возможностью регулирования потока двигателя представлена на рисунке 1.

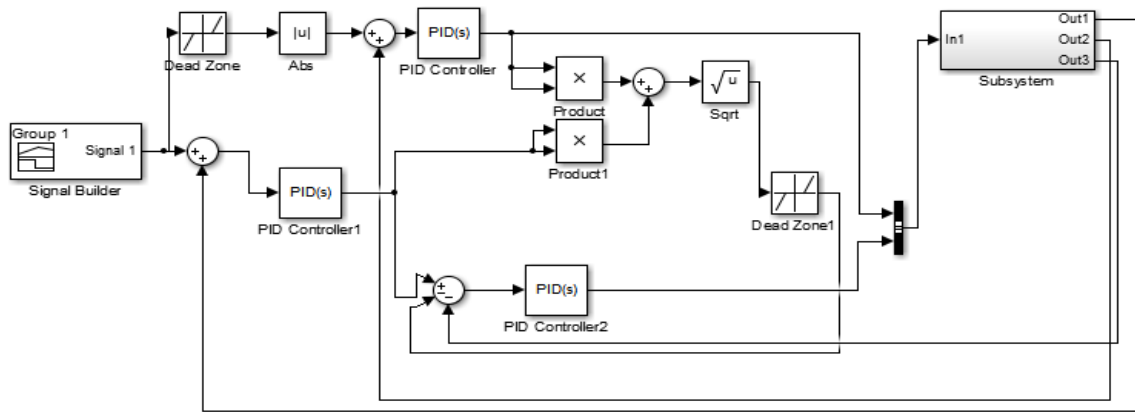


Рисунок 1 – Блок-схема электропривода с СДПМ и регулированием потока.

Здесь контур регулирования составляющей тока  $I_d$  образован регулятором тока PID Controller (например, ПИ регулятор), на вход которого подается сигнал задания скорости с задатчика скорости Signal Builder. Этот сигнал определяет максимальное значение составляющей тока  $I_d$ . при скорости большей номинальной (определяется зоной нечувствительности нелинейного элемента Dead zone). Регулятор тока PID Controller обеспечивает формирование напряжения по оси  $d$  в модели СДПМ. При этом обеспечивается ограничение составляющей тока  $I_q$  (определяется зоной нечувствительности нелинейного элемента Dead zone 1) на входе задания этой составляющей в контуре её регулирования (регулятор тока PID Controller 2, например, ПИ регулятор). Выход регулятора тока PID Controller 2 формирует напряжение по оси  $q$ . Зона нечувствительности элемента Dead zone определяет базовую скорость с которой начинается регулирование скорости вверх от номинальной, а зона нечувствительности элемента Dead zone 1 определяет значение тока статора с которого начинается его ограничение. Блок Subsystem представляет модель СДПМ с поверхностным расположением магнитов. Выходы Out1, Out2, Out3 соответственно: скорость двигателя, составляющая тока  $I_q$ , составляющая тока  $I_d$ .

Уравнения математической модели СДПМ в осях  $d$ - $q$ , неподвижных относительно ротора, при расположении постоянных магнитов на поверхности ротора и при наличии продольной размагничивающей реакции якоря (фиксированный упреждающий угол коммутации транзисторов инвертора [1]) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{1d}}{dt} &= -u_{1d} - i_{1d}R_1 + \omega_{эл}\psi_{1q} \\
 \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= u_{1q} - i_{1q}R_1 - \omega_{эл}\psi_{1d} \\
 M &= p_n \cdot (i_{1q}\psi_{1d} - i_{1d}\psi_{1q}) \\
 i_{1d} &= \frac{\psi_{1d} - \psi_m}{L_1}; i_{1q} = \frac{\psi_{1q}}{L_1}; \psi_m = \frac{\sqrt{3}}{p_n\omega_{ном}} \cdot E_{1ном},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

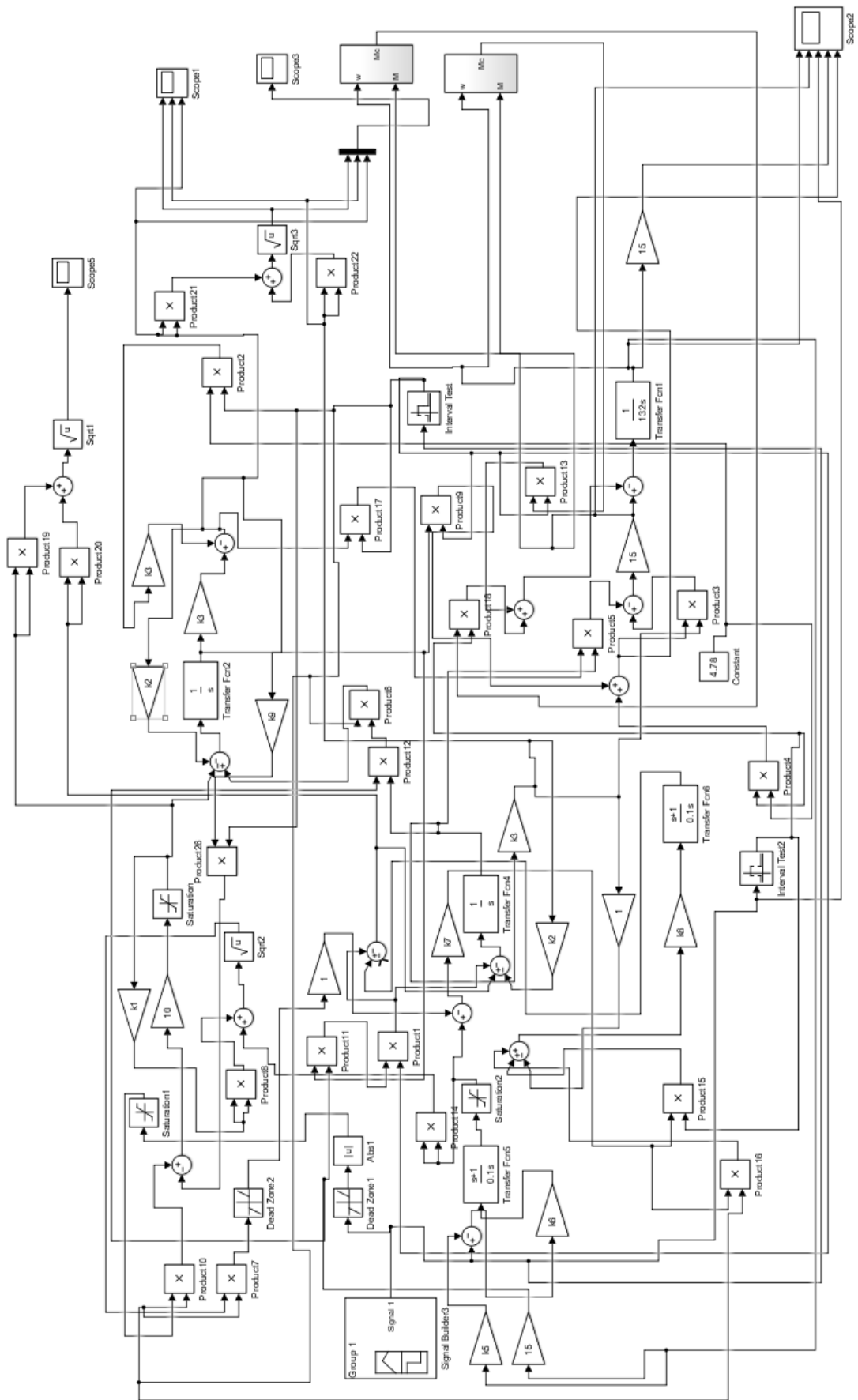


Рисунок 2 – Модель электропривода с СДПМ и ослаблением потока

Здесь:  $\Psi_m$  - потокосцепление взаимоиндукции;  $R_l, L_l$  , – активное сопротивление и индуктивность фазы статора;  $E_{I_{ном}}$  – действующее значение номинальной фазной ЭДС вращения;  $\omega_{ном}$  – номинальная угловая скорость ротора.

Для электропривода с возможностью ослабления потока разработана модель. Моделирование электропривода на основе схем (рисунок 1) для случая регулирования скорости в диапазоне 1:1,2 выполнено в среде Simulink пакета Matlab (рисунок 2). Использован СДПМ с параметрами приведенными в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры СДПМ, использованные при моделировании

J, кгм	R, Ом	M <sub>ном</sub> , Н.м	I <sub>ном</sub> , А	P <sub>ном</sub> , Вт	L, Гн	Ψ <sub>ном</sub> , Вб	Ω <sub>ном</sub> , с <sup>-1</sup>	Ω <sub>макс</sub> , с <sup>-1</sup>
132	0,652	710	12,4	3400	0,027	4,87	4,88	5,71

Моделирование СДПМ реализовано по структурной схеме на рисунке 2. На этой схеме блоки Interval Test1 и Interval Test2 соответственно формируют команды на работу СДПМ с постоянным потоком и начало режима работы с ослабленным потоком (рисунок 4 - ослабление потока СДПМ на промежутке времени с 1,8 сек до 13,6 сек). Переключение происходит по сигналу задания скорости с блока задания скорости Signal Builder3 при скорости двигателя больше 5 м/сек. В модели использованы ПИ регуляторы тока и скорости

Нагрузка формируется двумя блоками (выход блоков M<sub>c</sub>), соответственно, для случая работы СДПМ с постоянным потоком (момент нагрузки 350 Нм) и с ослабленным (момент нагрузки 50 Нм) (рисунок 4). Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствие со схемой на рисунке 1.

Результаты моделирования показаны на рис. 3-6.

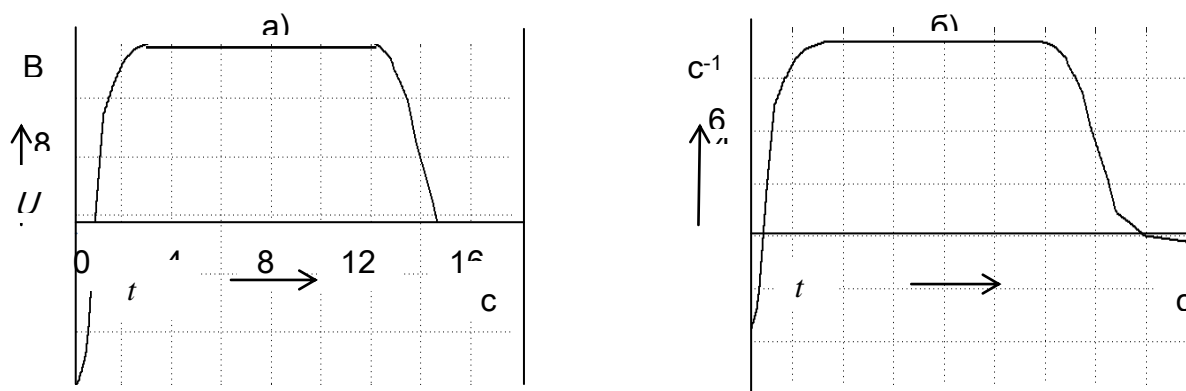


Рисунок 3 – Сигнал задания скорости СДПМ (а) и изменение скорости СДПМ в модели (б)

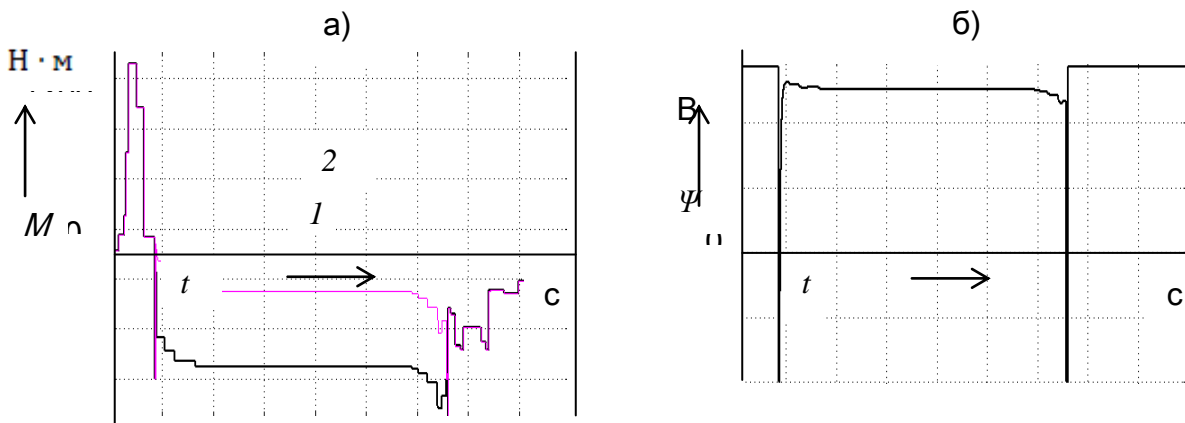


Рисунок 4 – Изменение момента СДПМ (а): 1 - момент нагрузки 50Нм, 2 - момент нагрузки 350 Нм. Изменение потокосцепления СДПМ (б).

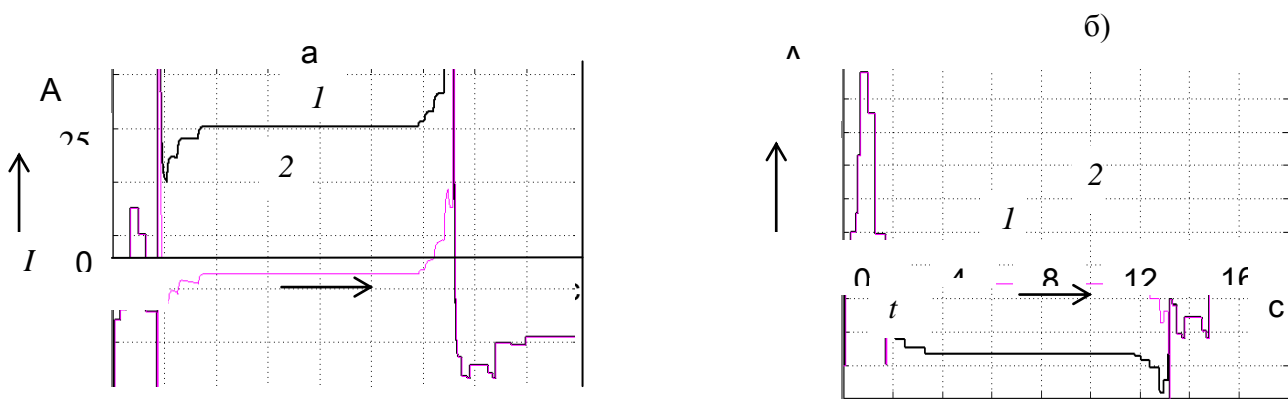


Рисунок 5 – Изменение тока статора СДПМ (а) и составляющей тока  $I_q$  (б) : 1 - момент нагрузки 50 Нм, 2 - момент нагрузки 350 Нм

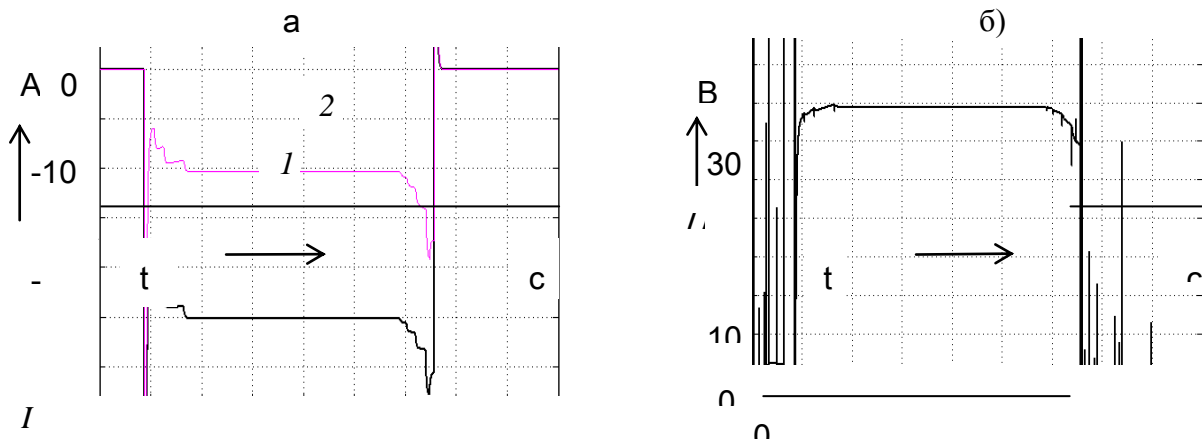


Рисунок 6 – Изменение составляющей  $I_q$  тока статора СДПМ (а) : 1 - момент нагрузки 50Нм, 2 - момент нагрузки 350 Нм. Амплитуда напряжения на статоре СДПМ при регулировании потока СДПМ - б).

Осциллограммы изменения регулируемых параметров электропривода на базе СДПМ при ослаблении потока показывают работоспособность предлагаемой модели электропривода. По результатам моделирования можно отметить известные факты работы СДПМ при ослаблении потока. В частности ,

ослабление потока СДПМ и соответствующее увеличение скорости требует существенного роста тока двигателя в зависимости от нагрузки и требуемой скорости. Так увеличение у используемого в модели привода СДПМ скорости на 20 процентов требует ослабления потокосцепления машины на 5,3 процентов. Обеспечивается этот эффект существенным увеличением составляющей тока по оси  $d$ . Для используемого двигателя эта величина составляет почти 25 ампер при нагрузке  $M_{ст.} = 50$  Нм.

Таким образом разработана модель регулируемого электропривода переменного тока на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе с возможностью регулирования скорости двигателя вверх от номинальной при ослаблении его магнитного потока. Модель реализована на основе описания СДПМ в осях  $d-q$ . Обеспечивает переключения в структуре в зависимости от режима работы двигателя :постоянный поток, изменяемый поток. Момент переключения в модели формируется в зависимости от скорости двигателя. Моделирование выполнено для двух моментов нагрузки в режиме ослабления поля:  $M_{ст.} = 50$  Нм и  $M_{ст.} = 350$  Нм.

#### Литература

1. Фираго, Б.И. Векторные системы управления электроприводами /Б.И.Фираго, Д.С.Васильев.-Минск: Высшая школа,2016.-159 с.
2. Коваль, А.С. К вопросу разработки электропривода пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта/ А.С. Коваль, А.И.Артеменко// Вестн. Белорус. – Рос. ун-та. – 2018. – N4 – С.62-69.
3. Козлов, В.В. Разработка и исследование цифровой системы управления вентильным двигателем с коррекцией статических характеристик: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / В.В. Козлов, – М., 2012 . – 132 с.