

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ СДПМ С ПОВЕРХНОСТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ МАГНИТОВ НА РОТОРЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА

UDC 62-83:621

A. S. Koval, V. S. Yashin, A. I. Artemenko

MODEL OF A PMSM-BASED ELECTRIC DRIVE WITH SURFACE ARRANGEMENT OF MAGNETS ON THE ROTOR AND FLOW REGULATION

Аннотация

На основе структурной схемы синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с поверхностным расположением магнитов на роторе разработана модель электропривода с возможностью ослабления потока двигателя и реализацией регулирования скорости двигателя выше номинальной. Представлены результаты моделирования электропривода на базе СДПМ по разработанной модели при работе на скорости, превышающей номинальную.

Ключевые слова:

синхронный двигатель с постоянными магнитами, ослабление потока, регулирование скорости, составляющие тока статора, графики изменения момента, скорости, тока и потока.

Abstract

Based on the block diagram of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with surface arrangement of magnets on the rotor, a model of an electric drive has been developed with the possibility of attenuating the motor flow and regulating the motor speed above the rated value. The paper presents the results of simulating the operation of a PMSM-based electric drive performed according to the developed model at speeds exceeding the rated value.

Keywords:

permanent magnet synchronous motor, flow attenuation, speed regulation, stator current components, graphs of torque, speed, current and flow change.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), в том числе с поверхностным расположением магнитов на роторе, широко используются в промышленных системах электропривода. Они обладают высокой надежностью, хорошими регулировочными возможностями в широком диапазоне регулирования скорости при неизменном магнитном потоке и постоянном момен-

те нагрузки. Их применение позволило для ряда механизмов отказаться от использования промежуточного редуктора и реализовать безредукторные системы тихоходного регулируемого электропривода, например, в лифтах [1]. Вместе с тем СДПМ, в том числе и с поверхностным расположением магнитов на роторе, 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, т. е. регулирование скорости за счет изменения (уменьшения) потока двигателя [2, 3]. Управление ослаблением поля с целью расширения частотного диапазона в сторону больших скоростей реализуется включением в системах векторного управления дополнительного блока управления ослаблением поля и выполнением контура регулирования составляющей тока статора I_d [4] (оси d - q связаны с ротором). Необходимо отметить работы, например [5], в которых предлагается отказаться от известных векторных схем регулирования СДПМ для управления скоростью выше номинальной. Используемый способ регулирования получил название фазового векторного регулирования скорости. При этом система управления электроприводом существенно упрощается, т. к. отсутствуют координатные преобразования. Но при всех способах расширения частотного диапазона в сторону больших скоростей специфика регулирования скорости СДПМ заключается в том, что при увеличении скорости выше номинальной противоЭДС в статорной обмотке уве-

личивается пропорционально скорости и, поскольку поток машины (постоянные магниты) остается постоянным, напряжение питания должно тоже увеличиваться, чтобы соответствовать возрастающей противоЭДС. Указанный режим невозможен при неизменном силовом напряжении питающей сети, запрашивающей силовой преобразователь частоты. Таким образом, для обеспечения работоспособности двигателя необходимо для снижения противоЭДС с ростом скорости выше номинальной уменьшать его магнитный поток, если не предполагается реализация других возможностей, связанных с регулированием магнитного потока. В этом случае СДПМ управляется так, чтобы вектор тока статора в осях, например d - q , неподвижных относительно ротора, формировался двумя составляющими: вектором тока I_q и отрицательным по направлению вектором тока I_d . Отрицательная составляющая тока статора I_d по оси d при регулировании скорости вверх от номинальной обеспечивает уменьшение магнитного потока СДПМ за счет формирования продольной размагничивающей реакции якоря, а составляющая тока I_q формирует необходимый момент двигателя (рис. 1).

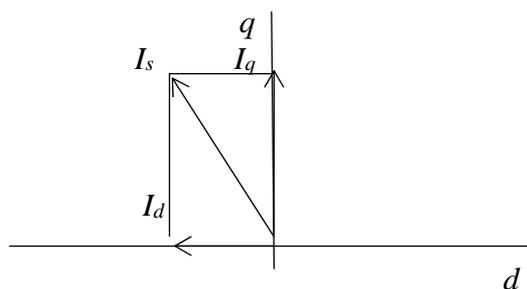


Рис. 1. Формирование вектора тока статора I_s при ослаблении потока СДПМ

При этом составляющая I_d может принимать большие отрицательные численные значения. Соответственно, растет и потребляемый двигателем ток, который не должен превышать максимально допустимого тока статора.

В результате составляющая тока I_q , формирующая момент, должна быть уменьшена, что требует уменьшения нагрузки на валу двигателя. Таким образом обеспечивается регулирование скорости выше номинальной при посто-



янности необходимой мощности.

Все модели электропривода на базе СДПМ при регулировании скорости с постоянством момента и неизменным магнитным потоком имеют контур регулирования тока статора I_q [2]. В случае двухзонного регулирования, как отмечалось выше, в системе регулирования электропривода на базе СДПМ должен появиться контур регулирования составляющей тока I_d с возможно-

стью ограничения полного тока двигателя и составляющей тока статора I_q . Эта специфика и определяет особенности построения системы регулирования электропривода в данном случае на базе СДПМ.

Блок-схема электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе с возможностью регулирования потока двигателя представлена на рис. 2.

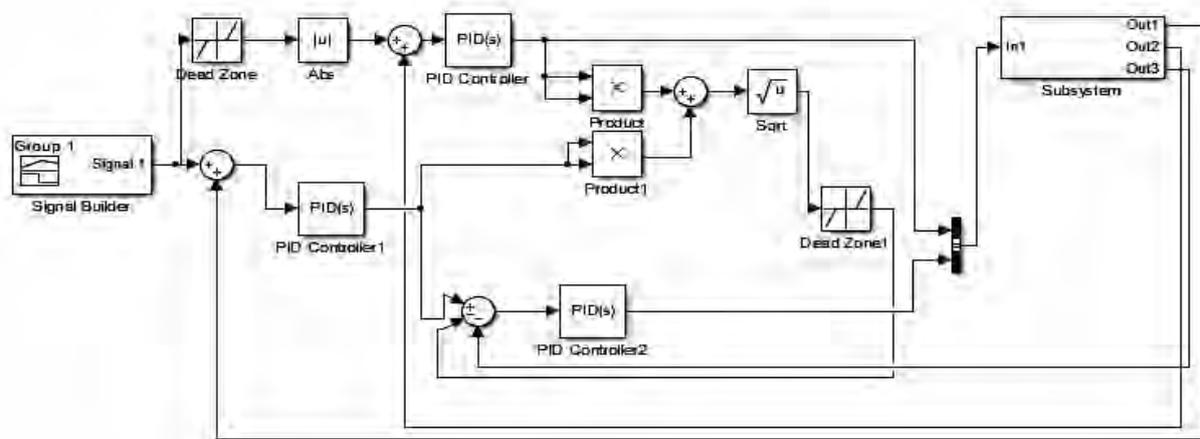


Рис. 2. Блок-схема электропривода с СДПМ и регулированием потока

Здесь контур регулирования составляющей тока I_d образован регулятором тока PID Controller (например, ПИ-регулятор), на вход которого подается сигнал задания скорости с датчика 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 – это 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 [2]) имеют вид:

$$\frac{d\psi_{1d}}{dt} = -u_{1d} - i_{1d}R_1 + \omega_{эл}\psi_{1q};$$

$$\frac{d\psi_{1q}}{dt} = u_{1q} - i_{1q}R_1 - \omega_{эл}\psi_{1d};$$

$$M = p_n \cdot (i_{1q}\psi_{1d} - i_{1d}\psi_{1q});$$

$$i_{1d} = \frac{\psi_{1d} - \psi_m}{L_1}; \quad i_{1q} = \frac{\psi_{1q}}{L_1};$$

$$\psi_m = \frac{\sqrt{3}}{p_n \omega_{ном}} \cdot E_{1ном}, \quad (1)$$

где ψ_m – потокосцепление взаимной индукции; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность фазы статора;

$E_{1ном}$ – действующее значение номинальной фазной ЭДС вращения; $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость ротора.

Величина упреждающего угла коммутации определяется требуемым значением увеличения скорости или значением составляющей тока I_d . В соответствии с (1) структурная схема СДПМ [2] представлена на рис. 3.

Для электропривода с возможностью ослабления потока разработана модель (рис. 4). Моделирование электропривода (использован приведенный момент инерции безредукторного привода пассажирского лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с) на основе схем (см. рис. 2 и 3) для случая регулирования скорости в диапазоне 1 : 1,2 выполнено в среде Simulink пакета Matlab (см. рис. 4). Использован СДПМ с параметрами, приведенными в табл. 1.

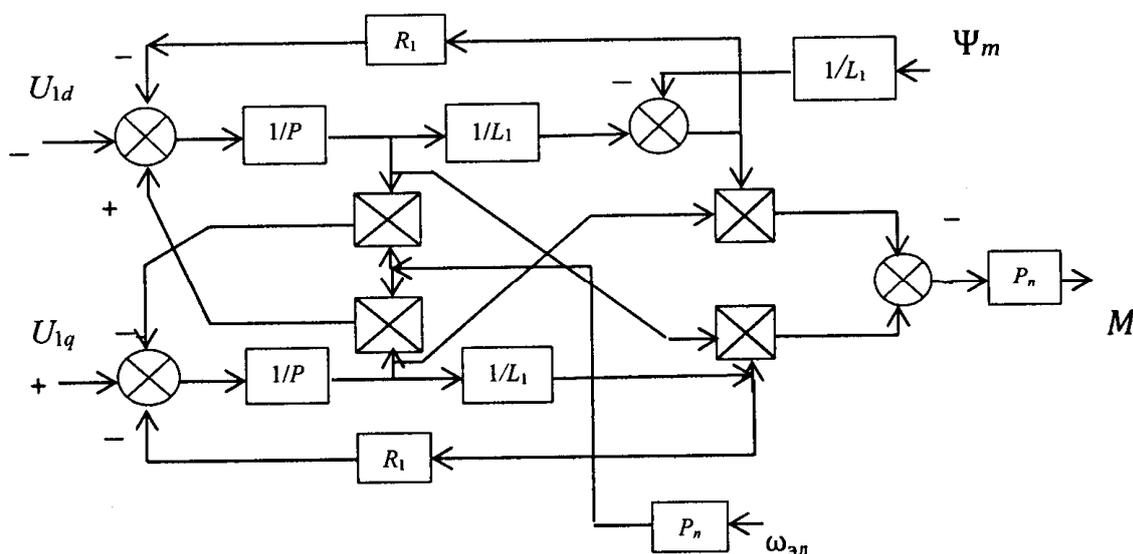


Рис. 3. Структурная схема СДПМ

Табл. 1. Параметры СДПМ

J , кг·м	R , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L , Гн	$\psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹	Ω_{max} , с ⁻¹
132	0,652	710	12,4	3400	0,027	4,87	4,88	5,71



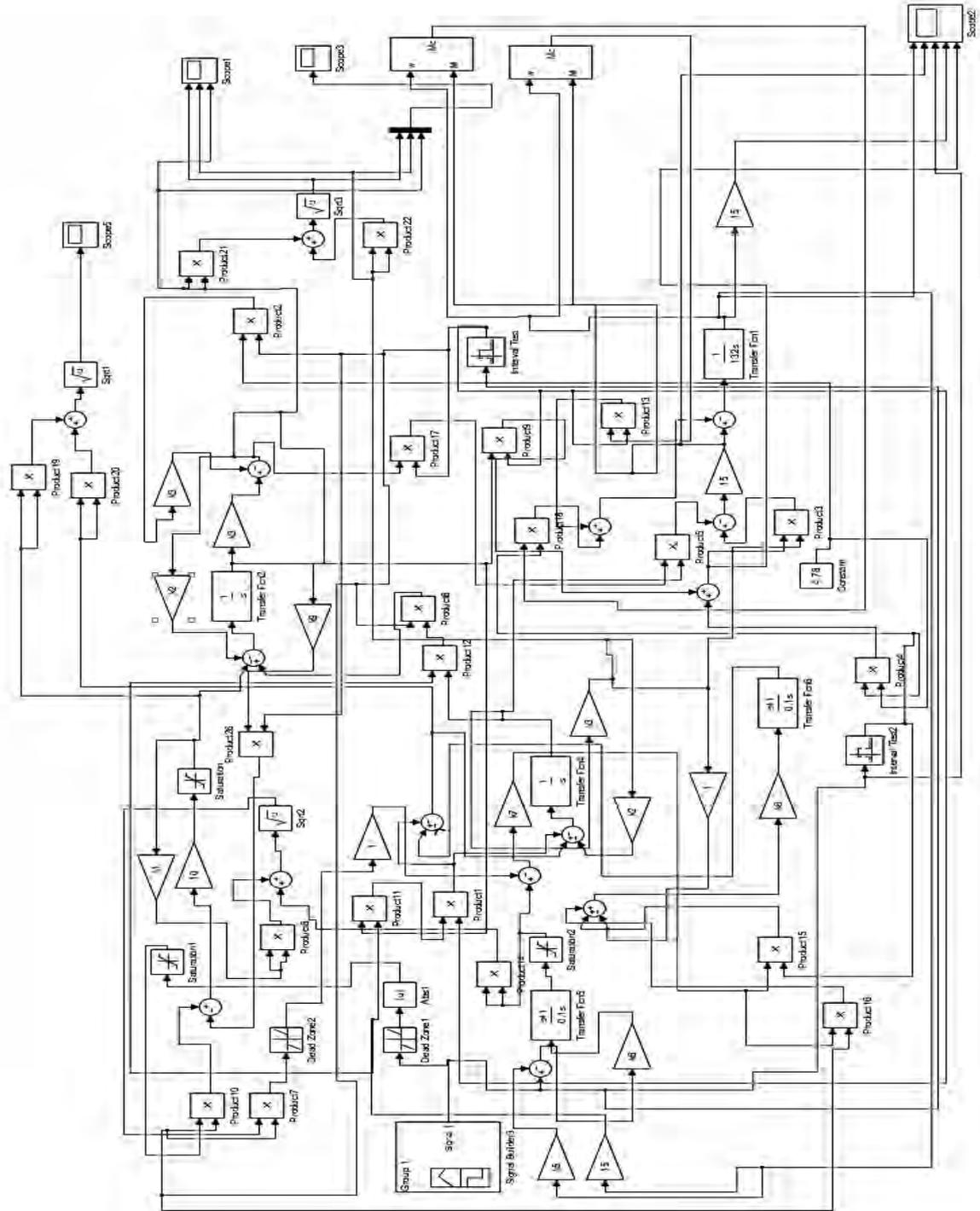


Рис. 4. Модель электропривода с СДПМ и ослаблением потока

На этой схеме блоки Interval Test1 и Interval Test2 формируют команды на работу СДПМ с постоянным потоком и начало режима работы с ослабленным потоком соответственно (рис. 6 – ослабление потока СДПМ на промежутке времени с 1,8 до 13,6 с). Переключение происходит по сигналу задания скорости с блока задания скорости Signal Bilde3 при скорости двигателя, большей 5 с^{-1} . В модели использованы ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{p+1}{0,1p}$$

Нагрузка формируется двумя блоками (выход блоков M_c) для случая работы СДПМ с постоянным потоком (момент нагрузки $350 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и с ослабленным (момент нагрузки $50 \text{ Н}\cdot\text{м}$) соответственно (см. рис. 6). Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствии со схемой на рис. 2. Моделирование СДПМ реализовано по структурной схеме на рис. 3. Результаты моделирования показаны на рис. 5–8.

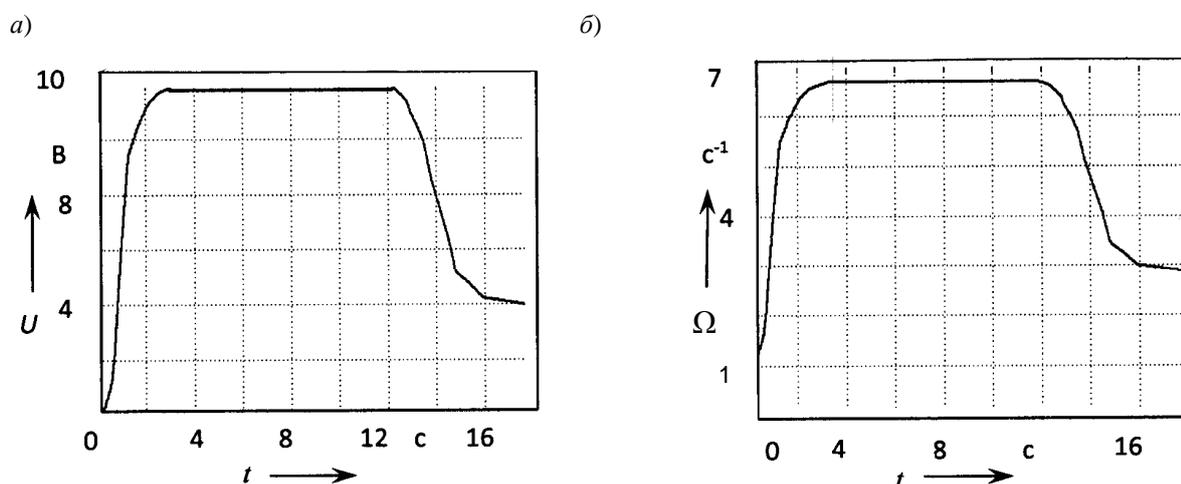


Рис. 5. Сигнал задания скорости СДПМ (а) и изменение скорости СДПМ (б) в модели

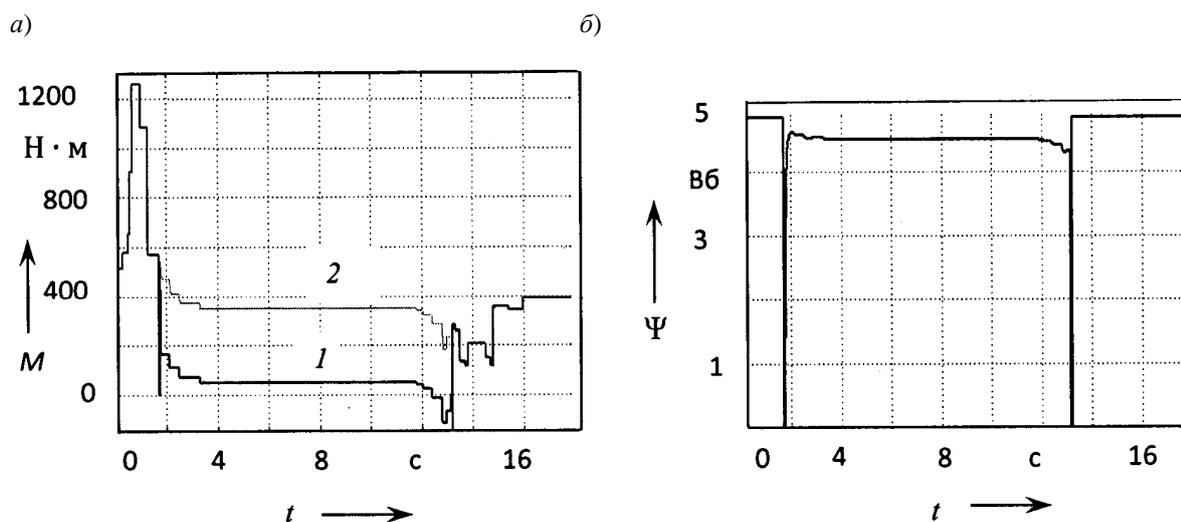


Рис. 6. Изменение момента СДПМ (а) и потокосцепления (б): 1 – момент нагрузки $50 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 2 – момент нагрузки $350 \text{ Н}\cdot\text{м}$



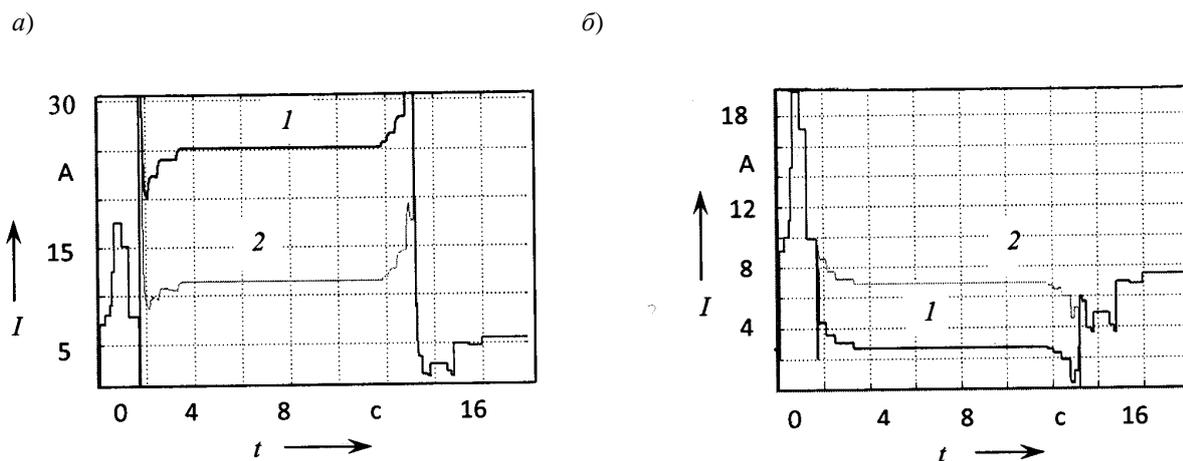


Рис. 7. Изменение тока статора СДПМ (а) и составляющей тока I_q (б): 1 – момент нагрузки 50 Н·м; 2 – момент нагрузки 350 Н·м

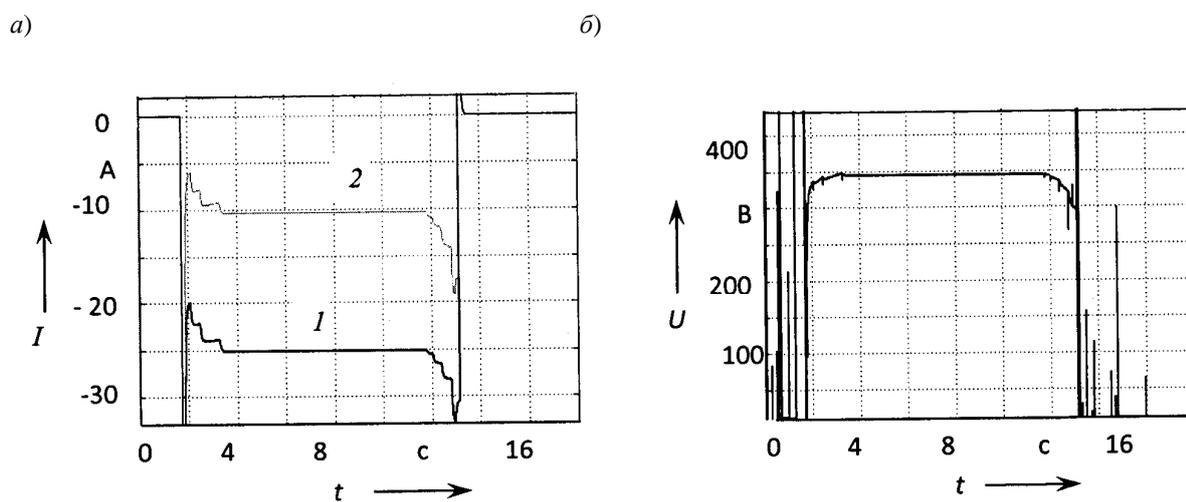


Рис. 8. Амплитуда напряжения на статоре СДПМ при регулировании потока СДПМ (б) и изменение составляющей I_d тока статора СДПМ (а): 1 – момент нагрузки 50 Н·м; 2 – момент нагрузки 350 Н·м

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 требуют существенного роста тока двигателя в зависимости от нагрузки и требуемой скорости. Так, увеличение у

используемого в модели привода СДПМ скорости на 20 % требует ослабления потокосцепления машины на 5,3 %. Этот эффект обеспечивается существенным увеличением составляющей тока по оси d . Для используемого двигателя данная величина составляет почти 25 А при нагрузке $M_{см.} = 50$ Н·м. В результате потребляемый в этом режиме двигателем ток достигает почти двухкратного номинального тока двигателя.



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 $d-q$ и 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 – $M_{cm} = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_{cm} = 350 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Выводы

1. Предложена модель регулируемого электропривода переменного тока с СДПМ с поверхностным расположе-

нием магнитов на роторе с возможностью регулирования скорости вверх от номинальной за счет ослабления потока двигателя. В основе модели – математическое описание работы СДПМ в осях $d-q$ и переключение структуры модели электропривода с режима работы при постоянном потоке на режим работы при ослабленном потоке. Переключение реализуется в зависимости от скорости СДПМ. Осциллограммы регулируемых координат по результатам моделирования подтверждают работоспособность предлагаемой модели.

2. Показано, что увеличение скорости используемого двигателя на 20 % выше номинальной при нагрузке 50 Н·м требует ослабления потока СДПМ на 5,3 % и сопровождается увеличением тока двигателя почти в 2 раза по сравнению с номинальным током.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль, А. С. Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с / А.С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 113–120.
2. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
3. 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. – № 4. – С. 62–69.
4. 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. – Москва, 2012. – 132 л.

Статья сдана в редакцию 14 июня 2019 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Виталий Сергеевич Яшин, аспирант, Белорусско-Российский университет.
Александр Игоревич Артеменко, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Vitaly Sergeyevich Yashin, PhD student, Belarusian-Russian University.
Aleksandr Igorevich Artemenko, PhD student, Belarusian-Russian University.

