

---

УДК 62-83:621

*А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко*

**МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ (СДПМ) СО ВСТРОЕННЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ МАГНИТОВ В РОТОРЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА**

---

UDC 62-83:621

*A. S. Koval, A. G. Kondratenko*

**MODEL OF ELECTRIC DRIVE BASED ON A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (PMSM) WITH BUILT-IN ARRANGEMENT OF MAGNETS IN THE ROTOR AND FLOW REGULATION**

---

**Аннотация**

На основе структурной схемы синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) со встроенным расположением магнитов в роторе разработана модель электропривода с возможностью ослабления потока двигателя и реализацией регулирования скорости двигателя выше номинальной. Представлены результаты моделирования работы электропривода на базе СДПМ по разработанной модели.

**Ключевые слова:**

синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) со встроенными магнитами в ротор, 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 a built-in arrangement of magnets in the rotor, a model of an electric drive has been developed with the possibility of flux attenuation and regulation of motor speed above the nominal speed. The results of modeling the operation of the PMSM-based electric drive according to the model developed are presented.

**Keywords:**

permanent magnet synchronous motor (PMSM) with built-in magnets in the rotor, flux attenuation, speed regulation, stator current components, graphs of torque, speed, current and flux change.

---

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) не имеют электрических потерь в роторе, связанных с формированием магнитного потока ротора. Они находят все более широкое применение в современных разработках регулируемого электропривода переменного тока вместо асинхронных двигателей, несмотря на проблемы использования высокоэнергетических магнитов на основе редкоземельных ме-

таллов (низкий гарантированный срок службы магнитов, высокая стоимость магнитов). СДПМ конструктивно имеют различное исполнение. В зависимости от расположения постоянных магнитов на роторе различают СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и СДПМ со встроенными магнитами в ротор (рис. 1, магниты – более темные элементы конструкции ротора).

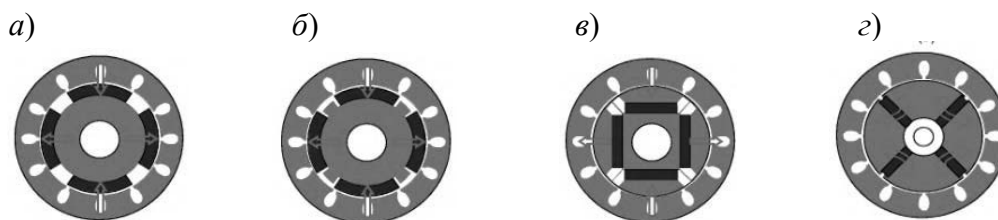


Рис. 1. Расположение магнитов в СДПМ: а, б – поверхностное расположение магнитов на роторе (PMSM); в, г – магниты встроены в ротор (IPMSM)

Расположение магнитов существенно влияет на характеристики СДПМ. В зависимости от их расположения при вращении ротора различны расчетные значения магнитных проводимостей в воздушном зазоре от магнитного потока магнитов. Для двигателей с поверхностным расположением магнитов магнитная проводимость рабочего зазора практически не меняется. Соответственно, расчетные значения индуктивностей  $L$  по осям  $d$  и  $q$  одинаковы. Для двигателей со встроенными магнитами в роторе эти индуктивности различны, они определяют дополнительную (реактивную) составляющую развиваемого двигателем момента, а также возможность регулирования скорости выше номинальной за счет ослабления потока двигателя для соответствующих нагрузочных моментов при допустимых потерях в двигателе.

В [1] показана возможность более энергоэффективного использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов за счет увеличения скорости кабины в этих режимах. Реализуется режим увеличения скорости за счет ослабления потока, например СДПМ, при работе лифта в генераторном режиме, что по тепловым режимам работы возможно только при использовании тихоходного двигателя, обеспечи-

вающего допустимые по нагреву потери при ослаблении потока. СДПМ с поверхностным расположением магнитов такой режим работы лифта не обеспечивает [2, 3]. Использование СДПМ со встроенными магнитами в ротор или асинхронного низкоскоростного двигателя возможно в этом случае [4].

Уравнения электрического равновесия СДПМ со встроенными магнитами в ротор в осях  $d$ – $q$  и выражение момента двигателя имеют вид [4]:

$$U_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} + L_d \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_{эл} \cdot L_q \cdot i_{1q};$$

$$U_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + L_q \cdot \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_{эл} \cdot (L_d \cdot i_{1d} + \psi_m);$$

$$M = \frac{3}{2} p \cdot [\psi_m \cdot i_q - (L_q - L_d) \cdot i_q \cdot i_d],$$

где  $L_d, L_q$  – индуктивности по осям;  $\omega_{эл}$  – электрическая частота вращения;  $p$  – число пар полюсов;  $\psi_m$  – потокосцепление;  $R_1$  – сопротивление.

Структурная схема СДПМ, соответствующая этим уравнениям, показана на рис. 2.

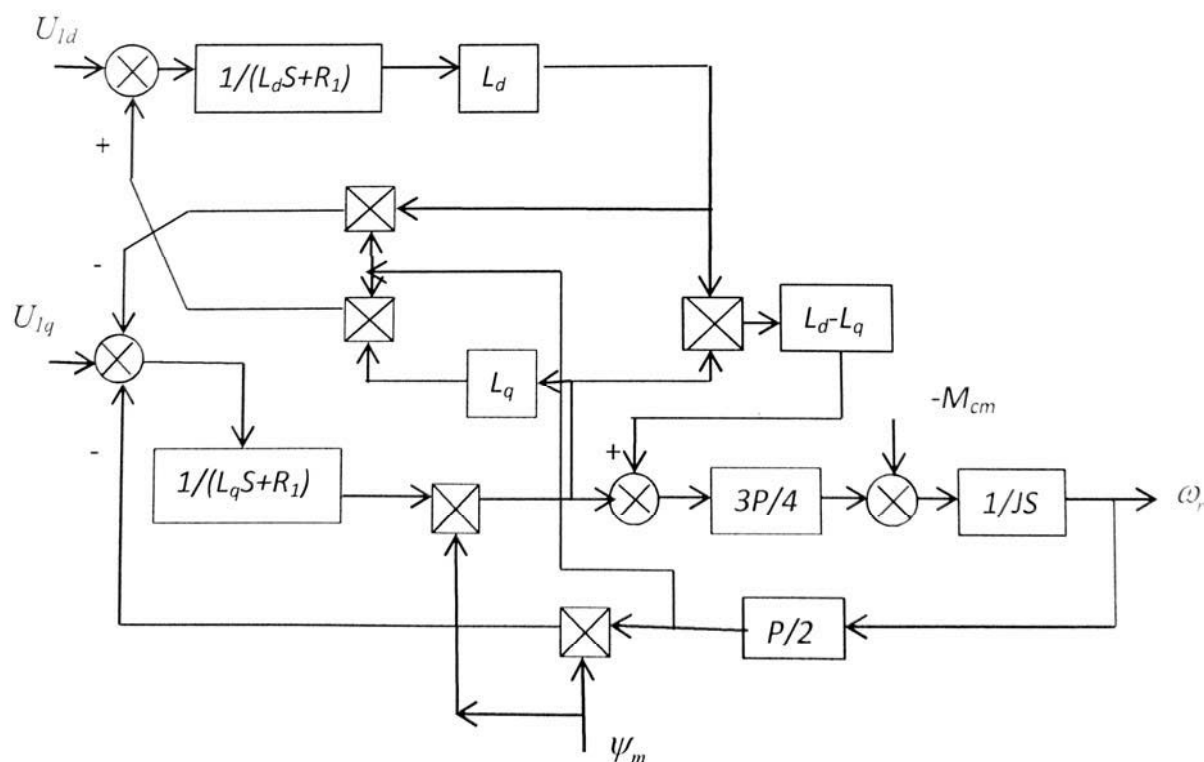


Рис. 2. Структурная схема СДПМ со встроенными магнитами в ротор

На базе данной структурной схемы может быть разработана модель электропривода с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной за счет ослабления потока СДПМ.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления электроприводом на базе СДПМ, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [5]. Например, САУ приводом лифта может быть реализована с контролем ограничения напряжения, формируемого на двигателе, в соответствии с условием  $U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2$ , где  $U_s$  – амплитудное значение номинального напряжения двигателя ( $U_{dc}$  – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты),  $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$ . С увеличением скорости двигателя выше  $\omega_{ном}$  при превышении напряжением на дви-

гателе значения  $U_s$  привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования отрицательной составляющей тока  $i_d$  с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального. Структурная схема системы автоматического управления (САУ) электроприводом в осях  $d-q$ , реализующая этот вариант, показана на рис. 3 (блок voltage decoupling – компенсация перекрестных связей).

Номинальное напряжение, формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты  $U_{dc}$  и способом реализации ШИМ инвертором. При увеличении скорости задания выше номинальной и соответствующем увеличении напряжения  $U$  на двигателе ( $U$  больше номинального значения) вступает в работу контур ограничения напряжения на двигателе, задающий отрицательную составляющую тока  $i_d$ , формирующего поток двигателя. Привод переходит в режим работы регули-

рования (ослабление) потока машины с контролем перегрузки по току и поддержанием напряжения на двигателе не превышающим  $U_{ном}$ . Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и скорости и ПИ-регулятором в контуре поддержания напряжения. На основе структурной

схемы электропривода (см. рис. 3) разработана в среде MATLAB имитационная модель электропривода с параметрами механической подсистемы, соответствующими безредукторному приводу пассажирского лифта грузоподъемностью 630 кг и скоростью движения 1 м/с (рис. 4). При моделировании использован СДПМ с расчетными параметрами, приведенными в табл. 1.

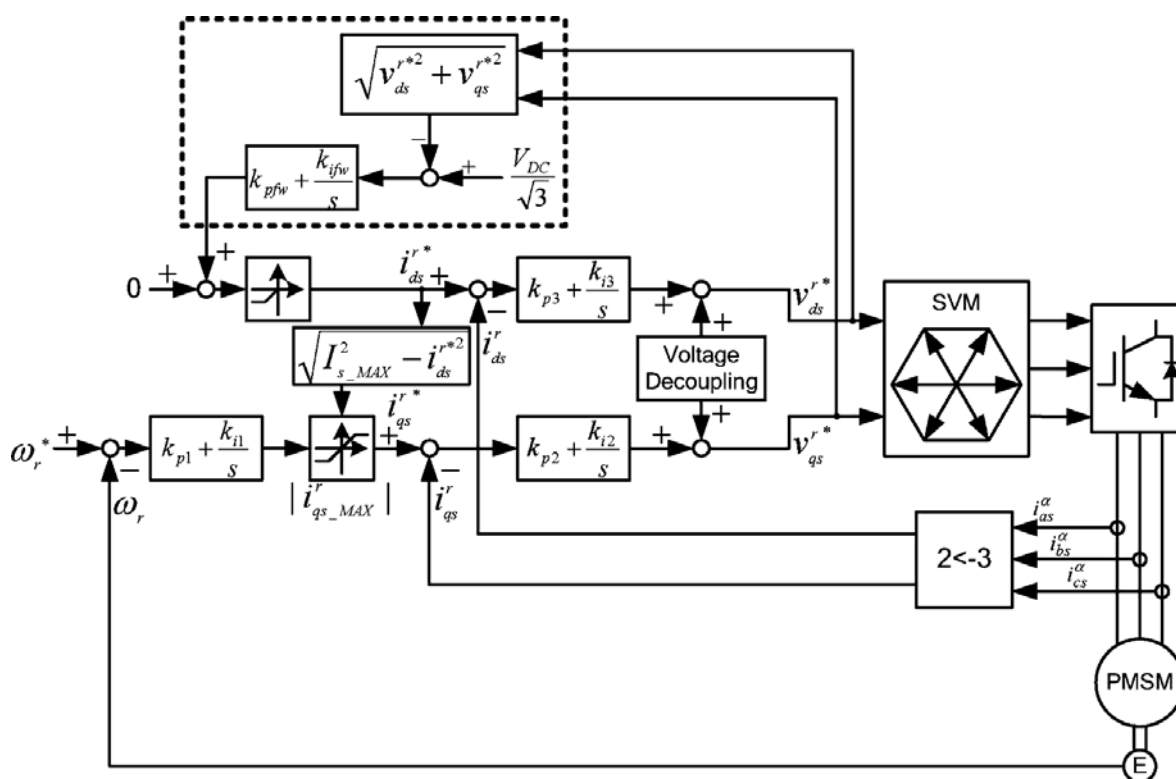


Рис. 3. Структурная схема САУ электроприводом в осях  $d-q$

Табл. 1. Расчетные параметры СДПМ, использованные при моделировании

| $J$ , кг·м <sup>2</sup> | $R$ , Ом | $M_{ном}$ , Н·м | $I_{ном}$ , А | $P_{ном}$ , Вт | $L_q$ , Гн | $L_d$ , Гн | $\Omega_{max}$ , с <sup>-1</sup> | $\Psi_{ном}$ , Вб | $\Omega_{ном}$ , с <sup>-1</sup> |
|-------------------------|----------|-----------------|---------------|----------------|------------|------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 4,5                     | 0,652    | 710             | 12,4          | 3400           | 0,065      | 0,041      | 6,33                             | 4,87              | 4,88                             |

На схеме (см. рис. 4) блоки Interval Test1 и Interval Test2 соответственно формируют команды на работу СДПМ с постоянным потоком и начало режима работы с ослабленным потоком (рис. 6 – ослабление потока СДПМ на проме-

жутке времени с 5 до 15,4 с). Переключение происходит по сигналу задания скорости с блока задания скорости Signal Bilder3 при скорости двигателя больше 5 м/с.

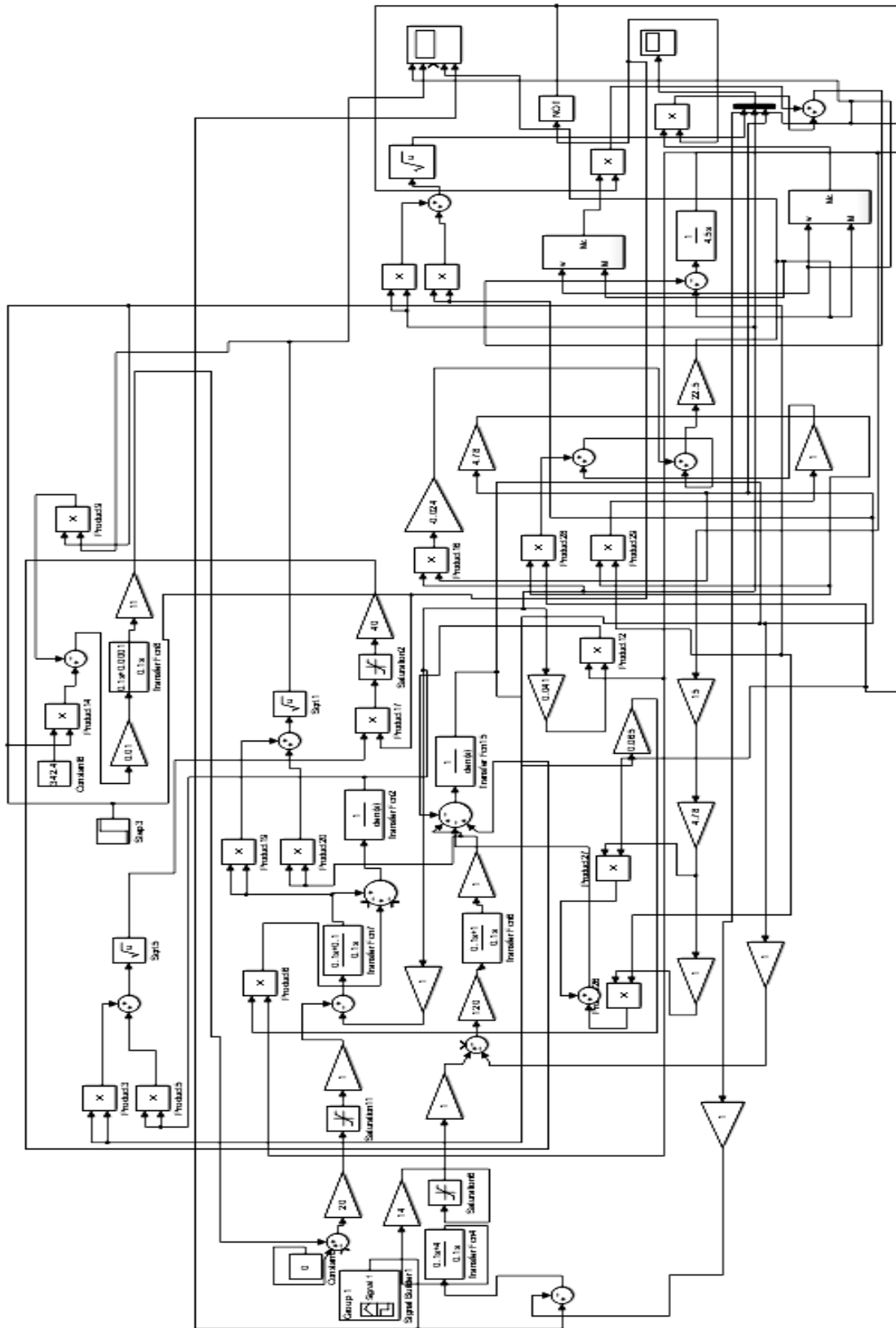


Рис. 4. Имитационная модель электропривода

В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточной функцией

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

Нагрузка формируется двумя блоками (выход блоков  $M_c$ ): соответственно для случая работы СДПМ с постоянным потоком (момент нагрузки 300 Н·м)

и с ослабленным (момент нагрузки 50 и 300 Н·м) (см. рис. 6) [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 работы электропривода показаны на рис. 5–9.

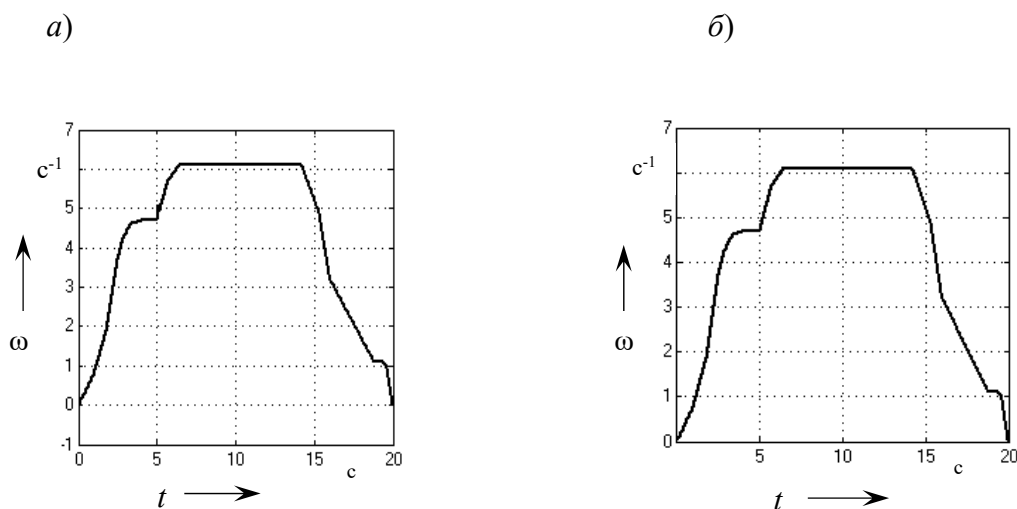


Рис. 5. Графики: *a* – тахограмма задания скорости; *б* – тахограмма скорости на модели

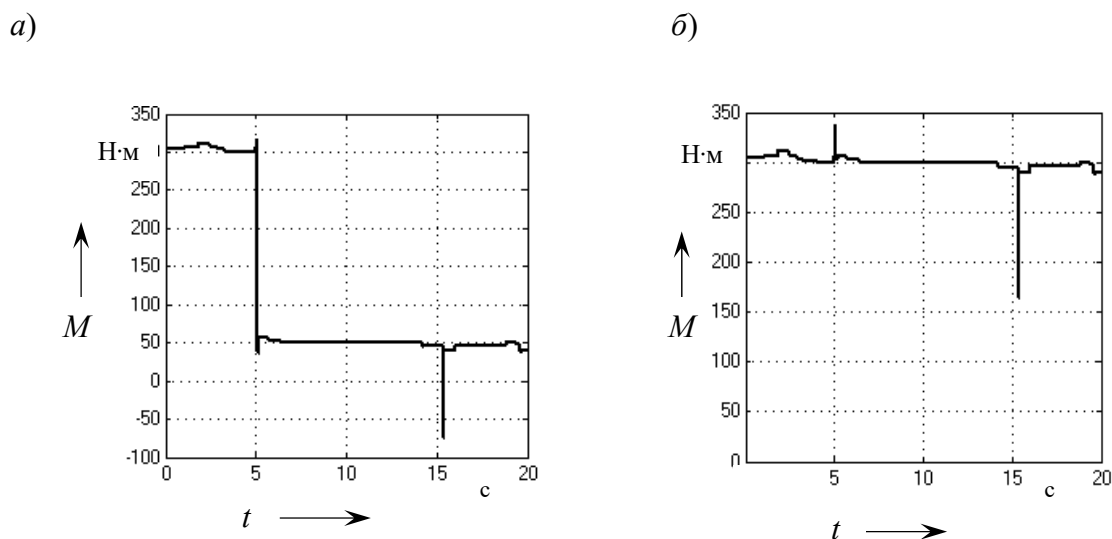


Рис. 6. Графики момента при пуске ( $M_c = 300$  Н·м) и в режиме регулирования потока: *a* – при  $M_c = 300$  Н·м; *б* – при  $M_c = 50$  Н·м

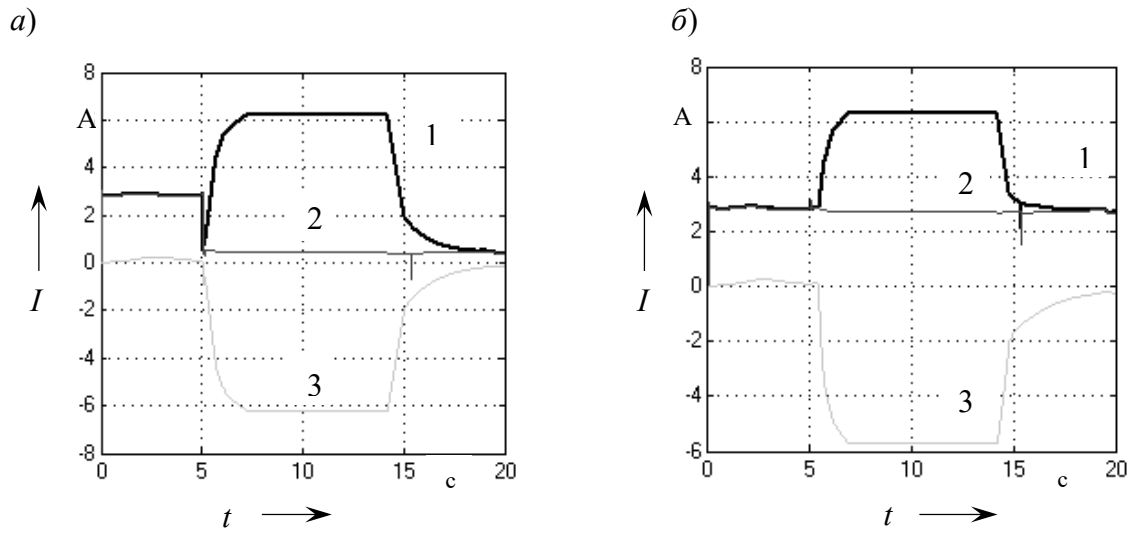


Рис. 7. Графики изменения тока двигателя: *a* – при  $M_c = 50$  Н·м; *б* – при  $M_c = 300$  Н·м; 1 – ток статора; 2 – составляющая тока  $i_q$ ; 3 – составляющая тока  $i_d$

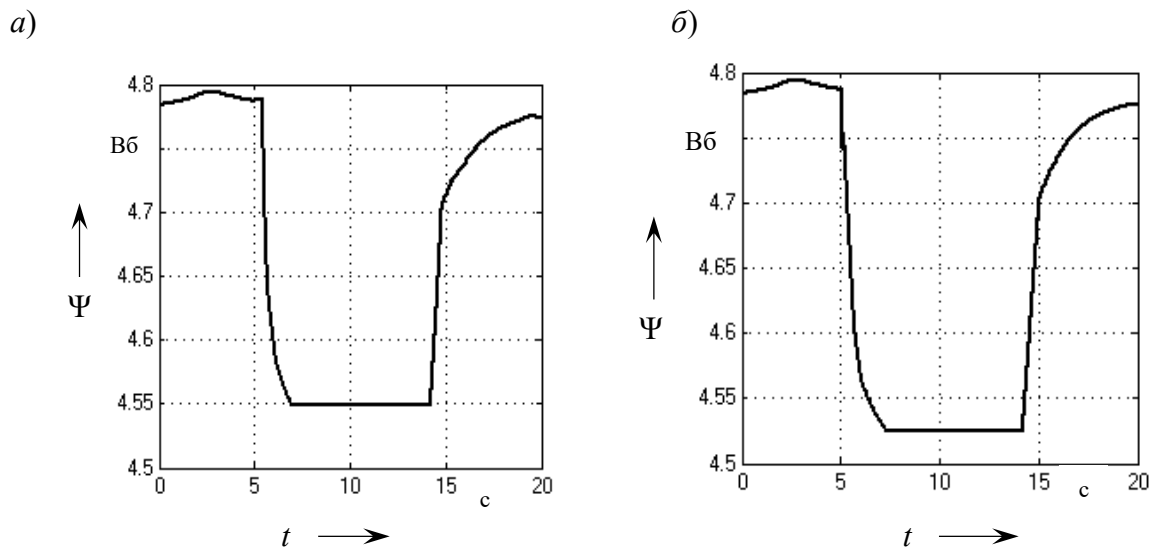


Рис. 8. Графики регулирования потока двигателя: *a* – при  $M_c = 300$  Н·м; *б* – при  $M_c = 50$  Н·м

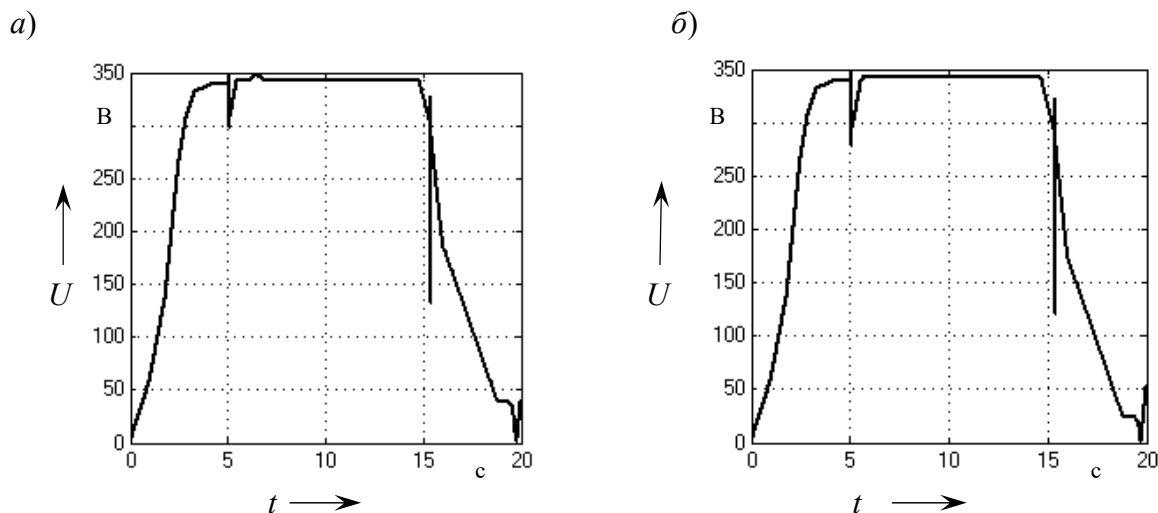


Рис. 9. Графики изменения напряжения на двигателе при регулировании потока: а – при  $M_c = 300$  Н·м; б – при  $M_c = 50$  Н·м

Осциллограммы изменения регулируемых параметров электропривода на базе СДПМ показывают работоспособность разработанной модели электропривода. Модель позволяет реализовать двухзонный режим работы электропривода с увеличением скорости двигателя выше номинальной за счет регулирования потока. Смоделирован режим работы при увеличении скорости на 30 % выше номинала для двух нагрузок в режиме ослабления потока: 50 и 300 Н·м. В отличие от СДПМ с поверхностным расположением магнитов в этом режиме для СДПМ со встроенными в ротор магнитами ток двигателя не превышает номинальное значение. Соответственно, данный тип двигателя может быть применен для реализации режима работы безредукторного привода лифта [1] с использованием повышенной скорости движения кабины лифта в рекуперативных режимах.

Таким образом, разработана модель регулируемого электропривода переменного тока на базе СДПМ со встроенными магнитами в ротор. Эта модель позволяет и для безредукторного привода лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины

лифта моделировать основные режимы его работы. Моделирование электропривода с СДПМ со встроенными магнитами в ротор двигателя показывает принципиальную возможность реализации безредукторного регулируемого электропривода лифта, например на базе СДПМ со встроенными магнитами в ротор, обеспечивающего движение кабины лифта в рекуперативных режимах работы со скоростью выше номинальной с целью увеличения энергоэффективности лифта.

### Выводы

Предложена модель регулируемого электропривода переменного тока с СДПМ со встроенным расположением магнитов в роторе двигателя, позволяющая и для безредукторного привода лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины лифта моделировать режимы его работы при увеличении скорости кабины лифта выше номинальной. Моделирование работы электропривода с СДПМ со встроенными магнитами в ротор двигателя при регулировании потока двигателя показывает возможность реализации безредукторного электропри-



вода лифта, обеспечивающего движение кабины лифта в рекуперативных режимах работы со скоростью выше номи-

нальной с целью увеличения энергоэффективности лифта.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** К вопросу энергосбережения в электроприводе пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта / А. С. Коваль, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
2. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
3. **Коваль, А. С.** Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока / А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3. – С. 121–129.
4. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.
5. **Ping-Yi Lin.** Control Technique for the Extension of DC-Link Voltage Utilization of Finite-Speed SPMSM Drives / Ping-Yi Lin, Yen-Shin Lai // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2012. – Vol. 59, № 9.
6. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB / Р. Т. Шрейнер [и др.] // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, № 8 (19).

*Статья сдана в редакцию 5 января 2021 года*

**Александр Сергеевич Коваль**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
**Алексей Григорьевич Кондратенко**, аспирант, Белорусско-Российский университет.

**Aleksandr Sergeyevich Koval**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
**Aleksey Grigoryevich Kondratenko**, PhD student, Belarusian-Russian University.