

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, А. Г. Кондратенко

МОДЕЛЬ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА НА БАЗЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТОКА

UDC 62-83:621

A. S. Koval, A. G. Kondratenko

MODEL OF GEARLESS ELECTRIC DRIVE FOR ELEVATORS BASED ON A LOW-SPEED INDUCTION MOTOR WITH FLOW REGULATION

Аннотация

На основе структурной схемы в осях x - y низкоскоростного высокомоментного асинхронного двигателя с ротором разработана модель двухзонного асинхронного электропривода. Представлены результаты моделирования работы электропривода по разработанной модели.

Ключевые слова:

низкоскоростной высокомоментный асинхронный двигатель с ротором, ослабление потока, регулирование скорости, составляющие напряжения статора, графики изменения момента, скорости, тока и потока.

Abstract

Based on the structural schematic in the x - y axes of the high-torque low-speed induction motor with a rotor, a model of a two-zone asynchronous electric drive has been developed. The paper presents the results of modeling the operation of the electric drive developed.

Keywords:

high-torque low-speed induction motor with a rotor, flux attenuation, speed regulation, stator voltage components, curves of torque, speed, current and flux change.

Показана [1] возможность повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов за счет увеличения скорости кабины при загрузке кабины лифта, отличающейся от номинальной. Так, увеличение скорости перемещения кабины в рекуперативном режиме на 20 % при нагрузке, например, характерной для подъема незагруженной кабины лифта в среднестатистической поездке на три этажа, приводит к увеличению энергии, передава-

емой на вал двигателя неуравновешенным грузом в рекуперативном режиме на 40 %. Реализуется эта возможность повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в регулируемом электроприводе переменного тока с двухзонным регулированием скорости [2], обеспечивающим увеличение скорости выше номинальной при соответствующей нагрузке при ослаблении потока используемого двигателя. Использование безредукторного привода на базе СДПМ с поверхност-

ным расположением магнитов на роторе, применяемом сегодня в лифтах, при регулировании скорости выше номинальной при ослаблении потока при загрузке кабины, близкой к режиму холостого хода, сопровождается значительным ростом потерь в двигателе и соответствующим нагревом [3, 4], исключая его практическое применение в лифтах. В регулируемых безредукторных электроприводах переменного тока, применимых в лифтах, режим работы при ослаблении потока при допустимых потерях, практически возможен в приводах либо с асинхронными двигателями с короткозамкнутым (к. з.) ротором, либо с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) и встроенным расположением магнитов в роторе. Существуют разработки безредукторного регулируемого электропривода лифта на базе высокомоментного низкоскоростного асинхронного электродвигателя с к. з. ротором [5]. Такой двигатель может быть использован для реализации рассматриваемых в [1] генераторных режимов работы лифта с повышенной скоростью. Моделирование процессов работы высокомоментного низкоскоростного асинхронного электродвигателя в таких режимах работы лифта позволяет оценить потери в двигателе, энергоэффективность использования двигателя в этих режимах, а также характер переходных процессов, что важно для лифтов.

Уравнения электрического равновесия асинхронного электродвигателя с к. з. ротором в осях x - y при ориентировании оси x вдоль вектора потокосцепления ротора и выражение момента двигателя имеют вид [4]:

$$U_{1x} = R_1 \cdot i_{1x} + L_{1x} \frac{di_{1x}}{dt} - \omega_1 \cdot L_1 \cdot i_{1y};$$

$$U_{1y} = R_1 \cdot i_{1y} + L_1 \cdot \sigma \cdot \frac{di_{1y}}{dt} + \omega_1 \cdot (L_{1x} \cdot i_{1x} + \Psi_{2x});$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot [\Psi_{2x} \cdot i_{1y} \cdot k_r];$$

$$\Psi_{2x} + T_2 \cdot \frac{d\Psi_{2x}}{dt} = L_{12} \cdot i_{1x},$$

где L_{1x} , L_1 , L_{12} – индуктивность рассеяния, индуктивность фазы статора, взаимная индуктивность соответственно; ω_1 – электрическая частота вращения; p_n – число пар полюсов; Ψ_{2x} – потокосцепление ротора; R_1 – сопротивление статора; σ – коэффициент рассеяния; k_r – коэффициент магнитной связи ротора, $k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$; T_2 – электромагнитная постоянная времени цепи ротора, $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$.

Структурная схема, соответствующая этим уравнениям, показана на рис. 1.

На базе этой структурной схемы может быть разработана модель безредукторного асинхронного электропривода лифта с возможностью реализации работы со скоростью выше номинальной при ослаблении потока двигателя и оценен возможный диапазон регулирования увеличения скорости при сохранении допустимого теплового режима работы двигателя.

Существуют различные варианты схемных решений системы автоматического управления (САУ) электроприводом на базе АД с к. з. ротором, обеспечивающих переход привода в режим работы с ослаблением потока при увеличении скорости выше номинальной [6]. Так как номинальное напряжение $U_{ном.}$, формируемое на двигателе, определяется напряжением на выходе звена постоянного тока преобразователя частоты U_{dc} и способом реализации ШИМ инвертором, то, например, САУ приводом лифта может быть реализована с учетом ограничения накладываемого напряжением цепи постоянного тока,

питающего инвертор преобразователя частоты, на максимальное фазное напряжение питания асинхронного двигателя в соответствии с условием

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_s^2,$$

где U_s – амплитудное номинальное фазное напряжение двигателя, $U_s = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$;

U_{dc} – напряжение на шине постоянного тока преобразователя частоты).

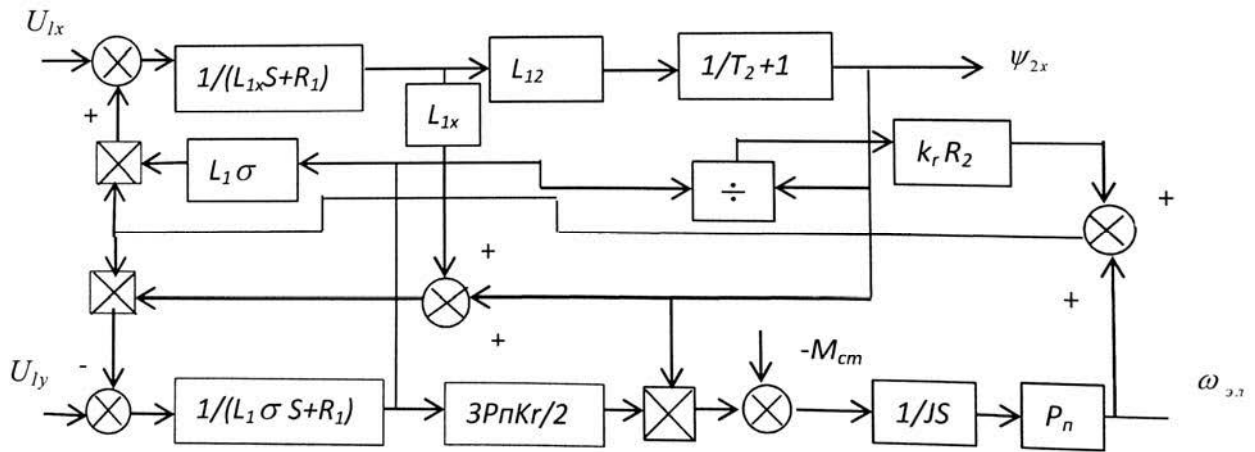


Рис. 1. Структурная схема асинхронного двигателя с к. з. ротором

Структурная схема системы автоматического управления электроприводом в осях $x-y$, реализующая этот вари-

ант при увеличении скорости регулирования вверх от номинальной, показана на рис. 2.

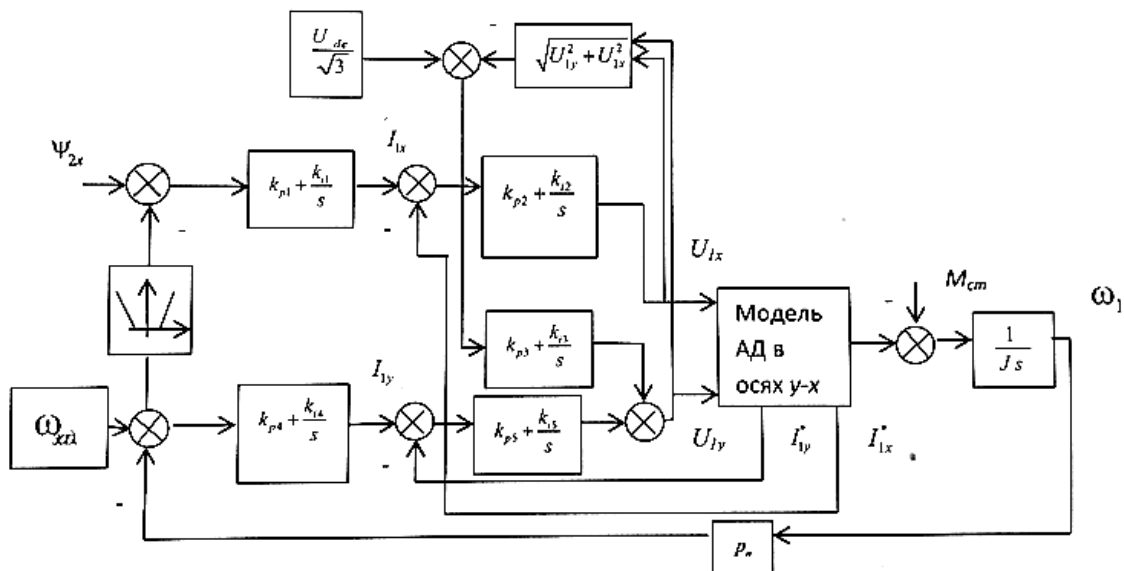


Рис. 2. Структурная схема САУ электроприводом в осях $d-q$

С увеличением задания скорости двигателя выше $\omega_{ном}$ ($\omega_{ном}$ определяет зону нечувствительности элемента, запускающего в работу контур регулирования потока) привод переходит в режим регулирования с ослаблением потока за счет формирования составляющей тока i_x с сохранением напряжения на двигателе на уровне номинального. При превышении напряжением на двигателе значения U_s вступает в работу обратная связь по напряжению на двигателе, ограничивая составляющую напряжения U_{1y} .

Система регулирования построена с использованием принципа подчиненного регулирования с ПИ-регуляторами тока в контурах регулирования потока и

скорости и ПИ-регулятором в контуре ограничения напряжения. Настройки коэффициентов передачи используемых регуляторов рассчитаны по методике [7].

На основе структурной схемы электропривода (см. рис. 2) разработана в среде МАТЛАБ имитационная модель электропривода с параметрами механической подсистемы электропривода (без учета упругих связей), соответствующими безредукторному приводу пассажирского лифта г/п 630 кг, и скоростью движения 1 м/с (рис. 3). При моделировании использован низкоскоростной высокомоментный лифтовый асинхронный двигатель с расчетными параметрами, приведенными в табл. 1.

Табл. 1. Расчетные параметры асинхронного двигателя, использованные при моделировании

J , кг·м ²	R_1 , Ом	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	$P_{ном}$, Вт	L_{12} , Гн	L_{13} , Гн	R_2 , Ом	$\Psi_{ном}$, Вб	$\Omega_{ном}$, с ⁻¹	$U_{ф}$, В
4,5	2,47	310	11,87	4071	0,979	0,219	1,82	4,36	12,1	208

Блок задания скорости Signal Bilder5 формирует требуемую тахограмму движения привода, обеспечивающую увеличение скорости привода на 20 % [1]. На схеме блок Step3 формируют команду на начало режима работы с контролем напряжения на двигателе. Увеличение скорости привода с ослаблением потока асинхронного двигателя на промежутке времени с 4,8 до 11,6 с на рис. 5–7. В модели применены ПИ-регуляторы тока и скорости с передаточными функциями, указанными на рис. 3. Нагрузка формируется блоком [8] (выход блока M_c). Момент нагрузки 200 Н·м для случая работы привода как с постоянным потоком, так и с ослабленным. Остальные элементы модели обеспечивают функционирование привода в соответствии со схемой на рис. 2.

Результаты моделирования работы электропривода показаны на рис. 4–7.

Осциллограммы изменения регулируемых параметров моделируемого электропривода показывают работоспособность разработанной модели электропривода. Модель позволяет реализовать двухзонный режим работы электропривода с увеличением скорости двигателя выше номинальной при регулировании потока. Смоделирован режим работы при увеличении скорости на 20 % выше номинальной в режиме ослабления потока для нагрузки 200 Н·м. В отличие от СДПМ с поверхностным расположением магнитов [3] в этом режиме для низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя ток двигателя не превышает номинальное значение.

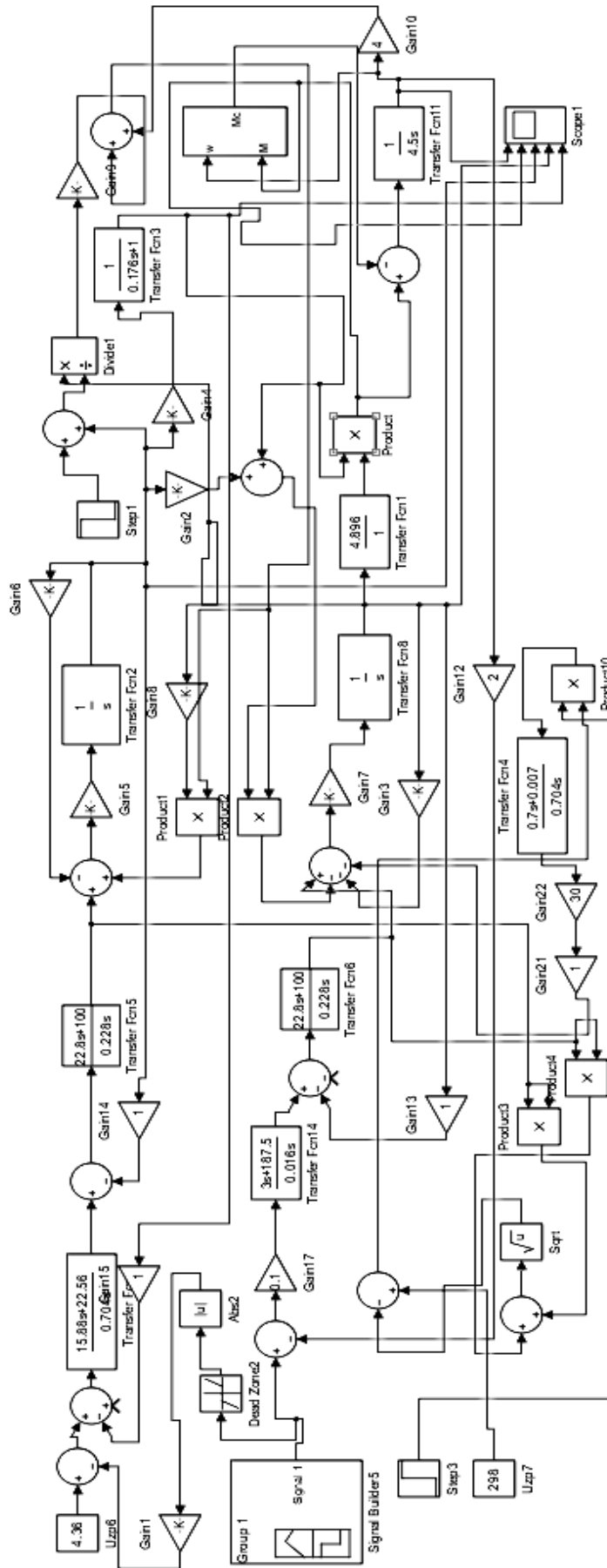


Рис. 3. Имитационная модель электропривода

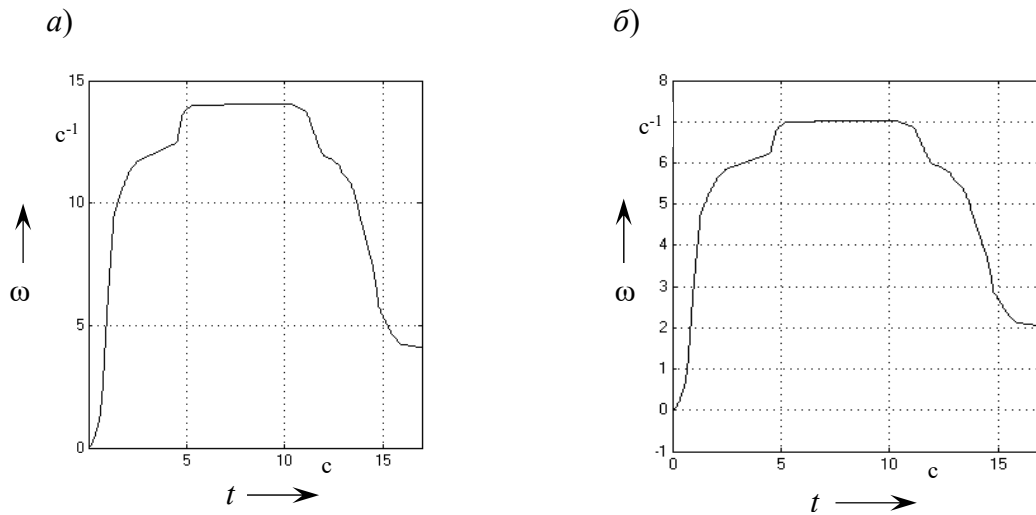


Рис. 4. Графики: *a* – тахограмма задания скорости; *б* – тахограмма скорости на модели

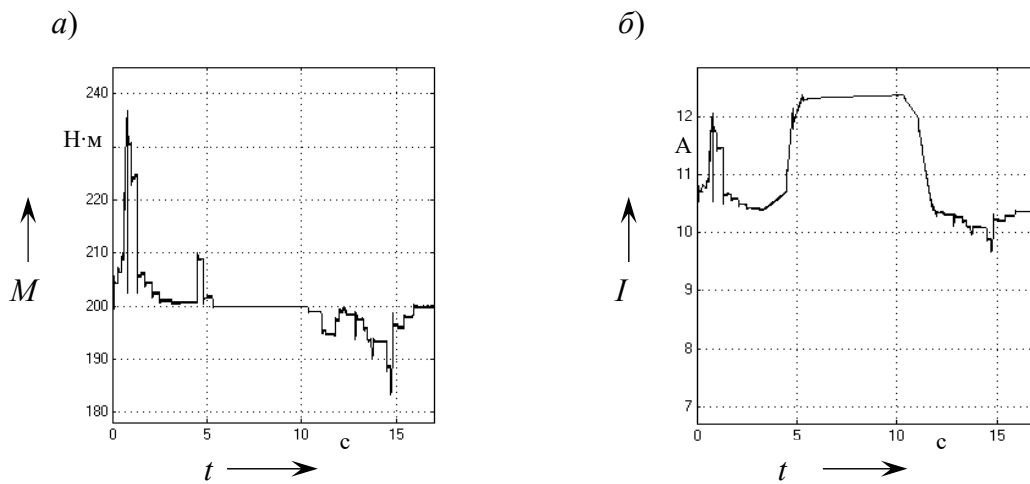


Рис. 5. Графики: *a* – изменения момента двигателя ($M_{cm} = 200$ Н·м); *б* – изменения тока двигателя

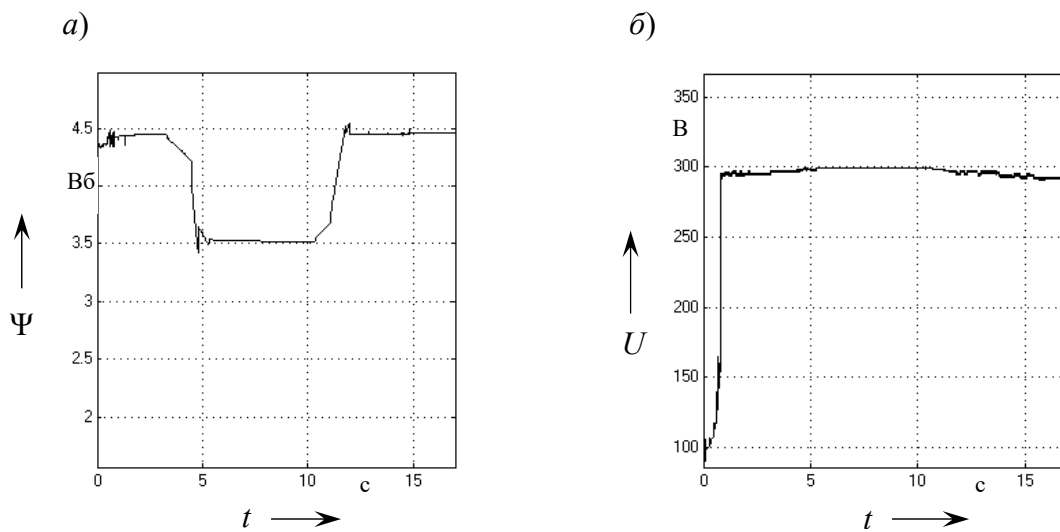


Рис. 6. Графики: *a* – изменения потока двигателя при $M_c = 200$ Н·м; *б* – изменения максимального фазного напряжения на двигателе

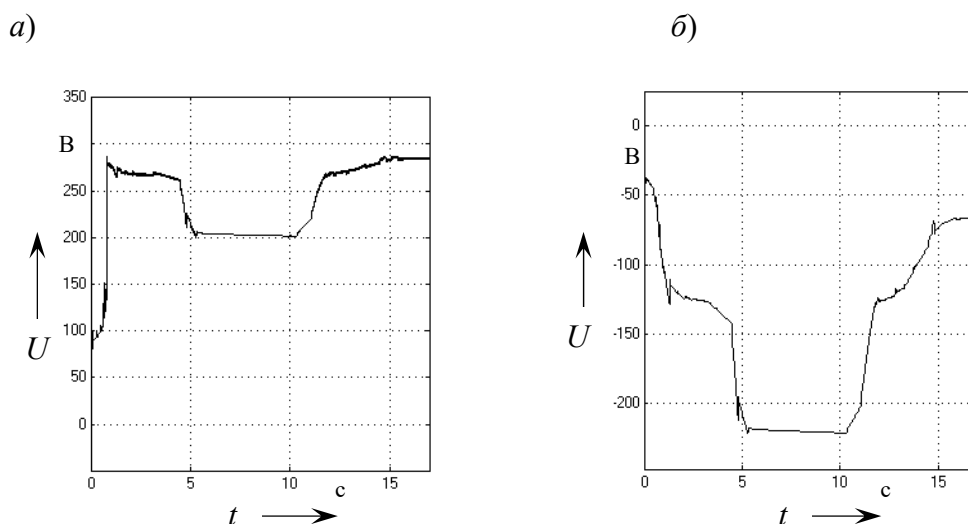


Рис. 7. Графики изменения составляющих напряжения по осям x - y на двигателе при ослаблении потока при $M_c = 200$ Н·м: a – составляющая напряжения U_y ; b – составляющая напряжения U_x

Соответственно, этот тип двигателя может быть использован для реализации режима работы безредукторного привода лифта [1] с использованием повышенной скорости движения кабины лифта в рекуперативных режимах.

Таким образом, разработана модель регулируемого двухзонного электропривода переменного тока на базе низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя с системой автоматического управления регулированием потока двигателя при контроле напряжения на двигателе.

Моделирование режимов работы электропривода на базе лифтового низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя показывает возможность реализации режимов работы электропривода с повышенной скоростью перемещения кабины лифта при ослаблении потока двигателя и допустимых потерях в двигателе (неполная загрузка кабины лифта). Эта модель как базовая позволяет для безредукторного асинхронного привода лифта моделировать основные режимы работы лифта [9] при отработке заданной тахограммы движения кабины

лифта с возможностью оценки повышения энергоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов при увеличенной скорости перемещения кабины лифта.

Выводы

Предложена модель двухзонного регулируемого электропривода переменного тока на базе низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя с системой автоматического управления регулированием потока двигателя при контроле напряжения на двигателе. Эта модель позволяет для безредукторного асинхронного привода лифта моделировать основные режимы работы лифта при отработке заданной тахограммы движения кабины лифта. Моделирование режимов работы электропривода на базе лифтового низкоскоростного высокомоментного асинхронного электродвигателя показывает возможность реализации генераторных режимов работы электропривода лифта с повышенной относительно номинального значения скоростью перемещения кабины лифта,

например на 20 %, при допустимых потерях в двигателе. Реализация этой возможности в рекуперативных режимах работы привода лифта, как показано в [1], способствует повышению энер-

гоэффективности использования генераторных режимов в безредукторном электроприводе лифтов и, соответственно, увеличению энергоэффективности лифта в целом.

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. **Кругликов, О. В.** К вопросу повышения технического уровня привода безредукторных лебедок с высокомоментными асинхронными электродвигателями / О. В. Кругликов // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 28–32.
6. **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.
7. Синергетические методы управления сложными системами. Механические и электромеханические системы / А. А. Колесников [и др.]. – Москва: ЛИБРОКОМ, 2013. – 304 с.
8. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB / Р. Т. Шрейнер [и др.] // Молодой ученый. – 2010. – Т. 1, № 8 (19).
9. **Коваль, А. С.** Моделирование двигательных и генераторных режимов работы безредукторного электропривода пассажирского лифта на базе СДПМ / А. С. Коваль, В. А. Яшин, А. И. Артеменко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 86–93.

Статья сдана в редакцию 5 апреля 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.