

Научная статья

УДК [62-83+621.313.333.1]:622.6

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23

Поползин Иван Юрьевич

Сибирский государственный индустриальный университет

*E-mail: eidoline@yandex.ru

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ**Информация о статье**

Поступила:

05 октября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 декабря 2022 г.

Принята к печати:

15 февраля 2023 г.

Опубликована:

09 марта 2023 г.

Ключевые слова:

асинхронный двигатель с фазным ротором, машина двойного питания, электропривод, подъемная установка, частотное управление.

Аннотация.

В статье приведены сведения об одном из перспективных способов модернизации асинхронного электропривода шахтных подъемных установок – применении схемы машины двойного питания. Актуальность вопроса обусловлена тем, что в большом числе подъемных электроприводов применены мощные асинхронные двигатели с фазным ротором и подключенной к нему роторной станцией, модернизация которых с использованием частотного управления не всегда возможна и сопряжена с рядом трудностей. На основании анализа процессов электромеханического преобразования энергии в машине и исследования ее механических характеристик в различных режимах предложен способ регулирования скорости и момента привода и возможная схема электропривода. При этом управление приводом осуществляется комбинацией различных режимов работы машины, что позволяет расширить диапазон регулирования скорости машины до значений, требуемых для шахтной подъемной установки. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что предлагаемая схема электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания технически реализуется на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, двух преобразователей (тока и напряжения) и системы управления преобразователями и позволяет достичь требуемого диапазона регулирования скорости с возможностью рекуперации электрической энергии в цепи ротора.

Для цитирования: Поползин И.Ю. Электропривод подъемной установки с комбинированным управлением на основе машины двойного питания // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 1 (165). С. 18-23. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23

В настоящее время асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР) все еще находят достаточно широкое применение в электроприводе шахтных и рудничных подъемных установок (ПУ). Такой электропривод, как правило, построен на основе АДФР, к ротору которого подключена роторная станция, переключение ступеней которой осуществляется шунтированием соответствующих секций резисторов. Такая схема обладает низкой энергоэффективностью (до 30% энергии, подведенной к двигателю, рассеивается в виде тепла на резисторах станции). Кроме того, ступенчатое переключение сопротивлений вызывает ступенчатое изменение тока ротора машины, и, как следствие, броски вращающего момента двигателя, которые могут передаваться в механическую часть привода и негативно влиять на ее элементы (в первую оче-

редь на подъемные канаты и зубчатые передачи). Несмотря на указанные недостатки, такая схема электропривода обладает несомненным достоинством – в ней обеспечивается большой пусковой момент и сохраняется критический момент АДФР (его перегрузочная способность) на всем диапазоне регулирования скорости, который с учетом режимов движения на малой скорости (например, при входе в разгрузочные кривые или при ревизии ствела) может составлять 30..40:1.

В то же время существует необходимость в модернизации и повышении энергоэффективности электропривода подъемных установок, поскольку они являются одним из основных потребителей энергии на шахтах и рудниках, и существенные потери энергии в схеме с роторной станцией обходятся предприятиям достаточно дорого. Обычно

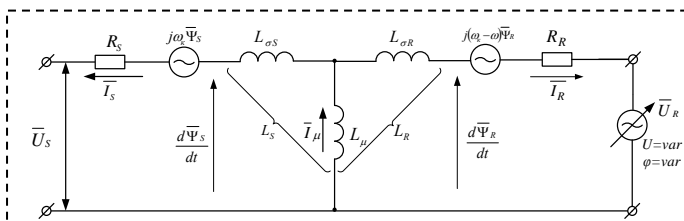


Рис. 1. T-образная схема замещения МДП
Fig. 1. T-shaped equivalent circuit of double-fed induction machine

напряжение, подведенное к ротору, в комплексной форме; s – относительная частота ЭДС ротора (скольжение); ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля статора; ω – угловая скорость вращения ротора; $\bar{\Psi}_S$ – потокосцепление статора в комплексной форме; $\bar{\Psi}_R$ – потокосцепление ротора в комплексной форме; ω_k – угловая скорость вращения системы координат, выбранной для описания машины.

основным способом модернизации асинхронного электропривода является использование частотных преобразователей в цепи статора и реализация скалярного или векторного управления машиной. Однако для подъемных АДФР такой способ модернизации применим далеко не всегда – магнитная система АДФР не рассчитана на частотное управление, и ее характеристики ухудшаются при снижении частоты даже при использовании векторного управления или скалярного управления с IR- или IZ-компенсацией. Другой проблемой является то, что в электроприводе подъемных установок используются мощные АДФР с номинальным напряжением на статоре 6 или 10 кВ и большим током статора; стоимость преобразователя, удовлетворяющего этим параметрам, может быть крайне велика.

В этой связи перспективным может представляться иное направление модернизации таких электроприводов – включение уже имеющихся АДФР по схеме машины двойного питания (МДП). В рамках данной работы примем следующее определение: под МДП понимается схема включения АДФР, в которой к ротору двигателя подключен частотный преобразователь [1-3]. Подобные схемы применительно к ПУ известны [4-7], хотя и не нашли широкого применения.

Обычно считается, что диапазон изменения скорости АДФР в схеме МДП ограничен соотношением 2-2,5:1 [1, 8, 9], что недостаточно для электропривода ПУ, диапазон изменения скорости в которых в зависимости от реализуемой тахограммы и режимов (например, режима ревизии ствола; режима входа в разгрузочные кривые и т.п.) может составлять 30:1 и выше. Таким образом, для применения схемы МДП в электроприводе ПУ необходимо решение задачи расширения диапазона регулирования скорости МДП.

T-образная схема замещения АДФР показана на Рис. 1., где \bar{U}_S – напряжение на статоре (в комплексной форме); \bar{I}_S – ток статора (в комплексной форме); $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния статора; \bar{I}_μ – ток намагничивания машины в комплексной форме; L_μ – индуктивность контура намагничивания; $L_{\sigma R}$ – собственная индуктивность рассеяния ротора; L_S – индуктивность статора; L_R – индуктивность ротора; R_S – активное сопротивление статора; R_R – активное сопротивление ротора; \bar{U}_R – добавочное

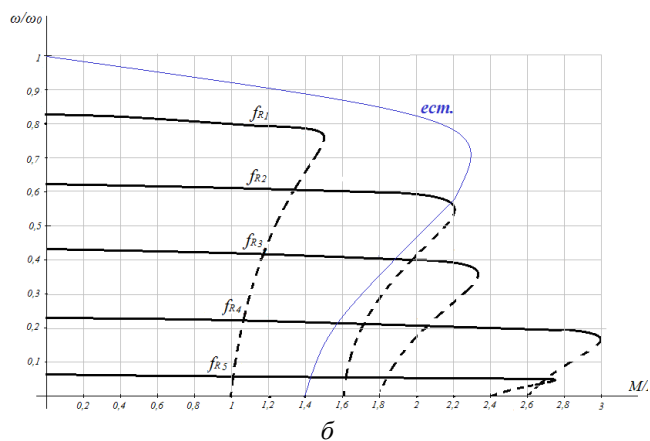
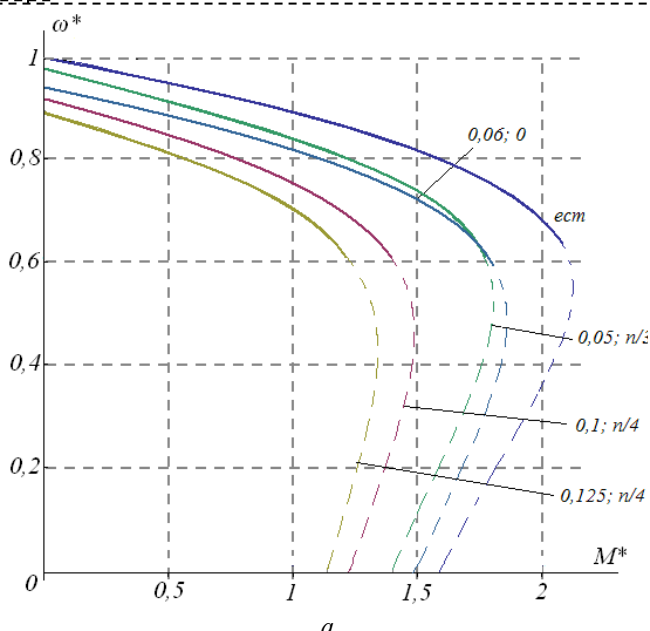


Рис. 2. Механические характеристики МДП (а – в асинхронном режиме; б – в синхронном)
Fig. 2. Mechanical characteristics of double-fed induction machine (a – asynchronous mode; b – synchronous mode)

Регулирование скорости и момента МДП осуществляется изменением параметров добавочного напряжения на роторе машины (амплитуды, фазового сдвига относительно напряжения на статоре и частоты). Согласно [10] для МДП могут быть выделены два основных режима работы, зависящих от способа управления частотой добавочного напряжения, подаваемого в цепь ротора с выхода преобразователя частоты. Первый режим, условно называемый «асинхронным», возникает в случае, когда частота добавочного напряжения равна частоте собственной ЭДС ротора (частоте скольжения).

Второй режим, называемый «синхронным», возникает в случае, если частота добавочного напряжения на роторе не равна частоте скольжения. При этом исследования [10] показали, что в асинхронном режиме скорость и момент машины зависят в основном от амплитуды, а фазовый сдвиг определяет жесткость характеристики. В синхронном режиме характеристики имеют жесткость, близкую к бесконечности, а значения амплитуды и фазового сдвига определяют максимальную перегрузочную способность МДП и потребляемую ей реактивную мощность.

Вид механических характеристик машины в асинхронном режиме показан на Рис. 2а, в синхронном – на Рис. 2б. Хорошо видно, что в целом форма характеристик МДП в асинхронном режиме подобна форме характеристик асинхронного двигателя, а в синхронном – синхронной машины; цифрами на Рис. 2а показаны относительная величина напряжения на роторе, направленного встречно ЭДС ротора, и его фазовый сдвиг относительно напряжения на статоре машины.

По приведенным характеристикам видно, что в асинхронном режиме при увеличении амплитуды добавочного напряжения на роторе уменьшается жесткость рабочего участка механической характеристики машины и ее перегрузочная способность.

Исследования также показали, что момент машины в синхронном режиме содержит две составляющие – асинхронную и синхронную, при этом синхронная составляющая момента имеет демпфирующие свойства, за счет чего жесткость механической характеристики машины в синхронном режиме велика, а свойства машины близки к свойствам явнополюсной синхронной машины. В асинхронном режиме диапазон регулирования скорости вниз от номинальной ограничен падением перегрузочной способности машины; в синхронном режиме регулирование целесообразно в диапазоне скоростей $0-0,5\omega_n$, поскольку в этом диапазоне скоростей машины имеет наибольшую перегрузочную способность.

Таким образом, для достижения глубокого регулирования скорости целесообразна комбинация асинхронного и синхронного режимов. Однако ни один из этих режимов не позволяет реализовать такой характерный для подъемных установок режим, как растормаживание привода, поскольку перегрузочная способность МДП в асинхронном режиме слишком мала при малой скорости, а в синхронном режиме при нулевой скорости машина не развивает пускового момента. Для решения этой проблемы было предложено включение в цепь ротора управляемого преобразователя тока (УПТ), который позволяет осуществить плавный пуск подъемного двигателя и его выход на скорость, на которой можно беспрепятственно использовать синхронный режим.

Основной проблемой в таком случае остается падение перегрузочной способности и снижение жесткости механической характеристики машины в асинхронном режиме в диапазоне скоростей $0-0,5\omega_n$. Для решения этой проблемы в [11] был

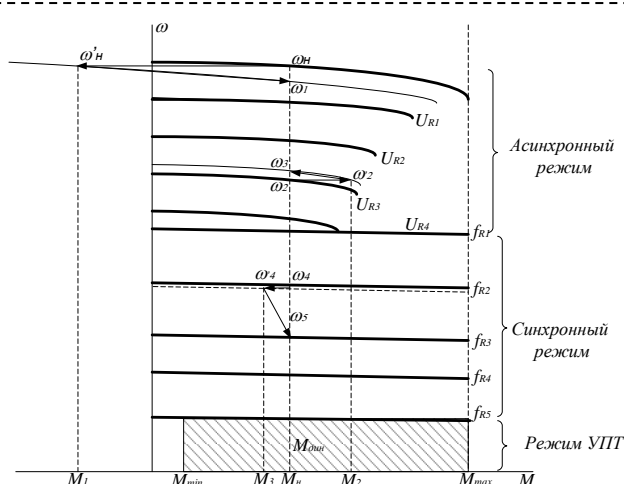


Рис. 3. Рабочие зоны механических характеристик МДП при сочетании режимов работы
Fig. 3. Work zones of mechanical characteristics of DFIM with combination of regimes

предложен способ коррекции вида механических характеристик МДП с помощью задания фазового сдвига добавочного напряжения на роторе в соответствии с выражением:

$$\delta = \arctg\left(\frac{s}{s_{KPe}}\right), \quad (9)$$

На основе проведенных исследований был сделан вывод о том, что в зависимости от пределов регулирования частоты добавочного напряжения на роторе, диапазон регулирования скорости МДП при комбинации асинхронного и синхронного режимов работы машины с параметрическим регулированием с помощью УПТ может быть оценен как 40:1-60:1, что является вполне удовлетворительным диапазоном регулирования скорости для электропривода шахтной подъемной установки.

Сочетание режимов работы МДП для электропривода ШПУ целесообразно организовать следующим образом [11]:

1) Для работы машины в диапазоне $0 \leq \omega \leq 0,1\omega_0$ целесообразно применение управляемого преобразователя тока в цепи ротора, поскольку он обеспечивает хорошую перегрузочную способность на малой скорости и возможность разгона с постоянными производными скорости и момента.

2) Синхронный режим работы целесообразно применять для разгона, торможения и работы на малой скорости в диапазоне скоростей $0,1\omega_0 \leq \omega \leq 0,5\omega_0$.

3) Асинхронный режим целесообразно применять для работы ШПУ на максимальной скорости подъема, а также при разгоне и торможении машины в диапазоне скоростей $0,5\omega_0 < \omega \leq \omega_0$.

При использовании комбинированного управления рабочие зоны механических характеристик имеют вид, приведенный на Рис. 3.

Стрелками на Рис. 3 показаны переходы между механическими характеристиками, соответствующими разным скоростям привода. При торможении увеличением амплитуды добавочного напряжения на роторе в асинхронном режиме текущая скорость

оказывается выше скорости идеального холостого хода на новой характеристике. При этом рабочая точка ω_n смещается во второй квадрант (точка ω'_n), и привод развивает тормозной момент, находясь в режиме рекуперации. Под действием этого момента скорость машины уменьшается до заданной скорости ω_1 . Разгон машины в асинхронном режиме осуществляется аналогично. В синхронном режиме при увеличении частоты и амплитуды добавочного напряжения уменьшается момент привода, и происходит торможение машины до заданной скорости по траектории $\omega_4-\omega'_4-\omega_5$. В режиме УПТ достигим любой требуемый момент привода.

Для реализации описанного способа управления АДФР была разработана схема электропривода с комбинированным управлением, в состав которой входят два преобразователя, включаемые в цепь ротора (управляемый преобразователь напряжения (УПН), состоящий из двух вентильных групп – роторной и сетевой, и УПТ), а также система управления, реализующая алгоритм переключения режимов работы машины и коммутацию силовых цепей преобразователей, а также регулирование скорости и момента машины. Схема работает следующим образом. При необходимости реализации режима прямого управления активной составляющей тока ротора задействуется УПТ. После достижения заданной скорости УПТ отключается от ротора, а УПН подключается к нему. При этом роторная группа работает в инверторном режиме, сетевая – в выпрямительном, частота выходного напряжения УПН устанавливается в соответствии с требуемыми величинами скорости и момента привода. При работе машины в установившемся режиме на заданной скорости роторная группа переводится в выпрямительный режим, а сетевая – в инверторный, что позволяет рекуперировать в сеть мощность скольжения АДФР. Торможение может осуществляться различными способами – с рекуперацией энергии через сеть ротора либо с подачей дополнительной энергии в ротор.

Таким образом, предлагаемая схема электропривода шахтной подъемной установки на основе МДП технически реализуется на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, двух преобразователей (тока и напряжения) и системы управления преобразователями. В такой схеме УПН имеет установочную мощность, существенно меньшую, чем мощность частотного преобразователя в цепи статора для такого же двигателя. Полная управляемость вентильных групп позволяет не только достичь рекуперации энергии в роторной цепи (и в тормозных режимах, и при движении с установившейся скоростью), но и управлять реактивной составляющей тока ротора, что позволяет в известных пределах снижать и даже компенсировать реактивную мощность, потребляемую двигателем [1, 12-15]. Наличие в схеме двух независимых преобразователей (УПН и УПТ) обеспечивает резервирование – в случае выхода из строя одного из них движение подъемного сосуда может быть безопасно продолжено с помощью другого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М. : Энергия, 1979. 200 с.
2. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск : ЗАО «Техноперспектива», 2006. 363 с.
3. Kirtley J. L., Banerjee A., Englebretson S. Motors for Ship Propulsion // Proceedings of the IEEE. 2015. Vol. 103, no. 12. Pp. 2320-2332. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2487044.
4. Бежок В. И. и др. Шахтный подъем. Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. 624 с.
5. Иванцов В. В. Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода «ЭРАТОН-ФР» // ЗАО «ЭРАСИБ». 2011. URL : <https://erasib.ru/staty/hoist-eratonfr-efficiency/>
6. Pankratov V. V., Kotin D. A., Vdovin V. V. A doubly fed induction motor drive of a mine hoisting plant // Russian Electrical Engineering. 2014. №85. P. 709–712. DOI:10.3103/S1068371214120116.
7. Payuk L. [et al.] Special modes of AC drives operation in the mining industry // E3S Web Conf. 2017. No. 15. 03014. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503014.
8. El Ouanjli [et al.] Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter // Protection and Control of Modern Power Systems. 2019. 4:17. DOI: 10.1186/s41601-019-0131-7.
9. Zerzeri M., Khedher A. Optimal speed-torque control of doubly-fed induction motors: analytical and graphical analysis // Computers & Electrical Engineering. 2021. Vol. 93. 107258. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107258.
10. Ostrovlyanchik V. Yu., Popolzin I. Yu., Marshev D. A. Mechanical characteristics of the doubly-fed machine and its use in the hoist electric drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. P. 1–8 (012028). DOI: 10.1088/1755–1315/206/1/012028.
11. Ostrovlyanchik V. Y., Popolzin I. Yu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 377. 012041. 9 p. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.
12. Bodson M. Speed control for doubly fed induction motors with and without current feedback // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2020. Vol. 28. No. 3. Pp. 898-907. DOI: 10.1109/TCST.2019.2898372.
13. Elmanfoud M. [et al.] Rotor Field Oriented Control of Doubly Fed Induction Motor // 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). 2019. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICOA.2019.8727708.
14. Aroussi H. A., Ziani E., Bossoufi B. Contribution to the enhancement of dual DTC application: Doubly fed induction motor // 2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). 2017. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/ATSIP.2017.8075608.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Поползин Иван Юрьевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Российская Федерация, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), eidoline@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Поползин И.Ю.– постановка исследовательской задачи, разработка схем, разработка схем, концептуализация исследования, обзор соответствующей литературы, написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23

Ivan Yu. Popolzin

Siberian State Industrial University

E-mail: eidoline@yandex.ru

MINE HOIST ELECTRIC DRIVE BASED ON DOUBLY-FED INDUCTION MOTOR WITH COMBINED CONTROL



Article info

Received:

05 October 2022

Accepted for publication:

01 December 2022

Accepted:

15 February 2023

Published:

09 March 2023

Keywords: wound-rotor induction motor, doubly-fed induction motor, electric drive, mine lifting installation, frequency controlling.

Abstract.

The article provides information about using the doubly-fed machine, one of the promising ways to modernize the electric drive of mine hoists with induction motors. The relevance of the issue is due to the fact that a large number of lifting electric drives uses powerful induction motors with a wound rotor and a rotary station connected to it. The modernization of such drives using frequency control is not always possible and is associated with some difficulties. A method for controlling the speed and torque of the drive and a possible electric drive circuit, based on the analysis of the processes of electromechanical energy conversion in the machine and the study of its mechanical characteristics in various modes, are proposed. The proposed drive works using a combination of various operating modes of the machine, which makes it possible to expand the range of machine speed control to the values required for a mine hoist.

For citation: Popolzin I.Yu. Mine hoist electric drive based on doubly-fed induction motor with combined control. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 1(165):18-23 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23

REFERENCES

1. Onishchenko G.B., Lokteva I.L. Asinkhronnye ventil'nye kaskady i dvigateli dvoynogo pitaniya [Wound-rotor slip recovery systems and doubly-fed induction motors]. Moscow: Energiya; 1979. 200 p.
2. Firago B.I., Pavlyachik L.B. Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka [Adjustable AC electric drives]. Minsk: CJSC Tehnoperspektiva; 2006. 363 p.
3. Kirtley J.L., Banerjee A., Englebretson S. Motors for Ship Propulsion. *Proceedings of the IEEE*. 2015; 103:12. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2487044
4. Bezhok V.R. [et al.] Shakhtnyy pod'em [Mine lifting]. Donetsk; Yugo-Vostok LTD, 2007. 624 p.
5. Ivantsov V.V. Povyshenie energoeffektivnosti i proizvoditel'nosti kletevoi shahtnoi pod'emnoi ustanovki s ispol'zovaniem rotornogo chastotnogo elektroprivoda «ERATON-FR» [Increasing the energy efficiency and productivity of a cage mine hoist using a "ERATON-FR", an electric drive with frequency converter in rotor circuit]. *CJSC ERASIB*. 2011. URL: <https://erasib.ru/staty/hoist-eratonfr-efficiency/>
6. Pankratov V.V., Kotin, D.A., Vdovin, V.V. A doubly fed induction motor drive of a mine hoisting plant. *Russian Electrical Engineering*. 2014; 85. DOI:10.3103/S1068371214120116.
7. Payuk L. [et al.] Special modes of AC drives operation in the mining industry. *E3S Web Conf.*, 15. 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503014.
8. El Ouanjli [et al.] Direct torque control of doubly fed induction motor using three-level NPC inverter. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2019; 4:17. DOI: 10.1186/s41601-019-0131-7.
9. Zerzeri M., Khedher A. Optimal speed-torque control of doubly-fed induction motors. *Computers & Electrical Engineering*. 2021; 93. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107258.
10. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu., Marshev D.A. Mechanical characteristics of the doubly-fed machine and its use in the hoist electric drive. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 206. DOI: 10.1088/1755-1315/206/1/012028.
11. Ostrovlyanchik V.Y., Popolzin I.Yu. Equivalent structure of a double-fed induction motor with a change in frequency of additional voltage for electric drive systems of mine winders. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 377. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012041.
12. Bodson M. Speed control for doubly fed induction motors with and without current feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2020; 28:3. DOI: 10.1109/TCST.2019.2898372.
13. Elmanfoud M. [et al.] Rotor Field Oriented Control of Doubly Fed Induction Motor. *5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*. 2019. DOI: 10.1109/ICOA.2019.8727708.
14. Aroussi H. A., Ziani E., Bossoufi B. Contribution to the enhancement of dual DTC application: Doubly fed induction motor. *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. 2017. DOI: 10.1109/ATSIP.2017.8075608.
15. Avlasko P.V., Bronov S.A. Electric drives on the basis of doubly fed induction motor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 643. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012035

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Ivan Yu. Popolzin, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Siberian State Industrial University, (654007, Russia, Novokuznetsk, Str. Kirova 42), eidoline@yandex.ru

Contribution of the authors:

Ivan Yu. Popolzin – formulation of a research problem, development of schemes, development of schemes, conceptualization of research, review of the relevant literature, writing the text, data collection and analysis; conclusions; writing text.

Author have read and approved the final manuscript.

