



УДК 621.313.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Черникова Т.М., Дабаров В.В., Каченков А.К.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

24 декабря 2023 г.

Рецензирование:

11 марта 2024 г.

Принята к печати:

25 марта 2024 г.

Ключевые слова:

асинхронный двигатель,
энергоэффективность,
модернизация двигателя,
моделирование пуска,
компенсация реактивной
мощности

Аннотация.

Важнейшей задачей при использовании асинхронных двигателей, в том числе в горной промышленности, является выбор наиболее оптимального способа повышения их энергоэффективности с целью уменьшения энергетических и экономических затрат. В данной работе представлены результаты аналитического исследования основных направлений повышения энергоэффективности асинхронных двигателей: создание новых двигателей, модернизация при ремонте, оптимизация работы в процессе эксплуатации. Для решения задачи повышения энергоэффективности в процессе эксплуатации проведено моделирование пуска двигателя с использованием устройства компенсации реактивной мощности. Исследования проводились на электродвигателе ВАО2-450LA4 мощностью 315 кВт с нагрузкой 1000 Нм на валу. Получены результаты уменьшения потребляемого тока во время пуска электродвигателя, позволяющие снизить нагрузку на электрическую сеть и уменьшить падение напряжения, тем самым повысив устойчивость и надежность работы электрооборудования, а также увеличить срок его службы. На основании полученных результатов сделан вывод, что наиболее благоприятной является ситуация использования двух устройств компенсации реактивной мощности, одно из которых, рассчитанное для номинального режима, подключено постоянно, а второе, рассчитанное для пускового режима, подключается только во время пуска. Полученные в работе данные могут быть использованы для наиболее результативного поиска способа повышения энергоэффективности асинхронных двигателей в процессе эксплуатации.

Для цитирования: Черникова Т.М., Дабаров В.В., Каченков А.К. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей // Техника и технология горного дела. – 2024. – № 1(24). – С. 77-86. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-1-77-86, EDN: EVEQUJ

Введение

Наиболее распространенным в настоящее время видом электрических машин, составляющих основу большинства механизмов, используемых в промышленности, в том числе на горных предприятиях, является асинхронный двигатель (АД). Такое широкое распространение обусловлено высокой надежностью и способностью к перегрузкам, отсутствию искрения, простоте эксплуатации, что облегчает их применение в горной промышленности, где асинхронные двигатели используются в качестве комбайновых, конвейерных двигателей, на подъемных, вентиляционных, водоотливных и других установках [1,2].

Важнейшей задачей при использовании асинхронных двигателей является выбор наиболее оптимального способа повышения его энергоэффективности. В соответствии с ГОСТ Р 54413-2011 класс энергоэффективности асинхронных двигателей, применяемых в промышленности, установлен не ниже IE3 или IE4. К сожалению, в настоящее время еще не все двигатели

соответствуют данным нормам, поэтому проблема повышения энергоэффективности асинхронных двигателей весьма актуальна.

В настоящей работе рассмотрены основные направления повышения энергоэффективности асинхронных двигателей (Рис.1).



Рис. 1. Основные направления повышения энергоэффективности асинхронных двигателей
Fig. 1. Main directions of increase energy efficiency of asynchronous motors

Материалы и методы

Создание: проектирование и изготовление асинхронных двигателей с высоким классом энергоэффективности (IE3 и IE4) – одно из важных направлений, которое позволяет изначально применять готовый энергосберегающий двигатель.

Для повышения энергоэффективности АД при их разработке применяют новые марки электротехнической стали, уменьшают воздушный зазор между статором и ротором; увеличивают сечение проводника обмотки и используют другие способы [3].

При проведении расчетов для улучшения энергосберегающих характеристик асинхронных двигателей серии 4А установлено [4], что для таких двигателей повышение энергоэффективности до класса IE3 и IE4 приводит к уменьшению рабочей температуры обмотки статора и других составных частей. Это увеличивает надежность и продлевает срок службы двигателя, а уменьшение потерь энергии позволяет использовать более простые системы вентиляции и охлаждения. К сожалению, повышение энергоэффективности происходит за счет увеличения массы и габаритов активной части, что приводит к увеличению стоимости двигателя. Применение новых материалов также повышает стоимость. Поэтому использование таких энергоэффективных асинхронных двигателей экономически наиболее оправдано при эксплуатации в продолжительном режиме работы.



Некоторые исследователи считают [5], что повышение энергоэффективности двигателей при проектировании возможно без изменения поперечного сечения при увеличении длины сердечника статора до 130% и снижении числа витков обмотки статора до 90% для регулируемых электроприводов, что позволяет обеспечить реальное энергосбережение.

Кроме того, в качестве повышения энергоэффективности возможно изготовление и использование новых типов двигателей [6]. Например, двигатель с совмещенными обмотками (схемы звезда и треугольник в одной обмотке) позволяет экономить от 30 до 50% потребления энергии при той же полезной работе. При этом за счет улучшения механической характеристики и более высоких энергетических показателей появляется возможность создания регулируемого энергосберегающего привода [6]. Двигатель с совмещенными обмотками дает возможность использовать его на горнодобывающем предприятии, а также обеспечивает более высокую экономическую и экологическую эффективность технологических процессов с сокращением неоправданных потерь электроэнергии.

Затраты на покупку энергоэффективных двигателей в 1,2-2 раза больше затрат на двигатель стандартной энергоэффективности. При этом в случае работы в течение десяти лет стоимость двигателя составляет менее двух процентов от общих затрат, около одного процента расходуется на обслуживание и монтаж, примерно 97% приходится на электроэнергию [7]. Поэтому срок окупаемости дополнительных затрат составляет 2-3 года.

Как альтернативу замены двигателей на энергосберегающие возможно использовать модернизацию при их ремонте, так как данный способ является наиболее эффективным, менее капиталоемким и экологически безопасным.

Результаты и обсуждение

Решение задачи по совершенствованию технологии капитального ремонта и модернизации существующих асинхронных двигателей может быть достигнуто путем разработки методики и аппаратного средства для оценки реального состояния стали статора машины, а также разработкой программного средства, позволяющего оценивать экономическую целесообразность принятия решения о капитальном ремонте, модернизации или утилизации двигателей [8].

Нередко двигатели ремонтируют несколько раз. При этом некачественный ремонт может привести к снижению КПД на 0,5-1%, а в некоторых случаях – на 4% и более, если двигатель старый. Более дешевым и часто более быстрым вариантом, чем приобретение нового двигателя, является его перемотка, но она может привести к снижению КПД на 1%. Зависимость затрат, связанных с приобретением нового двигателя и перемоткой существующего, от мощности представлена на Рис. 2 [9].

Дополнительные расходы, связанные с приобретением нового двигателя, могут быстро окупиться вследствие более высокой энергоэффективности, поэтому перемотка может оказаться неоптимальным решением с учетом затрат на протяжении всего срока службы [9]. Повышает энергоэффективность также улучшение системы охлаждения [10].

Путем модернизации АД при капитальном ремонте их обмоток статора без изменения магнитной системы возможно повышать энергоэффективность с помощью индивидуальной компенсации реактивных индуктивных токов электромагнитных устройств с использованием феррорезонанса токов. Такая индивидуальная компенсация реактивной мощности уменьшает потребляемый ток на 10-15%, повышает $\cos\phi$ до единицы, энергетический КПД – на 13–20% [11].

Оптимизация работы при эксплуатации также позволяет повысить энергоэффективность асинхронных двигателей. Этому способствуют следующие условия.

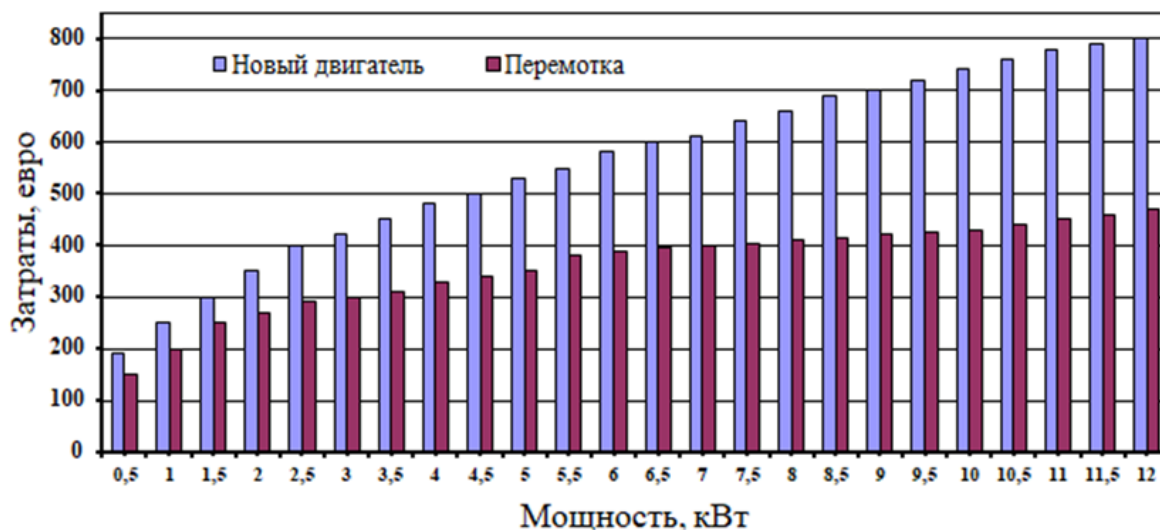


Рис. 2. Затраты на перемотку существующего двигателя и приобретение нового
Fig. 2. Costs of rewinding an existing engine and purchasing a new one

Установка частотно-регулируемого привода позволяет регулировать скорость вращения двигателя в зависимости от потребностей процесса, что способствует снижению потребления энергии при работе в частичных режимах. При использовании мягкого или плавного пуска можно снизить токи пуска и механические напряжения на оборудовании, что уменьшит энергопотребление и повысит надежность работы двигателя [12,13].

Мониторинг и контроль нагрузки помогают избежать излишнего потребления энергии при работе на неполной нагрузке или при перегрузках. Регулярная проверка и обслуживание двигателя, такие как очистка вентиляторов, смазка подшипников, проверка состояния изоляции и другие мероприятия, помогают сохранить оптимальное состояние двигателя.

Для повышения энергоэффективности может служить надежный и быстрый метод мониторинга рабочего состояния асинхронного двигателя в реальном времени, основанный на использовании трехмерной сверточной нейронной сети [14]. При этом используется новый метод диагностики как простых механических, так и электрических дефектов, а также их комбинации, основанный на измерении сигнала тока в различных рабочих состояниях.

Обеспечить энергосберегающую работу в процессе эксплуатации, повысить помехозащищенность и увеличить срок службы асинхронного двигателя может STATCOM – устройство на основе силовой электроники, используемое для компенсации реактивной мощности [15,16].

В настоящей работе проведены исследования повышения энергоэффективности асинхронного двигателя путем компенсации реактивных токов при его пуске с использованием программного средства [17].

Моделирование проводилось на электродвигателе ВАО2-450LA4 мощностью 315 кВт с нагрузкой 1000 Нм на валу. Схема питания приведена на Рис. 3. Двигатель подключался к энергосистеме через кабель АПВВГ 4х50 длиной 200 метров, напряжение питания 6 кВ.

Результаты моделирования показали, что при запуске без устройства компенсации реактивной мощности (КРМ) пусковой ток составил приблизительно 170 А (Рис. 4).

С помощью программного средства [17] была определена оптимальная мощность устройства КРМ в установившемся режиме –105 кВАр.

Исследования при пуске двигателя с использованием устройства КРМ показали, что пусковой ток уменьшился на 10 А и составил 160 А (Рис.5). При этом в установившемся режиме ток изменился с 19 до 15,6 А, что привело к снижению потребляемой активной мощности на 2,2 кВт за счет уменьшения потерь в кабеле.

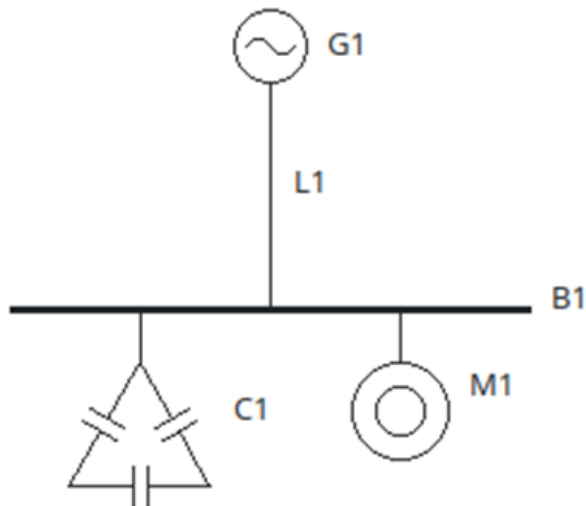


Рис. 3. Моделируемая схема: $G1$ – энергосистема; $L1$ – кабель; $B1$ – шина; $C1$ – устройство компенсации реактивной мощности; $M1$ – двигатель

Fig. 3. Simulated circuit: $G1$ – power system; $L1$ – cable; $B1$ – bus; $C1$ – reactive power compensation device; $M1$ – motor

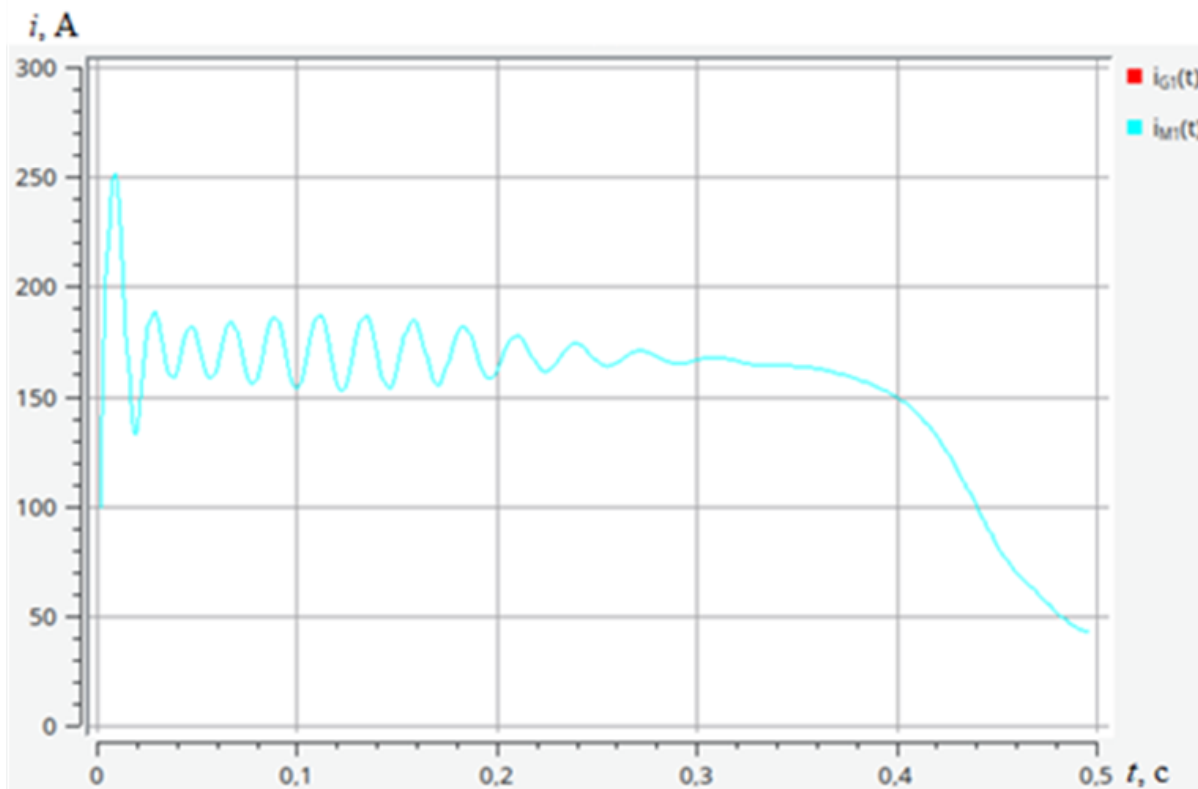


Рис. 4. График потребляемого тока без КРМ: i_{G1} – общий ток, потребляемый от энергосистемы; i_{M1} – ток, потребляемый двигателем (графики i_{G1} и i_{M1} совпадают)

Fig. 4. Current consumption graph without RPC: i_{G1} – total current consumed from the power system; i_{M1} – current consumed by the motor (i_{G1} and i_{M1} graphs are the same)

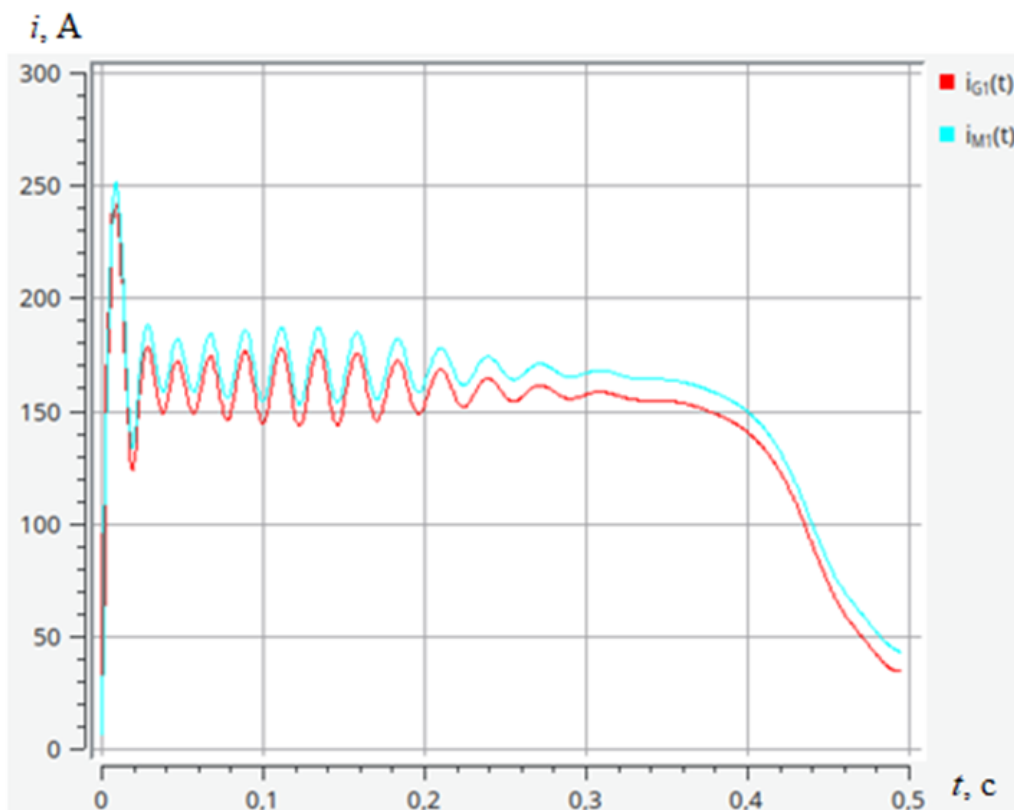


Рис. 5. Графики потребляемого тока с КРМ, оптимальной для установившегося режима
Fig. 5. Graphs of current consumption with RPC, optimal for steady state

С помощью программного средства определена также оптимальная мощность во время пуска двигателя – 1,4 МВАр. В качестве критерия оптимизации было принято снижение потерь электроэнергии, что соответствует минимальному значению потребляемого тока.

С использованием устройства КРМ при пуске двигателя ток, потребляемый из энергосистемы, снизился до 55 А (Рис. 6), что ниже почти в 3 раза пускового тока двигателя. Однако в установившемся режиме ток возрос до 125 А.

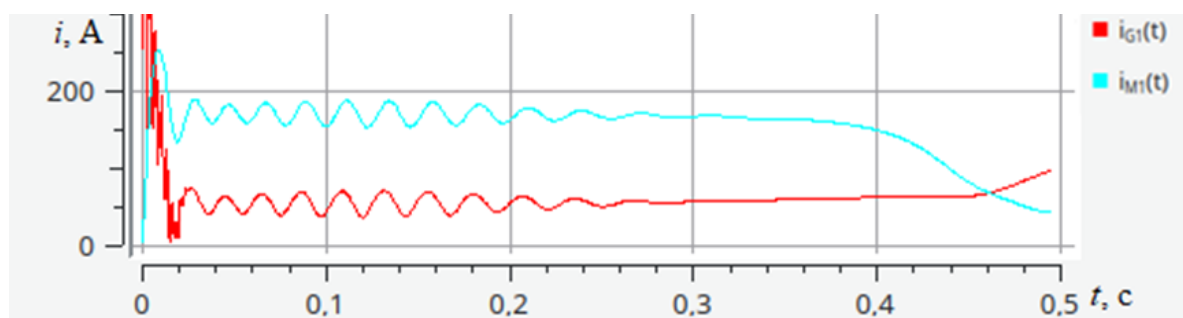


Рис. 6. Графики потребляемого тока с КРМ, оптимальной для пуска двигателя
Fig. 6. Graphs of current consumption with RPC, optimal for starting the engine

Значительное уменьшение потребляемого тока во время пуска электродвигателя позволяет снизить нагрузку на электрическую сеть и уменьшить падение напряжения, тем самым повысив устойчивость и надежность работы электрооборудования, а также увеличить срок его службы. Кроме того, использование устройства компенсации реактивной мощности позволяет снизить затраты на другое оборудование, а также на кабельные линии за счет уменьшения их сечения,



если решение принимается на этапе проектирования. Например, в данном случае возможно использование кабеля АПВВГ 4×10.

Однако следует отметить, что из-за высокой стоимости устройств КРМ, несмотря на вышесказанное, возможен отрицательный экономический эффект. К тому же требуется автоматическое подключение устройства КРМ на время пуска и автоматическое его отключение, так как в номинальном режиме работы наблюдается избыточная перекомпенсация и неоправданно высокое повышение потребляемого тока.

Выводы

Наиболее благоприятной является ситуация с двумя устройствами КРМ, одно из которых, рассчитанное для номинального режима, подключено постоянно, а второе, рассчитанное для пускового режима, подключается только во время пуска. Таким образом, применение КРМ во время пуска может быть полезным для повышения устойчивости, снижения падения напряжения, а также в случае необходимости замены двигателя на более мощный без замены другого электрооборудования. Применение устройства КРМ в установленном режиме может быть вполне оправданным в любом случае за счет снижения потребляемой мощности.

Для наиболее результативного поиска способа повышения энергоэффективности АД в процессе эксплуатации рекомендуется проводить мониторинг состояния оборудования с целью выявления влияния различных факторов на энергоэффективность двигателя и формировать информационную базу. Формирование информационной базы осуществляется на основе экспериментальных данных в процессе эксплуатации и периодического осмотра, способствует развитию и совершенствованию контроля состояния двигателей, позволяет определить пути повышения их энергоэффективности.

Анализируя работу асинхронных двигателей предприятия, необходимо выбирать мероприятия по повышению энергоэффективности, удовлетворяющие условиям практической значимости и экономичности. При этом необходимо оценивать не только возможность внедрения новых АД, но и модернизацию существующих, а также оптимизацию их работы в процессе эксплуатации. При проведении такого анализа важно составить перечень мероприятий с оценкой необходимых расходов, срока окупаемости, объемов энергетических и материальных затрат. Любое принимаемое решение должно быть технически и экономически обосновано.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Черникова Татьяна Макаровна, доктор техн. наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации
e-mail: chtm.oe@kuzstu.ru

Дабаров Владимир Викторович, кандидат техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации
e-mail: dvv.egpp@kuzstu.ru

Каченков Алексей Константинович, студент института энергетики
e-mail: alekseykachenkov@gmail.com

Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



Список литературы

1. Козярук А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т.218. С.261–269.
2. Армашова-Тельник Г.С., Бобович Т.А. Анализ преимущественных эффектов применения асинхронных электродвигателей в промышленном секторе // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. №. 2. С. 329-333.
3. Сафонов А.С. Повышение энергоэффективности электродвигателей [Электронный ресурс] // Электроцех. 2016. № 10. – URL: <https://panor.ru/articles/povyshenie-energoeffektivnosti-elektrodvigateley/71689.html#> (дата обращения 18.03.2024)
4. Падеев А.С., Кутарев А.М., Сурков Д.В. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург: ОГУ. 2016. С. 351-354.
5. Муравлева О. О. Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 7. С. 135-139.
6. Кулаковский Д.А., Сакович Е.А., Дышко М.С. Повышение энергоэффективности асинхронного электродвигателя за счет изменения параметров статорной обмотки [Электронный ресурс] // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск: БГАТУ, 2019. С. 169-171.– URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/10673> (дата обращения 18.03.2024.)
7. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей. Энергоэффективность электропривода [Электронный ресурс]. – URL: <https://cfrs.ru/different/povyshenie-energoeffektivnosti-asinhronnyh-dvigateli.html> (дата обращения 18.03.2024)
8. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р, Одинцов К.Э. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте, модернизации и утилизации двигателей асинхронных электроприводов // Вестник МагГТУ им.Г.И. Носова. 2018. Т.16, № 3. С. 145 – 159.
9. Золотых С.Ф., Рожков С.В., Лобанова С.В. Анализ методов повышения энергоэффективности электродвигателей в машиностроении // Известия ТулГТУ. Технические науки. 2013. В.12, ч.1. С. 130–135.
10. Рубцов А.Р. Особенности расчета и эффективности самовентиляции асинхронных двигателей [Электронный ресурс]// Вестник науки. 2023. Т.4. № 6 (63). С. 892–895. –URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54064693>(дата обращения 31.03.2024)
11. Мугалимов Р.Г. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2011. № 1. С. 59–63.
12. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 47–53
13. Сираев Ф.Ф., Хазиева Р.Т. Исследование частотно-регулируемого электропривода с асинхронным электродвигателем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т.18. № 2. С. 45–51.
14. Kerboua, A., Kelaiaia, R. Fault diagnosis in an asynchronous motor using three-dimensional convolutional neural network [Электронный ресурс] // Arab J Sci Eng 49, 3467–3485 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08025-y>
15. Dan S. Comprehensive energy-saving optimization model of asynchronous motor for voltage regulation based on static synchronous compensator [Электронный ресурс] // Energy Engineering 2022, 119(3), 1047-1057. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.015594>
16. Amal Lazar and Ashwani Kumar Chandel. Design of STATCOM for reactive power control using multilevel inverter // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1706 012111 DOI 10.1088/1742-6596/1706/1/012111.
17. Дабаров В. В. Система моделирования и оптимизации процесса компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618437.2012.



INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Tatiana M. Chernikova, Vladimir V. Dabarov, Alexei K. Kachenkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:
24 December 2023

Revised:
11 March 2024

Accepted:
25 March 2024

Keywords: asynchronous motor, energy efficiency, motor modernization, start-up modeling, reactive power compensation

Abstract.

The most important task when using asynchronous motors, including in the mining industry, is the choice of the most optimal way to increase their energy efficiency in order to reduce energy and economic cost. This paper presents the results of an analytical researches of the main directions for increasing the energy efficiency of asynchronous motors: the creation of new motors, modernization during repairs, work optimization when in service.

To solve the problem of increasing energy efficiency during operation, a simulation of engine starting was carried out using a reactive power compensation device. Researches were carried out on a BAO2-450LA4 electric motor with a power of 315 kW with a load of 1000 Nm on the shaft. The results of reducing the current consumption during starting the electric motor were obtained, which makes it possible to reduce the load on the electrical network and decrease the voltage drop, thereby increasing the stability and reliability of electrical equipment, as well as increasing its service life. Based on the results obtained, it was concluded that the most favorable situation is to use two reactive power compensation devices, one of which, designed for the nominal mode, is connected constantly, and the second one, designed for the starting mode, is connected during start-up only. The data obtained in the work can be used for the most effective search of the way the energy efficiency of asynchronous motors during operation.

For citation Chernikova T.M., Dabarov V.V., Kachenkov A.K. (2024) Increasing the energy efficiency of asynchronous motors, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 1(24):77. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-1-77-86, EDN: EVEQUJ

References

1. Kozyaruk A.E. Energoeffektivnye elektromekhanicheskie komplekсы gornodobyvayushchikh i transportnykh mashin // Zapiski Gornogo instituta. 2016. T.218. S.261–269.
2. Armashova-Tel'nik G.S., Bobovich T.A. Analiz preimushchestvennykh effektiv primeneniya asinkhronnykh elektrodvigatelay v promyshlennom sektore // Vestnik VGUIT. 2022. T. 84. №. 2. S. 329-333.
3. Safonov A.S. Povyshenie energoeffektivnosti elektrodvigatelay [Elektronnyy resurs] // Elektrotsekh. 2016. № 10. – URL: [https://panor.ru/articles/povyshenie-energoeffektivnosti-elektrodvigatelay/71689.html#\(data obrashcheniya 18.03.2024\)](https://panor.ru/articles/povyshenie-energoeffektivnosti-elektrodvigatelay/71689.html#(data obrashcheniya 18.03.2024))
4. Padeev A.S., Kutarev A.M., Surkov D.V. Povyshenie energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigateley // Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury : materialy Vseros. nauch.-metod. konf. Orenburg: OGU. 2016. S. 351-354.
5. Muravleva O. O. Energoeffektivnye asinkhronnye dvigateli dlya reguliruemogo elektroprivoda // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 308. № 7. S. 135-139.
6. Kulakovskiy D.A., Sakovich E.A., Dyshko M.S. Povyshenie energoeffektivnosti asinkhronnogo elektrodvigatelya za schet izmeneniya parametrov statornoy obmotki [Elektronnyy resurs] // Energoberezhenie - vazhneyshee uslovie innovatsionnogo razvitiya APK: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Minsk: BGATU, 2019. S. 169-171.– URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/10673> (data obrashcheniya 18.03.2024.)



7. Povyshenie energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigateley. Energoeffektivnost' elektroprivoda [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://cfrs.ru/different/povyshenie-energoeffektivnosti-asinhronnyh-dvigateli.html> (data obrashcheniya 18.03.2024)
8. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Povyshenie energoeffektivnosti i resursosberezhenie pri kapital'nom remonte, modernizatsii i utilizatsii dvigateley asinkhronnykh elektroprivodov // Vestnik MagGTU im.G.I. Nosova. 2018. T.16, № 3. S. 145 – 159.
9. Zolotyykh S.F., Rozhkov S.V., Lobanova S.V. Analiz metodov povysheniya energoeffektivnosti elektrodvigateley v mashinostroenii // Izvestiya TulGTU. Tekhnicheskie nauki. 2013. V.12, ch.1. S. 130–135.
10. Rubtsov A.R. Osobennosti rascheta i effektivnosti samoventilyatsii asinkhronnykh dvigateley [Elektronnyy resurs]// Vestnik nauki. 2023. T.4. № 6 (63). S. 892–895. –URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54064693>(data obrashcheniya 31.03.2024)
11. Mugalimov R.G. Kontsepsiya povysheniya energoeffektivnosti asinkhronnykh dvigateley i elektroprivodov na ikh osnove // Vestnik Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova. 2011. № 1. S. 59–63.
12. Kozyaruk A.E., Vasil'ev B.Yu. Metody i sredstva povysheniya energoeffektivnosti mashin i tekhnologiy s asinkhronnymi elektroprivodami // Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika». 2015. T. 15, № 1. S. 47–53
13. Siraev F.F., Khazieva R.T. Issledovanie chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s asinkhronnym elektrodvigatel'nyy // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2022. T.18. № 2. S. 45–51.
14. Kerboua, A., Kelaiaia, R. Fault diagnosis in an asynchronous motor using three-dimensional convolutional neural network [Elektronnyy resurs] // Arab J Sci Eng 49, 3467–3485 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08025-y>
15. Dan S. Somprehensive energy-saving optimization model of asynchronous motor for voltage regulation based on static synchronous compensator [Elektronnyy resurs] // Energy Engineering 2022, 119(3), 1047-1057. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.015594>
16. Amal Lazar and Ashwani Kumar Chandel. Design of STATCOM for reactive power control using multilevel inverter // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1706 012111 DOI 10.1088/1742-6596/1706/1/012111.
17. Dabarov V. V. Sistema modelirovaniya i optimizatsii protsessa kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v sisteme elektrosnabzheniya s elektrodvigatel'noy nagruzkoy / Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No2012618437.2012.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Tatiana M. Chernikova, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electric Drive and Automation
e-mail: chtm.oe@kuzstu.ru

Vladimir V. Dabarov, PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation
e-mail: dvv.egpp@kuzstu.ru

Alexey K. Kachenkov, student of the Institute of Energy
e-mail: alekseykachenkov@gmail.com

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

