

УДК 621.313.333

## Перспективы применения асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности в промышленных электроприводах

Р.Г. Мугалимов, А.Р. Мугалимова, М.Р. Мугалимова  
ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Российская Федерация  
E-mail: energosberegenie@rambler.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время в промышленных электроприводах применяются традиционные асинхронные двигатели, энергетические показатели которых невысоки. Повышение энергоэффективности асинхронных электроприводов является актуальной технико-экономической проблемой всех отраслей промышленности. Для решения этой проблемы разработаны, исследованы, изготовлены и испытаны на практике энергосберегающие асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности.

**Материалы и методы исследования:** Использованы результаты практических испытаний и математического моделирования. Результаты обрабатывались методами теории вероятностей и математической статистики с использованием корреляционного и регрессионного анализов.

**Результаты:** Дан сравнительный анализ конструктивных отличий энергосберегающих асинхронных двигателей от традиционных асинхронных двигателей. Представлены результаты практических испытаний энергосберегающих асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности.

**Выводы:** Расчеты и эксперименты, проведенные на реальных электроприводах, созданных на основе энергосберегающих асинхронных двигателей, позволяют утверждать: коэффициент загрузки трансформаторов снижается на 13 %; потери электрической мощности в системах электроснабжения и электроприводов уменьшаются на 19 %; экономия установленной мощности составляет 310–750 кВт·час в год. Таким образом, приводы на основе предлагаемых асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности являются энергосберегающими. На основе энергосберегающих асинхронных двигателей могут быть созданы регулируемые электроприводы по системам ТРН-ЭАД, ПЧ-ЭАД.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, реактивная мощность, электропривод.

## Perspectives of Asynchronous Motors Application with Individual Compensation of Reactive Power in Industrial Electric Drives

R.G. Mugalimov, A.R. Mugalimova, Candidates of Engineering, M.R. Mugalimova, Engineer  
Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education "Magnitogorsk State Technical University", Magnitogorsk, Russian Federation  
E-mail: energosberegenie@rambler.ru

### Abstract

**Background:** Nowadays, the traditional asynchronous motors with non-high energy data are used in industrial electrical drives. Improving the energy efficiency of asynchronous electric drives is relevant technical and economic problem in all industries. To solve this problem the asynchronous motors with individual reactive power compensation are developed, researched, manufactured and tested in practice.

**Materials and methods:** The authors used the results of the practical tests and mathematical modeling. The results were processed using the probability theory and mathematical statistics according to correlation and regression analyses.

**Results:** The authors describe the comparative analysis of the specific differences between energy saving asynchronous motors and traditional asynchronous motors. The test results of the energy saving asynchronous motors with individual reactive power compensation are given.

**Conclusions:** Calculations and experiments conducted on real electric drives that are based on energy saving asynchronous motors allow to confirm that the transformer load factor decreases by 13%, the losses of electrical power supply systems and electric drives are reduced by 19%, the total capacity economy is 310–750 kW per year. Drives based on the proposed asynchronous motors with individual reactive power compensation are energy saving. Based on energy-saving asynchronous motors the controlled electric drives with thyristor converter can be developed.

**Key words:** asynchronous motor, reactive power, electric drive.

Повышение энергоэффективности технологий, а также рабочих машин и механизмов, их реализующих, является актуальной технико-экономической проблемой всех отраслей промышленности. До 80–90 % рабочих машин и

механизмов промышленных предприятий, строительства, сельского и жилищно-коммунального хозяйств приводятся в движение традиционными асинхронными двигателями (ТАД) с номинальным напряжением до

1000 В. Электроприводы на основе ТАД потребляют не менее 65 % всей вырабатываемой электроэнергии. Около 70 % электроприводов на основе ТАД являются нерегулируемыми, поэтому их энергоэффективность определяется, преимущественно, рабочими характеристиками двигателя.

При известных преимуществах электроприводов на основе ТАД одним из главных их недостатков является сравнительно невысокий энергетический КПД ( $\eta_{эн}$ ), определяемый произведением электрического КПД ( $\eta$ ) и коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) двигателя [1]. Даже при нагрузках, близких к номинальным, при которых электрический КПД ТАД находится в диапазоне 70–92 %, а коэффициент мощности – 0,75–0,9, наилучший энергетический КПД электроприводов не превосходит 52–83 %. То есть 17–48 % потребляемой электрической энергии преобразуется в тепловую и рассеивается в окружающей среде. Это снижает энергоэффективность преобразования электрической энергии в механическую и, в итоге, конкурентную способность выпускаемой продукции.

В ООО «Научно-исследовательское и опытно-конструкторское бюро “Энергосбережение”» (г. Магнитогорск) совместно с ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ООО «МГТУ-Энергосбережение+» разработаны, исследованы, изготовлены и испытаны на практике энергосберегающие асинхронные двигатели (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности [2, 3, 4].

При электрическом КПД ЭАД, равным КПД ТАД, энергетический КПД ЭАД находится в диапазоне 70–92 %, что на 9–18 % выше, чем у ТАД. Это достигается за счет повышения  $\cos\varphi$  асинхронного двигателя до 0,99–1,0. Последнее обеспечивается конструктивным изменением обмотки статора, применением трехфазного конденсатора определенной емкости, схемами соединения обмоток друг с другом и конденсатором и использованием явления феррорезонанса токов в электромагнитной системе двигателя [5].

Конструктивные отличия ЭАД от ТАД заключаются в том, что в пазах статора ЭАД размещаются две трехфазные обмотки. Одна из обмоток, называемая рабочей (РО), подключается к источнику питания (ИП), а другая, называемая компенсационной (КО), – к трехфазному конденсатору (С) регламентированной емкости. Параметры обмоток и емкость конденсатора определяются при проектировании электромагнитной системы ЭАД по методике, изложенной, например, в [6, 7]. Отличительной особенностью методики проектирования ЭАД является электромагнитный расчет, выполняемый в два этапа. На первом этапе по известной методике проектирования асинхронных двигателей по критерию минимума затрат рассчитывается

ТАД [8]. На втором этапе расчета, используя полученные результаты первого этапа и особенности конструкции ЭАД, осуществляется расчет по критерию максимума энергетического КПД двигателя.

Создание ЭАД возможно или на существующих электромашиностроительных заводах, или на электроремонтных предприятиях, цехах и участках путем реконструкции ТАД при их капитальном ремонте, используя имеющиеся технологии, материалы и оборудование.

Перспективы применения ЭАД в промышленных электроприводах определяются следующими их преимуществами:

1. Рабочие и механические характеристики ЭАД превосходят аналогичные характеристики ТАД. Для сравнения, на рис. 1 представлены зависимости  $\cos\varphi$ ,  $\eta_{эн} = f(P_2)$  и естественные механические характеристики  $n = f(M)$  ТАД и ЭАД типа SMR55, созданного путем реконструкции ТАД при капитальном ремонте.

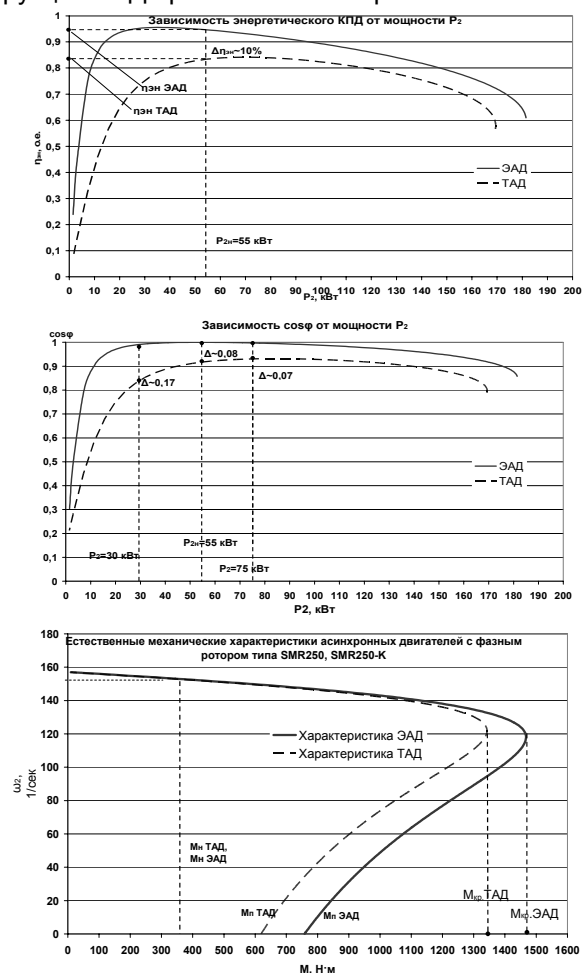


Рис. 1. Зависимости  $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\eta_{эн} = f(P_2)$  и  $n = f(M)$  ТАД и ЭАД типа SMR55

2. Электропривод на основе ЭАД в статических режимах работы практически не потребляет из электросети реактивный ток (реактивную мощность), в результате этого уменьшаются потребляемые полные ток и мощность. Разность начальных фаз питающего напряжения и

потребляемого тока (сдвиг фаз) практически равна нулю, коэффициент мощности асинхронного электропривода равен единице, энергетический КПД равен электрическому КПД. На рис. 2 приведены осциллограммы токов, напряжений и мощностей электроприводов при установившихся режимах работы одинаковых промышленных механизмов, созданных на основе ТАД и ЭАД типа SMR 55.

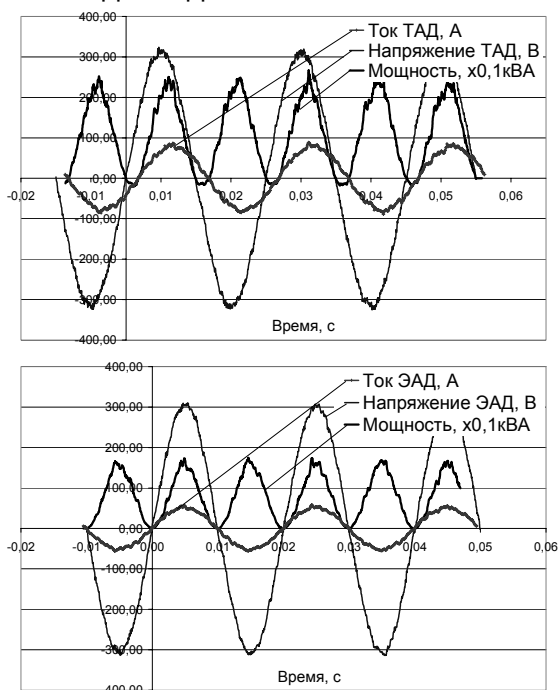


Рис. 2. Осциллограммы токов, напряжений и мощностей электроприводов на основе ТАД и ЭАД типа SMR 55 под нагрузкой

3. Электропривод на основе ЭАД позволяет при пуске в работу снизить динамические механические и электромагнитные нагрузки в рабочей машине и собственно в электродвигателе, а также уменьшить электрическую энергию, потребляемую при пуске. На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений, токов и мощностей при пуске электроприводов на основе ЭАД и ТАД типа SMR55 при одинаковых системах управления.

4. Нерегулируемые электроприводы на основе ЭАД с короткозамкнутым ротором позволяют осуществлять двух- или трехступенчатые пуски с применением простейшей коммутационной аппаратуры. Это достигается путем комбинационных электрических соединений рабочей, компенсационной обмоток и конденсатора.

Например, на рис. 4 приведена одна из простейших электрических схем, реализующая двухступенчатый пуск ЭАД с короткозамкнутым ротором ОР. Пуск реализуется или в функции времени, или в функции тока рабочей обмотки. Первая ступень пуска обеспечивается включением коммутационного устройства K1 при отключенном коммутационном устройстве K2,

вторая ступень – включением K2 при отключенном K1. В приведенной схеме пусковой ток ЭАД уменьшается в  $(1 + W_{КО}/W_{РО})$  раз, где  $W_{КО}$ ,  $W_{РО}$  – числа витков соответствующих обмоток статора. Дополнительная ступень пуска может быть обеспечена путем переключения последовательно соединенных пофазно КО и РО из схемы «звезда» в схему «треугольник».

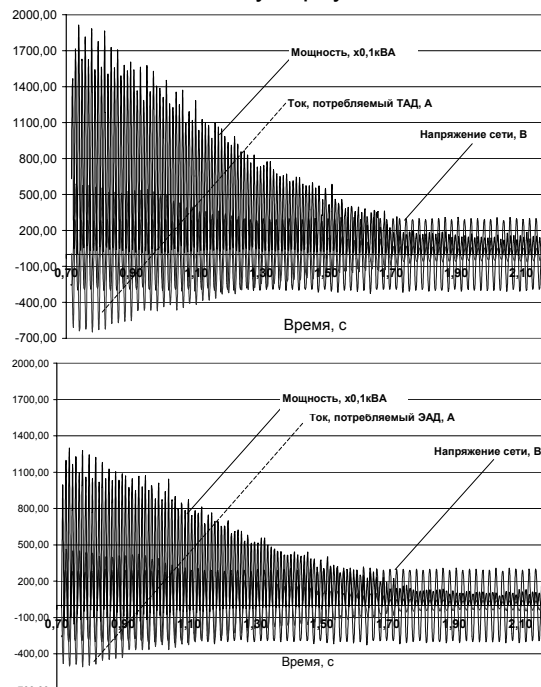


Рис. 3. Осциллограммы напряжений, токов и энергии при пуске электроприводов на основе ЭАД и ТАД типа SMR55

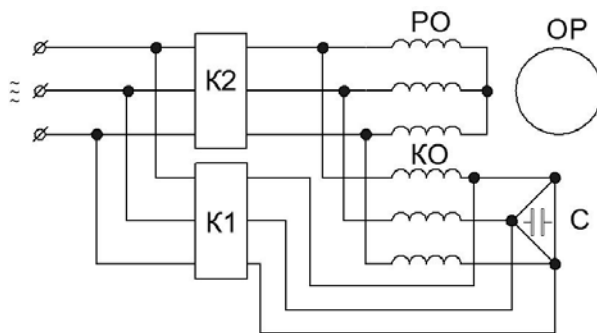


Рис. 4. Электрическая схема двухступенчатого пуска ЭАД с короткозамкнутым ротором

5. Конструкция ЭАД позволяет существенно увеличить число электромагнитных схем (ЭМС) силовой части электропривода. Например, обмотки статора могут подключаться к первому трехфазному источнику питания (ИП1) или ко второму источнику питания (ИП2), или одна из обмоток к ИП1, а другая к ИП2. ЭАД может работать с конденсатором или без конденсатора. Обмотки статора могут быть соединены друг с другом или потенциально, или через электромагнитное поле. Пофазно РО и КО могут соединяться последовательно согласно или параллельно одноименными началами или концами. Таким образом, электропривод на ос-

нове ЭАД, имеющий пять активных конструктивных элементов (РО, КО, ИП1, ИП2, С), могут иметь ЭМС, число  $N_{ЭМС}$  которых определяется выражением  $N_{ЭМС} = 2^5 = 32$ . Из этих 32-х комбинаций ЭМС не имеют практического применения ЭМС, не содержащие хотя бы один источник питания и одну из обмоток статора, так как без ИП1 или ИП2 и без РО или КО невозможно преобразование электрической энергии в механическую. С учетом этого число реально реализуемых ЭМС равно 28. Каждая электромагнитная схема электропривода позволяет получить индивидуальные рабочие и механические характеристики, что дает возможность проектировщику выбрать наиболее рациональную (эффективную) по заданному критерию схему. Кроме того, эти возможности ЭАД позволяют создавать проблемно-ориентированные электроприводы.

6. Применение в электроприводах промышленных установок ЭАД вместо ТАД уменьшает потери электрической энергии в системе электроснабжения и силовой части электроприводов. Экономия электрической энергии определяется известным выражением

$$\Delta W = (\Delta P_{ТАД} - \Delta P_{ЭАД}) T \cdot K_{и},$$

где  $\Delta P_{ТАД}$ ,  $\Delta P_{ЭАД}$  – потери электрической мощности в системах электроснабжения и электроприводов с ТАД и ЭАД соответственно;  $T$  – время работы электроприводов в течение года;  $K_{и}$  – коэффициент использования электроприводов.

Потери электрической мощности в системах электроснабжения и электроприводов складываются из потерь мощности в асинхронном двигателе  $\Delta P_{АД}$ , в кабельной линии  $\Delta P_{К}$  и силовом трансформаторе  $\Delta P_{Т}$ . Потери мощности в системе шин 0,4 кВ ТП из-за ее малости не учитываются. Перечисленные потери электрической мощности для рассмотренных вариантов могут быть определены следующими выражениями:

– для электроприводов на основе ТАД

$$\Delta P_{ТАД} = N(\Delta P_{АД} + \Delta P_{К} + \Delta P_{Т}) = N \left[ P_{2н} (1 - \eta_{нТАД}) + m l_{нТАД}^2 R_{(75)} + \frac{P_{2н}}{\cos \varphi_{нТАД}} (1 - \eta_{тТАД}) \right];$$

– для электроприводов на основе ЭАД

$$\Delta P_{ЭАД} = N \left[ P_{2н} (1 - \eta_{нЭАД}) + m l_{нЭАД}^2 R_{(75)} + \frac{P_{2н}}{\cos \varphi_{нЭАД}} (1 - \eta_{тЭАД}) \right],$$

где  $N$  – число электроприводов.

Коэффициент полезного действия трансформатора при работе электроприводов

на основе ТАД и ЭАД рассчитывается соответственно:

$$\eta_{тТАД} = \frac{\beta_{тТАД} S_{н} \cos \varphi_{нТАД}}{\beta_{тТАД} S_{н} \cos \varphi_{нТАД} + \beta_{тЭАД}^2 P_{К} + P_{0}};$$

$$\eta_{тЭАД} = \frac{\beta_{тЭАД} S_{н} \cos \varphi_{нЭАД}}{\beta_{тЭАД} S_{н} \cos \varphi_{нЭАД} + \beta_{тЭАД}^2 P_{К} + P_{0}};$$

$$\text{где } \beta_{тТАД} = \frac{N P_{2н}}{\cos \varphi_{нТАД} S_{н}}; \beta_{тЭАД} = \frac{N P_{2н}}{\cos \varphi_{нЭАД} S_{н}} -$$

коэффициенты загрузки трансформатора до и после реконструкции электроприводов.

Расчеты и эксперименты, проведенные на реальных электроприводах, созданных на основе ЭАД, при прежних режимах работы механизмов, позволяют утверждать:

- коэффициент загрузки трансформаторов снижается на 13 %;
- потери электрической мощности в системах электроснабжения и электроприводов уменьшаются на 19 %;
- каждый киловатт установленной мощности реконструированного ТАД в ЭАД позволяет в зависимости от режимов работы электропривода экономить в год 310–750 кВт·ч.

В перспективе на основе ЭАД могут быть созданы регулируемые электроприводы по системам ТРН-ЭАД, ПЧ-ЭАД [9].

#### Список литературы

1. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе // Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1989. – 129 с.
2. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Энергосберегающий электропривод нефтяного станка-качалки на основе асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические преобразователи энергии: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: ТПУ, 2005. – С. 196–199.
3. Мугалимов Р.Г. Моделирование энергоэффективности электроприводов насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Приводная техника. – 2011. – № 1. – С. 3–9.
4. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей // Вестник МГТУ. – 2011. – № 2. – С. 70–75.
5. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 Н02 к 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / А.Л. Савицкий, Р.Г. Мугалимов, Л.Д. Савицкая // Открытия. Изобретения. – 1998. – № 15. – 8 с.
6. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. К проектированию энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые энергомеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 77–80.
7. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Метод и алгоритм проектирования компенсированного энергосберегающего асинхронного двигателя // Сб. мат-лов V Междунар. (XVI Всерос.) науч. конф., 18–21 сентября 2007 г. – СПб., 2007. – С. 281–284.
8. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

9. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе. – Магнитогорск: ФГБОУВПО «МГТУ», 2011. – 250 с.

#### References

1. Il'inskiy, N.F. Rozhankovskiy, Yu.V., Gornov, A.O. Energoberezhenie v elektroprivode [Energy saving in electric drive]. *Energoberegayushchaya tekhnologiya elektrosnabzheniya narodnogo khozyaystva* [Energy saving technology of electric power supply in national economy]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. 129 p.

2. Mugalimov, R.G., Mugalimova, A.R. Energoberegayushchiy elektroprivod neftyanogo stanka-kachalki na osnove asinkhronnogo dvigatelya s individual'noy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti [Energy saving Electric Drive of Oil Conventional Pumping Unit based on Asynchronous Motors with Individual Reactive Power Compensation]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii»* [Electromechanical Energy Converters: Materials of Scientific and Technical Conference]. Tomsk: TPU, 2005, pp. 196–199.

3. Mugalimov, R.G. *Privodnaya tekhnika*, 2011, no. 1, pp. 3–9.

4. Mugalimov, R.G., Mugalimova, A.R. *Vestnik MGTU*, 2011, no. 2, pp. 70–75.

5. Savitskiy, A.L., Mugalimov, R.G., Savitskaya, L.D. *Asinkhronnaya kompensirovannaya elektricheskaya mashina* [Asynchronous Compensate Electrical Machine]. Patent RF, no. 2112307, 1998.

6. Mugalimov, R.G., Mugalimova, A.R. K proektirovaniyu energoberegayushchego asinkhronnogo dvigatelya s individual'noy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti [On Designing the Asynchronous Motors with Individual Reactive Power Compensation]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektromekhanicheskie i elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravlyaemye energomekhanicheskie sistemy»* [Works of the IIIrd Scientific and Technical Conference of Electromechanical and Electromagnetic Energy Transducers and Controlled Electromechanical Systems]. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2007, pp. 77–80.

7. Mugalimov, R.G., Kosmatov, V.I., Mugalimova, A.R. Metod i algoritm proektirovaniya kompensirovannogo energoberegayushchego asinkhronnogo dvigatelya [Designing Method and Algorithm of Compensate Energy Saving Asynchronous Motor]. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoy (XVI Vserossiyskoy) nauchnoy konferentsii* [Collected Works of the Vth International (the XVI All-Russian) Scientific Conference, September 18–21, 2007]. Saint-Petersburg, 2007, pp. 281–284.

8. Gurin, Ya.S., Kuznetsov, B.I. *Proektirovanie seriy elektricheskikh mashin* [Design series of electrical machines]. Moscow, Energiya, 1978. 480 p.

9. Mugalimov, R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individual'noy kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction motors with individual compensation of reactive power and electric based on them]. Magnitogorsk: FGBOU VPO «MGTU», 2011. 250 p.

*Мугалимов Риф Гарифович*,  
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
кандидат технических наук,  
e-mail: energoberegenie@rambler.ru

*Мугалимова Алия Рифовна*,  
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
кандидат технических наук,  
e-mail: energoberegenie@rambler.ru

*Мугалимова Маргарита Рифовна*,  
ООО НИИОКБ «Энергосбережение»,  
инженер,  
e-mail: energoberegenie@rambler.ru