

# Тенденции и новые вызовы в области энергоэффективности электрических машин

С. А. Галунин<sup>1</sup>, М. А. Ситников<sup>2</sup>, А. З. Лобович<sup>3</sup>, А. А. Дмитроченко<sup>4</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>sagalunin@etu.ru, <sup>2</sup>maximys.97@mail.ru, <sup>3</sup>alejandra.lobovich7@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена обзору современных вызовов и изменений в области как законодательной базы, так и в вопросах обеспечения энергоэффективности электрических машин. Исследованы основные методы повышения эффективности электромеханических преобразователей и новые виды материалов, используемых в машинах этого типа. Особое внимание уделяется экономическим последствиям и причинам перехода на высокоэнергоэффективные электрические машины, а также внедрению специальных электрических машин в серийное и массовое производство.

**Ключевые слова:** класс энергоэффективности; коэффициент полезного действия; электродвигатель; энергоэффективность

## I. ВВЕДЕНИЕ

Энергетика играет центральную роль в жизни каждого человека и развитии мировой экономики. Рост численности населения, повышение благосостояния стран и граждан приводят к наращиванию производства товаров, что увеличивает потребность в электричестве.

На конец 2020 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 245,31 ГВт [1].

Выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС России в 2020 году составила 1 047,03 млрд кВт·ч. Потребление электроэнергии в 2020 году составило 1 033,72 млрд кВт·ч.

Годовой максимум потребления мощности ЕЭС России составил 150 434 МВт. При этом нагрузка электростанций ЕЭС России составила 151 962 МВт.

На рис. 1 приводится мировая статистика по энергопотреблению. Как видно из графика, каждый год прирост энергопотребления составляет примерно 1 млрд кВт·час.

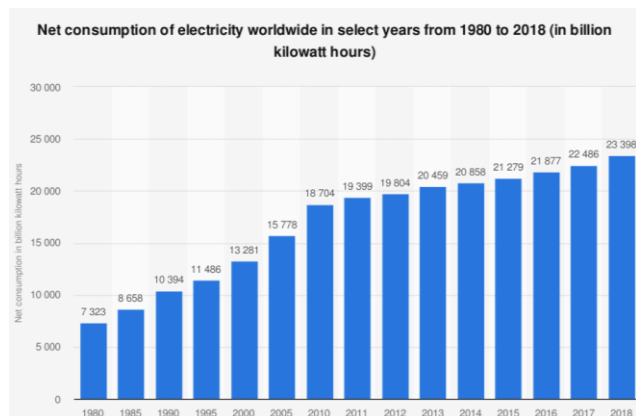


Рис. 1. Мировое энергопотребление

Суть глобальной проблемы, стоящей перед современной человеческой цивилизацией – противоречие

между все возрастающими потребностями человечества в ресурсах и уменьшением их запасов. При этом прежде всего имеются в виду минеральные и энергетические ресурсы [2].

В связи с тем, что в последние десятилетия по объективным причинам постоянно проводится аудит как природных запасов полезных ископаемых, так и воздействия цивилизации на экосистемы Земли, большинство стран пришли к пониманию, что экономические и экологические соображения требуют всемерной и повсеместной экономии энергоресурсов. Такая экономия позволяет уменьшить расходы на производство продукции, сохранить энергоресурсы для будущих поколений, уменьшить загрязнение окружающей среды. Возможные пути решения этой проблемы:

- создание и использование ресурсосберегающих промышленных технологий;
- полное извлечение полезных ископаемых из недр Земли (например, коэффициент извлечения нефти при современных способах добычи составляет 0,25–0,45);
- использование вторичного сырья [2].

Таким образом, на фоне таких общемировых тенденций, как глобализация, урбанизация, демографические изменения, климатические изменения, можно выделить ряд острых проблем в области энергетики: истощающиеся запасы, повышение цен на энергию, увеличение энергопотребления, увеличение загрязнения окружающей среды (увеличение выбросов углекислого газа).

В 2020 году была принята Энергетическая стратегия России до 2035 года. Целью новой стратегии определено достижение структурно и качественно нового состояния энергетики, максимально содействующего динамичному социально-экономическому развитию и обеспечению национальной безопасности Российской Федерации. Основными направлениями данной стратегии стали: цифровая трансформация, оптимизация энергетической инфраструктуры и уменьшение негативного воздействия отраслей топливно-энергетического комплекса на окружающую среду. Для этого в Энергетической стратегии предусматривается: повышение эффективности, надежности, доступности и качества удовлетворения внутреннего спроса на все энергоресурсы, технологии и услуги в сфере энергетики.

На долю электроприводных систем и электродвигателей приходится порядка 70% от всей потребляемой промышленностью электроэнергии, поэтому увеличение энергоэффективности двигателя с учетом условий его применения – необходимая задача в

рамках реализации энергетической стратегии [4]. В распоряжении Правительства РФ от 27.12.2010 №2446-р введены планы по обеспечению энергоэффективности. В данном распоряжении приводятся планы по замене старых электродвигателей на энергоэффективные, и первичная задача состояла в замене 48% существующих двигателей на энергоэффективные, а 28% на двигатели повышенной энергоэффективности.

Следует также отметить, что именно комплексный подход является ключом к устойчивой энергоэффективности, то есть наибольший эффект приносит оптимизация на всех уровнях – вклад от использования энергоэффективного двигателя может быть дополнительно увеличен, если произвести модернизацию полной системы, а также адаптировать ее для конкретного процесса.

## II. ПОНЯТИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Под энергоэффективностью понимается – совокупность характеристик, отражающих отношение полезного эффекта использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции или технологическому процессу [5].

Электродвигатель, в процессе преобразования энергии, часть теряет в виде тепла. Величина потерь электродвигателя определяется его конструктивными параметрами, а также материалами, которые влияют на электромагнитные параметры электромеханического преобразователя.

Основным показателем энергоэффективности электродвигателя является его коэффициент полезного действия (далее КПД). Под энергоэффективностью электромеханического преобразователя следует понимать кривую КПД по отношению к полезной мощности, на которую работает двигатель.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1},$$

где  $P_2$  – полезная мощность на валу электродвигателя,  $P_1$  – активная мощность, потребляемая электродвигателем из сети,  $\Delta P$  – суммарные потери, возникающие в электродвигателе.

## III. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СТАНДАРТОВ

На настоящий момент внедрение энергоэффективных двигателей позволяет: повысить КПД двигателя на 1–10%; увеличить надежность работы двигателя; уменьшить время простоев и затраты на техническое обслуживание; повысить устойчивость двигателя к тепловым нагрузкам; улучшить перегрузочную способность; повысить устойчивость двигателя к различным нарушениям эксплуатационных условий: понижению или повышенному напряжению, несбалансированности фаз и т.д.; увеличить коэффициент мощности; снизить уровень шума [5].

Важным инструментом для планомерного повышения рабочих свойств и ускорения внедрения новых энергоэффективных систем являются международные и государственные стандарты, вводящие энергетическую классификацию оборудования, устанавливающие границы классов эффективности, нормирующие процедуру испытаний для определения принадлежности

оборудования к одному из этих классов. В ряде стран (Европейский Союз, Китай, Япония, США) такие стандарты являются основной подзаконных актов, требующих обязательного использования энергосберегающего оборудования во вновь вводимых установках и зданиях, а также дающих при использовании такого оборудования определенные льготы [6].

С начала 2000 гг. постепенно вводятся стандарты энергоэффективности для электродвигателей и систем электропривода. В мире имеется несколько глобальных комиссий по стандартизации электротехнической продукции, имеющих свою систему стандартизации. Среди наиболее значительных можно назвать стандарты международной энергетической комиссии (МЭК, IEC) и стандарты NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Стандарты NEMA действуют, главным образом, в США [6].

С 1 июля 2021 года введён новый международный стандарт IEC 60034-30. Стандарт МЭК 60034-30-1 устанавливает классы энергоэффективности (IE классы) для трехфазных и однофазных двигателей переменного тока с прямым питанием от сети. Действие стандарта распространяется на асинхронные и синхронно-реактивные двигатели [6].

В прошлом для определения энергоэффективности двигателя были составлены глобально применимые классы эффективности и ряд нормативных актов по энергоэффективности, которые обобщены под названием экологического проектирования или нормативного акта Европейского регулятора. Классификация эффективности основана на международном стандарте IEC/EN 60034-30-1, который определяет классы от IE0 до IE4 для электродвигателей.

Предыдущее постановление 640/2009 / EG будет заменено новым постановлением (ЕС) 1781/2019. Это новое правило определяет минимальные требования для двигателей, и называются MEPS (Minimum Efficiency Performance Standarts). Впервые в истории они также включают четкие правила для преобразователей, а также требования класса эффективности IE4 для электродвигателей. На рис. 2 приводится эволюция требования к классам энергоэффективности для электродвигателей различной мощности.

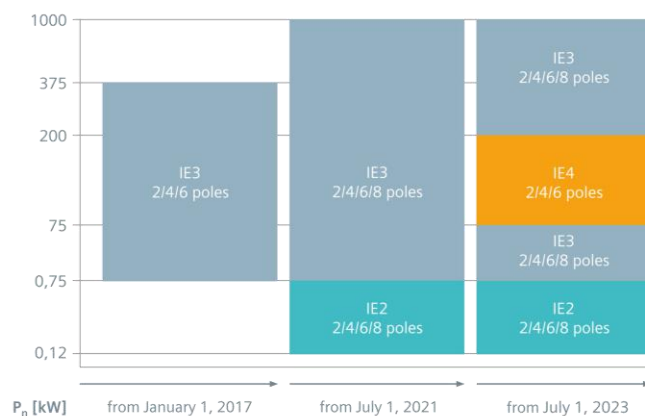


Рис. 2. Эволюция требований энергоэффективности

На данный момент определены 5 классов энергоэффективности [7]:

- IE1 (standard efficiency),
- IE2 (high efficiency),

IE3 (premium efficiency),  
 IE4 (super-premium efficiency),  
 IE5 (ultra-premium efficiency).

Рис. 2 показывает границы различных IE классов двигателей различной мощности [8].

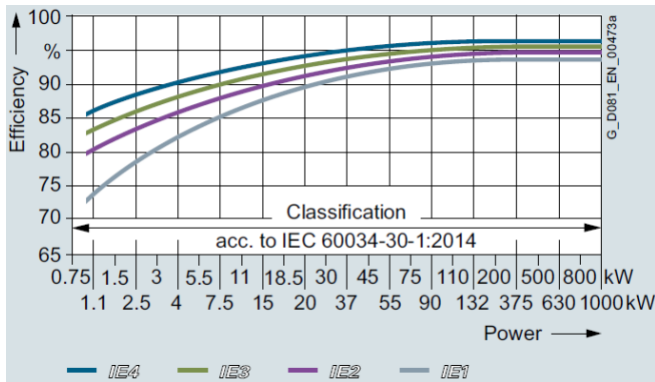


Рис. 3. Границы классов энергоэффективности, согласно [7]

На территории Европейского Союза действует EU Directives 640/2009 и 2009/125/EC. На территории РФ, как части Евразийского экономического союза, действует Технический регламент Евразийского экономического союза «О требованиях к энергетической эффективности потребляющих устройств». В рамках обозначенных документов на территории обоих союзов устанавливаются понятия минимальной энергоэффективности устройств в соответствии от их подключения к сети (напрямую или через преобразователь частоты), а также от вырабатываемой активной мощности. На рис. 4 и 5 приводится эволюция требований к классам энергоэффективности для европейских стран и Российской Федерации.

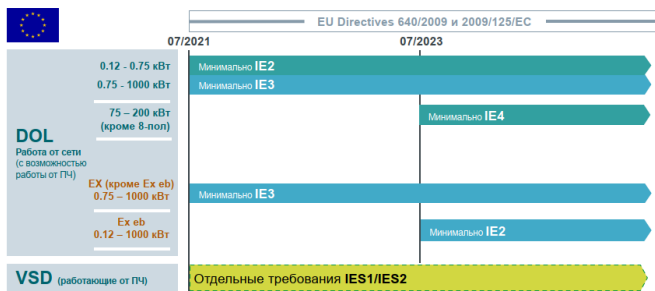


Рис. 4. Эволюция требований к энергоэффективности двигателей в ЕС

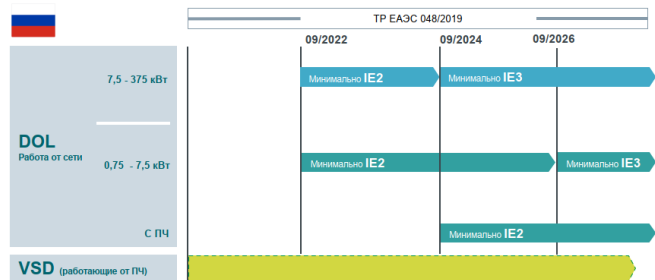


Рис. 5. Эволюция требований к энергоэффективности двигателей в РФ

Одним из наиболее перспективных решений в области энергоэффективных приводов считается применение синхронных реактивных двигателей. Синхронно-реактивная система привода обладает большим запасом мощности по сравнению с аналогичным асинхронным

приводом в тех габаритных размерах. Она обеспечивает очень высокий уровень эффективности в диапазоне полных и частичных нагрузок по сравнению с традиционной асинхронной технологией, сохраняя при этом высокую удельную мощность и динамические характеристики. Это позволяет снизить затраты и экономить энергию.

Система привода с реактивным двигателем обеспечивает максимальную (сравнимую с классом IE4) энергоэффективность в номинальной рабочей точке и повышает эффективность в диапазоне частичных нагрузок по сравнению с асинхронными двигателями, работающими от преобразователя частоты. К недостаткам электропривода с синхронным реактивным двигателем можно отнести невозможность работы данного двигателя без преобразователя частоты, так как этот двигатель не является самозапускаемым. В связи с работой от преобразователя частоты, а также отсутствием обмотки возбуждения на роторе данные двигатели имеют несколько меньший коэффициент мощности по сравнению с асинхронным аналогом.

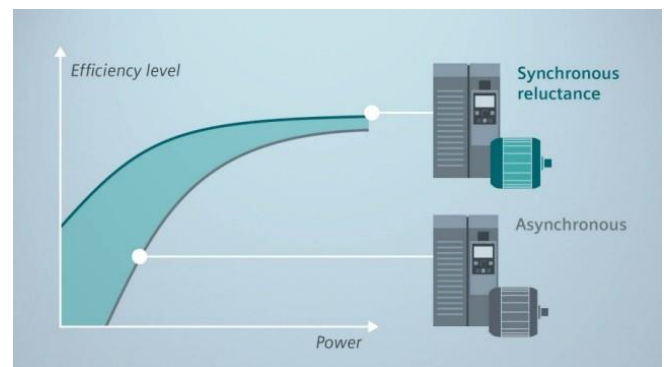


Рис. 6. Сравнение асинхронного и синхронно-реактивного двигателя

#### IV. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

1. Использование аддитивных технологий. Возможность использования широкого спектра материалов: пластика, керамики, металлических сплавов и даже органических/биоматериалов ставит аддитивные технологии в авангарде современных технологий производства. В настоящее время уже имеется опыт изготовления катушек/обмоток, элементов электрической изоляции, блоков магнитных сердечников статора/ротора, постоянных магнитов, корпуса двигателя, конструктивных элементов на основе использования новых материалов и технологий. Однако, следует отметить относительно низкую технологическую зрелость данной технологии – так, например, магнитные или обмоточные материалы обладают несколько худшими физическими свойствами по сравнению с существующими решениями. Тем не менее, исследования и разработки в этой области быстро прогрессируют. [8]

2. Использование принципиально нового типа изоляции. В процессе работы от преобразователя частоты в двигателе возникают дополнительные потери в обмотке, вызванные ШИМ-модуляцией, однако именно изоляция является одним из важнейших узлов, определяющих долговечность электрической машины. Компания Siemens, срок службы двигателей которой превышает 25 лет, в данный момент использует изоляцию DURIGNIT, основными достоинствами которой являются механическая прочность и виброустойчивость,

химическая стойкость, высокая электрическая прочность (а также устойчивость к пикам и броскам тока и напряжения, вызванных несинусоидальностью ШИМ), расчет на использование F/B. [9]

3. Улучшение аэродинамических свойств для снижения вентиляционных потерь путем оптимизации геометрии и топологии ротора.

4. Увеличение точности обработки и изготовления узлов и деталей двигателя, а также увеличение точности системы управления электрическим приводом за счёт внедрения в работу высокочувствительных датчиков и микроконтроллеров. Микроконтроллеры, применяемые к электромеханике, должны обладать такими характеристиками, как достаточное количество модулей захвата (CAP), большое статическое ОЗУ, несколько каналов 12-разрядных АЦП, несколько модулей ШИМ.

5. Использование двигателя совместно с частотным преобразователем, который позволяет регулировать коэффициент мощности машины, а также наличие ПЧ позволяет использовать синхронные реактивные двигатели, класс энергоэффективности которых может достигать IE5.

6. Использование подшипников более высокого класса (NSK, SKF), выше 6, расчетный срок службы которых составляет более 40000 часов [10]. Альтернативой к использованию традиционных подшипников может стать внедрение магнитных подшипников, которые сейчас используются только в высокоскоростных электрических машинах. Недостатки в магнитной системе подшипников могут заключаться в сложной системе управления электромагнитами в таких системах.

Еще одним важным параметром, характеризующим энергоэффективность электродвигателя, является коэффициент нагрузки  $\cos\phi$ . Коэффициент нагрузки определяет долю активной мощности в полной, поступающей в электродвигатель из сети.

$$\cos\phi = \frac{P_1}{S},$$

где S – полная мощность.

При этом только активная мощность преобразуется в полезную мощность на валу, реактивная мощность нужна лишь для создания электромагнитного поля. Реактивная мощность поступает в двигатель и возвращается обратно в сеть с удвоенной частотой сети 2f, создавая тем самым в подводящих линиях дополнительные потери. Таким образом, система, состоящая из двигателей с высокими значениями КПД, но низкими значениями  $\cos\phi$ , не может считаться энергоэффективной. Однако в системах электропривода с преобразователем частоты имеется возможность с помощью данного преобразователя корректировать коэффициент мощности приводной системы.

## V. СТОИМОСТЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Говоря о переходе к более энергоэффективным двигателям, несомненно, встаёт вопрос цены. Более высокая цена на данные двигатели может быть обусловлена удорожанием цены на материалы, такие как медь и сталь, а поскольку увеличение доли активных материалов как раз является одним из способов

увеличения энергоэффективности, это будет способствовать увеличению цены на данные двигатели.

Также увеличение цены возможно благодаря большим затратам на обработку и более сложной технологии производства материалов, как например оптимизация формы зубцовой зоны магнитопровода и конструкции обмоток [11].

Также следует отметить, что габариты машины могут остаться неизменными, однако энергоэффективность её будет выше, соответственно увеличение цены обусловлено тем, что при замене на более энергоэффективную машину, с большим КПД, нет необходимости увеличивать пространство под двигатель.

Были проведены сравнения двух двигателей Siemens линейки SIMOTICS 1LE1501-2CB23-4AB4 класс энергоэффективности которого IE2 и SIMOTICS 1LE1503-2CB23-4AB4 класс энергоэффективности IE3. Габариты данных двигателей были идентичны, однако масса и момент инерции двигателя класс IE3 были больше. При сравнении двигателя SIMOTICS 1LE1502-2CB23-4AB4, класс энергоэффективности которого IE1, с тем же двигателем класса IE3 были получены аналогичные данные. Массы двигателей и моменты инерции отличались пропорционально, следовательно, можно предположить, что в двигателе класса IE3 ротор имел большую массу. Увеличение массы ротора осуществляется увеличением количества стали, из которой состоит ротор, а соответственно увеличивается и цена на данный двигатель [12].

В сравнении с двигателем более низкого класса энергоэффективности данный двигатель сможет себя окупить и сэкономить денежные средства в обозримом будущем.

## VI. СРАВНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ВЫГОДЫ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время увеличивается число компаний, которые стремятся перейти на «зелёную энергетику».

Более эффективный двигатель может сэкономить от нескольких евро до нескольких десятков тысяч евро за весь срок службы, в зависимости от его мощности и схемы использования.

С помощью сервиса SINASAVE компании Siemens был проведен сравнительный анализ двух трёхфазных асинхронных двигателей мощностью 55 кВт с классами энергоэффективности IE1 и IE3 соответственно. На рис. 7 приводится внешний вид программы.

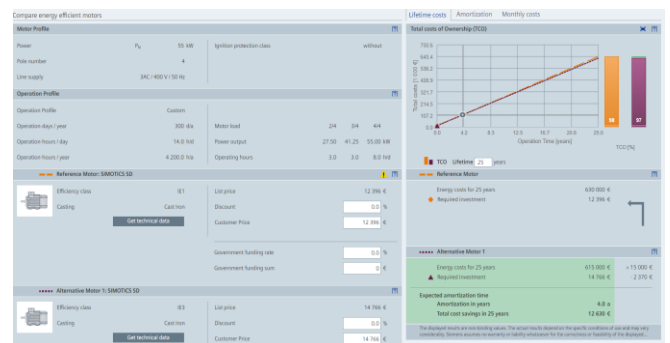


Рис. 7. Внешний вид SINASAVE

Клиентская цена электродвигателя с классом энергоэффективности IE1 составляет 12396 евро, а для IE3 –14766 евро. Таким образом, разница составляет



2370 евро на этапе закупки. В анализе мы полагаем, что электродвигатели работали 300 дней в году, 14 часов в день. При этом энергопотребление двигателя IE1 составило 210,3 МВт\*час/год, для двигателя IE3 – 204,6 МВт\*час/год, то есть потенциал сохранения энергии 5,7 МВт\*час/год, что эквивалентно сбережению 3,6 тон/год выбросов углекислого газа. Срок службы электродвигателей Siemens составляет 25 лет, за указанный период по расчетам программы удастся сэкономить 12630 евро, что сопоставимо со стоимостью первичного двигателя и несколько ниже, чем стоимость альтернативного двигателя, однако нужно иметь в виду, что в некоторых странах вводятся поощрительные выплаты государства и делаются скидки предприятиям за использование ресурсосберегающих технологий. При применении подобной практики в РФ мы имеем возможность значительно увеличить спрос на энергоэффективные электродвигатели при том, что за весь срок службы данные двигатели практически окупаются, но указанный срок службы лишь примерный, так как обычно они эксплуатируются дольше при должном проведении технических работ по обслуживанию.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках статьи были проанализированы основные тенденции в области возрастающего энергопотребления, а также основные причины растущего спроса на электроэнергию. Особое внимание было уделено актуальности энергоэффективности как части Энергетической стратегии РФ до 2035, а также в рамках международных стандартов. Была приведена и изучена эволюция как международных стандартов в области энергоэффективности электродвигателей, так и стандартов, действующих на территории Евразийского

Экономического Союза. Отдельно в статье рассматриваются причины и способы повышения энергоэффективности используемых на сегодняшний момент электромеханических преобразователей. В качестве примера целесообразности перехода к таким устройствам проведен экономический анализ двух идентичных электродвигателей с разными классами энергоэффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году
- [2] <https://vc.ru/u/433123-rusenergenews/134455-energeticheskaya-strategiya-2035>
- [3] ГОСТ Р 54413-2011
- [4] [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/36090/Klassy\\_energoeffektivnosti\\_ehlektrodvigatlej.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/36090/Klassy_energoeffektivnosti_ehlektrodvigatlej.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] D. Dorrell, "A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards", in Journal of Power Electronics, Vol. 14, No. 5, pp. 842-851, September 2014.
- [6] [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/44945/4/urfu1642\\_d.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/44945/4/urfu1642_d.pdf)
- [7] International standard IEC TS 60034-30-2 for variable speed motors ([https://www.altraliterature.com/-/media/Files/Literature/Brand/bauer-gear-motor/related/brochures/p-7197-bgm-iec-ts-60034-30-2\\_en.ashx](https://www.altraliterature.com/-/media/Files/Literature/Brand/bauer-gear-motor/related/brochures/p-7197-bgm-iec-ts-60034-30-2_en.ashx))
- [8] <https://elib.spbstu.ru/dl/2/3548.pdf/download/3548.pdf>
- [9] <https://www.szemo.ru/press-tsentr/article/energoeffektivnye-elektrodvigateli/>
- [10] <http://eprivod.com/preimushhestva-i-nedostatki-energoberegayushhix-elektrodvigatlej>
- [11] <http://eprivod.com/preimushhestva-i-nedostatki-energoberegayushhix-elektrodvigatlej>
- [12] <https://mall.industry.siemens.com/>
- [13] <https://www.sinasave.siemens.com/en/efficientsimotcsmotors>