

С.Х. Ошурбеков, В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.С. Парамонов

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ КЛАССОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ IE1 И IE2 В НАСОСНОЙ УСТАНОВКЕ МОЩНОСТЬЮ 11 кВт

На сьогоднішній день в країнах Євразійського економічного союзу в основному застосовуються електродвигуни низького класу енергоефективності IE1, відповідно до стандарту МЭК 60034-30 (ГОСТ МЭК 60034-30-1-2016). Однак, згідно з рішенням комісії Євразійського економічного союзу, з 1 вересня 2021 р значення коефіцієнта корисної дії двигунів не повинно бути менше значень, встановлених для класу енергетичної ефективності IE2. Тому для країн Євразійського союзу актуальним стає аналіз економічного ефекту від заміни двигунів класу IE1 на двигуни класу IE2. У даній роботі представлений порівняльний аналіз показників енергоспоживання асинхронних електродвигунів класів енергоефективності IE1 і IE2 в електроприводі відцентрового насоса потужністю 11 кВт системи водопостачання з дросельним регулюванням. Асинхронні двигуни живляться безпосередньо від електричної мережі. Обидві насосні системи мають один і той же графік витрати рідини, характерний для розімкнутих насосних систем. Кількість витрачається насосом води регулюється за рахунок дроселювання. Отримано результати по добовому і річному енергоспоживанню двох розглянутих конфігурацій насосної системи. Показано що система, де застосовується асинхронний двигун класу енергоефективності IE2, забезпечує економію 118,6 євро за рік і 2000 євро за життєвий цикл, в порівнянні з асинхронним двигуном класу IE1. Розрахований термін окупності двигуна класу IE2, який складає 5 місяців в разі введення в дію нової установки і 2 роки, в разі заміни двигуна в працюючій установці. Бібл. 25, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний двигун, дросельне регулювання, термін окупності, відцентровий насос, енергоефективність, енергоспоживання.

На сьогоднішній день в країнах Євразійського економічного союзу в основному застосовуються електродвигуни низького класу енергоефективності IE1, відповідно до стандарту МЭК 60034-30 (ГОСТ МЭК 60034-30-1-2016). Однак, згідно з рішенням комісії Євразійського економічного союзу, з 1 вересня 2021 г. значення коефіцієнта корисної дії двигунів не повинно бути менше значень, встановлених для класу енергетичної ефективності IE2. Тому для країн Євразійського союзу актуальним стає аналіз економічного ефекту від заміни двигунів класу IE1 на двигуни класу IE2. У даній роботі представлений порівняльний аналіз показників енергоспоживання асинхронних електродвигунів класів енергоефективності IE1 і IE2 в електроприводі центробежного насоса потужністю 11 кВт системи водопостачання з дросельним регулюванням. Асинхронні двигуни живляться безпосередньо від електричної мережі. Обидві насосні системи мають один і той же графік витрати рідини, характерний для розімкнутих насосних систем. Кількість витрачається насосом води регулюється за рахунок дроселювання. Отримано результати по добовому і річному енергоспоживанню двох розглянутих конфігурацій насосної системи. Показано що система, де застосовується асинхронний двигун класу енергоефективності IE2, забезпечує економію 118,6 євро за рік і 2000 євро за життєвий цикл, в порівнянні з асинхронним двигуном класу IE1. Розрахований термін окупності двигуна класу IE2, який складає 5 місяців в разі введення в дію нової установки і 2 роки, в разі заміни двигуна в працюючій установці. Бібл. 25, табл. 5, рис. 4.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, дросельное регулирование, срок окупаемости, центробежный насос, энергоэффективность, энергопотребление.

Введение. Высокая энергоёмкость современной промышленности обуславливает высокую актуальность повышения энергоэффективности производства. Электродвигатели потребляют около 70 % электроэнергии в промышленных приложениях. Поэтому во многих странах мира постепенно вводится запрет на использование двигателей с низкими классами энергоэффективности. Однако в России на настоящий момент применяются в основном электродвигатели низкого класса энергоэффективности IE1, согласно стандарту МЭК 60034-30. Двигатели класса IE2 отечественного производства также представлены на российском рынке [1]. Однако спрос на энергоэффективные двигатели в России мал из-за низкой стоимости электроэнергии, по сравнению со странами Европейского союза. Для сравнения цена на электроэнергию для промышленных потребителей в Германии составляет около 0,2 евро/кВт·ч, а в России – только около 0,057 евро/кВт·ч [2, 3].

В Европейском Союзе с 2017 года в общепромышленных приложениях допустимо применение двигателей классов не ниже, чем IE3, для мощности 0,75-375 кВт. Более того, с 1 июля 2023 года в Европейском Союзе двигатели с мощностью более 75 кВт должны соответствовать классу IE4 [4]. В дальнейшем имеются планы расширения обязательного класса IE4 на двигатели меньшей мощности и перехода к обязательному классу IE5 для мощных двигателей [5]. Стоит отметить, что уже в современных условиях применение двигателей классов IE4 и IE5 может быть оправдано, ввиду высоких, постоянно возрастающих цен на энергоносители и необходимости снижения влияния на окружающую среду [6].

Массовое применение двигателей более высоких классов энергоэффективности позволит существенно сократить энергопотребление, снизить энергоёмкость валового внутреннего продукта, а также будет способствовать улучшению экологической обстановки за

счет снижения выброса вредных веществ при генерации электроэнергии. Применение энергоэффективных двигателей соответствует достижению целей, заявленных в энергетических и экологических стратегиях различных стран: Европейского союза (European Green Deal [6]), США (State Energy Program), Швейцарии (поддерживает Парижское соглашение), Китая (поддерживает Парижское соглашение), Японии (Net Zero Energy Building), Южной Кореи (поддерживает Парижское соглашение), а также Российской Федерации [7] и т.д.

Поэтому, согласно решению комиссии Евразийского экономического союза о требованиях к энергетической эффективности энергопотребляющих устройств [8], с 1 сентября 2021 г. значение КПД для двигателей мощностью 0,75-375 кВт не должно быть меньше значений, установленных для класса энергетической эффективности IE2. А с 1 сентября 2023 г. значение КПД двигателей мощностью 7,5-375 кВт должно соответствовать уже классу IE3. Требование класса IE3 с 1 сентября 2025 г. будет также распространено и для двигателей 0,75-7,5 кВт [8].

Обязательный переход к двигателям класса IE2 в России и странах Евразийского экономического союза позволяет надеяться, что в будущем, пусть и с некоторой временной задержкой, обусловленной объективными экономическими причинами, требования к энергоэффективности двигателей будут приближаться к современным требованиям Европейского союза.

Насосные системы потребляют около 22 % электроэнергии, производимой в мире [9]. Большое количество работ [10-16] посвящено вопросам сопоставления энергопотребления насосных систем с применением различных двигателей с разными IE-классами. Однако во всех этих работах рассматриваются насосные системы с регулированием скорости двигателя с помощью преобразователя частоты. Несмотря на высокий КПД, а также лучшие статические и динамические регулировочные характеристики привода переменного тока с преобразователем частоты, из-за высокой стоимости преобразователя большая часть насосных приводов все еще питается непосредственно от электрической сети [9]. Например, доля регулируемого привода на рынке Германии – около 30 %, а на рынке Швейцарии – 20 % [17]. В России и в других странах СНГ доля частотно-регулируемых электроприводов традиционно ниже, чем в странах Европейского союза.

Для насосов, питающихся напрямую от электрической сети, вопросы сопоставления энергопотребления при применении двигателей с разными IE-классами рассматривается намного реже. Так в [9] рассматривается сравнительный анализ энергопотребления синхронных и асинхронных двигателей классов IE3 и IE4 с прямым питанием от сети в электроприводе центробежного насоса с дроссельным регулированием. Также в [9] показано, что при выборе двигателя необходимо учитывать не только класс энергоэффективности, но и нагрузочный цикл, в котором работает двигатель, и, соответственно, КПД

двигателя при пониженных нагрузках. Однако применение двигателей классов IE3 и IE4 на сегодня поддерживается законодательно не во всех странах.

На основании приведенного выше **обзора литературы**, можно заключить, что вопросы сопоставления двигателей различных классов энергоэффективности в насосных установках с нерегулируемой частотой вращения остаются недостаточно освещенными.

Целью данной работы является сравнительный анализ показателей энергопотребления асинхронных двигателей мощностью 11 кВт, питающихся непосредственно от сети, с классами энергоэффективности IE1 и IE2 в электроприводе центробежного насоса с дроссельным регулированием.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью оценки экономического эффекта от замены двигателей класса IE1 на двигатели класса IE2 для такого распространенного класса механизмов как центробежные насосы, ввиду скорого введения в странах Евразийского союза требований обязательного использования двигателей класса IE2. Для сравнения сопоставляются показатели энергопотребления и стоимость двигателей классов IE1 и IE2 за период жизненного цикла, анализируется срок окупаемости двигателя класса IE2. В работе [18] такой анализ был проведен для частного случая насосного агрегата мощностью 15 кВт. Данная работа расширяет этот анализ.

Характеристики насоса. Для расчета выбран насос Calpeda NM 50/20A/B мощностью 11 кВт [19]. Номинальная частота вращения насоса – 2900 об/мин.

Максимальная производительность насосной системы соответствует точке, в которой расход воды на 10 % больше, чем в точке с наибольшим КПД (англ. «best efficiency point», BEP) $Q_{110\%} = 1,1 \cdot Q_{bep} = 66 \text{ м}^3/\text{час}$.

На рис. 1,а показана каталожная Q - H характеристика насоса [19], а на рис. 1,б – зависимость механической мощности приводного двигателя насоса в зависимости от подачи воды при номинальной частоте вращения [19].

Характеристики асинхронных двигателей. Для расчета были выбраны асинхронные двигатели российского производства: 7AVEC160M2ie1 (класс IE1) и 7AVEC160M2ie2 (класс IE2) серии 7AVE [1], мощностью 11 кВт. Величины КПД этих двигателей в номинальном режиме равны 88,2 и 90 %, соответственно.

В табл. 1 приведены данные о КПД выбранных двигателей в 5 различных нагрузочных режимах. P_{mech} – механическая мощность двигателя; P_n – номинальная механическая мощность двигателя. Также эти данные продемонстрированы на рис. 2.

Рабочие точки насоса. Рассматривается разомкнутая насосная система, расход воды которой изменяется в диапазоне от 75 до 110 % расхода Q_{bep} , соответствующего рабочей точке насоса с наибольшим КПД (англ. «best efficiency point», BEP). 25 % времени насос работает в точке с расходом $0,75 \cdot Q_{bep}$, 50 % времени – с расходом Q_{bep} , и еще 25 % времени – с расходом $1,1 \cdot Q_{bep}$. Эта зависимость с помощью диаграмм

мы показана на рис. 3. Данный график нагрузки рекомендуется объединением производителей Euroimp для оценки энергопотребления насосов с нерегулируемым приводом [20].

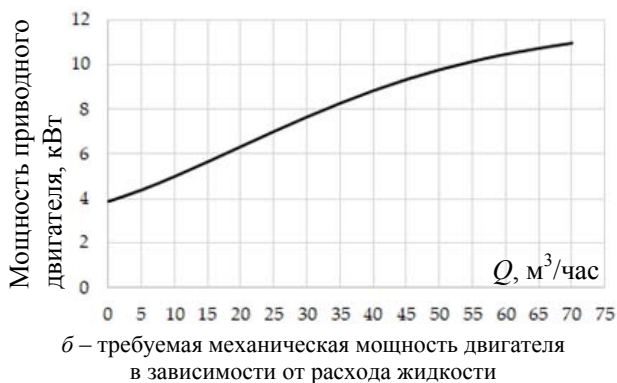
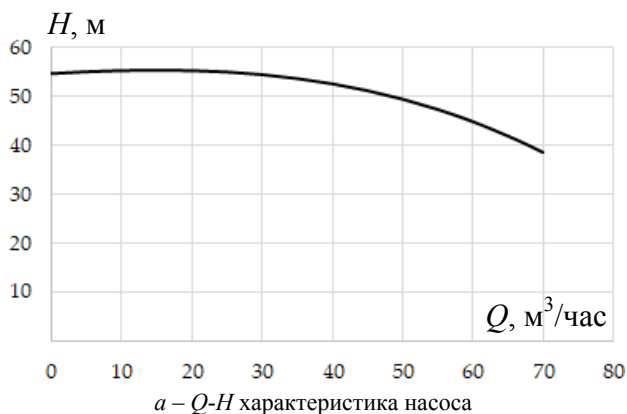


Рис. 1

Таблица 1

Данные о КПД двигателей

Двигатель	КПД двигателя, %				
	$P_{mech} = 0,25 \cdot P_n$	$P_{mech} = 0,5 \cdot P_n$	$P_{mech} = 0,75 \cdot P_n$	$P_{mech} = P_n$	$P_{mech} = 1,25 \cdot P_n$
АД IE1	79,5	86,6	88,4	88,2	85,8
АД IE2	83,8	89,2	90,4	90	88,5

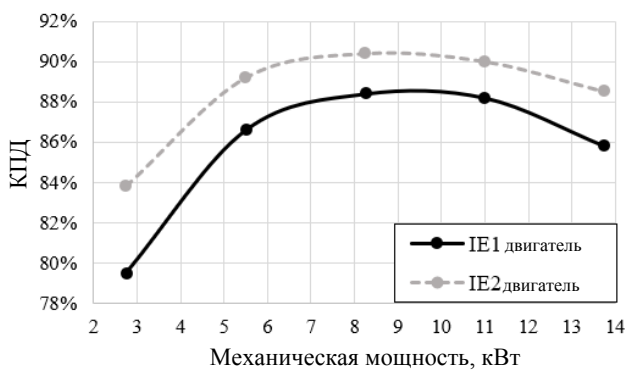


Рис. 2. Кривые КПД двигателей

При максимальном расходе воды ($Q = 1,1 \cdot Q_{ber}$), задвижка полностью открывается, а для обеспечения расходов, равных Q_{ber} и $0,75 \cdot Q_{ber}$ задвижка частично закрывается, чтобы характеристика системы изменялась, а точка ее пересечения с характеристикой насоса перемещалась влево. На рис. 4 показаны Q - H характе-

ристика насоса и характеристики гидравлической системы в различных рабочих точках.

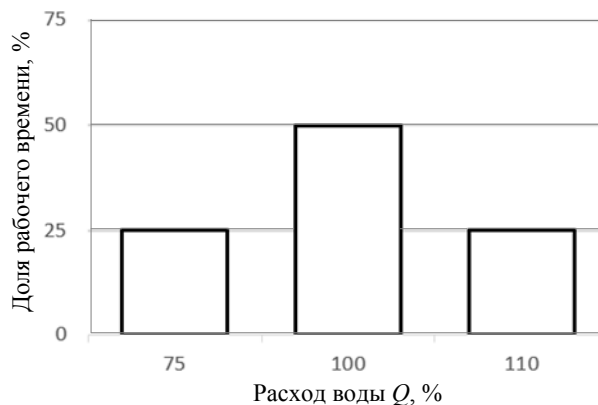


Рис. 3. Диаграмма расхода воды за цикл [20]

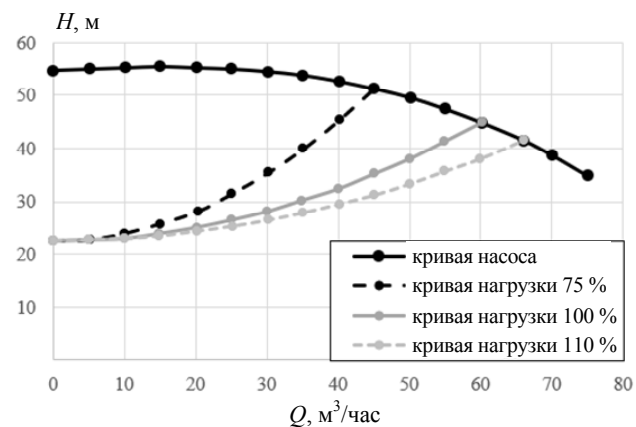


Рис. 4. Q - H характеристика насоса и кривые системы

Для оценки энергопотребления в первую очередь рассчитывается механическая мощность приводного двигателя, в трех режимах, показанных на рис. 3. При регулировании расхода воды дросселированием рабочие точки насосной системы перемещаются по Q - H характеристике насоса за счет измерения характеристики гидравлической системы. Характеристика гидравлической системы описывается следующим уравнением [9]:

$$H = H_{st} + k \cdot Q^2, \quad (1)$$

где Q и H – требуемые значения подачи воды и напора гидравлической системы (гидравлической нагрузки); H_{st} – статический напор гидравлической системы ($H_{st} = H_{ber} / 2 = 22,5$ м); k – коэффициент трения гидравлической системы, значение которого зависит от величины открытия задвижки.

В табл. 2 приведены результаты расчета механической мощности (P_{mech}) и других характеристик насоса при трех разных расходах воды, соответствующих рис. 3.

Таблица 2

Данные цикла работы насоса

$Q, \%$	$k, \text{ час}^2/\text{м}^5$	$Q, \text{ м}^3/\text{час}$	$H, \text{ м}$	КПД насоса, %	$P_{mech}, \text{ кВт}$
75	0,014	45	51,31	67,3	9,35
100	0,006	60	45,00	70,3	10,47
110	0,004	66	41,47	69,2	10,78

Коэффициент трения при различных Q рассчитывается, исходя из (1), как $k = (H - H_{st}) / Q^2$.

КПД насоса рассчитывается как P_{hydr} / P_{mech} , где $P_{hydr} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$ – гидравлическая мощность насоса; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; P_{mech} определяется, согласно зависимости, показанной на рис. 1,б.

Энергопотребление насосного агрегата. Значения КПД двигателей в разных рабочих точках (табл. 3), находятся согласно зависимостям, показанным на рис. 2.

Таблица 3

$Q, \%$	$P_{mech}, \text{ кВт}$	КПД двигателя, %	
		IE1 АД	IE2 АД
75	9,35	88,32	90,24
100	10,47	88,24	90,08
110	10,78	88,22	90,03

Используя данные из табл. 3, можно найти величины потребляемой электрической мощности в рассматриваемых рабочих точках, согласно формуле:

$$P_1 = P_{mech} / \eta_{motor}, \quad (2)$$

где η_{motor} – КПД двигателя.

Результаты такого расчёта показаны в табл. 4, в которой $i = 1..3$ – номер рассматриваемой нагрузочной точки.

Таблица 4

Электрические мощности, потребляемые двигателями, в рассматриваемых рабочих точках насоса

i	$Q, \%$	$t_i / t_{sum}, \%$	$P_1, \text{ кВт}$	
			АД класса IE1	АД класса IE2
1	75	25	10,585	10,360
2	100	50	11,865	11,623
3	110	25	12,223	11,997

С помощью полученных результатов (табл. 4) вычислим дневную потребляемую электроэнергию (E_{day}), годовую потребляемую электроэнергию (E_{year}), сумму годовых затрат на электроэнергию (C_{year}) и годовую экономию средств (S_{year}) для насосной системы с двигателем класса IE2, по сравнению с насосной системой с двигателем класса IE1 [9]:

$$E_{day} = \frac{t_{sum}}{1000} \cdot \sum_{i=1}^3 \left(P_{1i} \cdot \frac{t_i}{t_{sum}} \right); \quad (3)$$

$$E_{year} = E_{day} \cdot 365; \quad (4)$$

$$C_{year} = E_{year} \cdot GT; \quad (5)$$

$$S_{year} = C_{year1} - C_{year2}, \quad (6)$$

где t_i / t_{sum} – доля рабочего времени i -го режима работы; t_{sum} – продолжительность рабочего цикла (24 часа); $GT = 0,057 \text{ евро/кВт}\cdot\text{ч}$ – тариф на электроэнергию в России за 1 кВт·ч для промышленности (Москва, 2019 год) [2]; C_{year1} и C_{year2} – сумма годовых затрат на электроэнергию первой (при использовании двигателя класса IE1) и второй (двигатель класса IE2) конфигурации насосной системы.

Также оценим потребление энергии в течение всего жизненного цикла насосной системы, который обычно составляет 20 лет [21]. Оценка стоимости энергии в течение всего жизненного цикла насосной системы определяется следующей формулой [21]:

$$C_{lcc} = \sum_{m=1}^n \left(\frac{C_{year\ m}}{(1 + [y - p])^m} \right), \quad (7)$$

где $C_{year\ m}$ – сумма затрат на электроэнергию m -того года; y – процентная ставка Центрального Банка ($y = 0,06$); p – ожидаемая годовая инфляция ($p = 0,04$); n – срок службы системы ($n = 20$ лет).

Результаты расчета по формулам (3) – (7) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение параметров энергопотребления

Параметры	E_{day} , кВт·час	E_{year} , кВт·час	C_{year} , евро	S_{year} , евро/год	C_{lcc} , тыс. евро
АД IE1	279,2	101921	5 809	–	95,0
АД IE2	273,5	99827	5 690	118,6	93,0

Как видно из табл. 5, годовая экономия S_{year} составляет 118,6 евро при применении двигателя класса IE2, в сравнении с двигателем класса IE1. Экономия за 20 лет (разность C_{lcc} двух двигателей) составляет 2000 евро с учетом процентной ставки и инфляции.

Также на основе полученных данных произведем расчет срока окупаемости при использовании двигателя класса IE2. По данным статьи [22], разница в стоимости активных материалов асинхронного двигателя 7AVE мощностью 13 кВт и класса IE1 и IE2, составляет всего 6,7 % (в статье [22] нет данных об активных материалах для двигателя с мощностью 11 кВт). Однако разница в рыночной цене асинхронных электродвигателей соседних классов энергоэффективности серии 7AVE [1], согласно [23], составляет 20-25 %. Срок окупаемости рассчитаем для двух случаев:

- 1) при введении в строй нового насосного агрегата с применением АД класса IE2 вместо АД класса IE1;
- 2) при замене АД класса IE1 на АД класса IE2 в насосном агрегате, находящемся в эксплуатации.

В первом случае срок окупаемости определяется как отношение разницы стоимости двигателей класса IE1 и IE2, к годовой экономии электроэнергии [24] (8):

$$T = (C_{m2} - C_{m1}) / S_{year}, \quad (8)$$

где T – величина срока окупаемости системы, год; $C_{m1} = 194,21 \text{ евро}$ – стоимость асинхронного двигателя класса IE1 [25]; $C_{m2} = 1,25 \cdot C_{m1} = 242,76 \text{ евро}$ – стоимость асинхронного двигателя класса IE2 [23].

Во втором случае рассчитаем срок окупаемости как:

$$T = C_{m2} / S_{year}. \quad (9)$$

Сроки окупаемости, рассчитанные по формулам (8) и (9), составляют 0,41 год (примерно 5 месяцев) при введении в строй нового насосного агрегата с АД IE2 и 2,03 лет при замене АД класса IE1 на АД класса IE2 в существующем агрегате.

Выводы.

В данной работе проведено сравнение показателей энергоэффективности насосного агрегата мощностью 11 кВт при использовании асинхронных двигателей классов IE1 и IE2. В обоих случаях рассматривается одинаковый график расхода жидкости, характерный для разомкнутых насосных систем. Расход жидкости регулируется за счет дросселирования трубопровода.

Показано, что система, в которой применяется асинхронный двигатель класса IE2, обеспечивает

экономию 118,6 евро за год и 2000 евро (с учетом процентной ставки и инфляции) за жизненный цикл, по сравнению с системой, в которой применяется асинхронный двигатель класса IE1.

Срок окупаемости при использовании более дорогого двигателя класса IE2 вместо двигателя класса IE1, составляет 5 месяцев при введении в строй нового насосного агрегата и 2,03 года при замене двигателей в насосном агрегате, находящемся в эксплуатации.

Малый срок окупаемости для первого случая позволяет сделать вывод об очень большой рентабельности применения двигателей класса IE2 в новых установках при действующих ценах на двигатели и электроэнергию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (базовая часть госзадания, проект No. FEUZ-2020-0060).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический каталог. Серия низковольтных асинхронных двигателей 7AVE, габариты 160-315 мм, классы энергоэффективности IE1, IE2, IE3. Электронный ресурс: <http://www.xn--h1aamb1s2f.xn--p1ai/produkcziya/elektrodvigateli/nizkovoltnye-asinhronnye-dvigateli-7ave/>.
2. Тарифы на электроэнергию для средних предприятий в 2020. Электронный ресурс: <https://time2save.ru/articles/tarifyna-elektroenergiyu-dlya-srednih-predpriyatij-v-2018>.
3. Eurostat Data for the Industrial Consumers in Germany. Available at: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en.
4. Commission Regulation (EU) 2019/1781 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, amending Regulation (EC) No 641/2009 with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products and repealing Commission Regulation (EC) No 640/2009, Document 32019R1781. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj>.
5. Doppelbauer M. Update on IEC motor and converter standards. *6th International Motor Summit for Energy Efficiency powered by Impact Energy*, Motor Summit, 2016.
6. *Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal*. Brussels, 11.12.2019, COM (2019) 640 final. Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication-annex-roadmap_en.pdf.
7. Российский план по снижению выбросов парниковых газов до 2050 года. Электронный ресурс: https://economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf.
8. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 8 августа 2019 г. N 114 «О техническом регламенте Евразийского экономического союза «О требованиях к энергетической эффективности энергопотребляющих устройств». Электронный ресурс: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73240518>.
9. Гоман В.В., Ошурбеков С.Х., Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. Сравнение энергопотребления различными электродвигателями, работающими в составе насосного агрегата. *Электротехника і електромеханіка*, 2020, №1, С. 16-24. doi: [10.20998/2074-272X.2020.1.03](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03).
10. Ahonen T., Orozco S.M., Ahola J., Tolvanen J. Effect of electric motor efficiency and sizing on the energy efficiency in pumping systems. *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Sep. 2016, Karlsruhe, pp. 1-9. doi: [10.1109/EPE.2016.7695671](https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695671).
11. Van Rhyn P., Pretorius J.H.C. Utilising high and premium efficiency three phase motors with VFDs in a public water supply system. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, May 2015, Riga, pp. 497-502. doi: [10.1109/PowerEng.2015.7266367](https://doi.org/10.1109/PowerEng.2015.7266367).
12. Brinner T.R., McCoy R.H., Kopecky T. Induction versus permanent-magnet motors for electric submersible pump field and laboratory comparisons. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 174-181. doi: [10.1109/TIA.2013.2288203](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2288203).
13. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Sarapulov S. Interpolation and analysis of the efficiency of a synchronous reluctance electric drive at various load points of a fan profile. *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, Moscow, 2018, pp. 1-5. doi: [10.1109/IWED.2018.8321372](https://doi.org/10.1109/IWED.2018.8321372).
14. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: [10.3390/en12061144](https://doi.org/10.3390/en12061144).
15. Kazakbaev V.M., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A. A comparative performance analysis of induction and synchronous reluctant motors in an adjustable-speed electric drive. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 4, pp. 233-238. doi: [10.3103/s106837121704009](https://doi.org/10.3103/s106837121704009).
16. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Sarapulov S., Askerov D. Comparison of power consumption of synchronous reluctance and induction motor drives in a 0.75 kW pump unit. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Jun. 2017, Astana, pp. 1-6. doi: [10.1109/SIBCON.2017.7998485](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998485).
17. Phillips R., Tieben R. Improvement of Electric Motor Systems in Industry (IEMSI). *Proceedings of the 10th international conference on energy efficiency in motor driven systems (EEMODS' 2017)*, Rome, Italy, September 6-8, 2017. pp. 53-67. doi: [10.2760/345473](https://doi.org/10.2760/345473).
18. Oshurbekov S., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Comparative Study of Energy Consumption of 15 kW Induction Motors of IE1 and IE2 Efficiency Classes in Pump Applications. *Proceedings of 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, October 04-07, pp. 1-6. (Accepted for publication).
19. *NM, NMS, Close Coupled Centrifugal Pumps with Flanged Connections; Catalogue*; Calpeda, 2018. Available at: https://www.calpeda.com/system/products/catalogue_50hzs/53/en/NM_NMS_EN2018.pdf?1549893188 (accessed 23 March 2019).
20. *Extended product approach for pumps*, Copyright © 2014 by Europump. Published by Europump.
21. *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary*. Hydraulic Institute (Parsippany, NJ); Europump (Brussels, Belgium); Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable

Energy U.S. Department of Energy (Washington, DC). January 2001, pp. 1–19. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pumplcc_1001.pdf.

22. Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В., Макаров Л.Н. Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий. *Электротехника*, 2015, №4, С. 34–40. doi: **10.3103/S1068371215040033**.

23. Кобелев А.С. Двигатели с литым медным ротором: шпaгaт между ценой и эффективностью. *Конструктор. Машиностроитель, журнал*, 2020. Электронный ресурс: <https://konstruktor.net/podrobnnee-elekt/dvigateli-s-litym-mednym-rotorom-shpagat-mezhdu-cenoi-i-ehffektivnostju-2464.html>.

24. Тютёва П.В. Алгоритм оценки энергоэффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах. *Известия Томского политехнического университета*, 2009, Т. 315, № 4, С. 75–79.

25. Прайс-лист, асинхронные двигатели серии АИР, класса IE1. Электронный ресурс: <http://www.a-a-a.ru/01-pr.html>.

REFERENCES

1. *Technical catalog. Series of low-voltage asynchronous motors 7AVE, dimensions 160-315mm, energy efficiency classes IE1, IE2, IE3*. Available at: <http://www.xn--h1aamb1s2f.xn--plai/produkcziya/elektrodvigateli/nizkovoltnye-asinhronnye-dvigateli-7ave/> (accessed 01 May 2020). (Rus).

2. *Electricity tariffs for medium-sized enterprises in 2020*. Available at: <https://time2save.ru/articles/tarify-na-elektroenergiyu-dlya-srednih-predpriyatij-v-2018> (accessed on 11 July 2020). (Rus).

3. *Eurostat Data for the Industrial Consumers in Germany*. Available at: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en.

4. *Commission Regulation (EU) 2019/1781* of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, amending Regulation (EC) No 641/2009 with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products and repealing Commission Regulation (EC) No 640/2009, Document 32019R1781. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj>.

5. Doppelbauer M. Update on IEC motor and converter standards. *6th International Motor Summit for Energy Efficiency powered by Impact Energy*, Motor Summit, 2016.

6. *Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019, COM (2019) 640 final. Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication-annex-roadmap_en.pdf.

7. *Long-term development strategy of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050*. Available at: https://economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf (accessed 20 March 2020). (Rus).

8. Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission of August 8, 2019 no. 114 «On the technical regulation of the Eurasian Economic Union «On requirements for the energy efficiency of energy-consuming devices». Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73240518> (accessed 11 May 2020). (Rus).

9. Goman V.V., Oshurbekov S.Kh., Kazakbaev V.M., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A. Comparison of energy consumption of various electrical motors operating in a pumping unit. *Electrical engineering & electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 16–24. doi: **10.20998/2074-272X.2020.1.03**.

10. Ahonen T., Orozco S.M., Ahola J., Tolvanen J. Effect of electric motor efficiency and sizing on the energy efficiency in pumping systems. *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Sep. 2016, Karlsruhe, pp. 1–9. doi: **10.1109/EPE.2016.7695671**.

11. Van Rhyn P., Pretorius J.H.C. Utilising high and premium efficiency three phase motors with VFDs in a public water supply system. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, May 2015, Riga, pp. 497–502. doi: **10.1109/PowerEng.2015.7266367**.

12. Brinner T.R., McCoy R.H., Kopecky T. Induction versus permanent-magnet motors for electric submersible pump field and laboratory comparisons. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 174–181. doi: **10.1109/TIA.2013.2288203**.

13. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Sarapulov S. Interpolation and analysis of the efficiency of a synchronous reluctance electric drive at various load points of a fan profile. *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, Moscow, 2018, pp. 1–5. doi: **10.1109/IWED.2018.8321372**.

14. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: **10.3390/en12061144**.

15. Kazakbaev V.M., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A. A comparative performance analysis of induction and synchronous reluctant motors in an adjustable-speed electric drive. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 4, pp. 233–238. doi: **10.3103/s106837121704009**.

16. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Sarapulov S., Askerov D. Comparison of power consumption of synchronous reluctance and induction motor drives in a 0.75 kW pump unit. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Jun. 2017, Astana, pp. 1–6. doi: **10.1109/SIBCON.2017.7998485**.

17. Phillips R., Tieben R. Improvement of Electric Motor Systems in Industry (IEMSI). *Proceedings of the 10th international conference on energy efficiency in motor driven systems (EEMODS' 2017)*, Rome, Italy, September 6–8, 2017. pp. 53–67. doi: **10.2760/345473**.

18. Oshurbekov S., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Comparative Study of Energy Consumption of 15 kW Induction Motors of IE1 and IE2 Efficiency Classes in Pump Applications. *Proceedings of 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, October 04–07, pp. 1–6. (Accepted for publication).

19. NM, NMS, *Close Coupled Centrifugal Pumps with Flanged Connections; Catalogue*; Calpeda, 2018. Available at: https://www.calpeda.com/system/products/catalogue_50hzs/53/en/NM_NMS_EN2018.pdf?1549893188 (accessed 23 March 2019).

20. *Extended product approach for pumps*, Copyright © 2014 by Europump. Published by Europump.

21. *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary*. Hydraulic Institute (Parsippany, NJ); Europump (Brussels, Belgium); Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable

Energy U.S. Department of Energy (Washington, DC). January 2001, pp. 1–19. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pumplcc_1001.pdf.

22. Bepalov V.Y., Kobelev A.S., Kruglikov O.V., Makarov L.N. Constructing and mastering the production of energy-efficient asynchronous motors of mass-market series. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 4, pp. 194-200. doi: **10.3103/S1068371215040033**.

23. Kobelev A.S. Cast copper rotor motors: between the price and the performance. *Constructor. Mechanical engineer Journal*, 2020. Available at: <https://konstruktor.net/podrobnee-ekonomicheskoe-srovnaniye-energozatshe-rotornykh-dvigateli-s-litym-mednym-rotorom-shpagat-mezhdu-cenoj-i-ehffektivnostju-2464.html> (Accessed 11 May 2020). (Rus).

24. Tyuteva P.V. Algorithm for evaluating the energy efficiency of asynchronous motors in pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 75-79. (Rus).

25. Price list, induction motors of the AIR series, class IE1. Available at: <http://www.a-a-a.ru/01-pr.html> (Accessed 22 June 2020). (Rus).

Поступила (received) 12.07.2020

Ошурбеков Сафарбек Хосабекович¹,
Казакбаев Вадим Маратович¹, к.т.н.,
Практ Владимир Алексеевич¹, к.т.н.,
Дмитриевский Владимир Алексеевич¹, к.т.н.,
Парамонов Алексей Сергеевич¹,

¹ Уральский федеральный университет,
620002, Российская Федерация, Екатеринбург,
ул. Мира, 19,
e-mail: safarbek.oshurbekov@urfu.ru,
vadim.kazakbaev@urfu.ru,
va.prakht@urfu.ru,
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru,
paramonov.aleksey@inbox.ru

S.Kh. Oshurbekov¹, V.M. Kazakbaev¹,
V.A. Prakht¹, V.A. Dmitrievskii¹, A.S. Paramonov¹

¹ Ural Federal University,
19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Analysis of electricity consumption of induction motors of IE1 and IE2 efficiency classes in a 11 kW pump installation.

Purpose. Comparative analysis of energy consumption indicators of electric motors of different energy efficiency classes in an electric drive of a centrifugal pump with power of 11 kW of a water supply system with throttle regulation. **Methodology.** In this paper a comparison of energy consumption of 11 kW pump units with induction motors of energy efficiency classes IE1 and IE2 is presented. The induction motors are powered directly from the mains. Both considered pump configurations have the same fluid flow rate characteristic of open pump systems. The amount of water consumed by the pump is adjusted by throttling. **Results.** The results on the daily and annual energy consumption of the two considered pump system configurations are obtained. It is shown that the pump unit using the IE2 class motor provides the annual energy savings of 9.65 thousand rubles and the life cycle energy savings of 158 thousand rubles compared to the IE1 class motor. The payback period of the IE2 class motor is calculated, which is 5 months if a new installation is commissioned and 2 years if the motor is replaced in an operating installation. **Practical value.** Nowadays the countries of the Eurasian Economic Union mainly use electric motors of the lowest energy efficiency class IE1, according to the IEC 60034-30 Standard (GOST IEC 60034-30-1-2016). However, according to the decision of the Commission of the Eurasian Economic Union, since the 1st of September, 2021 all general-purpose motors shall not be less efficient than the IE2 efficiency level. Therefore, the analysis of the economic effect of replacing IE1 class motors with IE2 class motors becomes relevant for the countries of the Eurasian Union. Pump drives are one of the most important consumers of electricity. Most of the pump drives are powered directly from the mains. References 25, tables 5, figures 4.

Key words: induction motor, throttle control, payback period, centrifugal pump, energy efficiency, energy consumption.