

В.В. Гоман, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, В.А. Дмитриевский, Э.А. Валеев, А.С. Парамонов

## АНАЛИЗ СРОКА ОКУПАЕМОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННЫХ КЛАССОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

**Мета.** Порівняльний аналіз розрахунків енергоспоживання, витрат на електроенергію протягом життєвого циклу і термінів окупності насосної установки з 2-полюсними асинхронними електродвигунами потужністю 90 кВт різних класів енергоефективності, що живляться безпосередньо від електричної мережі. **Методика.** Розглянуті режими роботи відповідають типовому циклу роботи, характерному для насосних установок з приблизною витратою 75-110 % від номінального. Розрахунок ґрунтувався на паспортних даних насоса і електродвигунів, які в свою чергу засновані на експериментальних даних виробників. **Результат.** У статті проведено розрахунки енергоспоживання, витрат на електроенергію і термінів окупності насосної установки з 2-полюсними асинхронними електродвигунами потужністю 90 кВт, що живляться безпосередньо від електричної мережі. Розглянуто застосування електродвигунів з класами енергоефективності IE2, IE3 і IE4. **Практичне значення.** Показано, що в разі заміни електродвигуна класу енергоефективності IE2 в зв'язку з плановою модернізацією електродвигуном класу енергоефективності IE4 термін окупності становить 2,18 року, економія електроенергії протягом розрахункового 20-річного терміну експлуатації складає 268 МВт·год, що в грошовому вираженні становить 41110 €. При тих же умовах заміна електродвигуна класу енергоефективності IE2 на електродвигун класу енергоефективності IE3 дозволить досягти економії електроенергії протягом розрахункового терміну експлуатації 88 МВт·год, що становить в грошовому вираженні 13500 €, і термін окупності є 5,11 року. Таким чином, в статті показано, що незважаючи на більш високу початкову вартість, вибір електродвигуна класу енергоефективності IE4 більш вигідний з економічної точки зору. Бібл. 27, табл. 4, рис. 1.

**Ключові слова:** відцентровий насос, енергоефективність, клас енергоефективності, асинхронний електродвигун, дросельне регулювання, енергозбереження, життєвий цикл, термін окупності.

**Цель.** Сравнительный анализ расчетов энергопотребления, затрат на электроэнергию в течение жизненного цикла и сроков окупаемости насосной установки с 2-полюсными асинхронными электродвигателями мощностью 90 кВт различных классов энергоэффективности, питающимися напрямую от электрической сети. **Методика** Рассматриваемые режимы работы соответствовали типовому циклу работы, характерному для насосных установок с приблизительно постоянным расходом 75-110 % от номинального. Расчет основывался на паспортных данных насоса и электродвигателей, которые в свою очередь основаны на экспериментальных данных производителей. **Результат** В статье произведен расчеты энергопотребления, затрат на электроэнергию и сроков окупаемости насосной установки с 2-полюсными асинхронными электродвигателями мощностью 90 кВт, питающимися напрямую от электрической сети. Рассмотрено применение электродвигателей с классами энергоэффективности IE2, IE3 и IE4. **Практическое значение.** Показано, что в случае замены электродвигателя класса энергоэффективности IE2 в связи с плановой модернизацией электродвигателем класса энергоэффективности IE4 срок окупаемости для электродвигателя класса энергоэффективности IE4 составляет 2,18 года, экономия электроэнергии в течение расчетного 20-летнего срока эксплуатации составляет 268 МВт·ч, что в денежном выражении составляет 41110 €. При тех же условиях замена электродвигателя класса энергоэффективности IE2 на электродвигатель класса энергоэффективности IE3 позволит достичь экономии электроэнергии в течение расчетного срока эксплуатации 88 МВт·ч, что составляет в денежном выражении 13500 €, и срока окупаемости 5,11 года. Таким образом, в статье показано, что, несмотря на более высокую начальную стоимость, выбор электродвигателя класса энергоэффективности IE4 более выгоден с экономической точки зрения. Библ. 27, табл. 4, рис. 1.

**Ключевые слова:** центробежный насос, энергоэффективность, класс энергоэффективности, асинхронный электродвигатель, дросельное регулирование, энергосбережение, жизненный цикл, срок окупаемости.

**Введение.** В мире и, в частности, в Евросоюзе давно и последовательно ведется работа по повышению энергоэффективности бытовых приборов, промышленного оборудования и технологических процессов. Важной ее частью является установление классов энергоэффективности электродвигателей как питающихся напрямую от электрической сети [1], так и работающих в составе частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) [2]. Это связано с тем, что по данным исследования [3], электродвигатели потребляют 46 % электроэнергии, вырабатываемой в мире, а доля потребления электроэнергии электродвигателями в промышленности составляет около 70 %.

В соответствии с регламентом Евросоюза [4] от 2009 года, с дополнением от 2014 года, с 1 января 2017 все электродвигатели мощностью от 0,75 до 375 кВт, за исключением оговоренных в стандарте, должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE3 либо IE2, в случае если они используются в составе ЧРП. В 2019 году требования к энергоэффективности электродвигателей были обновлены в новом регла-

менте Евросоюза [5], согласно которому была расширена сфера применения требований и определены сроки введения более жестких требований. Так, в [5] указано, что с 1 июля 2021 года 2-, 4-, 6-, 8-полюсные электродвигатели мощностью от 0,75 до 1000 кВт, за исключением оговоренных в стандарте, должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE3. С 1 июля 2023 года 2, 4, 6-полюсные электродвигатели мощностью от 75 до 200 кВт включительно должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE4 [5]. В США, Швейцарии, Турции, Канаде, Мексике, Южной Корее, Сингапуре, Японии, Саудовской Аравии, Бразилии, Тайване и ряде других стран применение электродвигателей с классом энергоэффективности не ниже IE3 является обязательным [6].

**Актуальность работы.** Согласно отчету Европейской комиссии [3], на насосные системы приходится почти 22 % энергии, потребляемой электродвигателями в мире. Поэтому изучение возможностей повышения энергетической эффективности насосных агрегатов является актуальной задачей.

Центробежные насосы зачастую не требуют широкий диапазон регулирования, а также высокий пусковой момент и быстродействие. Поэтому асинхронные электродвигатели (АД), работающие непосредственно от электрической сети, широко применяются в приводах упомянутых выше механизмов. Регулирование производительности насосов в этом случае производится с помощью задвижек (дроссельное регулирование), путем управляемого изменения характеристики гидравлической сети. Известно, что из-за высоких затрат на преобразователи частоты, не только для насосов характерно применение электродвигателей, питающихся напрямую от электрической сети. Например, доля ЧРП согласно данным Европейской комиссии [1] для Германии составила около 30 %, а для Швейцарии согласно исследованию, описанному в [7] около 20 %.

Повышение энергетической эффективности насосной установки возможно за счет изменения в гидравлической сети, на которую работает установка, применения ЧРП, оптимизации и распределения нагрузок (в случае параллельно работающих насосных установок), а также за счет надлежащего выбора элементов установки, в частности применения электродвигателей более высокого класса энергоэффективности [8]. Большое количество статей [9-12] посвящено вопросам снижения энергопотребления насосных установок путем применения различных по принципу действия электродвигателей более высоких классов энергоэффективности. Однако во всех вышеперечисленных статьях [9-12] рассматривается способ регулирования производительности насосов с помощью ЧРП. В данной статье рассматривается применение электродвигателей с более высоким классом энергоэффективности, как наиболее актуальный способ повышения энергоэффективности насосов при дроссельном регулировании.

Отметим, что классификация электродвигателей по энергоэффективности в нормативных документах [1, 5] основывается только на КПД в номинальном режиме работы, т.е. при номинальной мощности на валу, и не учитывает КПД электродвигателей при нагрузке, отличной от номинальной, которая в той или иной степени характерна для электродвигателей в составе насосных агрегатов. Так, для циркуляционных насосов мощностью до 2,5 кВт работающих преимущественно с переменным расходом согласно [13-15] относительное время работы в номинальном режиме не превышает 6 %.

Для водяных насосов согласно [16] приняты типовые режимы работы с производительностью 75 %, 100 % и 110 % от номинального расхода и приводятся требования по энергоэффективности в данных режимах. В [14, 15] приведен типовой цикл работы для данных режимов, характерный для насосных систем с приблизительно постоянным расходом. Данный профиль предполагает работу в течение 25 % времени с расходом 75 %, 50 % времени с номинальным расходом и 25 % времени с расходом 110 %.

**Обзор литературы.** В [17] была проанализирована насосная установка номинальной мощностью 2,2 кВт, работающая с переменным расходом. Рассматривались синхронные электродвигатели с прямым пуском (самозапускающиеся) и постоянными магнитами и АД с классами энергоэффективности IE3

и IE4. Было рассчитано годовое потребление электроэнергии, годовые затраты на электроэнергию, доля затрат в течение жизненного цикла, определяемая стоимостью электроэнергии и годовая экономия электроэнергии в натуральном и денежном выражении при выборе того или иного электродвигателя. Однако расчет сроков окупаемости не производился, т.к. основной целью статьи было показать, что выбор электродвигателя только по классу энергоэффективности, который присваивается по КПД при номинальной нагрузке, не приводит к минимальному энергопотреблению при работе насосной установки с переменным расходом согласно типовому циклу работы, приведенному в [13].

В статье [18] анализ этих же показателей был проведен для насосной установки, работающей с приблизительно постоянным расходом, мощностью 11 кВт с двумя АД, классов энергоэффективности IE1 и IE2, рассчитаны сроки окупаемости технических решений по замене электродвигателя класса IE1 на электродвигатель класса IE2. Однако стоит отметить, что замена АД класса энергоэффективности IE1 на электродвигатели класса IE2 актуальна только в некоторых странах. Например, в странах Евразийского экономического союза (Россия, Казахстан, Белоруссия, Киргизия, Армения), законодательство которых в области энергоэффективности [19] до 1 сентября 2021 года не запрещает использовать электродвигатели класса IE1.

Таким образом, как показывает обзор литературных источников, ранее не проводился сравнительный анализ энергопотребления и экономических показателей эксплуатации электродвигателей классов энергоэффективности IE2, IE3, IE4 в насосных установках средней и высокой мощности с дроссельным регулированием и приблизительно постоянным расходом.

**Цель работы** – сравнительный анализ энергопотребления и сроков окупаемости насосной установки с применением 2-полусных АД классов энергоэффективности IE2 [20], IE3 [21] и IE4 [22] мощностью 90 кВт одного производителя, питающихся напрямую от электрической сети, для типового цикла работы, характерного для приблизительно постоянного расхода согласно данным [14, 15].

**Исходные данные и методы расчёта.** Для расчёта использованы данные насоса Grundfos NB 65-315/308 AF2ABAQE – 97836805 [23] с номинальной мощностью  $P_{RATE} = 90$  кВт и номинальной частотой вращения  $n_{RATE} = 2980$  об/мин. Данные насоса приведены в табл. 1, где  $Q_{BEP}$  – расход в точке наивысшей эффективности (англ. best efficient point – BEP), и  $H_{BEP}$  – давление насоса в точке BEP.

Таблица 1

Паспортные данные насоса	
Параметр	Значение
Тип	NB 65-315/308
$P_{RATE}$ , Вт	90 000
$n$ , об/мин	2980
$Q_{BEP}$ , м <sup>3</sup> /ч	182
$H_{BEP}$ , м	120,6
КПД, %	73,8

Графики основных характеристик насоса (зависимости давления, потребляемой мощности и КПД от расхода) показаны на рис. 1.

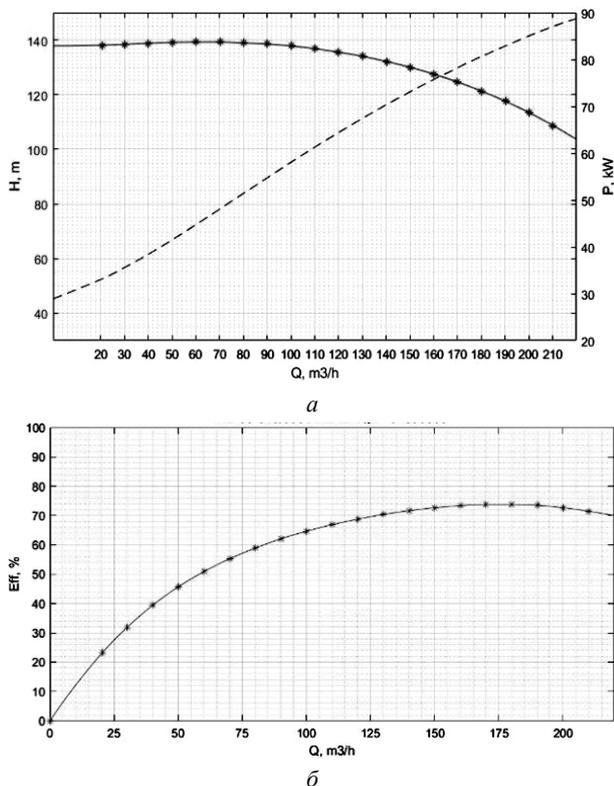


Рис. 1. Интерполированные характеристики насоса и исходные точки по данным каталога:  
 а)  $Q$ - $H$  характеристика и зависимость потребляемой мощности от расхода; б) зависимость КПД насоса от расхода

Потребляемая из электрической сети активная мощность  $m$ -го АД в  $i$ -м режиме работы вычислялась согласно формуле (1) с учетом интерполированных значений КПД электродвигателей  $\eta_{M.i.m}$  и механической мощности  $P_{mech.i.m}$  для режимов, соответствующих типовому циклу работы, аналогично подходу, примененному в работе [17]

$$P_{1.i.m} = P_{mech.i.m} / \eta_{M.i.m}. \quad (1)$$

Годовое потребление энергии для каждого АД в рассматриваемом типовом рабочем цикле насосной установки с учетом круглогодичной и круглосуточной работы было определено как

$$E_{d.m.} = 365 \cdot t_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^3 \left( P_{1.i.m} \cdot \frac{t_i}{t_{\Sigma}} \right). \quad (2)$$

где  $t_{\Sigma}$  – общее время работы, взятое равным 24 ч и  $t_i$  – время работы в каждом режиме

Стоимость электроэнергии (€) при тарифе  $GT = 0.188$  € / кВт·ч для промышленных потребителей в Германии во второй половине 2019 года [24] была определена по формуле

$$C_{y.m} = E_{y.m} \cdot GT. \quad (3)$$

Годовая экономия электроэнергии в стоимостном выражении вычислялась как

$$S_{y,31} = C_{y,3} - C_{y,1}; S_{y,32} = C_{y,3} - C_{y,2}; S_{y,21} = C_{y,2} - C_{y,1}. \quad (4)$$

Учитывая, что жизненный цикл насосных установок согласно данным [25, 26] составляет около 15–20 лет, для расчетов был принят срок эксплуатации  $n = 20$  лет. Были рассчитаны затраты на электроэнергию в течение жизненного цикла насосной установки, т.к. общая стоимость жизненного цикла насосной установки преимущественно представляет собой стоимость

потребленной электроэнергии (по крайней мере, более 50–60 %) [25, 26]. Чистая приведенная стоимость (англ. net present value –  $NPI$ ) жизненного цикла, определяемая стоимостью потребленной электроэнергии, вычислялась как

$$C_{LCCen.m} = C_{y.m} / (1 + (y - p))^n, \quad (5)$$

где  $y$  – процентная ставка (принималась равной 0,04) и  $p$  – ожидаемая годовая инфляция (принималась равной 0,02) [25, 26].

Разность затрат на электроэнергию в течение жизненного цикла  $m$ -го АД относительно существующего АД определялась как

$$\Delta C_{LCCen.3m} = C_{LCCen.3} - C_{LCCen.m}. \quad (6)$$

В случае замены существующего АД класса энергоэффективности IE2 на АД класса IE4 или IE3, срок окупаемости  $T_m$   $m$ -го АД определялся как

$$T_m = C_{iic.m} / S_{y.3m}. \quad (7)$$

где  $C_{iic.m}$  – первоначальные стоимости рассмотренных электродвигателей, которые приведены в табл. 4 согласно данным [27].

**Результаты расчётов и их обсуждение.** В табл. 2 показаны результаты расчета режимов работы насоса.

Таблица 2

Результаты расчета режимов работы насоса

Количество режимов ( $i$ )	1	2	3
$Q_{is}$ %	75	100	110
$Q_{is}$ м³/час	136,5	182,0	200,2
$H_{pump.is}$ м	132,6	120,6	113,9
$\eta_{pump.is}$ %	71,3	73,8	72,7
$P_{mech.is}$ Вт	69176	81045	85471
$P_{mech.is}$ %	76,86	90,05	94,97

В табл. 3 показаны значения КПД электродвигателей согласно каталогу для нагрузок 50 %, 75 % и 100 %, а также для каждого режима работы насоса в соответствии с рассматриваемым типовым циклом работы.

Таблица 3

Исходные и интерполированные значения КПД электродвигателей

$m$	Тип электродвигателя, IE класс	КПД по данным каталогов, % при нагрузке		
		50 %	75 %	100 %
1	АД WEG W22, IE4	95,5	96,2	96,5
2	АД WEG W22, IE3	94,3	95,2	95,2
3	АД WEG W22, IE2	94,0	94,6	94,6
$m$	Тип электродвигателя, IE класс	Интерполированные значения КПД $\eta_{M.i.m}$ , % в рабочих режимах		
		1	2	3
1	АД WEG W22, IE4	96,27	96,43	96,46
2	АД WEG W22, IE3	95,20	95,20	95,20
3	АД WEG W22, IE2	94,60	94,60	94,60

Результаты расчета по формулам (1-7) приведены в табл. 4. В случае замены электродвигателя класса энергоэффективности IE2 в действующей насосной установке на электродвигатель класса энергоэффективности IE4 экономия электроэнергии в течение расчетного срока эксплуатации составляет 268 МВт·ч, что в денежном выражении составляет 41100 €, а срок окупаемости составляет 2,18 года. В случае замены на электродвигатель класса энергоэффективности IE3 экономия электроэнергии в течение расчетного срока

эксплуатации составляет 88 МВт·ч, что составляет в денежном выражении 13500 €, срок окупаемости составляет 5,11 года. Таким образом, для рассмотренных условий целесообразна модернизация насосной установки путем замены электродвигателя класса энергоэффективности IE2. При этом, несмотря на более высокую стоимость, применение электродвигателя класса энергоэффективности IE4 обеспечивает существенно меньший срок окупаемости, чем применение электродвигателя класса IE3.

Таблица 4  
Результаты расчета энергопотребления и экономии электроэнергии

<i>m</i>	1	2	3
Тип электродвигателя, IE класс	АД WEG W22, IE4	АД WEG W22, IE3	АД WEG W22, IE2
$E_{v,m}$ , МВт·ч	719,5	728,5	732,9
$C_{v,m}$ , тыс. €	135,27	136,96	137,78
$S_{v,3m}$ , €	2513,4	824,8	0
$C_{LCCen,m}$ , тыс. €	2211,9	2239,5	2253,0
$\Delta C_{LCCen,3m}$ , тыс. €	41,1	13,5	0
$C_{iic,m}$ , €	5486	4220	0
$T_m$ , лет	2,18	5,11	–

**Выводы.** В работе были произведены расчеты потребления электроэнергии и стоимостных показателей экономии электроэнергии для асинхронных электродвигателей классов IE2, IE3, IE4, в случае применения их в насосной установке, работающей с расходом, изменяющимся в пределах 75-110 % от номинального. Произведено сравнение сроков окупаемости и затрат на электроэнергию на протяжении жизненного цикла для случая замены электродвигателя в связи с плановой модернизацией. Срок окупаемости в случае замены электродвигателя класса энергоэффективности IE2 на электродвигатель класса энергоэффективности IE4 составляет 2,18 года. При этом срок окупаемости в случае замены электродвигателя класса энергоэффективности IE2 на электродвигатель класса энергоэффективности IE3 значительно больше и составляет 5,11 года. Таким образом, выбор электродвигателя класса энергоэффективности IE4 более выгоден при модернизации с экономической точки зрения, несмотря на то, что его стоимость на 30 % выше, чем у электродвигателя класса IE3. Следует заметить, что такое техническое решение будет особенно актуальным в свете требований документа [5], согласно которым в Евросоюзе применение электродвигателей класса IE4 для мощностей выше 75 кВт является обязательным с 1 июля 2023 года.

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

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. IEC 60034-30-1/ Ed. 1; IEC: 2014-03. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/136> (accessed on 10 June 2020).
2. *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)* IEC 60034-30-2/ IEC: 2016-12. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/30830> (accessed on 10 June 2020).

3. *European Commission. Study on improving the energy efficiency of pumps*, 2001. Available at: <https://www.jacobalbertsen.dk/komposit/Darmstadtrapport.pdf> (accessed on 10 June 2020).
4. *European Commission Regulation (EC) No. 640/2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to Ecodesign Requirements for Electric Motors*, (2009), amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. Document 32014R0004. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004> (accessed on 11 June 2020).
5. *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*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1781&from=EN> (accessed on 10 June 2020).
6. *Efficiency regulations for motors: international norms*. NORD DRIVESYSTEMS Group, S4700 Part. No. 6069202 / 4019. Available at: [https://www.nord.com/cms/media/documents/bw/S4700\\_6069202\\_4019\\_Screen.pdf](https://www.nord.com/cms/media/documents/bw/S4700_6069202_4019_Screen.pdf) (accessed on 11 June 2020).
7. 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: <http://dx.doi.org/10.2760/345473>.
8. Arun Shankar V.K., Umashankar S., Paramasivam S., Hanigovszki N. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 2016, vol. 181, pp. 495-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>.
9. 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: <https://doi.org/10.1109/epe.2016.7695671>.
10. 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: <https://doi.org/10.1109/powereng.2015.7266367>.
11. 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: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2288203>.
12. 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: <https://doi.org/10.3390/en12061144>.
13. *Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012*. Document 02009R0641-20170109. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02009R0641-20170109> (accessed on 11 June 2020).
14. *Extended product approach for pumps*, Copyright © 2014 by Europump. Published by Europump. Available at:

[http://europump.net/uploads/Extended%20Product%20Approach%20for%20Pumps%20-%20A%20Europump%20guide%20\(27OCT2014\).pdf](http://europump.net/uploads/Extended%20Product%20Approach%20for%20Pumps%20-%20A%20Europump%20guide%20(27OCT2014).pdf) (accessed on 11 June 2020).

15. Stoffel B. *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units. Background and Methodology*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100597-2.00009-4>.

16. Commission regulation (EU) No 547/2012 of June 25, 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water pumps. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32012R0547> (accessed on 11 June 2020).

17. 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: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.

18. Oshurbekov S.Kh., Kazakbaev V.M., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Paramonov A.S. Analysis of electricity consumption of induction motors of IE1 and IE2 efficiency classes in a 11 kW pump installation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 18-24. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.03>.

19. Technical regulations of Eurasian Economic Union (TR EAEC 048/2019). *About requirements of the energy efficiency of power consuming devices*. (Rus). Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73240518/> (accessed on 01 June 2020).

20. W22 High Efficiency IE2 90 kW 2P 280S/M 3Ph 380-415/660/460 V 50 Hz IC411 – TEFC – B34T. *Product Details*. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/CI/en/Electric-Motors/Low-Voltage-IEC-Motors/General-Purpose-ODP-TEFC/Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22---Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22-IE2/W22-IE2-90-kW-2P-280S-M-3Ph-380-415-660-460-V-50-Hz-IC411---TEFC---B34T/p/12999061> (accessed on 01 June 2020).

21. W22 Premium Efficiency IE3 90 kW 2P 280S/M 3Ph 380-415/660/460 V 50 Hz IC411 – TEFC – B3T. *Product Details*. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/CI/en/Electric-Motors/Low-Voltage-IEC-Motors/General-Purpose-ODP-TEFC/Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22---Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22-IE3/W22-IE3-90-kW-2P-280S-M-3Ph-380-415-660-460-V-50-Hz-IC411---TEFC---B3T/p/12862411> (accessed on 10 June 2020).

22. W22 Super Premium Efficiency IE4 90 kW 2P 280S/M 3Ph 400/690/460 V 50 Hz IC411 – TEFC – B3T. *Product Details*. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/AZ/en/Electric-Motors/Low-Voltage-IEC-Motors/General-Purpose-ODP-TEFC/Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22---Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22-IE4/W22-IE4-90-kW-2P-280S-M-3Ph-400-690-460-V-50-Hz-IC411---TEFC---B3T/p/12774372> (accessed on 10 June 2020).

23. NB 65-315/308 AF2ABAQE 97836805. *Product Details*. Available at: [https://product-selection.grundfos.com/product-detail\\_product-de-tail.html?custid=GMO&productnumber=97836805&qcid=1019268753](https://product-selection.grundfos.com/product-detail_product-de-tail.html?custid=GMO&productnumber=97836805&qcid=1019268753) (accessed on 10 June 2020).

24. Eurostat Data for the Industrial Consumers in Germany. Available at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-ex-plained/index.php/Electricity\\_price\\_statistics#Electricity\\_prices\\_for\\_industrial\\_consumers](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-ex-plained/index.php/Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_industrial_consumers) (accessed on 11 June 2020).

25. *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](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pumplcc_1001.pdf).

26. Waghmode L.Y., Sahasrabudhe A.D. A comparative study of life cycle cost analysis of pumps. In *Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (ASME 2010)*, Montreal, QC, Canada, 15-18 August 2010, vol. 6, pp. 491-500. doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2010-28034>.

27. AC Electric Motor. Available at: <https://www.acelectricmotor.co.uk/> (accessed on 11 June 2020).

Поступила (Received) 04.10.2020

Принята (Accepted) 10.12.2020

Опубликована (Published) 25.02.2021

Гоман Виктор Валентинович<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Практ Владимир Алексеевич<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Казакбаев Вадим Маратович<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Дмитриевский Владимир Алексеевич<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Валеев Эдуард Альбертович<sup>1</sup>, студент,  
Парамонов Алексей Сергеевич<sup>2</sup>, студент,  
<sup>1</sup> Нижнетагильский технологический институт (филиал)

Уральского федерального университета,  
622013, Российская Федерация, Свердловская обл.,  
Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59,  
e-mail: v.v.goman@urfu.ru, valieievewot@mail.ru

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет,  
620002, Российская Федерация, Екатеринбург,  
ул. Мира, 19,

e-mail: va.prakht@urfu.ru, vadim.kazakbaev@urfu.ru,  
vladimir.dmitrievsky@urfu.ru, paramonov.aleksey@inbox.ru

V.V. Goman<sup>1</sup>, V.A. Prakht<sup>2</sup>, V.M. Kazakbaev<sup>2</sup>,  
V.A. Dmitrievskii<sup>2</sup>, E.A. Valeev<sup>1</sup>, A.S. Paramonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Tagil Technological Institute (branch)  
of Ural Federal University,  
59, Krasnogvardeiskaia Str., Nizhny Tagil,  
Sverdlovsk Region, 622013, Russia.

<sup>2</sup> Ural Federal University,  
19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

**Analysis of the payback period of a modernized pump unit with induction electric motors of advanced energy efficiency classes.**

**Aim.** The comparative analysis of energy consumption, electricity costs during lifetime cycle and payback period of a pump unit with 90 kW 2-pole induction motors, belonging to various energy efficiency classes, feeding directly from power grid. **Methods.** The examined operating modes aligned with a typical operating cycle of a pump unit with approximately constant flow rate of 75-110 % of the rated flow. The calculations were based on the pump and induction motors nameplate data, which, in their turn, were based on the manufacturers' experimental data. **Results.** The calculations of energy consumption, electricity costs and payback periods of a pump unit with 90 kW 2-pole induction motors, feeding directly from power grid have been performed in the article. The application of induction motors belonging to IE2, IE3 and IE4 energy efficiency classes has been discussed. **Practical value.** It has been demonstrated, than in case of replacement of an induction motor of energy efficiency class IE2 due to planned retrofit, payback period for an IE4 induction motor is 2.18 years, energy savings within a calculated 20-year operating period are 268MW·h, which makes €41110 in money terms. Under the same conditions, the replacement of an induction motor of energy efficiency class IE2 with an induction motor of energy efficiency class IE3 will allow to save 88 MW·h within a calculated operating period, which, expressed in monetary terms, is €13500 and the payback period is 5.11 years. Thus, the article proves that despite a higher initial price, the choice of an induction motor of energy efficiency class IE4 tends to be more economically advantageous. References 27, tables 4, figures 1.

**Key words:** centrifugal pump, energy efficiency, energy efficiency class, induction motor, throttling control, energy saving, lifetime cycle, payback period.