

УДК 621.313

doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.03

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

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ, РАБОТАЮЩИМИ В СОСТАВЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Мета. Порівняльний аналіз енергоспоживання електродвигунів різних типів і класів енергоефективності в електроприводі відцентрового насоса потужністю 2,2 кВт системи водопостачання з дросельним регулюванням. Порівнювалися синхронні електродвигуни з прямим пуском і постійними магнітами на роторі класу енергоефективності IE4 і асинхронні електродвигуни класів енергоефективності IE4 і IE3 різних виробників. Методика. Розрахунок енергоспоживання проводився на основі даних насоса і електродвигунів, що надаються виробниками, і включав в себе розрахунок енергоспоживання відцентровим насосом в типовому робочому циклі, який передбачає роботу зі зниженими навантаженнями протягом тривалого часу. Результат. Отримано розрахункові дані по добовому і річному енергоспоживанню розглянутих електродвигунів в типовому робочому циклі насоса, річна вартість електроенергії виходячи з середньоевропейського тарифу, економія в грошовому вираженні щодо найгіршого електродвигуна з розглянутих. Практичне значення. Показано, що вибір електродвигуна за КПД при найменшому навантаженні, тобто фактично на основі присвоєного відповідно до стандарту IEC 60034-30-1 класу енергоефективності IE, не призводить до мінімального енергоспоживання відцентрового насосного агрегату зі змінною подачею протягом типового робочого циклу. Також показано, що застосування в насосних агрегатах зі змінною витратою синхронних електродвигунів з прямим пуском і постійними магнітами класу IE4 в ряді випадків призводить до більшого енергоспоживання, ніж застосування асинхронних електродвигунів класу IE4, а іноді і класу IE3. Таким чином, при виборі класу енергоефективності електродвигуна як для насосного агрегату, так і для будь-якого іншого механізму, що працює значний час при знижених навантаженнях, слід проводити розрахунок енергоспоживання на підставі даних про типовий робочий цикл або з експериментальних даних. При цьому існуючий підхід, заснований на визначенні індексу енергетичної ефективності EEI, не дає інформації про економію електроенергії в натуральному і вартісному виразах, на відміну від описаного в роботі підходу. При виборі електродвигуна за принципом дії слід враховувати, крім енергоспоживання, те, що синхронні електродвигуни з постійними магнітами мають велику вартість, ніж асинхронні електродвигуни, з труднощі їх запуску при значному моменті інерції, а отримання магнітів з рідкоземельних металів пов'язане зі значним екологічним збитком. Бібл. 40, табл. 5, рис. 6.

Ключові слова: відцентрові насоси, асинхронні електродвигуни, синхронні електродвигуни з прямим пуском і постійними магнітами, клас енергоефективності, коефіцієнт корисної дії, дросельне регулювання.

Цель. Сравнительный анализ энергопотребления электродвигателей разных типов и классов энергоэффективности в электроприводе центробежного насоса мощностью 2,2 кВт системы водоснабжения с дроссельным регулированием. Сравнялись синхронные электродвигатели с прямым пуском и постоянными магнитами на роторе класса энергоэффективности IE4 и асинхронные электродвигатели классов энергоэффективности IE4 и IE3 различных производителей. Методика. Расчет энергопотребления проводился на основе данных насоса и электродвигателей, предоставляемых производителями, и включал в себя расчет энергопотребления центробежным насосом в типовом рабочем цикле, предполагающем работу с пониженными нагрузками в течение продолжительного времени. Результат. Получены расчетные данные по суточному и годовому энергопотреблению рассмотренных электродвигателей в типовом рабочем цикле насоса, годовая стоимость электроэнергии исходя из средневропейского тарифа, экономия в денежном выражении относительно наихудшего электродвигателя из рассмотренных. Практическое значение. Показано, что выбор электродвигателя по КПД при номинальной нагрузке, то есть фактически на основе присвоенного в соответствии со стандартом IEC 60034-30-1 класса энергоэффективности IE, не приводит к минимальному энергопотреблению центробежного насосного агрегата с переменной подачей в течение типового рабочего цикла. Также показано, что применение в насосных агрегатах с переменным расходом синхронных электродвигателей с прямым пуском и постоянными магнитами класса IE4 в ряде случаев приводит к большему энергопотреблению, чем применение асинхронных электродвигателей класса IE4, а иногда и класса IE3. Таким образом, при выборе класса энергоэффективности электродвигателя как для насосного агрегата, так и для любого другого механизма, работающего значительное время при пониженных нагрузках, следует проводить расчет энергопотребления на основании данных о типовом рабочем цикле либо экспериментальных данных. При этом существующий подход, основанный на определении индекса энергетической эффективности EEI, не дает информации об экономии электроэнергии в натуральном и стоимостном выражениях, в отличие от описанного в работе подхода. При выборе электродвигателя по принципу действия следует учитывать помимо энергопотребления, то, что синхронные электродвигатели с постоянными магнитами имеют большую стоимость, чем асинхронные электродвигатели, имеются трудности их запуска при значительном моменте инерции, а получение магнитов из редкоземельных металлов сопряжено со значительным экологическим ущербом. Библ. 40, табл. 5, рис. 6.

Ключевые слова: центробежные насосы, асинхронные электродвигатели, синхронные электродвигатели с прямым пуском и постоянными магнитами, класс энергоэффективности, коэффициент полезного действия, дроссельное регулирование.

Введение. Широко известные достоинства час- высоком КПД и высоких показателях динамической и тотно-регулируемых приводов (ЧРП) заключаются в статической характеристик, таких как жесткость, диа-

пазон регулирования, точность поддержания регулируемых величин.

Однако, доля частотно-регулируемых приводов согласно данным Европейской комиссии [1] для Германии составила около 30 %, а для Швейцарии согласно исследованию описанному в [2] около 20 %.

Таким образом, во многих приложениях широко применяются электродвигатели, питающиеся напряжением от электрической сети.

В частности, такие распространенные механизмы как центробежные насосы, компрессоры и вентиляторы не требуют широкий диапазон регулирования, высокий пусковой момент и быстродействие. Поэтому асинхронные электродвигатели (АД), работающие непосредственно от сети, широко применяются в приводах упомянутых турбомеханизмов. Также рядом производителей предлагается использование синхронных электродвигателей с прямым пуском и постоянными магнитами (СДсППиПМ) высокого класса энергоэффективности, питающихся напрямую от сети. Регулирование производительности насосов в этом случае производится с помощью задвижек (дрессельное регулирование), путем управляемого изменения характеристики гидравлической сети.

По данным международного энергетического агентства [3], электродвигатели потребляют 46 % электроэнергии, вырабатываемой в мире. На их долю приходится около 70 % общего промышленного потребления электроэнергии. Согласно отчету Европейской комиссии [3], на насосные системы приходится почти 22 % энергии, поставляемой электродвигателями в мире, как показано на рис. 1. Поэтому изучение возможностей повышения энергетической эффективности насосных агрегатов является актуальной задачей.

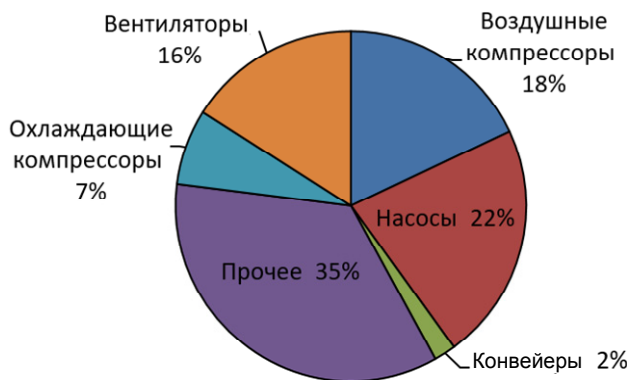


Рис. 1. Потребление энергии для различных приложений

Повышение энергетической эффективности насосного агрегата возможно за счет изменения в гидравлической сети на которую работает агрегат, применения систем управления, включая ЧРП, оптимизации и распределения нагрузок (в случае параллельно работающих агрегатов), а также за счет надлежащего выбора элементов агрегата, в частности применения электродвигателей более высокого класса энергоэффективности [4]. Последний упомянутый способ изучается в данной работе, как наиболее актуальный для насосов при дроссельном регулировании.

Минимальный уровень энергетической эффективности электродвигателей определен в Приложении I к [5]. Классы энергоэффективности основываются на значениях, указанных в [6]. В соответствии с регламентом Евросоюза [5] с 1 января 2017 все электродвигатели мощностью от 0,75 до 375 кВт должны иметь класс энергоэффективности не ниже IE3 либо IE2, в случае если они используются в составе ЧРП. До 2030 года согласно Policy Option 4 [7] следует ожидать введение минимального допустимого класса энергоэффективности не ниже IE4.

Классификация электродвигателей в [5] и [6] основывается только на КПД в номинальном режиме работы, то есть при номинальной мощности на валу, но не учитывает КПД электродвигателей при частичной нагрузке, которая характерна для электродвигателей в составе насосных агрегатов [8].

На практике, большую часть времени центробежные насосные установки эксплуатируются при низких или средних нагрузках, что происходит ввиду изменения численности людей в зданиях и/или атмосферных условий, при этом насосы проектируются, так чтобы удовлетворять максимальным нагрузкам [9]. В [10] оценено, что 75 % центробежных насосных установок имеют завышенную мощность, многие из них более, чем на 20 %. В [11] оценено, что только 20 % электродвигателей в насосах работают при номинальной мощности.

В публикациях [12, 13] производится сравнение энергопотребления насосного агрегата с электродвигателями разных типов и классов IE с ЧРП, так как при частотном регулировании достигается значительная экономия энергии, особенно в условиях малых нагрузок. Тем не менее, ввиду сохранившегося во многих отраслях, массового применения нерегулируемого электропривода, в ряде работ производится сравнение характеристик электродвигателей, которые работают непосредственно от сети. Так в статье [14] производился сравнительный анализ АД класса энергоэффективности IE3 и СДсППиПМ в составе вентилятора в пусковом и в установившемся режимах. Данный анализ показал, что КПД и коэффициент мощности СДсППиПМ существенно выше, чем у АД. Однако, анализ проводился для условий номинальной нагрузки. В статье [15] рассматривается работа СДсППиПМ в составе насосного агрегата. Сравняются характеристики предлагаемой конструкции электродвигателя с результатами моделирования в номинальном режиме насосной установки в условиях пуска с высоким моментом инерции. В статье [16] рассматривается устройство и характеристики установившегося и переходного режимов работы АД и СДсППиПМ мощностью 2,2 кВт в номинальном режиме и на холостом ходу. Для режима работы с номинальной мощностью определен показатель годовой экономии средств в случае использования СДсППиПМ.

Одним из основных выводов публикаций [13-16] является наличие преимущества СДсППиПМ над АД по таким параметрам как КПД и коэффициент мощности. Заметим, однако, что в данных публикациях сравнение АД и СДсППиПМ проводилось преимуще-

ственно для режимов работы с номинальной нагрузкой. В данной статье рассматриваются режимы работы АД и СДсППиПМ в составе насосного агрегата с переменной нагрузкой, зависящей от потребления воды, например, в крупном здании. В работе рассчитывается энергопотребление электроприводов при нагрузках, отличных от номинальной нагрузки электродвигателя, и полученные данные сравниваются для оценки потенциала энергосбережения электродвигателей классов энергоэффективности IE3 и IE4.

Ввиду того, что класс энергоэффективности IE электродвигателя присваивается по КПД в номинальном режиме в соответствии со стандартом IEC 60034-30-1 [6], но в HVAC-приложениях (англ. Heating, Ventilation, & Air Conditioning – Отопление, вентиляция и кондиционирование) электродвигатель в таком режиме работает лишь небольшую долю времени, основной целью этой статьи является определение критерия выбора электродвигателей по условию минимального энергопотребления с учетом реальных условий работы центробежных насосных агрегатов.

Характеристики насосного агрегата и электродвигателей. Привод насосного агрегата с одним электродвигателем, питающийся напрямую от электрической сети, показан на рис. 2 [8]. Он состоит из центробежного насоса, который без промежуточных механических передач соединен с электродвигателем.

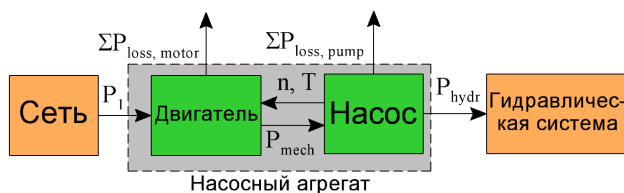


Рис. 2. Схема нерегулируемого насосного агрегата

Потребляемая приводом активная мощность P_1 преобразуется электродвигателем в механическую мощность P_{mech} . Мощность P_{mech} меньше P_1 на величину потерь в электродвигателе [8]:

$$P_{mech} = P_1 - \Sigma P_{loss,m}, \quad (1)$$

где $\Sigma P_{loss,m}$ – суммарные потери электродвигателя.

Механическая мощность электродвигателя P_{mech} передается на насос и, следовательно, в условиях отсутствия промежуточных механических передач, равна входной механической мощности насоса. В насосе механическая мощность P_{mech} преобразуется в гидравлическую мощность P_{hydr} . Разница между P_{mech} и P_{hydr} является величиной общих потерь $\Sigma P_{loss,pump}$ в насосе [8]:

$$P_{hydr} = P_{mech} - \Sigma P_{loss,pump}. \quad (2)$$

Гидравлическая мощность определяется расходом Q и напором насоса H_{pump} . Напор насоса зависит от расхода в соответствии с характеристикой $Q-H$ насоса при заданной частоте вращения насоса n . Следовательно, необходимая электрическая мощность P_1 зависит от расхода Q [8]:

$$P_1 = \rho g Q H_{pump} + \Sigma P_{loss,pump} + \Sigma P_{loss,m}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободно падения.

Для сравнения энергопотребления электродвигателей насосной установки при регулировании расхода

с помощью задвижки рассматривался центробежный насос NM4 40/25B (производство Calpeda), мощностью 2,2 кВт с номинальной скоростью вращения $n = 1450$ об/мин [17]. Данные насоса приведены в табл. 1, где Q_{BER} – расход в точке максимальной эффективности (англ. best efficient point, *BER*), H_{BER} – напор в *BER*.

Таблица 1
Паспортные характеристики насоса [17]

Параметр	Значение
Тип	NM4 40/25B
P , Вт	2200
n , об/мин	1450
Q_{BER} , м ³ /ч	19
H_{BER} , м	17,8
КПД, %	60

Расчет проводился для 8-и разных 4-полюсных электродвигателей мощностью 2,2 кВт, а именно: трех СДсППиПМ класса IE4, работающих от сети (Bharat Bijlee SynchroVERT [18], WEG [19], SEW-Eurodrive [20]), двух АД класса IE4 (Siemens [21] и WEG [22]) и трех АД класса IE3 (Siemens [21], WEG [23] и ABB [24]). Данные о величине КПД электродвигателей приведены в табл. 2.

Таблица 2
КПД 4-полюсных электродвигателей мощностью 2,2 кВт [18-24]

m	Тип	Класс	КПД, % при нагрузке, %		
			50 %	75 %	100 %
1	LSPMSM SEW DRU J	IE4	88,0	90,5	91,2
2	LSPMSM SynchroVERT	IE4	88,6	89,4	89,5
3	LSPMSM WEG WQuattro	IE4	86,0	89,0	90,2
4	IM Siemens 1LE1004	IE4	88,3	89,6	89,5
5	IM WEG W22	IE4	88,5	89,5	89,5
6	IM Siemens 1LE1003	IE3	86,4	87,3	86,7
7	IM WEG W21	IE3	86,5	87,0	87,0
8	IM ABB M3BP	IE3	85,1	86,9	86,7

Оценка энергопотребления насосного агрегата.

Работа насосного агрегата рассматривается в режимах, где расход воды в течение цикла работы насосного агрегата меняется, в соответствии с гидравлической нагрузкой, характерной для HVAC-приложений. Типовой цикл работы насоса (рис. 3), определенный регламентом Евросоюза [25] подразделен на 4-е режима. Особенностью цикла является то, что большую часть времени насос работает с расходом гораздо меньше номинального. Например, с расходом 25 % от номинального насос работает относительное время $t_i/t_\Sigma = 44$ %, где t_Σ – суммарное время работы, принятое равным 24 часам, t_i – время работы насоса в данном режиме. При этом относительное время работы в номинальном режиме не превышает 6 %. Данный профиль нагрузки является типовым для насосных систем с потребностью в изменении расхода в широких пределах (систем с переменным расходом) [6].

Электродвигатель включается в сеть непосредственно, то есть скорость двигателя не регулируется с помощью преобразователя частоты в течение цикла, а расход насоса Q регулируется с помощью задвижки. Напор воды в этом случае меняется в соответствии с кривой $Q-H$ насоса, а рабочая точка является точкой пересечения характеристики насоса и характеристики гидравлической системы. На рис. 4 показаны результаты интерполяции $Q-H$ характеристики выбранного насоса и исходные точки согласно данным производителя [17], а также мощность насоса в рабочем диапазоне расходов.

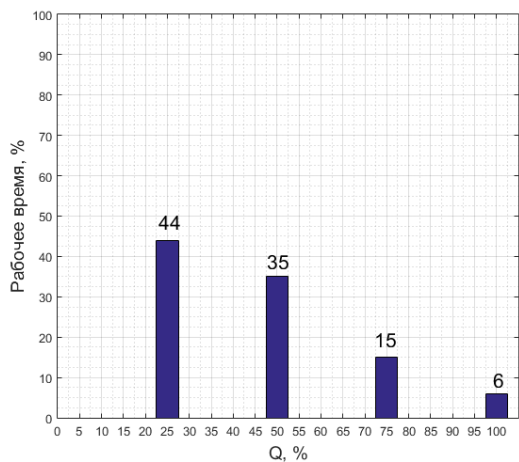


Рис. 3. Временная зависимость расхода воды за цикл

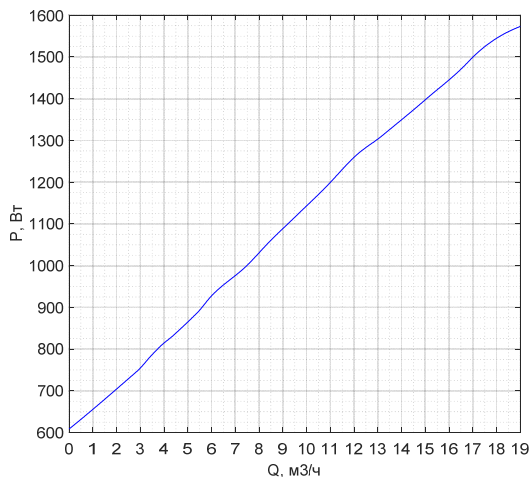
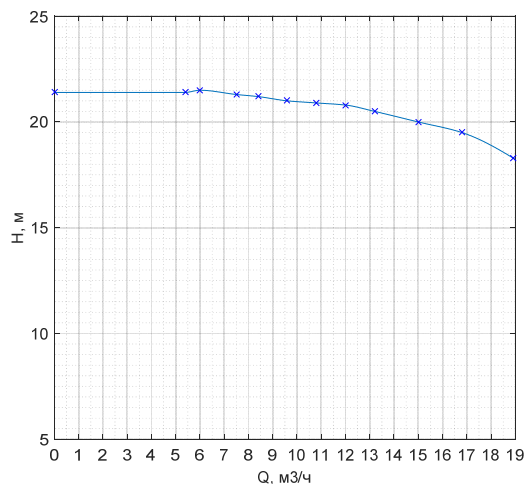


Рис. 4. $Q-H$ – характеристика насоса и зависимость мощности от расхода

Кривая мощности насоса в зависимости от расхода приводится производителем насоса (рис. 4). По данной кривой была определена мощность насоса в 4-х стандартных режимах работы (25 %, 50 %, 75 %, 100 % расхода). Расход, соответствующий 100 %, был определен по кривой КПД насоса [17] как соответствующий максимальному КПД. На основании известных паспортных значений КПД электродвигателей (табл. 2) путем полиномиальной интерполяции кривой потерь $\Sigma P_{\text{loss},m}$ каждого электродвигателя были определены величины КПД для четырех режимов работы насосного агрегата. Как показано в [27], зависимость потерь электродвигателя от нагрузки хорошо описывается полиномом второго порядка, коэффициенты которого можно легко получить по 3-м точкам исходных данных по КПД электродвигателей.

Полученные значения КПД для каждого электродвигателя $\eta_{m,i,m}$ приведены в табл. 3, в которой также указаны для каждого режима работы: расход, напор, мощность насоса, выходная мощность электродвигателей в процентах относительно номинальной.

Таблица 3

Интерполированные значения КПД электродвигателей

i	1	2	3	4
$Q_{i,s}$, %	25	50	75	100
$Q_{i,s}$, м³/ч	4,75	9,50	14,25	19,00
$H_{\text{pump},i,s}$, м	21,4	21,0	20,2	17,8
$P_{\text{mech},i,s}$, Вт	851	1116	1361	1573
$P_{\text{mech},i,s}$, %	38,7	50,7	61,9	71,5
КПД $\eta_{m,i,m}$, %				
i	1	2	3	4
LSPMSM SEW DRU J	85,5	88,1	89,5	90,3
LSPMSM SynchroVERT	87,7	88,6	89,1	89,3
LSPMSM WEG WQuattro	83,3	86,1	87,8	88,7
IM Siemens 1LE1004	86,7	88,4	89,2	89,5
IM WEG W22	85,8	88,2	89,3	89,7
IM Siemens 1LE1003	84,9	86,5	87,1	87,3
IM WEG W21	84,8	86,3	86,9	87,2
IM ABB M3BP	82,7	85,2	86,3	86,8

Потребляемая из сети активная электрическая мощность в каждом режиме вычислялась согласно выражению (4)

$$P_{1,i,m} = P_{\text{mech},i,m} / \eta_{m,i,m}, \quad (4)$$

где $\eta_{m,i,m}$ – КПД m -го электродвигателя в i -м режиме работы.

Результаты расчета приведены в табл. 4.

Суточное потребление электроэнергии каждого электродвигателя (кВт·ч) за полный цикл работы насосного агрегата в соответствии с рассматриваемым профилем нагрузки определяется выражением

$$E_{d,m} = \frac{t_{\Sigma}}{1000} \cdot \sum_{i=1}^4 (P_{1,i,m} \cdot t_i / t_{\Sigma}). \quad (5)$$

При круглогодичной работе насосного агрегата годовая величина энергопотребления может быть рассчитана как:

$$E_{y,m} = E_{d,m} \cdot 365. \quad (6)$$

Стоимость потребленной электроэнергии (Евро) с учетом принятого средневропейского тарифа на электроэнергию $GT = 0,1149 \text{ €/кВт}\cdot\text{ч}$ для потребителей не являющимися домохозяйствами во втором полугодии 2018 г. [28], рассчитывается как

$$C_{y,m} = E_{y,m} \cdot GT. \quad (7)$$

Для сопоставления энергопотребления и стоимости затраченной электроэнергии насосных агрегатов с различными электродвигателями, по выражению (8) рассчитывались разности стоимости электроэнергии относительно насосного агрегата с электродвигателем с наибольшим расходом электроэнергии при рассматриваемом профиле нагрузки (электродвигатель № 8 класса IE3 производства ABB)

$$S_{y,m} = C_{y,8} - C_{y(1...7)}, \quad (8)$$

Результаты расчетов по формулам (4-8) сведены в табл. 4 и 5, а также показаны на рис. 5, 6.

Таблица 4

Потребляемая мощность $P_{i,m}$, Вт

i	1	2	3	4
LSPMSM SEW DRU J	996,2	1266,1	1520,3	1742,3
LSPMSM SynchroVERT	971,3	1258,6	1527,4	1760,8
LSPMSM WEG WQuattro	1022,6	1295,2	1550,9	1773,1
IM Siemens 1LE1004	982,2	1262	1526,3	1757,5
IM WEG W22	992,9	1264,8	1524,4	1753,8
IM Siemens 1LE1003	1003,1	1289,9	1562,5	1802,5
IM WEG W21	1004,4	1293,1	1566	1805
IM ABB M3BP	1029,4	1309,4	1576,4	1812,2

Таблица 5

Стоимостные характеристики электропотребления

Тип	$E_{d,m}$, кВт·ч	$E_{y,m}$, кВт·ч	$C_{y,m}$, €	$S_{y,m}$, €
LSPMSM SEW DRU J	29,1	10635	2113,1	73,8
LSPMSM SynchroVERT	28,9	10535	2093,3	93,6
LSPMSM WEG WQuattro	29,8	10882	2162,3	24,6
IM Siemens 1LE1004	29	10585	2103,1	83,8
IM WEG W22	29,1	10630	2112,1	74,8
IM Siemens 1LE1003	29,6	10822	2150,3	36,6
IM WEG W21	29,7	10843	2154,4	32,5
IM ABB M3BP	30,2	11006	2186,9	0

График на рис. 5 демонстрирует то, что электродвигатель №3 – СДсППиПМ класса IE4 в рассматриваемом рабочем цикле, характерном для насосов с переменным расходом, потребляет больше электроэнергии, чем АД класса IE3 № 6 и №7, но меньше,

чем АД класса IE3 №8. Соответственно согласно рисунку 6 данный электродвигатель класса IE4 обеспечивает меньшую экономию средств, чем электродвигатели №6 и №7 класса IE3. СДсППиПМ №1 и №2 имеют показатели энергопотребления, приблизительно совпадающие с АД класса IE4 №4 и №5. Наименьшее энергопотребление имеет электродвигатель №2 – СДсППиПМ SynchroVERT, а наибольшее – электродвигатель №8, АД ABB.

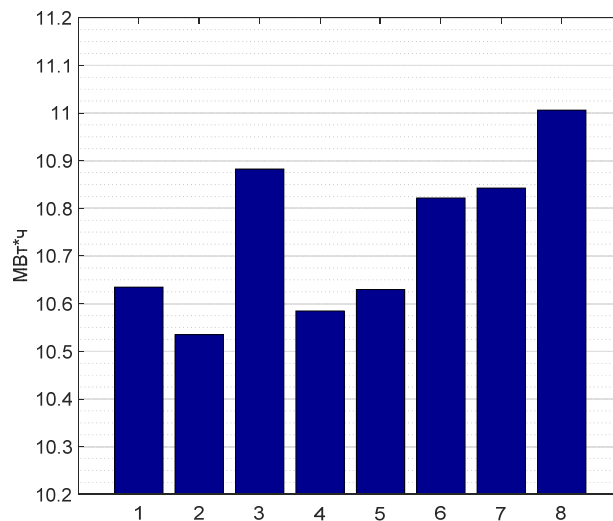


Рис. 5. Годовое потребление энергии:

1 – СДсППиПМ IE4 SEW DRU J; 2 – СДсППиПМ IE4 Synchrovert; 3 – СДсППиПМ IE4 Weg WQuattro; 4 – АД IE4 Siemens 1LE1004; 5 – АД IE4 Weg W22; 6 – АД IE3 Siemens 1LE1003; 7 – АД IE3 Weg W21; 8 – АД IE3 ABB M3BP.

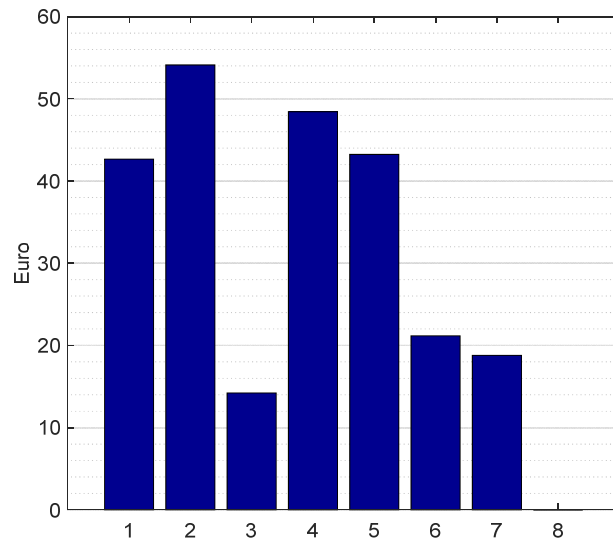


Рис. 6. Экономия затрат на электроэнергию относительно электродвигателя № 8:

1 – СДсППиПМ IE4 SEW DRU J; 2 – СДсППиПМ IE4 Synchrovert; 3 – СДсППиПМ IE4 Weg WQuattro; 4 – АД IE4 Siemens 1LE1004; 5 – АД IE4 Weg W22; 6 – АД IE3 Siemens 1LE1003; 7 – АД IE3 Weg W21; 8 – АД IE3 ABB M3BP

Полученные результаты, показанные на рис. 5 и 6, являются следствием того, что согласно принятому стандарту [6], электродвигатели классифицируются по энергопотреблению в соответствии со значением КПД в номинальном режиме работы, при

нагрузке, равной 100 %. Однако в насосных агрегатах электродвигатели значительную часть времени работают при нагрузке в 2...4 раза меньше номинальной и как следствие имеют пониженный КПД. При этом в существующих стандартах не установлены минимальные значения КПД электродвигателей, питающихся непосредственно от сети, при нагрузках ниже номинальных.

Таким образом, выбор электродвигателя на основании его класса энергоэффективности IE₂ в ряде приложений, таких как насосы с переменным расходом, не приведет к достижению минимального энергопотребления. Заметим, что для частотно-регулируемых электродвигателей стандартом IEC 60034-30-2 [29] определены значения КПД в семи режимах нагрузки отличных от номинального. В черновой версии IEC 60034-30-2 [30] предлагалось для частотно-регулируемых электродвигателей насосов и вентиляторов (приводов с квадратичной зависимостью нагрузки от скорости) вычислять общий КПД как усредненный средневзвешенный показатель КПД при пониженных скоростях и нагрузках.

Поэтому при выборе электродвигателя для насосного агрегата, работающего с переменным расходом, нельзя руководствоваться только классом энергоэффективности IE и номинальным значением КПД, а стоит производить расчет энергопотребления в зависимости от режимов работы либо ориентироваться на индекс энергоэффективности насосного агрегата (см. ниже).

Стоит отметить, что СДсППиПМ имеют большую стоимость, чем АД (особенно класса IE3), из-за наличия в конструкции дорогостоящих редкоземельных магнитов. Получение же магнитов из редкоземельных металлов сопряжено со значительным экологическим ущербом, так в [31] указано, что производство каждой тонны материала для редкоземельных магнитов сопряжено с генерацией 1-1,4 т радиоактивных отходов. Лишь небольшая часть данных отходов содержит редкоземельные элементы и в дальнейшем перерабатывается для их извлечения [31]. Существует также технологическая зависимость от поставщиков редкоземельных элементов из Китая, так как более 95 % мировой добычи редкоземельных элементов контролируется Китаем [32]. Из-за монополии Китая цены на редкоземельные элементы нестабильны и могут меняться в несколько раз в течение нескольких лет [33].

Отметим также трудности запуска СДсППиПМ при значительном моменте инерции нагрузки, что существенно ограничивает их область применения. Обзор современных статей по СДсППиПМ [34-37] показывает, что максимальный момент инерции нагрузки для таких электродвигателей относительно небольшой и недостаточен, чтобы запуститься и выйти на номинальную скорость, например, турбомеханизму со стальным рабочим колесом. Данные электродвигатели не способны запуститься со многими типовыми механизмами, такими как: поршневые ком-

прессоры, винтовые компрессоры, плунжерные насосы, конвейеры, эскалаторы и т.д. [34-37].

Согласно результатам сравнения СДсППиПМ и АД классов IE3 и IE4, описанного в [38] СДсППиПМ демонстрируют большее пиковое значение пускового тока, что может вызвать срабатывание типовых автоматических выключателей. Броски пускового тока могут быть причиной нежелательных отключений и могут повреждать контакторы, предохранители и устройства защиты, такие как автоматические выключатели или комплектные распределительные устройства [38]. При этом пуск с переключением «звезда-треугольник» или с помощью электронных устройств плавного пуска не рекомендован либо не возможен для СДсППиПМ [38]. Также СДсППиПМ намного более чувствительны к падению напряжения [38] и более чувствительны к несимметрии по фазам [38].

С учетом отмеченных выше недостатков СДсППиПМ более оправданным в настоящее время является применение в приложениях с переменной нагрузкой, сильно отличающейся от номинального режима, АД класса IE4, а не СДсППиПМ.

Расчет и оценка индекса энергоэффективности насосного агрегата в соответствии с требованиями европейских стандартов. Энергоэффективность циркуляционных насосов, работающих преимущественно с переменным расходом, оценивается в соответствии с регламентом Евросоюза [25]. В данном документе в качестве типового профиля нагрузки насоса принят профиль, указанный на рис. 3, согласно которому велись вышеописанные расчеты. Согласно [8] индекс энергетической эффективности (*EEI*) хорошо обоснован для оценки энергетической эффективности циркуляционных насосов и сейчас предлагается для других применений в сфере насосов.

То есть, *EEI* является наиболее подходящим показателем для оценки энергоэффективности насосных систем с переменным расходом различного назначения, в отличие от минимального индекса эффективности (*MEI*), который определен в [39] и основывается на значениях КПД в относительно ограниченном диапазоне рабочих точек (75...110 % расхода) [8].

Согласно подходу ассоциации Euro pump [26, с. 12] и [40] *EEI* определяется выражением:

$$EEI = P_{1,avg} / P_{1,ref}, \quad (9)$$

где $P_{1,avg}$ – средневзвешенное значение потребляемой насосом электрической мощности, которое определяется следующим выражением [25]:

$$P_{1,avg} = \sum_{i=1}^4 [(t_i/t_{\Sigma}) \cdot P_{1,i}]. \quad (10)$$

Знаменатель в выражении (9) $P_{1,ref}$ – это электрическая мощность «справочной» системы, которая согласно [26, 40] определяется выражением

$$P_{1,ref} = P_{hydr.ref} / (\eta_{motor.ref} \cdot \eta_{pump.min.req}). \quad (11)$$

В обоих выражениях $P_{hydr.ref}$ – гидравлическая мощность справочной системы, которая определяется как произведение расхода Q_{BER} (м³/с) и напора H_{BER} (Па): в данном случае $P_{hydr.ref} = 921,6$ Вт.

В выражении (11) $\eta_{\text{motor.ref}}$ – КПД справочного электродвигателя, который был принят равным КПД 4-х полюсного электродвигателя мощностью 2,2 кВт класса энергоэффективности IE3 согласно [6] ($\eta_{\text{motor.ref}} = 86,7\%$); $\eta_{\text{pump.min.req}}$ – минимальный требуемый КПД справочного насоса в точке наилучшей эффективности [39], зависящий от табличного коэффициента C , определяемого типом насоса, номинальной частотой вращения насоса n и его энергоэффективностью, расхода $Q_{\text{ВЕР}}$ и удельной частотой вращения n_s , в свою очередь зависящей от $H_{\text{ВЕР}}$ и n . Подробный расчет $\eta_{\text{pump.min.req}}$ в данной статье не приводится, результат расчета: $\eta_{\text{pump.min.req}} = 50,66\%$. Согласно формуле (11) значение $P_{1.ref} = 2098,23$ Вт в данном случае.

Результаты расчетов по выражениям (9-11) приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что значения EEI для насосного агрегата с различными электродвигателями соответствуют закономерностям, проявленным на рис. 5 и 6. Таким образом, EEI характеризует энергопотребление насосного агрегата более объективно, чем класс энергоэффективности электродвигателя (IE), который зависит только от КПД в номинальном режиме.

Таблица 6

Определение индекса энергоэффективности насосной системы

m	Тип	$P_{1.avg}$, Вт	EEI
1	LSPMSM SEW DRU J	1214,0	0,5786
2	LSPMSM SynchroVERT	1202,6	0,5732
3	LSPMSM WEG WQuattro	1242,3	0,5921
4	IM Siemens 1LE1004	1208,3	0,5759
5	IM WEG W22	1213,4	0,5784
6	IM Siemens 1LE1003	1235,4	0,5888
7	IM WEG W21	1237,7	0,5899
8	IM ABB M3BP	1256,4	0,5988

Отметим, что для циркуляционных насосов, являющихся предметом регламента Евросоюза [25], с 2005 г. существует добровольная маркировка продукции членами ассоциации Europump с помощью буквенного обозначения класса энергоэффективности A...G. Представляется актуальным введение подобной маркировки и для насосных агрегатов промышленного назначения, работающих с переменным расходом.

Выводы.

В работе проведен сравнительный анализ энергопотребления электродвигателей различного типа (СДсППиПМ и АД) и класса энергоэффективности (IE3 и IE4) в составе насосного агрегата мощностью 2,2 кВт с переменным расходом, с дроссельным регулированием. Описан подход, используемый для сравнения энергетических характеристик электродвигателей, включающий расчет энергопотребления насосного агрегата в типовом рабочем цикле с различными величинами технологической нагрузки. Были рассчитаны электрические мощности, потребляемая энергия и экономия средств для 8-ми электродвигателей.

По результатам расчета по описанной методике, выполненного на основе паспортных данных электродвигателей и насосов, было показано, что применение электродвигателя с высоким КПД при номинальной нагрузке (высоким классом энергоэффективности согласно [6]) не всегда обеспечивает минимальное энергопотребление в насосном агрегате с переменной подачей в течение цикла работы.

В работе отмечается, что возможен выбор наилучшего электродвигателя по методике, основанной на определении индекса энергетической эффективности EEI [26], так как при его расчете также учитывается режим работы насосного агрегата. Однако, расчетное значение EEI не дает информации об экономии электроэнергии в натуральном и стоимостном выражениях, в отличие от описанного в работе подхода.

Также в работе показано, что рассмотренные СДсППиПМ класса IE4 не имеют значительных преимуществ перед АД класса IE4, а иногда и класса IE3, в случае применения в насосных агрегатах с переменным расходом.

Результаты работы получены при поддержке средствами МОН РФ, задание № 8.9549.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. De Almeida A.T. et al. *EuP Lot 11 Motors, Final report to the European Commission*, 2008.
2. 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.
3. *European Commission. Study on improving the energy efficiency of pumps*, 2001.
4. 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: 10.1016/j.apenergy.2016.08.070.
5. *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.
6. *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*. IEC 60034-30-1/ Ed. 1; IEC: 2014-03.
7. De Almeida A., Fong J., Falkner H. New European codesign regulation proposal for electric motors and drives. *Proceedings of the 9th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 15)*, Helsinki, Finland, September 15-17, 2015. doi: 10.2790/903731.
8. Stoffel B. *Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units. Background and Methodology*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015. doi: 10.1016/B978-0-08-100597-2.00009-4.
9. Gevorgov L. *Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives*. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
10. Shuvalova J. *Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants*. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2004.

11. Glover A., Lukaszczuk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*, 2005, vol. 2005, no. 466, pp. 36-38. doi: [10.1016/s0262-1762\(05\)70638-6](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(05)70638-6).
12. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30-2. *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, Jan. 2018. doi: [10.1109/IWED.2018.8321381](https://doi.org/10.1109/IWED.2018.8321381).
13. 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).
14. Mutize C., Wang R.-J. Performance comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications». *Proceedings of SAUPEC*, 2013. doi: [10.13140/RG.2.1.2542.1922](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2542.1922).
15. Jian Li, Jungtae Song, Yunhyun Cho. High Performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Pumping System. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010. doi: [10.1109/ISIE.2010.5637082](https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637082).
16. Kahrisangi M.G., Isfahani A.H., Vaez-Zadeh S., Sebdani M.R. Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*, 2012, pp. 2095-2732. doi: [10.1007/s11460-012-0217-8](https://doi.org/10.1007/s11460-012-0217-8).
17. 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).
18. *Catalogue of super premium efficiency SynchroVERT LSPM motors*. Available at: https://www.bharatbijlee.com/media/14228/synchrovert_catalogue.pdf (accessed 15 May 2019).
19. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/RU/en/Electric-Motors/Special-Application-Motors/Permanent-Magnet-Motors/Line-Start-PM-Motors/Wquattro-2-2-kW-4P-100L-3Ph-230-400-V-50-Hz-IC411---TEFC---B3T/p/13009386> (accessed 28 August 2019).
20. *Addendum to the operating instructions: AC Motors DR.71.J-DR.100.J with LSPM technology, 21281793/EN, 09/2014, SEW Eurodrive*. Available at: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/21343799.pdf> (accessed 20 August 2019).
21. *Catalog Siemens D81.1 Simotics GP, SD, XP, DP low-voltage motors, 05/2018*. Available at: www.siemens.com/drives/catalogs (accessed 27 August 2019).
22. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/MV/en/Electric-Motors/Low-Voltage-NEMA-Motors/General-Purpose-ODP-TEFC/Cast-Iron-TEFC-General-Purpose/W22-Super-Premium-Efficiency/W22-Super-Premium-Efficiency-3-HP-4P-182-4T-3Ph-208-230-460-380-V-60-Hz-IC411---TEFC---Foot-mounted/p/12792146> (accessed 28 August 2019).
23. Available at: <https://www.weg.net/catalog/weg/RU/en/Electric-Motors/Low-Voltage-IEC-Motors/General-Purpose-ODP-TEFC/Aluminium-TEFC-General-Purpose/Aluminium-TEFC-General-Purpose/Multimounting-IE3/Multimounting-IE3-2-2-kW-4P-100L-3Ph-220-240-380-415-460-V-50-Hz-IC411---TEFC---B3T/p/12397774> (accessed 24 August 2019).
24. *Catalog ABB - Low Voltage General Performance motors, June 2018*. Available at: <https://library.e.abb.com/public/00389a1977844886b7e3e7560a6c22bf9AKK105789%20EN%2006-2018%20General%20Perf.pdf> (accessed 14 May 2019).
25. *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.
26. *Extended product approach for pumps*, Copyright © 2014 by Europump. Published by Europump.
27. Ferreira F.J.T.E., De Almeida A.T. Energy savings potential associated with stator winding connection mode change in induction motors. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 2775-2783. doi: [10.1109/ICELMACH.2016.7732915](https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732915).
28. *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 (accessed 10 September 2019).
29. *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code) IEC 60034-30-2/ IEC: 2016-12*.
30. *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code) IEC 60034-30-2 (draft)*. Available at: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:52:0:::FSP_ORG_ID,FS_P_DOC_ID,FSP_DOC_PIECE_ID:1221,151336,279593 (accessed on 17 September 2019).
31. W. Ismar Borges de Lima, editor. *Rare Earth Industry*. Elsevier, 2015. doi: [10.1016/C2014-0-01863-1](https://doi.org/10.1016/C2014-0-01863-1).
32. Dent P.C. Rare earth elements and permanent magnets (invited). *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, no. 7, p. 07A721. doi: [10.1063/1.3676616](https://doi.org/10.1063/1.3676616).
33. Goss J., Popescu M., Staton D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. *Proceedings of IEEE International Electric Machines & Drives Conference, EMDC 2013*, Chicago, IL, USA. doi: [10.1109/IEMDC.2013.6556256](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556256).
34. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Gusakov D.V. Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Aerospace Application. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nov. 2018. doi: [10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607689](https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607689).
35. Sorgdrager A.J., Wang R.-J., Grobler A.J. Multiobjective Design of a Line-Start PM Motor Using the Taguchi Method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2081, vol. 54, no. 5, pp. 4167-4176. doi: [10.1109/TIA.2018.2834306](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2834306).
36. Kurihara K., Rahman M.A. High-Efficiency Line-Start Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 789-796. doi: [10.1109/TIA.2004.827476](https://doi.org/10.1109/TIA.2004.827476).
37. Niaz Azari M., Mirsalim M. Line-start permanent-magnet motor synchronisation capability improvement using slotted solid rotor. *IET Electric Power Applications*, 2013, vol. 7, no. 6, pp. 462-469. doi: [10.1049/iet-epa.2013.0042](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2013.0042).
38. Ferreira F.J.T.E., Lepretre B., de Almeida A.T. Comparison of protection requirements in IE2- IE3- and IE4-class motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 3603-3610. doi: [10.1109/TIA.2016.2545647](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2545647).

39. 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.

40. Lang S., Ludwig G., Pelz P.F., Stoffel B. *General methodologies of determining the Energy Efficiency Index of pump units in the frame of the Extended Product Approach*. Rio de Janeiro, EEMODS, 2013. doi: 10.2790/28891.

Поступила (received) 29.10.2019

Гоман Виктор Валентинович¹, к.т.н.,
Ошурбеков Сафарбек Хосабекович²,
Казакбаев Вадим Маратович², к.т.н.,
Практ Владимир Алексеевич², к.т.н.,
Дмитриевский Владимир Алексеевич², к.т.н.,

¹ Нижнетагильский технологический институт (филиал)

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

² Уральский федеральный университет,
620002, Российская Федерация, Екатеринбург,
ул. Мира, 19,
e-mail: s.oshurbekov@mail.ru, vadim.kazakbaev@urfu.ru,
va.prakht@urfu.ru, vladimir.dmitrievsky@urfu.ru

V.V. Goman¹, S.Kh. Oshurbekov², V.M. Kazakbaev²,
V.A. Prakht², V.A. Dmitrievskii²

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

² Ural Federal University,
19, Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Comparison of energy consumption of various electrical motors operating in a pumping unit.

Purpose. Comparative analysis of energy consumption of various types electric motors in fixed speed centrifugal industrial pump applications is carried out. The purpose of the analysis is to choose the most efficient motor in the considered application. It is assumed that hydraulic flow of the pump is adjusted by throttling. The rated power of the pump unit is 2.2 kW. Direct on line motors of various energy efficiency classes from various manufacturers are considered: induction motors with permanent magnets on the rotor of IE4 class and squirrel cage induction motors of IE3 and IE4 classes. **Methodology.** Assessment of energy consumption of the motors is carried out based on the catalogue data from manufacturers of the pump and the motors. Pump hydraulic equations, interpolation of motor catalogue data and statistical data are also used. **Results.** The following values have been obtained: annual and daily energy consumption of the motors and electricity cost savings comparing with the least effective motor considered. **Practical value.** The following practical consideration are presented based on the theoretical results: choosing the motor based only on its IE efficiency class according to IEC 60034-30-1 is not enough to ensure the minimum energy consumption of pump units with variable flow during the load cycle. In addition, the energy consumption may be higher in the case of permanent magnet motors of IE4 class in comparison with induction motors of IE4 or even IE3 class. Therefore, it is necessary to take into account efficiency of the motors at underload and it is needed to calculate the energy consumption during the actual load cycle. It should be noted, that the existing approach based on the Energy Efficiency Index (EEI) calculation does not provide information about absolute values of energy savings and cost savings, in contrast to the described approach. While choosing motors to run in the considered application it is also important to take into account that the motors with permanent magnets on the rotor have significantly higher price and very restricted starting capabilities comparing with induction motors. In addition, the production of rare earth magnets causes a significant environmental damage. References 40, tables 5, figures 6.

Key words: centrifugal pump, induction motor, line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM), efficiency class, energy efficiency, throttle control.