



## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ГИНЗБУРГ Матвей Яковлевич

Советник директора «Завода вентильных электродвигателей ООО «ЛУКОЙЛ ЭПУ Сервис», член Экспертного совета по механизированной добыче нефти

**М**аркировка класса энергетической эффективности погружных электродвигателей, предусмотренная ГОСТ Р 56624-2015 «Энергетическая эффективность. Погружные лопастные насосы и электродвигатели для добычи нефти. Классы энергоэффективности», должна способствовать принятию обоснованных решений при их выборе. Этим стандартом погружные электродвигатели (ПЭД) в зависимости от диаметрального габарита, КПД и коэффициента мощности делятся на два класса энергоэффективности: 1) e1 – электродвигатели с нормальным КПД, величина которого соответствует уровню, достигнутому в производстве погружных электродвигателей; 2) e2 – двигатели с высоким КПД (энергоэффективные), у которых суммарные потери мощности не менее чем на 40% ( $K = 0,4$ ) ниже суммарных потерь мощности электродвигателей той же мощности и частоты вращения с нормальным КПД. Вместе с тем, приведенные в предлагаемой Вашему вниманию статье расчеты и примеры показывают, что принцип классификации погружных электродвигателей по энергоэффективности на основе их КПД, принятый в международных и российских стандартах для общепромышленных электродвигателей, непригоден для классификации по энергоэффективности погружных электродвигателей. В статье приведены предложения по индексации энергетической эффективности в обозначениях погружных электродвигателей в качестве основания для пересмотра соответствующего раздела указанного выше стандарта.

Деление погружных электродвигателей по энергоэффективности на два класса повторяет принцип классификации по энергоэффективности электродвигателей общемашиностроительного применения по ГОСТ Р 51677-2000 «Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности», которым двигатели делятся на два типа по уровню энергоэффективности на основе КПД.

КПД энергосберегающего двигателя  $\eta_3$ :

$$\eta_3 = \frac{100\eta}{[100 - e(100 - \eta)]}, \quad (1)$$

где  $\eta_3$  – коэффициент полезного действия двигателя с нормальным КПД;  $e$  – относительное снижение суммарных потерь мощности в двигателе.

В соответствии с этим стандартом «двигатели с нормальным КПД» – это двигатели, КПД которых соответствует уровню, достигнутому в производстве. При этом стандартом предусмотрено отнесение асинхронных электродвигателей общепромышленного применения к классу энергоэффективных, если  $e > 0,2$ .

### ПРЕДЕЛ ПОВЫШЕНИЯ КПД АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

КПД погружных асинхронных электродвигателей в зависимости от их диаметрального габарита, мощности и технического исполнения находятся в диапазоне 79-85%. Новых идей по обеспечению дальнейшего повышения их КПД за счет снижения механических потерь и потерь в обмотках электродвигателей у разработчиков нет, а повышение КПД ПЭД за счет применения более дорогих марок электротехнической стали с меньшей толщиной листа экономически не обосновано.

В соответствии с ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей» нормативные показатели энергетической эффективности, устанавливаемые в нормативных документах, должны разрабатываться на основе «достижения экономического оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем мировом уровне развития техники и технологий». Для установок электропогружных лопастных насосов (УЭЛН) за эталон взято оборудование одного из известных зарубежных производителей. В рекламной информации производителя сообщается, что его электродвигатели под условным названием «D» «являются самыми прочными и эффективными из всех существующих погружных электродвигателей». «Новые конфигурации ротора и статора позволили увеличить мощность и КПД электродвигателей». Нет оснований сомневаться в заявленных преимуществах этих электродвигателей за исключением декларируемого фирмой существенного роста их КПД. На рис.1 представлены нагрузочные характеристики электродвигателя «D» (диаметр корпуса 115,8 мм) мощностью 180 л.с. (132,4 кВт).

Как видно из приведенного графика, КПД электродвигателя «D» составляет 85%, что соответствует КПД погружного асинхронного электродвигателя ЭДС125-117М примерно того же диаметра (117 мм) и мощности (125 кВт).

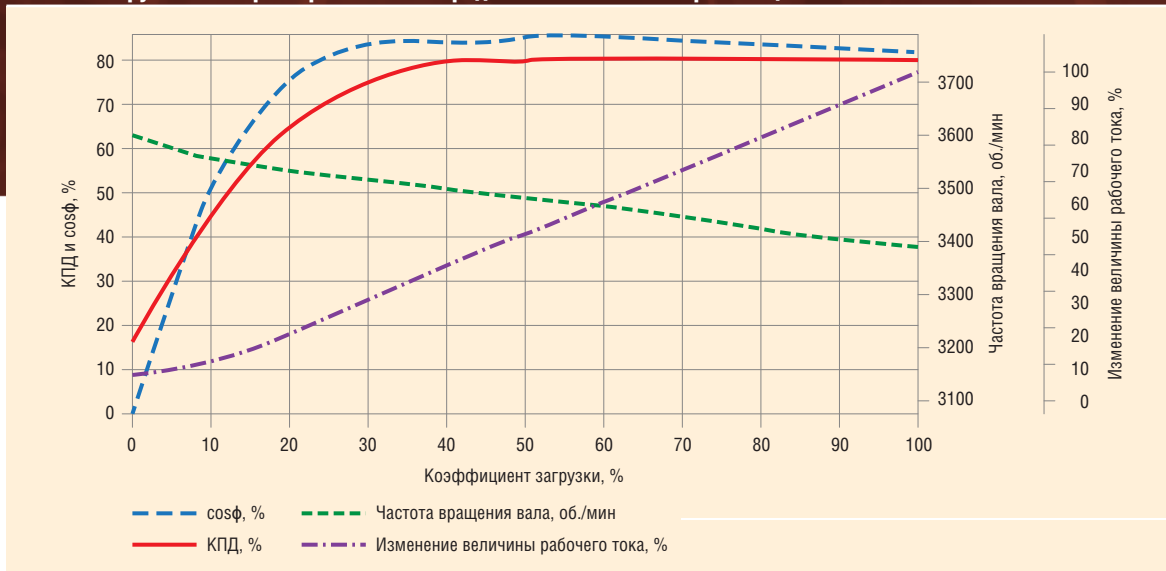
Сегодня есть основания считать, что возможности дальнейшего повышения КПД погружных асинхронных двигателей практически исчерпаны.

### КЛАССЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В табл. 1 представлены «нормальные» (класс e1) значения КПД погружных асинхронных электродвигателей в зависимости от их диаметрального габарита, принятые в ГОСТ Р 56624-2015

В соответствии с ГОСТ Р 56624-2015 погружные электродвигатели могут быть отнесены к энергоэффективному классу e2, если  $e = 0,4$ . Такому значению показателя соответствуют погружные вентильные

Рис. 1. Нагрузочные характеристики электродвигателя «D» 456 серии мощностью 180 л.с.



электродвигатели (ПВЭД) с постоянными магнитами в роторе, КПД которых на 6-8% выше КПД погружных асинхронных электродвигателей.

В табл. 2 приведены значения КПД погружных электродвигателей, которые позволяют их относить к классу e2.

Определение класса энергетической эффективности погружных электродвигателей осуществляется производителем и включается им в ТУ на изделие и указывается в паспорте двигателя. Однако ни в этом стандарте, ни в ГОСТ Р 56830-2015 «Установки скважинных электроприводных насосов. Общие технические условия» нет указаний, как отразить в обозначении ПЭД класс их энергетической эффективности, если их КПД ниже нормативных значений класса энергоэффективности e1.

Очевидно, что в обозначениях таких двигателей в их паспортах и табличках классы энергоэффективности не должны указываться. Однако такое логическое заключение должно было найти отражение в указанных стандартах, как это приведено в ГОСТ Р 54413-2011 «Машины электрические вращающиеся. Часть

30 Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE)», в п.5.3.3 которого указано, что «на заводских табличках двигателей, имеющих КПД меньше нормативного значения, класс энергоэффективности не указывают».

#### КЛАССЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЭД ПО ГОСТ Р 56624-2015 НЕ ОТРАЖАЮТ ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В СОСТАВЕ УЭЛН

Рассмотрим, насколько объективно ГОСТ Р 56624-2015 классифицирует ПЭД по энергоэффективности.

В табл. 3 приведены классы энергетической эффективности электродвигателей мощностью 50 кВт, выпускаемых по ТУ3381-003-12058737-2010.

Показателем энергетической эффективности (ПЭЭ) электродвигателей в соответствии с ГОСТ Р 51749-2001 «Энергопотребляющее оборудование общепромышленного применения. Виды. Типы. Группы. Показатели энергетической эффективности. Идентификация» служит их КПД. Поэтому этот показатель

Таблица 1

#### Значения КПД погружных электродвигателей класса «e1» по ГОСТ Р 56624-2015

КПД для двигателя с диаметральной габаритом, мм, %

81	96	103	117	123	130	143	180 и более
77,0	79,0	79,5	84,0	84,0	84,0	86,0	88,0

Таблица 2

#### Значения КПД погружных электродвигателей класса «e2» по ГОСТ Р 56624-2015

КПД для двигателя с диаметральной габаритом, мм, %

81	96	103	117	123	130	143	180 и более
84,8	86,2	86,6	89,7	89,7	89,7	91,1	92,4

Таблица 3

Классы энергетической эффективности электродвигателей ПЭД мощностью 50 кВт по ТУ3381-003-12058737-2010		
Обозначение	КПД	Класс энергоэффективности по ГОСТ Р 56624-2015
ПЭДН50-1540-117В5	84,5	Нормальный е1
ПЭДН50-2600-117В5	83,5	Ниже нормативного

принят за основу при классификации по энергетической эффективности общемашиностроительных электродвигателей в международных и гармонизированных с ними российских стандартах.

Однако при оценке энергетической эффективности ПЭД в составе установок электропогружных лопастных насосов (УЭЛН) необходимо учесть условия их эксплуатации: если электродвигатели общепромышленного применения питаются сетевым напряжением и источник электропитания находится вблизи электродвигателя, то погружные электродвигатели, используемые в составе УЭЛН, значительно удалены от точки подключения к источнику электропитания, в цепи электропитания есть трансформатор и станция управления. Абсолютная величина потерь мощности в этом оборудовании зависит не только от их КПД, но и от энергетических характеристик ПЭД и температуры эксплуатации УЭЛН. Поэтому энергетическую эффективность ПЭД необходимо оценивать интегральным показателем, учитывающим расход активной мощности не только в электродвигателе, но и в кабельной линии, трансформаторе и станции управления. Такой подход к оценке энергетической эффективности ПЭД рассмотрен в статье [1].

Интегральный показатель энергетической эффективности погружных электродвигателей определяется по выражению:

$$И_{э} = \frac{P_2}{\sum P_y}, \quad (2)$$

где  $P_2$  – механическая мощность двигателя, кВт;  $\sum P_y$  – потребляемая УЭЛН мощность, кВт.

Потребляемая УЭЛН мощность представляет собой:

$$\sum P_y = P_1 + \Delta P_k + \Delta P_m + \Delta P_{cy}, \quad (3)$$

где  $P_1$  – потребляемая электродвигателем мощность, кВт;  $\Delta P_k$  – потери мощности в кабельной линии, кВт;  $\Delta P_T$  – потери мощности в трансформаторе, кВт;  $\Delta P_{cy}$  – потери мощности в станции управления, кВт.

Потребляемая электродвигателем мощность:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_d}, \quad (4)$$

где  $\eta_d$  – КПД двигателя.

Потери мощности в кабельной линии,  $\Delta P_k$ , кВт:

$$\Delta P_k = 3 \cdot I^2 \cdot R_T \cdot L \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $R_T$  – электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля длиной 1 км при рабочей температуре  $T_{ж}$ , °С;  $L$  – длина кабельной линии, км.

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля длиной 1 км при рабочей температуре  $T_{ж}$  определяется по формуле:

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha(T_{ж} - 20)], \quad (6)$$

где  $R_{20}$  – электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля длиной 1 км при температуре 20°С, Ом;  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления материала токопроводящей жилы, °С<sup>-1</sup>;  $T_{ж}$  – рабочая температура жилы кабеля, °С.

Подставив в формулу [6] значение температурного коэффициента электрического сопротивления медной жилы  $\alpha = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ , получим

$$R_T = R_{20} (0,92 + 0,004T_{ж}), \quad (7)$$

Значения электрического сопротивления токопроводящих жил кабеля длиной 1 км при температуре 20°С,  $R_{20}$ , представлены в таблице 3.

Обозначим

$$K_{тж} = (0,92 + 0,004T_{ж}), \quad (8)$$

где  $K_{тж}$  – коэффициент, корректирующий значение электрического сопротивления токопроводящей жилы кабеля, в зависимости от температуры жилы.

Значения  $K_{тж}$  представлены в табл. 4.

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля длиной 1 км в зависимости от ее сечения  $S$  и рабочей температуры  $R_T$  представлены в таблице 5.

Значения  $R_T$  и  $L$  определяются параметрами эксплуатации каждой скважины, поэтому нормативных значений потерь мощности в кабельных линиях быть не может. Однако для оценочных показателей интегральной энергетической эффективности погружных электродвигателей они могут быть приняты для регламентированных условий. Для упрощения расчетов принимаются и нормативные значения КПД трансформаторов и станций управления с ПЧ (табл. 6).

Таблица 3

Электрическое сопротивление токопроводящих жил кабеля длиной 1 км при температуре 20°C, R <sub>20</sub> , Ом							
Номинальное сечение жилы, S, мм <sup>2</sup>							
6	8	10	16	25	35	13,3	21,15
ГОСТ 22483-77						ГОСТ 51777-2001	
3,08	2,25	1,83	1,15	0,727	0,524	1,400	0,863

Таблица 4

Значения K <sub>тж</sub> в зависимости от температуры жилы														
K <sub>тж</sub> при температуре, °C														
20	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1,0	1,12	1,16	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64

Таблица 5

Зависимость электрического сопротивления токопроводящей жилы кабеля длиной 1 км от температуры, R <sub>t</sub>															
S, мм <sup>2</sup>	Температура пластовой жидкости, °C														
	20	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
6	3,08	3,45	3,57	3,70	3,82	3,94	4,07	4,19	4,31	4,43	4,56	4,68	4,80	4,93	5,05
8	2,25	2,52	2,61	2,70	2,79	2,88	2,97	3,06	3,15	3,24	3,33	3,42	3,51	3,60	3,69
10	1,83	2,05	2,12	2,20	2,27	2,34	2,42	2,49	2,56	2,64	2,71	2,78	2,85	2,93	3,00
13,3	1,4	1,57	1,62	1,68	1,74	1,79	1,85	1,90	1,96	2,02	2,07	2,13	2,18	2,24	2,30
16	1,15	1,29	1,33	1,38	1,43	1,47	1,52	1,56	1,61	1,66	1,70	1,75	1,79	1,84	1,89
21,15	0,863	0,97	1,00	1,04	1,07	1,10	1,14	1,17	1,21	1,24	1,28	1,31	1,35	1,38	1,42
25	0,727	0,81	0,84	0,87	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08	1,11	1,13	1,16	1,19
35	0,524	0,59	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86

Регламентированные параметры длин кабельных линий и температур их жил, приведенные в табл. 6, могут иметь другие значения, например, средневзвешенные для нефтяной отрасли России.

Таблица 6	
Значения параметров, которые учтены при расчете оценочных нормативных значений I <sub>э</sub>	
Показатель	Значение
КПД, %, Рабочий ток, А	По ТУ на погружные электродвигатели
Регламентированные параметры, принятые в расчетах	
Температура кабельной жилы, T <sub>ж</sub> , °C	90
Длина кабельной линии, L, км	1
Сечение кабельной жилы, S	При I < 40А – 16 мм <sup>2</sup> , при I > 40А – 25 мм <sup>2</sup>
КПД трансформатора, о.е.	0,96
КПД станции управления с ПЧ, о.е.	0,96

Потери мощности в трансформаторе рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_m = (P_1 + \Delta P_\kappa) \cdot \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right), \quad (9)$$

где  $\eta_m$  – КПД трансформатора, о.е.

При  $\eta_m = 0,96$ :

$$\Delta P_m = 0,04 \cdot (P_1 + \Delta P_\kappa). \quad [10]$$

Потери мощности в станции управления описываются выражением:

$$\Delta P_{cy} = (P_1 + \Delta P_\kappa + \Delta P_m) \cdot \left( \frac{1}{\eta_{cy}} - 1 \right), \quad [11]$$

где  $\eta_{cy}$  – КПД станции управления, о.е.

При  $\eta_{cy} = 0,96$ :

$$\Delta P_{cy} = 0,04 \cdot (P_1 + \Delta P_\kappa + \Delta P_m). \quad [12]$$

Таблица 7

**Оценочные интегральные показатели энергетической эффективности ( $I_{33}$ ) погружных электродвигателей мощностью 50 кВт ТУ3381-003-12058737-2010**

Тип двигателя	КПД, о.е.	Ток, А	Мощность, кВт						$I_{33}$
			$P_2$	$P_1$	$\Delta P_k$	$\Delta P_T$	$\Delta P_{cy}$	$\Sigma P_y$	
ПЭДН50-117-1540	84,5	26,3	50	59,2	3,04	2,49	2,59	67,32	0,743
ПЭДН50-117-2600	83,5	16	50	59,9	1,13	2,44	2,54	65,71	0,761

Таблица 8

**Классы энергетической погружных электродвигателей мощностью 50 кВт по ТУ3381-003-12058737-2010 и их оценочные интегральные показатели энергетической эффективности**

Погружные электродвигатели по ГОСТ Р 56830-2015				Оценочный интегральный показатель энергетической эффективности, $I_{33}$
Обозначение	КПД, %	Ток, А	Класс энергоэффективности по ГОСТ Р 56624-2015	
ПЭД50-1540-117В5 - е1Н	84,5	26,3	Нормальный	0,743
ПЭД50-2600-117В5-Н	83,5	16	Ниже нормативного	0,761

Таблица 9

**Предложение по индексации энергетической эффективности в обозначениях погружных электродвигателей**

Погружные электродвигатели по ГОСТ Р 56830-2015	
Принято в стандарте	Предлагается
ПЭД50-1450-117В5-Н	ПЭД50-1450-117В5-е73.6 Н
ПЭД50-1540-117В5 - е1Н	ПЭД50-1540-117В5-е74.6 Н
ПЭД50-2600-117В5-Н	ПЭД50-2600-117В5-е76.1 Н
ВЭД50-1870-117В5 – е2Н	ВЭД50-1870-117В5-е83.5 Н

В табл. 7 приведены составляющие потерь мощности в электрической цепи оборудования УЭЛН и рассчитанные на их основе оценочные интегральные показатели энергетической эффективности ( $I_{33}$ ) погружных электродвигателей мощностью 50 кВт по ТУ3381-003-12058737-2010.

Классы энергетической эффективности погружных электродвигателей по ГОСТ Р 56624-2015, определяемые их КПД, и их интегральные показатели энергетической эффективности, рассчитанные с учетом суммарных потерь мощности в электрической цепи оборудования УЭЛН, представлены в табл. 8.

Как видно из таблицы, электродвигатель ПЭД50-2600-117В5-Н, класс энергетической эффективности которого «ниже нормативного», обладает более высоким значением интегрального показателя энергетической эффективности, чем двигатель ПЭД50-1540-117В5-е1Н с «нормальным е1».

Приведенный пример позволяет сделать вывод о том, что принцип классификации погружных электродвигателей по энергоэффективности по их КПД, принятый в международных и российских стандартах для общепромышленных электродвигателей, непригоден

для классификации по энергоэффективности погружных электродвигателей.

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНДИКАТОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Предложения по индексации энергетической эффективности в обозначениях погружных электродвигателей приведены в табл. 9.

При этом необходимо подчеркнуть, что в отличие от КПД, используемого при установлении класса энергетической эффективности погружных электродвигателей по ГОСТ Р 56624-2015, предлагаемый показатель энергетической эффективности не предназначен для использования в расчетах энергетической эффективности оборудования. Он представляет собой индикатор, позволяющий определить место ПЭД одинаковой номинальной мощности и частоты вращения в иерархии ряда погружных электродвигателей различных модификаций.

Для того чтобы маркировка энергетической эффективности ПЭД действительно способствовала принятию обоснованных решений при их разработке, изготовлении, подборе, обеспечивающих энергоэффективную эксплуатацию УЭЛН, в ГОСТе Р 56624-2015 классы энергоэффективности е1 и е2 должны быть заменены интегральными индикаторами энергетической эффективности (ИИЭЭ), и эти показатели должны быть отражены в обозначениях погружных электродвигателей по ГОСТ Р 56830-2015.

Есть основание для постановки вопроса о пересмотре ГОСТ Р 56624-2015 «Энергетическая эффективность. Погружные лопастные насосы и электродвигатели для добычи нефти. Классы энергоэффективности». ♦

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гинзбург М. Классификация погружных электродвигателей по энергоэффективности // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 4.