

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

В статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности электропривода насосной установки. Целью работы является определение целесообразности использования частотно-регулируемого электропривода для управления насосной установкой. В связи с растущими требованиями к энергоэффективности электрооборудования представляют интерес вопросы оптимизации потребления энергоресурсов в ходе технологического процесса. В работе выполняются построение основных характеристик насосной установки, а также рассчитываются параметры энергопотребления. Расчетные данные, с учетом особенностей используемой методики, являются корректными. В результате работы определена низкая эффективность эксплуатации объекта исследования и представлен алгоритм определения целесообразности применения частотного электропривода.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, нефтепереработка, вентильный электропривод, дросселирование потока, центробежный насос.

В последние годы в России отмечен рост промышленного производства [1]. Неизбежным следствием этого становится введение новых мощностей промышленного электрооборудования. В то же время к существующим и вводимым потребителям электроэнергии предъявляются серьезные требования к энергоэффективности, соответствующие современным подходам к потреблению энергоресурсов [2].

Низковольтная нагрузка промышленных предприятий составляет существенную часть потребления мощности промышленного предприятия. В связи с этим, задача анализа эффективности и оптимизации энергопотребления низковольтной нагрузки представляет интерес.

Целью данной работы является определение целесообразности применения частотно-регулируемого электродвигателя для привода насосной установки. Задачами являются выбор технологической позиции для исследования, анализ эффективности потребления энергии в существующих условиях и расчет возможных вариантов оптимизации.

Методом определения существующих и перспективных эксплуатационных параметров является математический расчет.

В отраслях добычи и переработки нефти большое количество электроэнергии потребляется насосными установками. Подача насоса регулируется тремя способами [3]:

1. Дросселирование — увеличение гидравлического сопротивления на общем для всей системы напорном участке трубопровода с помощью автоматической или ручной регулирующей арматуры.

2. Перепуск — поддержание постоянного напора насоса. При снижении расхода насосного агрегата регулятор осуществляет перепуск жидкости из напорного патрубка во всасывающий.

Этот метод регулирования более предпочтителен в сравнении с дросселированием, поскольку в данном случае подача и напор насоса постоянны, его рабочая точка находится в оптимальном эксплуатационном диапазоне. Однако при уменьшении загрузки потребление энергии при таком методе не является оптимальным, поскольку электродвигатель продолжает работать в режиме, близком к номинальному [3].

3. Частотное управление — изменение скорости вращения рабочего колеса. Такой способ может осуществлять мягкий пуск, снизить пусковые токи, исключить гидравлические удары и целесообразен в системах с частыми и сильными колебаниями расхода жидкости, а также в случае высокой стоимости электроэнергии [4].

В составе насосной установки потребителем электроэнергии является электродвигатель. В основном применяются двигатели переменного тока, которые, в свою очередь, подразделяются на асин-

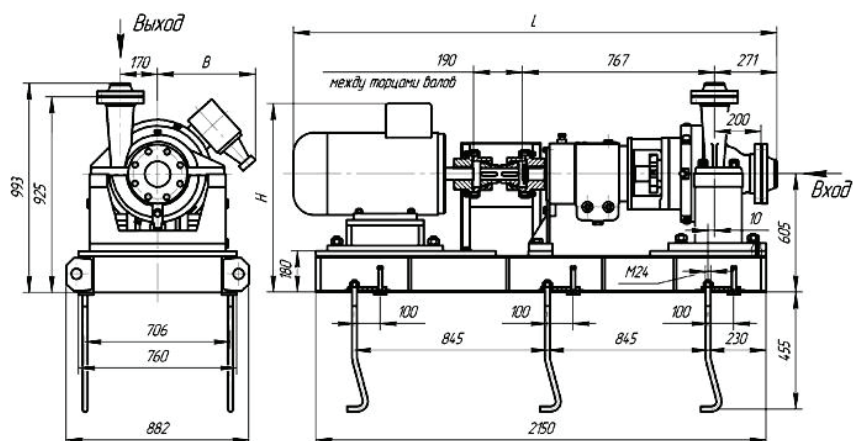


Рис. 1. Габаритные и присоединительные размеры насосов НК-210/80 [5]

хронные (скорость вращения зависит от нагрузки) и синхронные (скорость вращения не зависит от нагрузки). Наиболее часто применяются асинхронные двигатели.

Объектом исследования является технологическая позиция Н-20 установки гидроочистки дизельных топлив из перечня оборудования Омского НПЗ.

На данной позиции установлен центробежный насос НК-210/80. Насос НК (нефтяной консольный) — центробежный, горизонтальный, одноступенчатый (рис. 1), предназначен для перекачивания нефти и нефтепродуктов с температурой от 0 до +200 °С. Используется в технологических установках нефтехимических, нефте- и газоперерабатывающих предприятий, системах подачи топлива ТЭЦ, крупных котельных и газонаполнительных станциях [5].

Управление производительностью насоса осуществляется дросселированием потока. Справочные характеристики насосов НК-210/80 с ротором типа 2а представлены на рис. 2.

Насос приводится в движение электродвигателем ВАО-82-2 [6], технические характеристики которого представлены в табл. 1. Продуктом насосного агрегата является легкий газойль.

Легкий газойль (фракция 195–350 °С) имеет плотность 0,89–0,94 г/м<sup>3</sup> и состоит на 40–80 % из ароматических соединений. Легкий газойль с высоким цетановым числом используется как компонент дизельного топлива, с низким цетановым числом — как разбавитель мазута. Легкий газойль, полученный из сернистого сырья, нуждается в очистке от серы [7].

С помощью программного обеспечения PI ProcessBook был получен годовой график расхода продукта (рис. 3) технологической позиции Н-20 Омского НПЗ. Выполним преобразование графика расхода, представив его последовательностью средних значений в порядке убывания (рис. 4).

Для определения энергопотребления насосной установки необходимо построить напорно-расходные характеристики насоса и сети при разных условиях дросселирования потока.

Согласно [8], зависимость напора  $H$  от расхода  $Q$  можно построить по формуле:

$$H = H_{0H} \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - CQ^2, \quad (1)$$

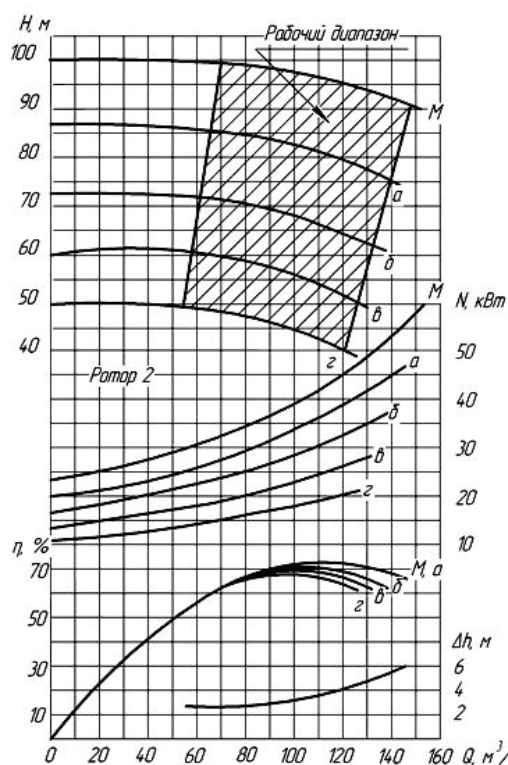


Рис. 2. Справочные характеристики насосов НК-210/80 с ротором типа 2а [5]

Таблица 1

#### Технические характеристики электродвигателя ВАО 81-2 [6]

$P_{н'}$ , кВт	$n$ , об/мин	$\cos \varphi$	КПД <sub>в</sub> , %	$m$ , кг	$f$ , Гц	$U$ , В	Защита
40	3000	0,9	89,0	390	50–60	380	IP 54

где  $H_{0H}$  — напор насоса при нулевой подаче и номинальной скорости вращения;  $\omega_{ном}$  — номинальная скорость;  $C$  — конструктивный коэффициент,  $C = (H_{0H} - H_{ном})/Q_{ном}^2$ ,  $H_{ном}$  и  $Q_{ном}$  — номинальные напор и расход.

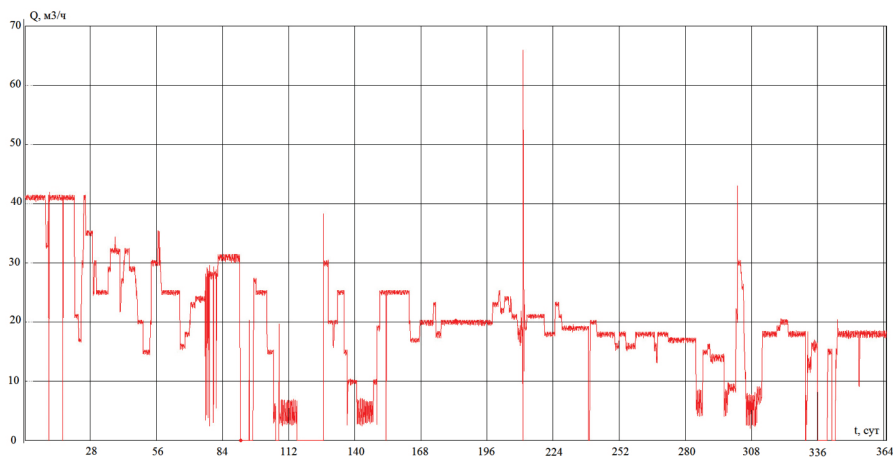


Рис. 3. Характеристика расхода Н-20 за год

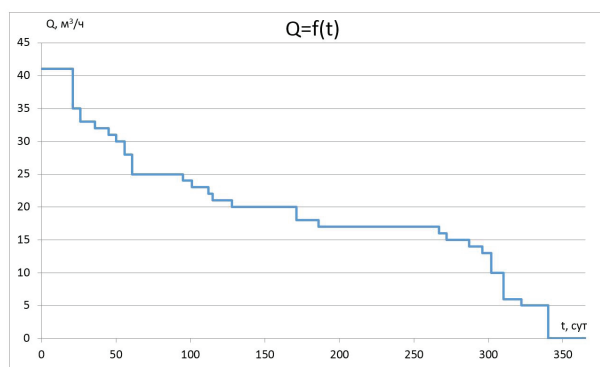


Рис. 4. Годовая нагрузочная характеристика насосной установки

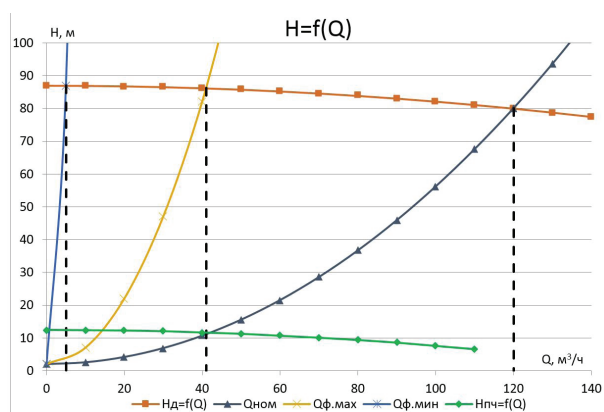


Рис. 5. Напорно-расходные характеристики насоса и системы

Характеристику магистрали можно построить по следующей формуле:

$$H = H_c - RQ^2, \quad (2)$$

где  $H_c$  — статический напор (противодавление), соответствующий закрытой задвижке,  $R$  — коэффициент сопротивления магистрали  $R = (H_{ном} - H_c) / Q_{ном}^2$ .

По уравнениям (1) и (2) построены номинальная ( $Q_{ном}$ ) и фактические ( $Q_{ф.мин}$ ,  $Q_{ф.маx}$ ) характеристики системы, а также напорные характеристики насоса при дросселировании потока ( $H_g = f(Q)$ ) и при частотном управлении ( $H_{пч} = f(Q)$ ) (рис. 5).

При частотном управлении КПД асинхронного двигателя определяется зависимостью:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \cdot \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} \cdot (1 + a)}, \quad (3)$$

где  $S_{ном}$  — номинальное скольжение двигателя;  $a$  — отношение активных сопротивлений фазы статора  $R_1$  и ротора  $R'_2$ ,  $a = R_1 / R'_2$ .

Для того, чтобы не производить полный расчет параметров схемы замещения, на основе критериев подобия, примем значения сопротивлений обмоток статора  $R_1 = 0,029$  Ом и ротора  $R'_2 = 0,0016$  Ом по доступным справочным данным для электродвигателей серии 4А [9].

Для того, чтобы выразить интересующие значения в зависимости от расхода, на основании

связи скорости вращения рабочего колеса и подачи насоса, скольжение электродвигателя может быть представлено зависимостью от расхода. Для этого в уравнении (1) следует заменить  $(\omega / \omega_{ном})^2$  на  $[(1 - S) / (1 - S_{ном})]^2$  и решить его совместно с выражением (2) относительно  $S$ :

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + (Q / Q_n)^2 (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) A, \quad (4)$$

где  $h_c = H_c / H_{0H}$ ,  $A = \sqrt{h_c + (Q / Q_n)^2 (1 - h_c)}$ .

Зависимость выраженного в относительных единицах момента на валу турбомеханизма при работе его на сеть с постоянными параметрами имеет вид:

$$\mu = \mu_{0C} (\omega / \omega_{ном})^2 + (1 - \mu_{0C}) (\omega / \omega_{ном}) \sqrt{\frac{(\omega / \omega_{ном})^2 - h_c}{1 - h_c}}, \quad (5)$$

где  $\mu$  — относительный момент на валу турбомеханизма,  $\mu = M / M_{с.маx}$  ( $M_{с.маx}$  — максимальный статический момент на валу механизма, который имеет место при  $\omega = \omega_{ном}$ );  $\mu_{0C}$  — статический момент на валу (закрытой задвижке), выраженный в относительных единицах,  $\mu_{0C} = M_{0C} / M_{с.маx}$ .  $M_{0C}$  определяется на основании характеристик насоса (рис. 2).

Используя выражения (4) и (5), можно выразить электромагнитный момент двигателя, скорость вращения, КПД и потребляемую мощность.

Выражения для расчета потребляемой мощности  $P_1$  при дроссельном и частотном регулировании принимают вид:

$$P_1 = P_H (1 + a S_{НОМ}) \frac{\mu_{0C} + (1 - \mu_{0C}) Q / Q_H}{1 - S_{НОМ}}; \quad (6)$$

$$P_1 = P_H A^2 \left( \mu_{0C} A + \frac{(1 - \mu_{0C}) Q}{Q_H} \right) \cdot \left( 1 + \frac{S_{НОМ} (1 + a)}{(1 - S_{НОМ}) A} \right); \quad (7)$$

где  $h_c = H_c / H_{0H}$ ,  $A = \sqrt{h_c + (1 - h_c)(Q / Q_H)^2}$ ,  $\mu_{0C} = M_{0C} / M_{c,max}$ .

Уравнения (6) и (7) позволяют построить зависимость энергопотребления при дросселировании потока и частотном регулировании (рис. 6). По уравнению (3) определим КПД электродвигателя при разных скоростях. Результаты расчета сведены в табл. 2. Полученные характеристики соответствуют теоретическим ожиданиям [8].

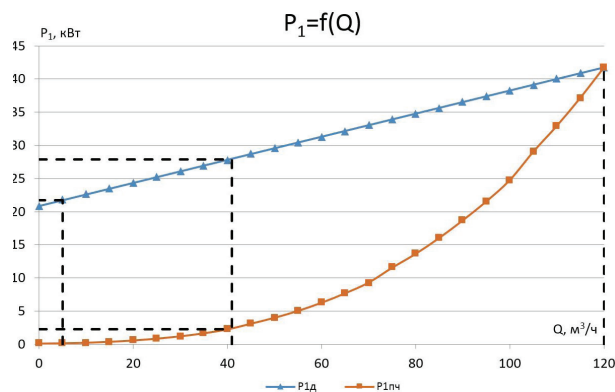


Рис. 6. Расчетное потребление мощности насосной установки при разных способах управления подачей

Таблица 2

Результаты расчета энергопотребления насоса

$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$t$ , сут.	$\eta_{AA}$ о.е.	$\omega$ , рад/с	$P_{1,A'}$ кВт	$P_{1,ГПЧ}$ кВт	$P_{A'}$ кВтч	$P_{ГПЧ}$ кВтч
5	21	0,246	13	23,32	0,168	11753,28	84,672
6	5	0,281	15,6	23,52	0,211	2822,4	25,32
10	10	0,395	26,01	24,2	0,253	5808	60,72
13	9	0,459	33,81	24,88	0,379	5374,08	81,864
14	5	0,477	36,41	25,12	0,421	3014,4	50,52
15	6	0,494	39,01	25,32	0,463	3646,08	66,672
16	5	0,51	41,61	25,32	0,463	3038,4	55,56
17	34	0,526	44,21	25,56	0,505	20856,96	412,08
18	6	0,54	46,81	25,76	0,547	3709,44	78,768
20	11	0,566	52,01	26,24	0,674	6927,36	177,936
21	3	0,578	54,61	26,44	0,758	1903,68	54,576
22	13	0,589	57,21	26,44	0,758	8249,28	236,496
23	43	0,6	59,81	26,68	0,8	27533,76	825,6
24	15	0,61	62,41	26,92	0,884	9691,2	318,24
25	81	0,62	65,01	27,12	0,968	52721,28	1881,792
28	5	0,646	72,81	27,56	1,179	3307,2	141,48
30	15	0,662	78,02	28,04	1,389	10094,4	500,04
31	9	0,669	80,62	28,24	1,474	6099,84	318,384
32	6	0,676	83,22	28,48	1,642	4101,12	236,448
33	8	0,683	85,82	28,68	1,768	5506,56	339,456
35	12	0,695	91,02	28,92	1,895	8328,96	545,76
41	18	0,728	106,62	30,04	2,737	12977,28	1182,384

Анализ годовой характеристики расхода показывает, что насосный агрегат используется не более чем на треть. В связи с этим при использовании частотного управления электродвигатель будет работать в диапазоне низких скоростей. Использование асинхронного двигателя в данных условиях может быть связано с существенными потерями [10].

Поскольку известен характер расхода (рис. 3), определим потребленную за год мощность в кВт·ч для двух видов регулирования. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Цена на электроэнергию нестабильна и находится в постоянном изменении. За первое полугодие 2018 года средневзвешенный тариф на электроэнергию уровня 35 кВ для Омского НПЗ составил 2,39 руб/кВт·ч. Как известно, стоимость определяется:

$$a = C \cdot n, \quad (8)$$

где  $a$  — стоимость,  $C$  — цена (тариф),  $n$  — количество.

Подставляя в выражение (8) известные данные по энергопотреблению и тарифу, определяем стоимость электроэнергии, потребленной за год насосом с дросселированием потока и с частотным управлением.

Для определения сроков окупаемости технического решения необходимо определить его стоимость.

Алгоритм определению целесообразности применения частотно-регулируемого привода насоса:

1. Выявление оборудования с малой или изменяющейся нагрузкой.

2. Оценка эффективности эксплуатации оборудования в фактических условиях.

3. Определение потребления электроэнергии и расчет ожидаемого эффекта.

4. Расчет окупаемости затрат на внедрение электропривода.

5. В случае определения положительного эффекта планирование и реализация данного решения во время плановых ремонтов или реконструкций.

В ходе данной работы осуществлен анализ эффективности энергопотребления насосной установки из перечня технологического оборудования Омского НПЗ. Были построены рабочие характеристики насосной установки и осуществлен расчет энергопотребления, в ходе чего была определена низкая эффективность эксплуатации данной технологической позиции.

Ввиду того что отмечено частое изменение нагрузки в широком диапазоне, но в то же время позиция загружена менее чем на треть, наиболее эффективным представляется применение частотно-регулируемого электропривода.

Расчетная мощность, потребленная электроприводом насоса при дросселировании потока, за календарный год составила  $P_{г\sum} = 217465$  кВт·ч. При использовании электропривода с частотным управлением расчетное значение потребленной мощности составило  $P_{нч.г\sum} = 7675$  кВт·ч, т.е. в 28 раз меньше.

Расчет экономического эффекта от применения частотного электропривода показал экономию за год более чем 500 тыс рублей, что позволяет окупить затраты на внедрение преобразователя частоты менее чем за год.

На основании полученных результатов представлен алгоритм определения целесообразности

применения данного технического решения не только применительно к объекту исследования, но и к другим насосным установкам.

В заключение следует отметить, что полученные результаты снижения энергопотребления могут показаться завышенными. Большая разница в энергопотреблении и внушительная сумма экономии при расчетах связаны в данном случае не только с эффективностью частотного электропривода, но и с неэффективным режимом работы самого насоса. Средний за год расход  $Q = 22$  м<sup>3</sup>/ч, что составляет всего 18 % от номинального значения расхода. В таких условиях большая часть потребляемой мощности приходится на ток холостого хода, который может составлять от 10 до 40 % номинального.

#### Библиографический список

1. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Социально-экономическое положение России. М., 2017. 384 с.
2. Энергоэффективность и развитие энергетики: Государственная программа Российской Федерации от 15 апреля 2014 г., № 321 // Министерство энергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/323> (дата обращения: 17.09.2018).
3. Байбаков С. А., Субботина Е. А., Филатов К. В. [и др.]. Частотно-регулируемый привод. Регулирование центробежных насосов и методы регулирования отпуска тепла в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. 2014. № 1 (161). URL: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3192](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3192) (дата обращения: 20.07.2018).
4. Макаров А. М., Сергеев А. С., Крылов Е. Г. [и др.]. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока. Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2016. 192 с. ISBN 978-5-9948-2076-6.
5. Насосы нефтяные НК. Характеристики и цены // Энергоснабкомплект. Промышленное оборудование. URL: [http://www.esbk.ru/products\\_info/nasos/212\\_nasos\\_petr\\_NK/212\\_nasos\\_petr\\_NK.html](http://www.esbk.ru/products_info/nasos/212_nasos_petr_NK/212_nasos_petr_NK.html) (дата обращения: 20.07.2018).
6. Электродвигатель ВАО-81-2.40/3000 // Слобожанский электромеханический завод (СЛЭМЗ). URL: <https://slemz.com.ua/catalogue/vzryvozashchishchennye/elektrodvigatel-va0-81-2-403000> (дата обращения: 24.09.2018).
7. Эрих В. Н., Расина М. Г., Рудин М. Г. Химия и технология нефти и газа. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1985. 408 с.
8. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 252 с. ISBN 5-7695-1704-2.
9. Кравчик А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
10. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с. ISBN 5-7695-2306-9.

**ЛЫСЕНКО Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 4975-9193

AuthorID (РИНЦ): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Адрес для переписки: [deolas@mail.ru](mailto:deolas@mail.ru)

**СИМАКОВ Александр Владимирович**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения.



SPIN-код: 3865-0506  
AuthorID (РИНЦ): 894651  
Адрес для переписки: a\_v\_simakov@rambler.ru  
**ГОРОВОЙ Сергей Анатольевич**, магистрант  
гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ.  
SPIN-код: 8478-7760,  
AuthorID (РИНЦ): 998582  
Адрес для переписки: Gorovoysergey97@gmail.com

Для цитирования

Лысенко О. А., Симаков А. В., Горовой С. А. Повышение энергоэффективности насосных установок нефтеперерабатывающей отрасли // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 50 – 55. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-50-55.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© О. А. Лысенко, А. В. Симаков, С. А. Горовой

УДК 621.313.8  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-55-60

**О. А. ЛЫСЕНКО<sup>1</sup>**  
**А. В. СИМАКОВ<sup>2</sup>**  
**М. А. КУЗНЕЦОВА<sup>2</sup>**  
**А. В. НИКОНОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассматриваются вопросы определения параметров электрических машин переменного тока из состава электропривода установки электроцентробежного насоса. Целью работы является построение механической характеристики объекта исследования, асинхронного погружного электродвигателя, с помощью современного программного обеспечения. В связи с растущими требованиями к энергоэффективности, в том числе и в области нефтедобычи, представляют интерес вопросы применения современных пакетов прикладных программ для точного определения параметров электро-механического преобразователя. В ходе работы выполняется построение зависимостей момента асинхронной машины от скорости вращения на основе аналитических зависимостей и математического моделирования методом конечных элементов. Данные моделирования, с учетом погрешности и принятых допущений, являются корректными. Результатом работы является методика, позволяющая осуществлять корректное построение механических характеристик асинхронных электрических машин с короткозамкнутым ротором на основе моделирования в программе Elcut 6.2.

**Ключевые слова:** механическая характеристика, электропривод, погружной электродвигатель, математическая модель, метод конечных элементов.

В последние годы на рынке энергоресурсов наблюдается тенденция по увеличению потребления углеводородов [1]. Во многом это связано с введением новых производственных мощностей и с ростом потребностей населения планеты в энергоресурсах. В области нефтедобычи главным инструментом для поднятия сырьевого раствора из нефтяной скважины является погружной электрический центробежный насос. Его приводом является погружной электродвигатель (ПЭД). Эффективность его работы напрямую зависит от электромагнитных процессов, происходящих в его магнитных системах.

Требования к энергоэффективности электропривода постоянно растут [2], а многие аналитические методы расчета характеристик его звеньев не точны или устарели. В связи с этим существует острая необходимость в разработке новых методов расчета с применением современного программного обеспечения.

Установка электроцентробежного насоса (УЭЦН) состоит из оборудования двух категорий: наземного, доступного для обслуживания, и подземного, выполняющего непосредственную работу — извлечение сырьевой жидкости из промысловых