

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. ЛЫСЕНКО¹
А. В. СИМАКОВ²
М. А. КУЗНЕЦОВА²
А. В. НИКОНОВ¹

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Омский 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

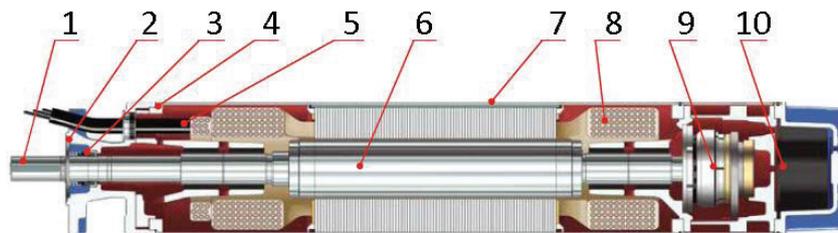


Рис. 1. Погружной асинхронный электродвигатель, где:
1 — вал; 2 — фланцевое соединение; 3 — механическое уплотнение; 4 — корпус двигателя; 5 — кабель; 6 — ротор; 7 — статор; 8 — обмотка статора; 9 — подшипник скольжения; 10 — диафрагма [4]

скважин. Сырьевая жидкость представляет собой смесь воды, нефти и газа в различных концентрациях [3].

Погружной электродвигатель в системе электропривода выполняет функции электромеханического преобразователя и является приводом центробежного насоса, расположенного в скважине и осуществляющего извлечение углеводородного сырья.

Конструктивное исполнение асинхронного ПЭД приведено на рис. 1. Для оценки свойств электродвигателя выполняют расчет и анализ его механических характеристик.

Механическая характеристика электродвигателя — это зависимость электромагнитного момента от скорости вращения.

Для асинхронного электродвигателя вместо скорости вращения может использоваться величина, именуемая скольжением.

Электромагнитный момент (момент силы) — это векторная физическая величина, равная векторному произведению вектора силы и радиус-вектора, проведенного от оси вращения к точке приложения этой силы. Характеризует вращательное действие силы на твердое тело.

В общем случае полный вращающий момент равен:

$$\vec{M} = [\vec{F} \times \vec{r}], \quad (1)$$

где M — полный вращающий момент; F — сила, действующая на тело; r — радиус-вектор.

В магнитном поле, создаваемом переменными токами, полная сила, действующая на тело, равна:

$$F = \frac{1}{2} \oint_s (H(n \cdot B) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) ds, \quad (2)$$

где B — комплексный вектор индукции магнитного поля; H — комплексный вектор напряженности магнитного поля; n — единичный вектор нормали к контуру.

Полный вращающий момент, согласно уравнению (1), равен:

$$M = \frac{1}{2} \oint_s \left([r \times H](n \cdot B) + [r \times B](H \cdot n) - [r \times n](H \cdot B) \right) ds. \quad (3)$$

Отношение между вращающим моментом и мощностью определяется как:

$$P = M \cdot \omega, \quad (4)$$

где P — мощность; ω — угловая скорость.

Под скольжением подразумевается величина в относительных единицах, которая характеризует отставание скорости вращения ротора от синхронной скорости вращения поля статора, создаваемого трехфазной обмоткой [5].

Характер механической характеристики позволяет сделать заключение о целесообразности применения рассматриваемого электродвигателя к той или иной системе электропривода, оценить диапазоны его устойчивой работы, перегрузочные данные, численные значения моментов и т.д.

Расчет механической характеристики можно выполнить на основе аналитических зависимостей, с помощью моделирования либо экспериментальным путем.

Аналитическая зависимость величины момента может быть определена по формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s}{s_{кр}} + 2as_{кр}}, \quad (5)$$

где $M_{кр}$ — максимальный (критический) момент, $s_{кр}$ — критическое скольжение, a — отношение активных сопротивлений фазы статора R_1 и ротора R'_2 .

В ряде случаев допускается не учитывать активное сопротивление фазы статора, и уравнение (5) принимает вид (6), который называют упрощенной формулой Клосса.

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s}{s_{кр}}}. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) достаточно точно описывают механические свойства асинхронных электродвигателей с фазным ротором. В асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором в той или иной мере наблюдается явление вытеснения тока в стержнях ротора, в связи с чем их параметры непостоянны и механические характеристики значительно отличаются от характеристик, рассчитанных по формулам Клосса. В частности, у некоторых электродвигателей с КЗ ротором при малых скоростях вращения наблюдается снижение момента, вызванное влиянием высших гармоник поля. Это следует учитывать при пуске двигателя под нагрузкой [6]. Тем не менее формулы (5) и (6) позволяют выполнять многие расчеты и делать общие заключения о свойствах и работе АД.

В случаях, когда необходима большая точность построения, должны использоваться экспериментально снятые механические характеристики.

Паспортные [8] и расчетные данные погружного электродвигателя

Паспортные данные ПЭД						Расчетные данные ПЭД				
$P_{н'}$, кВт	$U_{н'}$, В	$I_{н'}$, А	$\cos\phi$	η , о.е.	n_1 , об/мин	$s_{н'}$, о.е.	$M_{кр'}$, Н·м	$s_{кр'}$, о.е.	r_1' , Ом	r_2' , Ом
32	950	40	0,65	0,7	1500	0,1	520,61	0,407	0,045	0,076

Таблица 2

Численные значения вращающего момента

s , о.е.	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$M_{расч'}$, Н·м	366,13	393,21	422,71	453,86	484,55	510,05	520,53	497,76	414,01	226,35
$M_{мог'}$, Н·м	256,83	282,57	313,49	350,99	396,64	450,37	502,8	507,48	412,04	230,5

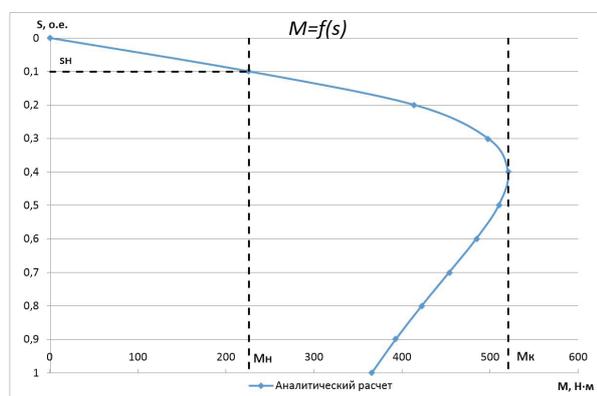


Рис. 2. Механическая характеристика ПЭД по формуле Клосса

В связи со спецификой применения погружных электродвигателей получение экспериментальных данных довольно затруднительно.

Можно предположить, что механическая характеристика, построенная с помощью математического моделирования, будет более точно отражать свойства исследуемого объекта.

Существует множество видов и методов моделирования. Одними из эффективных являются численные методы математического моделирования, в частности метод конечных элементов. Применение данного метода при проектировании электрических машин может способствовать оптимальному выбору компоновки, применяемых материалов, электрических нагрузок.

Прототипом для моделирования является погружной асинхронный электродвигатель ЭД32-117/4М. Поскольку одних паспортных данных недостаточно для построения механической характеристики, по методике [7] определим компоновку и выполним расчет параметров погружного асинхронного электродвигателя. Паспортные данные электродвигателя и расчетные величины для построения механической характеристики представлены в табл. 1.

Рассчитанные данные позволяют выполнить построение механической характеристики по уравнению (5). Численные значения момента при каждом значении скольжения сведены в табл. 2. По данным

табл. 2 построена зависимость величины вращающего момента от скольжения (рис. 2). Форма построенного графика характерна для асинхронной машины. Значения номинального момента, определенного по уравнению (4), и критического, определенного на основании перегрузочной способности электродвигателя, соответствуют полученным при решении уравнения (4), из чего следует, что характеристика построена корректно.

Выполним построение механической характеристики с помощью математического моделирования методом конечных элементов. Для достижения поставленных задач воспользуемся пакетом прикладных программ Elcut 6.2. Elcut — это программное обеспечение для моделирования мультифизических задач [9]. К его преимуществам относятся довольно простой процесс моделирования, дружелюбный интерфейс и незначительное потребление ресурсов. Также стоит отметить: это ПО является продуктом отечественной компании, что благоприятно сказывается на его доступности в условиях сложной политической обстановки.

Для построения геометрической модели по методике, представленной в [7], выполнен расчет главных размеров исследуемого объекта. Блокам геометрической модели необходимо присвоить исходные данные.

Медные обмотки статора и ротора имеют относительную магнитную проницаемость, равную единице. Ротор и статор выполнены из электротехнической стали СТ2013, нелинейность намагничивания стали учитывается при моделировании (рис. 3). В связи с малыми геометрическими размерами вал выполнен из того же материала, что и ротор, и используется как продолжение магнитопровода [10]. Электромагнитное поле создается током, протекающим в трехфазной обмотке статора. Для расчета выбранной задачи рационально пользоваться плотностью тока вместо полного тока для экономии расчетных мощностей. При работе электрической машины может возникать сильный нагрев из-за воздействия вихревых токов, в связи с чем ротор и статор шихтуются и имеют условно нулевую электропроводность. Для моделирования этого свойства необходимо задать длину плоской модели в направлении оси Z, равной шагу шихтовки. Поскольку в данной работе интерес представляет только электромагнитное поле в пределах

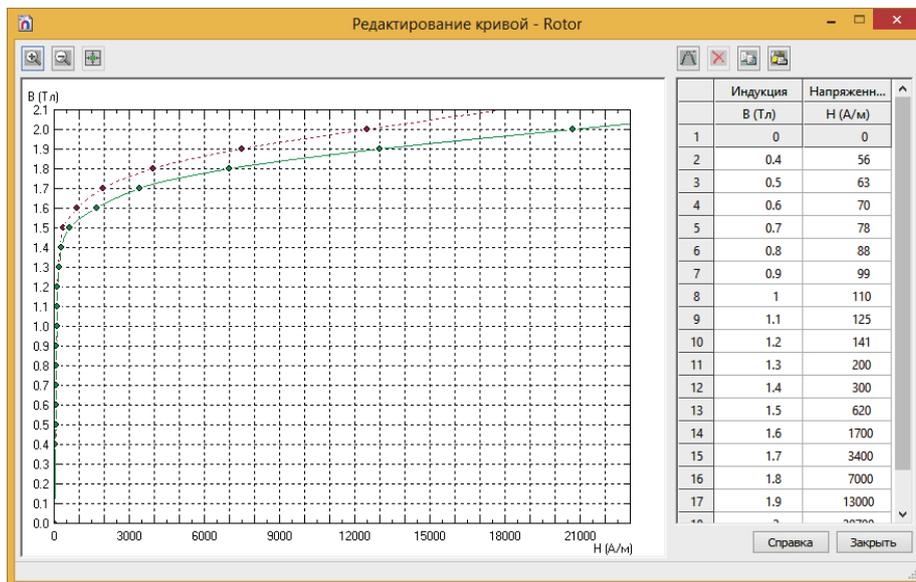
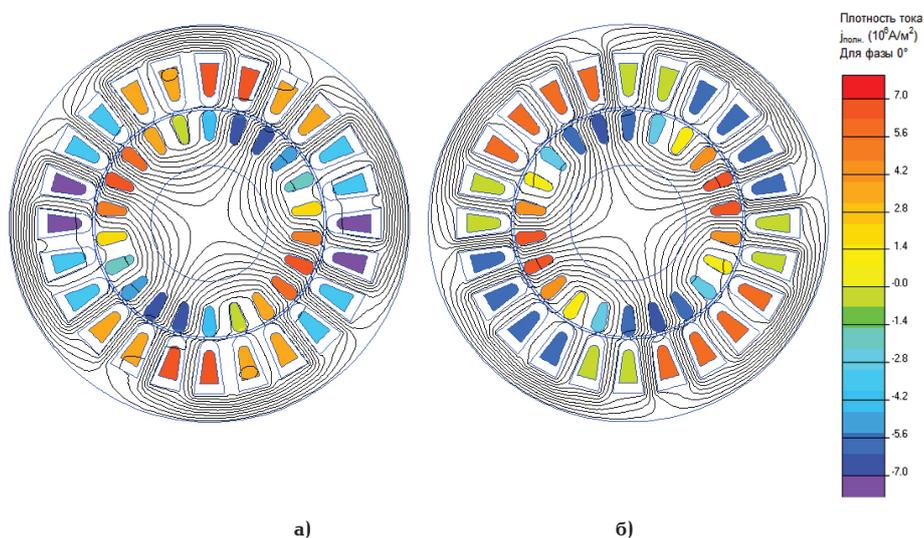
Рис. 3. Определение свойств материала с нелинейной зависимостью $B=f(H)$ 

Рис. 4. Результаты моделирования асинхронного ПЭД: силовые линии и плотности тока при фазе 0 (а) и при фазе 90 (б)

корпуса машины, принимаем при моделировании, что векторный магнитный потенциал внешней границы статора равен нулю.

В результате моделирования получена картина электромагнитного поля внутри корпуса исследуемой машины (рис. 4). Цветовая картина отображает характер распределения плотности тока в обмотках. Форма силовых линий демонстрирует наличие двух пар полюсов. При изменении фазы тока наблюдается вращение поля статора и изменение плотности тока в обмотке ротора. Плотность тока в статорных обмотках изменяется в соответствии с изменением фазы. В соответствии со сказанным выше можно сделать вывод о корректности построения модели и возможности использования ее для дальнейшего анализа.

Для построения механической характеристики асинхронного электродвигателя необходимо произвести серию последовательных расчетов с изменением частоты от 50 Гц до 0 с шагом 5 Гц. Для того, чтобы не моделировать каждую задачу в отдельности, воспользуемся встроенной в Elcut 6.2 утилитой LabelMover. Она позволит произвести серию по-

следовательных расчетов при заданном изменении физических свойств модели или геометрического положения ее блоков.

Для выполнения расчета необходимо выбрать контур интегрирования, через который будет определяться электромагнитный момент. Этим контуром охвачены ротор, короткозамкнутая обмотка и вал. Также необходимо задать, какое свойство задачи будет изменяться при каждом последующем шаге. В данном случае изменения частоты тока статора достаточно для моделирования вращения ротора.

Программа выполняет расчет сил и моментов по уравнениям (2) и (3). Результаты расчета значений электромагнитного момента в программе Elcut 6.2 представлены на рис. 5.

К сожалению, модуль LabelMover обладает довольно слабыми возможностями в плане работы с графиками. Для дальнейшего анализа экспортируем рассчитанные значения в MS Excel и совместим на одном графике механическую характеристику, построенную по уравнению (5), и зависимость, полученную при моделировании. Итоговый график представлен на рис. 6.

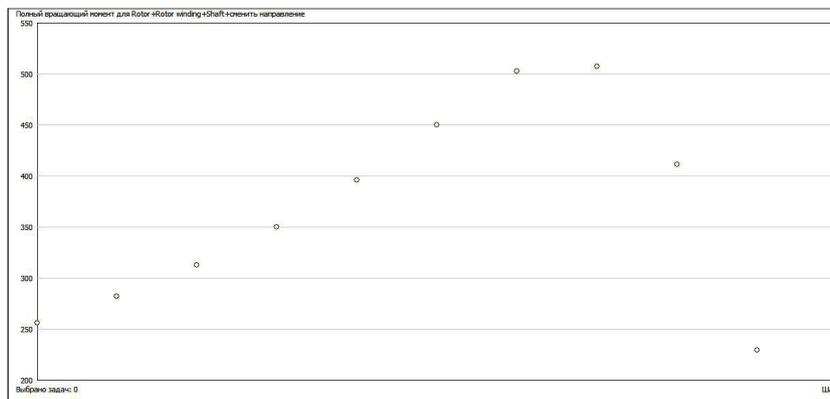


Рис. 5. Построение механической характеристики ПЭД в Elcut 6.2

Механические характеристики ПЭД, построенные двумя разными способами, совпадают на прямолинейном участке до номинального момента.

Следует отметить, что на основании данного участка можно оценить жесткость характеристик электродвигателя и его пригодность для применения в электроприводах различного назначения. Характеристики также демонстрируют сходство при перегрузке в диапазоне устойчивости. На участке пусковой характеристики наблюдается расхождение значений вплоть до точки критического момента. Наиболее значимыми являются отклонения значений пускового момента и критического скольжения. Пусковой момент, полученный при моделировании составляет $M_{n, \text{мог}} = 256,83$ Н·м, что меньше расчетного пускового момента $M_{n, \text{расч}} = 366,13$ Н·м. Также критическое скольжение $s_{k, \text{мог}} = 0,34$ отличается от расчетного $s_{k, \text{расч}} = 0,407$. Снижение момента на участке пусковой характеристики можно объяснить влиянием высших гармоник поля, которое имеет место при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором из-за эффекта вытеснения тока.

В ходе работы было выполнено построение механической характеристики погружного асинхронного электродвигателя двумя способами: по аналитической зависимости и с помощью моделирования методом конечных элементов. Для осуществления построений был выбран прототип электродвигателя и выполнен расчет основных параметров по одной из известных методик.

Значения номинального и критического момента, полученные при моделировании, отличаются от расчетных значений менее чем на 2 %. Величина критического скольжения, полученного при моделировании, отличается от расчетного на 16 %, а значение пускового момента — на 29 %.

Снижение момента на пусковом участке механической характеристики объясняется влиянием эффекта вытеснения тока при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. В свою очередь, малое значение пускового момента оказывает влияние на величину критического скольжения. В связи с этим можно предположить, что механическая характеристика асинхронного ПЭД, полученная при моделировании, соответствует теоретическим ожиданиям и является более корректной, чем аналогичная характеристика, построенная по формуле Клосса.

В результате работы сформирована комбинированная методика расчета параметров асинхронной машины переменного тока на основе современного

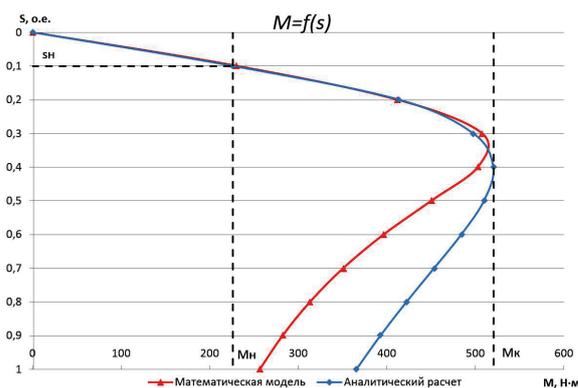


Рис. 6. Механические характеристики асинхронного ПЭД

программного обеспечения и ряда математических расчетов. Данная методика позволяет выполнить построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с учетом эффекта вытеснения тока в обмотке ротора.

Библиографический список

1. Прищепа О. М., Боровинских А. П. Направления развития сырьевой базы нефти России в долгосрочной перспективе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11, № 3. С. 10–24. DOI: 10.17353/2070-5379/36_2016.
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. Ковалев А. Ю., Ковалев Ю. З., Солодянкин А. С. Электротехнологические установки насосной эксплуатации скважин: моногр. Нижневартовск: Изд-во НГТУ, 2010. 105 с. ISBN 978-5-89988-753-6.
4. News // Pleuger Water Solutions. URL: <https://pleuger.nl/en/News> (дата обращения: 20.09.2018).
5. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. М.: Питер, 2008. 349 с. ISBN 978-5-469-01381-5.
6. Лифанов В. А., Помогаев Г. В. Электрические машины переменного тока. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 131 с.
7. Счастливый Г. Г., Семак В. Г., Федоренко Г. М. Погружные асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1983. 169 с.
8. Погружные электродвигатели (ПЭД). Технический каталог. URL: <https://www.rimera.com/upload/catalog/pdf/pogruzhnye-elektrodvig-ped.pdf> (дата обращения: 20.09.2018).
9. ELCUT 6.2. Руководство пользователя. СПб.: TOP, 2017. 287 с.

10. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П. [и др.]. Проектирование электрических машин. М.: Юрайт, 2011. 775 с.

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

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

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

Адрес для переписки: a_v_simakov@rambler.ru

КУЗНЕЦОВА Мария Андреевна, аспирантка кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.

Адрес для переписки: kuznetcova994@gmail.com

НИКОНОВ Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ОмГТУ.

SPIN-код: 9722-8373,

AuthorID (РИНЦ): 124080

ORCID: 0000-0002-9079-7038

AuthorID (SCOPUS): 7101714232

ResearcherID: B-3078-2016

Адрес для переписки: udinev@asoiu.com

Для цитирования

Лысенко О. А., Симаков А. В., Кузнецова М. А., Никонов А. В. Расчет механической характеристики асинхронного погружного электродвигателя методом конечных элементов // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 55–60. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-55-60.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© О. А. Лысенко, А. В. Симаков, М. А. Кузнецова,
А. В. Никонов