

УДК 62-97/-98

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.09

С.В. Мишуринских, А.Б. ПетроченковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ПОГРУЖНЫМ
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ**

Погружные асинхронные электродвигатели находятся среди основных типов привода, используемого в установках электроприводных центробежных насосов. Данные о коэффициенте мощности двигателя в каталогах приводятся при номинальном напряжении на его клеммах. Однако в условиях промышленной эксплуатации напряжение на клеммах двигателя, как правило, отличается от номинального. Это приводит к изменению коэффициента мощности и должно учитываться при расчете параметров режима электротехнического комплекса. **Цель:** разработка методики расчета, которая позволяет оценить изменение коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения на его клеммах. **Результаты:** предложена методика идентификации параметров схемы замещения электрического двигателя на основании каталожных нагрузочных характеристик двигателя. На основе результатов моделирования построены поверхности отклика коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения на клеммах и загрузки двигателя для различных моделей двигателей. Результаты расчетов показывают, что снижение напряжения на клеммах двигателя имеет положительный эффект с точки зрения уменьшения потерь в кабельной линии только при загрузке двигателя 30 % и ниже. Увеличение напряжения на клеммах двигателя позволяет снизить потери в кабеле при загрузке двигателя от 45 %. Получены полиномы, описывающие полученные поверхности отклика. **Практическая значимость:** полученные в результате исследования зависимости позволяют повысить точность моделирования погружных асинхронных электродвигателей, работающих в составе электротехнического комплекса нефтяного месторождения. При помощи разработанных моделей возможно выполнить исследования влияния номинального скольжения двигателей на характер изменения их коэффициента мощности.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, погружной электродвигатель, коэффициент мощности, моделирование электрических режимов.

S.V. Mishurinskikh, A.B. Petrochenkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR ESTIMATING THE REACTIVE POWER CONSUMED BY A SUBMERSIBLE INDUCTION ELECTRIC MOTOR

Submersible induction motors are one of the main drive types used in electric driven centrifugal pump installations. The motor power factor data in the catalogs are given at the rated voltage at the motor terminals. However, under industrial conditions, the voltage at the motor terminals, as a rule, differs from the nominal voltage. This leads to a change in the power factor and must be taken into account when calculating the parameters of the electrotechnical complex mode. The investigation **purpose** is the calculation methodology development that allows you to evaluate the change in the motor power factor depending on the voltage at its terminals. **Results:** it is the method for the parameters identifying of the electric motor equivalent circuit based on the catalog load characteristics of the motor is proposed. Based on the simulation results, the response surfaces of the motor power factor depending on the voltage at the terminals and the load of the motor for various motor models are constructed. The calculation results show that the voltage reducing at the motor terminals has a positive effect in terms of reducing losses in the cable line only at a motor load of 30% or less. Increasing the voltage at the motor terminals allows reducing cable losses when the motor is loaded from 45%. Polynomials describing the resulting response surfaces are obtained. **Practical relevance:** the result of the study allows increasing the modeling accuracy of submersible induction electric motors operating as part of the electrotechnical complex of an oil field. With the help of the developed models, it is possible to achieve the rated slip of the motors on the nature of the change in their power factor.

Keywords: electrotechnical complex, submersible electric motor, power factor, electrical modes modeling.

Введение

В технической документации энергетические параметры погружных асинхронных электрических двигателей (ПЭД) приводятся, как правило, для номинальных режимов работы. В некоторых случаях данные параметры могут приводиться для загрузки, отличной от номинальной. При этом стоит отметить, что данные параметры представлены при номинальном напряжении на клеммах двигателя. В реальных производственных условиях напряжение на клеммах двигателя не всегда равно номинальному.

В работе [1] приводятся данные об изменении энергетических характеристик погружного асинхронного двигателя в зависимости от напряжения на клеммах двигателя при номинальной нагрузке на валу. Изменение коэффициента мощности составляет в среднем 0,8 пп. на 1 % изменения напряжения с противоположным знаком. В работе [2] приведен анализ влияния напряжения на клеммах двигателя на коэф-

фициент мощности при различной нагрузке. В результатах представлено, что при полной нагрузке изменение коэффициента мощности составляет в среднем 1,2 пп. на 1 % изменения напряжения, при 75 % нагрузки изменение коэффициента мощности составляет в среднем 1,25 пп. на 1 % изменения напряжения, при 50 % нагрузки изменение коэффициента мощности составляет в среднем 1,3 пп. на 1 % изменения напряжения. При этом знаки изменения напряжения и коэффициента мощности противоположные. Подобные данные в виде графиков также представлены в работе [3]. В работе [4] дается рекомендация поддерживать напряжение на клеммах двигателя ниже номинального для уменьшения величины реактивной мощности в сети. При этом реактивная мощность снижается настолько, что компенсирует увеличение нагрузочных потерь вследствие уменьшения напряжения. В работе [5] отмечается, что при изменении напряжения на клеммах двигателя на 1 % от номинального происходит изменение в ту же сторону потребляемой реактивной мощности на 0,8...3,2 % в зависимости от нагрузки двигателя. Результаты анализа показывают, что при увеличении напряжения выше номинального коэффициент мощности снижается, а при уменьшении напряжения ниже номинального – повышается.

Однако в рассмотренных работах не приводятся аналитические выражения, с помощью которых можно было бы учитывать изменение коэффициента мощности при изменении напряжения. Данные зависимости достаточно важны, когда выбираются уровни напряжения на трансформаторах, работающих в составе установок электроприводных центробежных насосов (УЭЦН).

Методика расчета

Схема взаимодействия элементов электротехнического комплекса (ЭТК) УЭЦН представлена на рис. 1.

Основными внешними параметрами, определяющими величину потребления активной и реактивной мощности погружным электрическим двигателем, являются коэффициент нагрузки двигателя (определяется мощностью, необходимой для привода насоса и номинальной мощностью двигателя) и напряжение на его клеммах (определяется напряжением обмотки ВН трансформатора и потерями напряжения в КЛ [6–8]). В работах [9–14] предлагаются различные подходы к определению реактивной мощности, потребляемой электродвигателем.

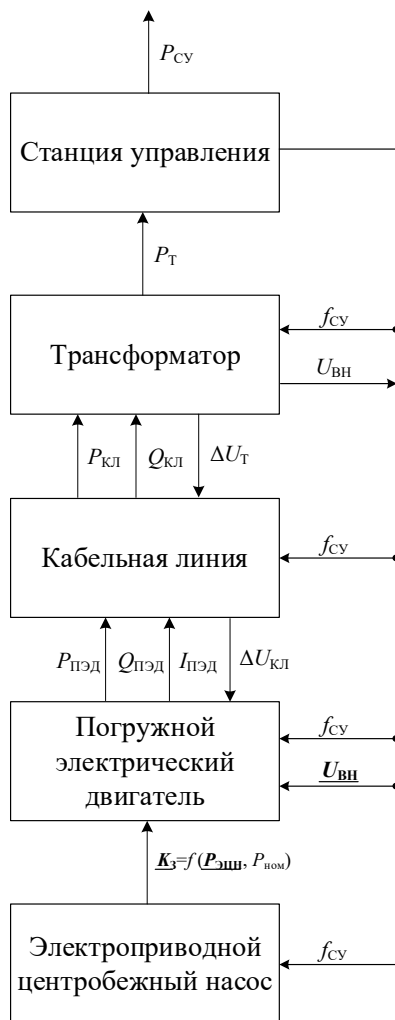


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов ЭТК УЭЦН: f_{cy} – частота напряжения на выходе станции управления; $P_{ном}$ – номинальная мощность электрического двигателя; $P_{эщ}$ – мощность, необходимая для привода ЭЦН; $P_{пэд}$ – активная мощность, потребляемая ПЭД; $Q_{пэд}$ – реактивная мощность, потребляемая ПЭД; $I_{пэд}$ – ток ПЭД; $\Delta U_{кл}$ – потеря напряжения в кабельной линии; $P_{кл}$ – активная мощность по стороне высокого напряжения (ВН) трансформатора; $Q_{кл}$ – реактивная мощность по стороне ВН трансформатора; ΔU_T – потеря напряжения в трансформаторе; P_T – активная мощность по стороне низкого напряжения (НН) трансформатора; P_{cy} – активная мощность на входе СУ

В проведенном исследовании для определения коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения на его клеммах и коэффициента загрузки разработан следующий алгоритм (рис. 2).

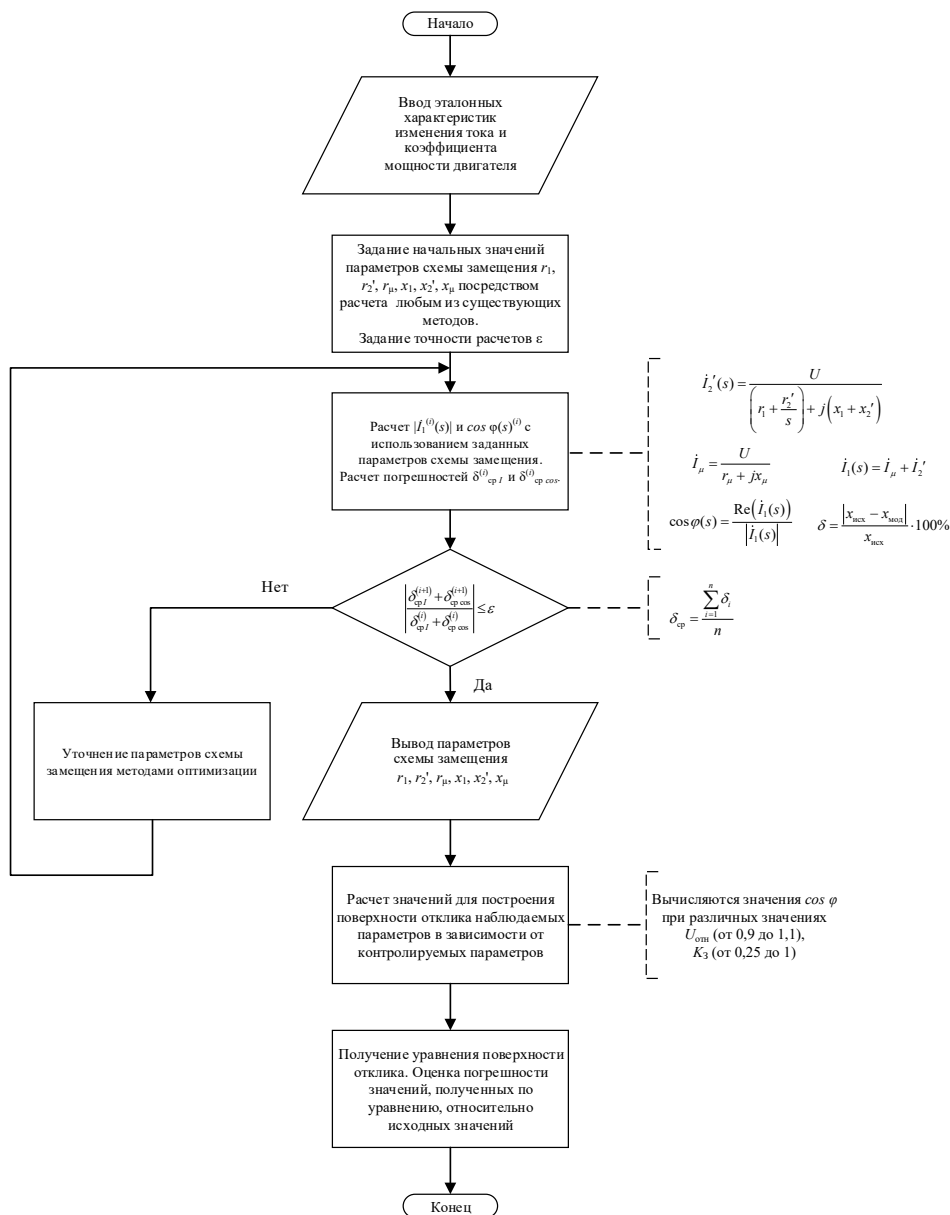


Рис. 2. Алгоритм определения коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения и коэффициента загрузки

Более подробно этапы алгоритма представлены ниже.

Определение параметров схемы замещения. Для исследования изменения коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения на его клеммах предлагается использовать Г-образную схему замещения двигателя (рис. 3).

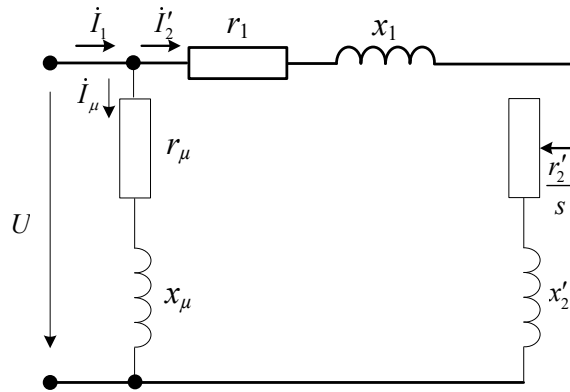


Рис. 3. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Токи в схеме вычисляются по формулам [15]:

$$\dot{I}_\mu = \frac{U}{r_\mu + jx_\mu}, \quad (1)$$

$$\dot{I}'_2(s) = \frac{U}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + j(x_1 + x'_2)}, \quad (2)$$

$$\dot{I}_1(s) = \dot{I}_\mu + \dot{I}'_2, \quad (3)$$

где \dot{I}_μ – ток намагничивания АД, А; \dot{I}'_2 – ток ротора, приведенный к обмотке статора, А; \dot{I}_1 – ток статора, А; U – напряжение на клеммах двигателя, В; r_μ – активное сопротивление цепи намагничивания, Ом; r_1 – активное сопротивление статора, Ом; r'_2 – активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; x_μ – индуктивное сопротивление цепи намагничивания, Ом; x_1 – индуктивное сопротивление статора, Ом; x'_2 – индуктивное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом; s – скольжение двигателя, о.е.

Исходя из полученных токов, коэффициент мощности двигателя определяется по формуле [16]:

$$\cos \varphi(s) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{I}_1(s))}{|\dot{I}_1(s)|}. \quad (4)$$

В настоящее время существует большое количество методик расчета параметров схем замещения асинхронных двигателей на основании паспортных данных оборудования. Однако стоит отметить, что упрощенные методики дают менее точные результаты, а более подробные требуют большого количества исходных данных. Опыт расчета [17] показывает, что энергетические характеристики двигателей, построенные с применением таких методик, значительно отличаются от паспортных данных двигателей [18]. При известной структуре модели, а также величинах входных и выходных данных параметры схемы замещения можно получить, применяя методы идентификации [19, 20].

Для идентификации параметров схемы замещения разработан следующий подход:

1) построение характеристик изменения тока и коэффициента мощности в зависимости от загрузки по каталожным данным двигателя;

2) задание начальных параметров схемы замещения. Параметры задаются по результатам расчетов любым из существующих методов;

3) идентификация параметров схемы замещения. Критерием окончания расчета является минимальное значение суммы средних погрешностей тока и коэффициента мощности двигателя, полученных в результате расчетов по формулам (1)–(4) относительно каталожных данных. Оценка погрешностей выполняется по формулам (5)–(6).

Для определения модуля относительной погрешности используется формула:

$$\delta = \frac{|x_{\text{исх}} - x_{\text{мод}}|}{x_{\text{исх}}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $x_{\text{исх}}$ – каталожное значение наблюдаемой величины, ед.; $x_{\text{мод}}$ – значение наблюдаемой величины, полученное в результате моделирования, ед.

Средняя погрешность определяется по формуле:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}, \quad (6)$$

где δ_i – погрешность в i -й узловой точке, %; n – количество узловых точек, ед.

Реактивная мощность при каждом значении скольжения пропорциональна U^2 , и при изменении напряжения и соответствующем изменении скольжения не остается неизменной. При снижении скольжения она будет уменьшаться, а с некоторого значения напряжения U_2 будет возрастать до величины $U_{кр}$. Затем двигатель остановится [21–23].

Определить скольжение при напряжении, отличном от номинального, можно, исходя из уравнения механической характеристики асинхронного двигателя [15, 24, 25]:

$$s^2 - \left(\frac{3U^2 p r_2'}{2\pi f_{1н} M_C r_1^2} - 2 \frac{r_2'}{r_1} \right) s + \left(\frac{r_2'}{r_1} \right)^2 = 0, \quad (7)$$

где p – число пар полюсов, шт; M_C – момент сопротивления, Н·м; $f_{1н}$ – частота питающего напряжения, Гц;

При решении данного уравнения получаются два положительных корня, меньшее значение из которых используется для расчета энергетических показателей АД при соответствующем напряжении питания U [15].

Оценка эффективности снижения напряжения. При оценке эффективности снижения напряжения на клеммах двигателя основным параметром является ток двигателя, так как от него зависят потери в кабельной линии, питающей двигатель. Ток двигателя вычисляется по формуле:

$$I = \frac{P_2}{\sqrt{3}U \cdot \cos \varphi}, \quad (8)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт.

Исходя из данной формулы и допущения, что мощность на валу двигателя остается постоянной при изменении напряжения на клеммах двигателя, получаем критерий оценки, по которому определяется эффективность снижения напряжения на двигателе:

$$K = \frac{U_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot \cos \varphi_1}, \quad (9)$$

где U_1, U_2 – напряжение на клеммах двигателя до и после регулирования напряжения соответственно, В; $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ – коэффициент мощности двигателя до и после регулирования напряжения соответственно, о.е.

Регулирование считается эффективным, если $K > 1$, но если $K \leq 1$, регулирование неэффективно.

Построение поверхности отклика, оценка результатов расчетов. В формулах (1), (2), (7) используются величины момента сопротивления и напряжения двигателя в именованных единицах. Для сравнения характеристик различных двигателей более удобно будет использовать относительные величины: коэффициент загрузки двигателя K_3 , относительное напряжение на клеммах двигателя $U_{отн}$ и относительный коэффициент мощности $K_{\cos\varphi}$:

$$K_3 = \frac{M_c}{M_{ном}}, \quad (10)$$

$$U_{отн} = \frac{U}{U_{ном}}, \quad (11)$$

$$K_{\cos\varphi} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi(U_{ном})}, \quad (12)$$

где $M_{ном}$ – номинальный момент электрического двигателя, Н·м; $U_{ном}$ – номинальное напряжение электрического двигателя, В; $\cos\varphi(U_{ном})$ – коэффициент мощности двигателя при заданной нагрузке и номинальном напряжении на клеммах, о.е.

Для построения поверхностей отклика величин K и $K_{\cos\varphi}$ переменными являются: коэффициент загрузки K_3 (диапазон изменения принимается от 0,25 до 1), относительное напряжение $U_{отн}$ (диапазон изменения принимается от 0,9 до 1,1).

С целью дополнения математической модели электрического двигателя зависимостью изменения коэффициента мощности от загрузки и напряжения для каждого двигателя определяется уравнение поверхности отклика в виде зависимости:

$$K_{\cos\varphi} = f(K_3, U_{отн}). \quad (13)$$

Для унификации уравнения предлагается определить весовые коэффициенты переменных по формуле:

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n}, \quad (14)$$

где a_{ij} – весовой коэффициент при i -й переменной j -го двигателя, ед.; i – номер рассматриваемой переменной; j – номер рассматриваемого двигателя; n – количество рассматриваемых двигателей.

Таким образом, чтобы вычислить коэффициент мощности двигателя при различной нагрузке и напряжении на клеммах, отличном от номинального, следует воспользоваться формулой:

$$\cos \varphi_U = \cos \varphi(U_{\text{ном}}) \cdot K_{\cos \varphi}, \quad (15)$$

где $\cos \varphi(U_{\text{ном}})$ – коэффициент мощности двигателя при заданной нагрузке и номинальном напряжении на клеммах.

Результаты

Апробация методики выполнена на основании каталожных данных двигателей предприятия ООО «Новомет-Пермь» [18]. Расчеты выполнены для двигателей ПЭД габарита 117 с одной парой полюсов, мощностью 25–45 кВт. Результаты идентификации параметров схем замещения двигателей, а также средние погрешности при определении тока и коэффициента мощности двигателя относительно паспортных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты идентификации параметров
схем замещения двигателей

Двигатель	r_1 , Ом	x_1 , Ом	r'_2 , Ом	x'_2 , Ом	r'_μ , Ом	x_μ , Ом	δ_{epI} , %	$\delta_{\text{ep cos}}$, %
ПЭД25	0,0001	2,8446	1,5171	2,8445	9,7731	73,5303	1,01	0,84
ПЭД28	0,0001	4,6158	2,2252	4,6154	10,0076	82,5762	1,07	1,04
ПЭД32	0,0001	4,4602	2,4549	4,4599	11,5793	91,8314	1,04	0,95
ПЭД40	0,0001	6,2728	2,3446	6,2723	13,9353	114,7260	1,06	1,02
ПЭД45	0,0001	8,1300	2,6433	8,1268	14,6407	128,4123	1,09	1,16

На основании разработанных моделей выполнена оценка эффективности изменения напряжения двигателя. Поверхность отклика коэффициента K для двигателя ПЭД25 представлена на рис. 4.

На рис. 5 приведена поверхность отклика относительного коэффициента мощности двигателя ПЭД25 при различной нагрузке и напряжении на клеммах двигателя.

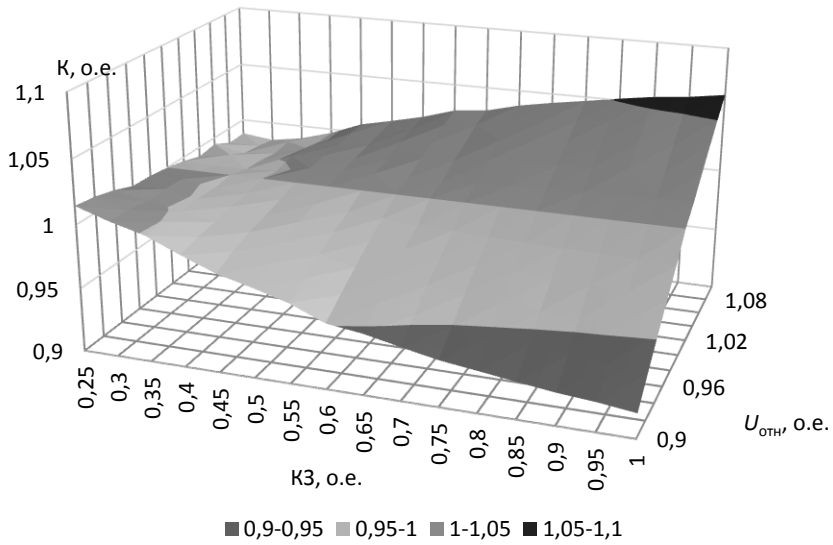


Рис. 4. Поверхность отклика коэффициента K для двигателя ПЭД25

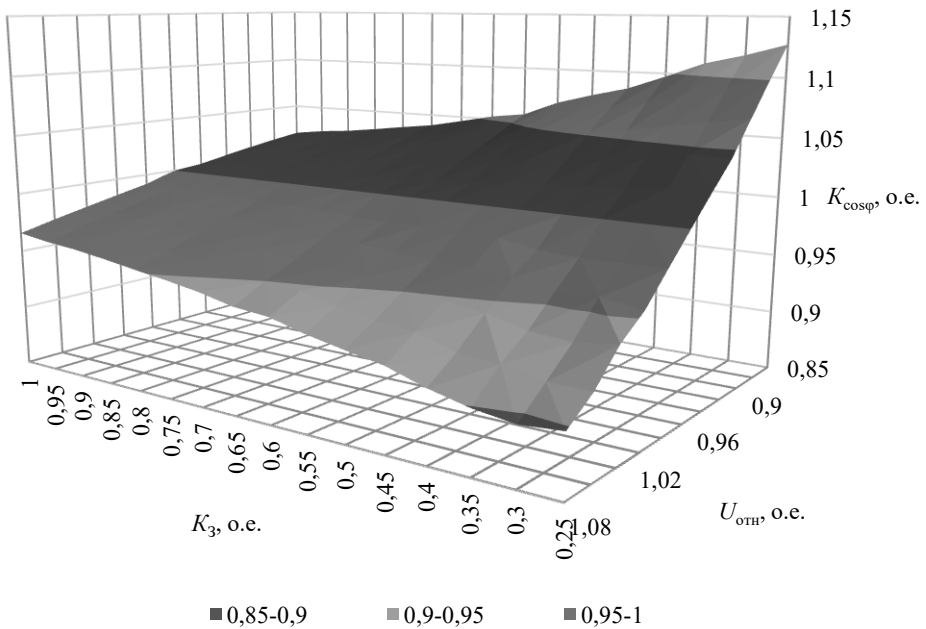


Рис. 5. Поверхность отклика относительного коэффициента мощности для двигателя ПЭД25

Выполнено сравнение поверхностей отклика коэффициента мощности двигателя в зависимости от напряжения на клеммах двигателя при различной нагрузке двигателя. В результате анализа выявлено, что для двигателей различной мощности поверхности отклика подобны. На основе расчетных данных получено уравнение, позволяющее дополнить модель электрического двигателя зависимостью изменения коэффициента мощности двигателя при различных нагрузках и напряжении, отличном от номинального. Зависимость имеет следующий вид:

$$K_{\cos\varphi} = (a_1 + a_2 \cdot K_3 + a_3 \cdot K_3^2 + a_4 \cdot K_3^3) U_{\text{отн}} + (a_5 + a_6 \cdot K_3 + a_7 \cdot K_3^2 + a_8 \cdot K_3^3). \quad (16)$$

Коэффициенты полинома для различных двигателей представлены в табл. 2. В нижней строке представлено среднее значение, рассчитанное по формуле (14).

Таблица 2

Коэффициент полинома

Двигатель	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
ПЭД25	-1,5103	1,1136	1,2132	-1,1104	2,5228	-1,1564	-1,1794	1,1029
ПЭД28	-1,6298	1,5843	0,6233	-0,8419	2,6495	-1,6607	-0,5498	0,8185
ПЭД32	-1,6155	1,56059	0,61355	-0,8358	2,6346	-1,6330	-0,5413	0,8113
ПЭД40	-1,5936	1,4301	0,8351	-0,9385	2,6046	-1,4724	-0,8046	0,9329
ПЭД45	-1,6512	1,6392	0,5914	-0,8302	2,6648	-1,6941	-0,5490	0,8216
Среднее	-1,6001	1,4656	0,7753	-0,9114	2,6152	-1,5233	-0,7248	0,8974

Таблица 3

Результаты оценки погрешности вычислений

Двигатель	Погрешность δ , %			
	Индивидуальные значения коэффициентов		Средние значения коэффициентов	
	Средняя погрешность	Максимальная погрешность	Средняя погрешность	Максимальная погрешность
ПЭД25	0,163	1,279	0,239	1,583
ПЭД28	0,191	0,986	0,195	1,023
ПЭД32	0,175	0,990	0,187	1,138
ПЭД40	0,190	1,147	0,197	0,996
ПЭД45	0,204	1,139	0,269	0,869

В табл. 3 представлены результаты оценки погрешности между значениями наблюдаемых величин поверхности отклика и значений,

полученных при использовании полученного полинома. В столбцах, соответствующих индивидуальным значениям коэффициентов, приведены значения погрешностей, когда использованы различные весовые коэффициенты полиномов для каждого из двигателей. В столбцах, соответствующих среднему значению коэффициентов, приведены значения погрешностей, когда использованы средние весовые коэффициенты полиномов для каждого из двигателей, которые приведены в нижней строке табл. 2.

При использовании индивидуальных коэффициентов максимальная относительная погрешность между значениями, полученными с применением полинома, и расчетными данными составляет не более 1,279 %, а средняя относительная погрешность составляет 0,204 %. При использовании усредненных коэффициентов максимальная относительная погрешность между значениями, полученными с применением полинома, и расчетными данными составляет не более 1,583 %, а средняя относительная погрешность составляет 0,269 %.

Заключение

1. Предложена методика идентификации параметров схемы замещения электрического двигателя на основании каталожных нагрузочных характеристик двигателя. В результате идентификации параметров выявлена особенность, что величина активного сопротивления статора стремится к 0. Средняя погрешность определения тока и коэффициента мощности двигателя составляет не более 1,16 %. Использование данного подхода имеет большую практическую значимость при моделировании режимов электротехнических комплексов промышленных предприятий.

2. Выполнена оценка эффективности снижения напряжения на клеммах двигателя. Результаты расчетов показывают, что снижение напряжения на клеммах двигателя имеет положительный эффект с точки зрения уменьшения потерь в кабельной линии только при загрузке двигателя 30 % и ниже. Увеличение напряжения на клеммах двигателя позволяет снизить потери в кабеле при загрузке двигателя от 45 %, при этом чем выше нагрузка двигателя, тем больший эффект окажет увеличение напряжения.

3. На основе результатов моделирования построены поверхности отклика коэффициента мощности двигателя в зависимости от напря-

жения на клеммах и загрузки двигателя для различных моделей двигателей. Анализ результатов показал, что для рассмотренных двигателей поверхности отклика подобны. В результате расчетов получены уравнения поверхности отклика для каждого из двигателей, а также уравнение с усредненными коэффициентами. Расчет погрешностей показал, что в практических целях можно использовать уравнение с усредненными коэффициентами. Применение данного уравнения позволяет дополнить математические модели электрических двигателей без значительного усложнения математического аппарата и алгоритмов расчетов, что достаточно важно при решении задачи оптимизации электропотребления объектов механизированной добычи нефти.

4. При помощи разработанных моделей возможно исследовать влияние номинального скольжения двигателей на характер изменения их коэффициента мощности.

Библиографический список

1. Takacs G. *Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance*. – Burlington, MA: Gulf Professional Publishing, 2009. – 440 p.

2. Pillay P. Practical Consideration in Applying Energy Efficient Motors in the Petrochemical Industry // *IEEE, PCIC-95-21*. – September, 1995.

3. Антонов М.В., Герасимова Л.С. *Технология производства электрических машин: учеб. пособие для вузов*. – М: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

4. Табачникова Т.В. *Оптимизация режимов работы электротехнического комплекса предприятий нефтедобывающей промышленности: автореф...дис. канд. техн. наук*. – СПб., 2006. – С. 24.

5. Сибикин Ю.Д. *Основы электроснабжения объектов: учеб. пособие*. – 3-е – изд., стер. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 328 с.

6. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes / A.V. Romodin, D.Y. Leyzgold, S.V. Mishurinskikh, N.V. Pavlov, A.S. Semenov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1886. – Art. 012003. – 7 p. (Scopus).

7. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V. Practical aspects of modeling of the oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 643. – Art. 012115. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/>

article/10.1088/1757-899X/643/1/012115. Title from screen. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012115.

8. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

9. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 115 с.

10. Гридин В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. – 2018. – № 9. – С. 44–48. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-9-44-48

11. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

12. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Академия, 2007. – 368 с.

13. Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование асинхронных двигателей с целью определения возможностей повышения их энергетических показателей // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 619–628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6

14. Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Абибуллаев А.Н. Зависимость скольжения, мощности и вращающего момента асинхронных машин от частоты сети при переходном режиме работы // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 11. – С. 161–170.

15. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: метод. указания к самостоят. работе студ. по дис. «Электротехника и электроника», «Основы электропривода». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

16. Калинов А.П., Огарь В.А. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания // Вестник КДПУ. – 2006. – С. 226–229.

17. Experience in Developing a Physical Model of Submersible Electrical Equipment for Simulator Systems: Research and Training Tasks on the Agenda of a Key Employer [Электронный ресурс] / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, S.V. Mishurinskikh, V.V. Seleznev, V.A. Shamaev // Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Plan-

ning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES); Saint Petersburg, Russia, Nov. 14–15, 2018; IEEE Russia North-West section. – Saint Petersburg Electrotechn. Univ. LETI; IEEE, 2018. – P. 114–117. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604169>. DOI 10.1109/PTES.2018.8604169

18. Погружные насосные системы: каталог продукции [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.novometgroup.com/rus/products-and-services/artificial-lift/electrical-submersible-pumping-systems/standard-esp/> (дата обращения: 30.12.2020).

19. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дис. канд. техн. наук: 05.09.01, 05.09.03. – Ханты-Мансийск, 2020. – 182 с.

20. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения / В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин, В.О. Бессонов // Омск. науч. вестник. Электротехника. Энергетика. – 2018. – № 6. – С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-36-40

21. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 309 с.

22. Воронин В.А. О допустимых отклонениях напряжения для асинхронных двигателей // Россия молодая: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участ. / Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2016.

23. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для вузов. – М.: Академия, 2004. – 202 с.

24. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А.И. Вольдек, В.В. Попов [и др.]. – СПб.: Питер, 2008. – 349 с.

25. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

References

1. Takacs G. Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance. Burlington, MA: Gulf Professional Publishing, 2009, 440 p.

2. Pillay P. Practical Consideration in Applying Energy Efficient Motors in the Petrochemical Industry. *IEEE, PCIC-95-21*. September, 1995.

3. Antonov M.V., Gerasimova L.S. Tekhnologiya proizvodstva elektricheskikh mashin [Electric machine manufacturing technology]. Moscow: Energoizdat, 1982, 512 p.

4. Tabachnikova T.V. Optimizatsiia rezhimov raboty elektrotekhnicheskogo kompleksa predpriatii nefte dobyvaiushchei promyshlennosti [Optimization of the operating modes of the electrical complex of oil-extracting industry enterprises]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2006, 24 p.

5. Sibikin Iu.D. Osnovy elektrosnabzheniia ob"ektov [Fundamentals of power supply to objects]. 3rd ed. Moscow, Berlin: Direkt-Media, 2020, 328 p.

6. Romodin A.V., Leyzgold D.Y., Mishurinskikh S.V., Pavlov N.V., Semenov A.S. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1886, Art. 012003, 7 p., Scopus.

7. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V. Practical aspects of modeling of the oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 643, Art. 012115, 6 p, available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012115>. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012115.

8. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlia dobychi nefi [Downhole pumping units for oil production]. Moscow: «Nef' i gaz» Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefi i gaza imeni I.M. Gubkina, 2002, 824 p.

9. Vainshtein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem v raschetakh ustanovivshikhsia rezhimov i perekhodnykh protsessov [Mathematical models of elements of electric power systems in the calculations of steady-state modes and transient processes]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010, 115 p.

10. Gridin V.M. Raschet kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei po katalognym dannym [Calculation of the characteristics of induction motors according to catalog data]. *Elektrichestvo*, 2018, no. 9, pp. 44-48. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-9-44-48

11. Rabinovich R.S. Avtomaticheskaiia chastotnaia razgruzka energosistem [Automatic frequency unloading of power systems]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 352 p.

12. Moskalenko V.V. Elektricheskii privod [Electric drive]. Moscow: Akademiia, 2007, 368 p.

13. Burkov A.F., Iurin V.N., Avetisian V.R. Issledovanie asinkhronnykh dvigatelei s tsel'iu opredeleniia vozmozhnostei povysheniia ikh energeticheskikh pokazatelei [Study of induction motors in order to determine the possibilities of increasing their energy performance]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 619-628. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-619-6

14. Bekirov E.A., Voskresenskaia S.N., Abibullaev A.N. Zavisimost' skol'zheniia, moshchnosti i vrashchaiushchego momenta asinkhronnykh mashin ot chastoty seti pri perekhodnom rezhime raboty [Dependence of slip, power and torque of induction machines on the mains frequency during transient operation]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaia bezopasnost'*, 2018, no. 11, pp. 161-170.

15. Solov'ev V.A. Raschet kharakteristik trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatel'ia [Calculation of the characteristics of a three-phase induction motor]. Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Bauman, 2014, 44 p.

16. Kalinov A.P., Ogar' V.A. Kharakteristiki asinkhronnykh dvigatelei s uchetom nelineinosti krivoi namagnichivaniia [Characteristics of induction motors taking into account the nonlinearity of the magnetization curve]. *Vestnik KDPU*, 2006, pp. 226-229.

17. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V., Seleznev V.V., Shamaev V.A. Experience in Developing a Physical Model of Submersible Electrical Equipment for Simulator Systems: Research and Training Tasks on the Agenda of a Key Employer. *Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES); St. Petersburg, Russia, Nov. 14-15, 2018; IEEE Russia North-West section*. Saint Petersburg Electrotechn. Univ. LETI; IEEE, 2018, pp. 114-117, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604169>. DOI 10.1109/PTES.2018.8604169

18. Pogruzhnye nasosnye sistemy: katalog produktsii [Submersible pumping systems: product catalog], available at: <https://www.novomet-group.com/rus/products-and-services/artificial-lift/electrical-submersible-pumping-systems/standard-esp/> (accessed 30 December 2020).

19. Anikin V.V. Metodika i sredstva predvaritel'noi identifikatsii parametrov modeli posleremontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Method and means of preliminary identification of model parameters of post-repair adjustable submersible induction electric motors]. Ph. D. thesis. Khanty-Mansiisk, 2020, 182 p.

20. Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kuznetsov E.M., Anikin V.V., Bessonov V.O. Opredelenie ekspluatatsionnykh parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei po identifikatsionnym parametram T-obraznoi skhemy zameshcheniia [Determination of operational parameters of submersible induction electric motors according to the identification parameters of the T-shaped equivalent circuit]. *Omskii nauchnyi Vestnik. Elektrotehnika. Energetika*, 2018, no. 6, pp. 36-40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-36-40

21. Gurevich Iu.E., Libova L.E., Okin A.A. Raschety ustoichivosti i protivooavariinnoi avtomatiki v energosistemakh [Calculations of stability and emergency automation in power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 2009, 309 p.

22. Voronin V.A. O dopustimyykh otkloneniiakh napriazheniia dlia asinkhronnykh dvigatelei [On permissible voltage deviations for induction motors]. *Rossiia molodaia. Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem*. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2016.

23. Braslavskii I.Ia. Energoberegaiushchii asinkhronnyi elektroprivod [Energy saving induction electric drive]. Moscow: Academia, 2004, 202 p.

24. Vol'dek A.I., Popov V.V. et al. Elektricheskie mashiny: mashiny peremennogo toka [Electrical machines: alternative current machines]. Saint Petersburg: Piter, 2008, 349 p.

25. Kliuchev V.I. Teoriia elektroprivoda [Electric drive theory]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1998, 704 p.

Сведения об авторах

Мишуриных Сергей Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mishurinskikh_sv@pstu.ru).

Петроченков Антон Борисович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pab@msa.pstu.ru).

About the authors

Sergey V. Mishurinskikh (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Microprocessor Units of Automation Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: mishurinskikh_sv@pstu.ru).

Anton B. Petrochenkov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Science in Engineering Sciences, Head of the Microprocessor Units of Automation department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pab@msa.pstu.ru).

Получено 28.05.2021