

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Рассмотрена методика определения эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) — тока статора I_1 , выходной мощности P_2 , коэффициента полезного действия η , коэффициента мощности $\cos\phi$ и др. через параметры Т-образной схемы замещения с одноконтурным ротором. Для практической реализации методики разработана программа SHEM_PAR в пакете Matlab 7. Приводятся результаты определения эксплуатационных параметров у ПЭД типов ЭД(Т)12-117-380, 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000, подтверждающие эффективность программы SHEM_PAR и целесообразность ее применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования для идентификации и контроля параметров ПЭД с целью повышения межремонтного периода эксплуатации в составе установок для добычи нефти.

Ключевые слова: активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора.

Введение. Установки электропогружных центробежных насосов (УЭЦН) в составе станция управления — повышающий промышленный трансформатор — длинная кабельная линия — ПЭД — электроцентробежный насос (ЭЦН) — насосно-компрессорные трубы реализуют в России основной способ механизированной добычи нефти [1]. Надежное и эффективное управление работой ПЭД в УЭЦН напрямую связано с идентификацией параметров его классической Т-образной схемы замещения (рис. 1). Информация об этих параметрах необходима для определения эксплуатационных параметров ПЭД [2], организации энергоэффективных и надежных режимов эксплуатации УЭЦН [3, 4].

В [5, 6] рассмотрена идентификация параметров схемы замещения (рис. 1), использующая интегральное преобразование $\int_0^\infty i_1(t)dt$ затухающего тока обмотки статора, экспоненциальную аппроксимацию его переходной характеристики

$$i_1(t) = I_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + I_2 e^{-\frac{t}{T_2}} + I_3 e^{-\frac{t}{T_3}} \quad (1)$$

и вычисление по этим данным параметров схемы замещения

$$R_1 = (U_0 / I_0), \quad L_m = \frac{R_1 \cdot \int_0^\infty i_1(t)dt}{I_0} - \frac{L_\phi}{k},$$
$$R'_2 = \frac{R_1 \cdot \int_0^\infty i_1(t)dt}{I_0 T_1 - \int_0^\infty i_1(t)dt}, \quad L'_2 = T_2(R_1 + R'_2) - \frac{L_\phi}{k},$$
$$R_m = \frac{L_\phi \cdot L'_2}{T_3(L_\phi + k \cdot L'_2)}, \quad L_\phi = -k \cdot U_0 (di_1 / dt)_{t \rightarrow 0}^{-1}. \quad (2)$$

В (1) и (2) U_0 и I_0 — постоянное напряжение и ток в обмотке статора до гашения магнитного

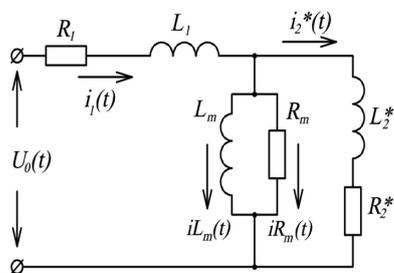


Рис. 1. Т-образная схема замещения АД с параллельным контуром намагничивания при неподвижном роторе: R_1 , R_m , R_2^* — активное сопротивление обмотки статора АД, сопротивление активных потерь в магнитопроводе АД, приведенное активное сопротивление обмотки ротора; L_1 , L_2^* , L_m — индуктивности рассеяния обмотки статора, обмотки ротора, индуктивность намагничивания

поля ПЭД; I_1 , I_2 , I_3 и T_1 , T_2 , T_3 — начальные токи и постоянные времени аппроксимирующих экспонент, $k=2/3$ при соединении фаз ПЭД по схеме неполной звезды $a+b/c$. Идентификация параметров осуществляется при заторможенном роторе без сложного сопряжения ПЭД с нагрузочным ЭЦН и удобна для реализации в цеховых условиях ремонтных предприятий (табл. 1) с помощью переносной сертифицированной установки РПХ-20 [7], оснащенной программным обеспечением SHERM_ZAM [8].

В данной статье рассмотрены алгоритм определения эксплуатационных параметров ПЭД, построенный на основе структуры схемы замещения (рис. 1), и программа его реализации. Последняя может найти применение в сервисных центрах для контроля измененного технического состояния ПЭД, вызванного его ремонтным обслуживанием.

Теоретическая часть. Алгоритм определения эксплуатационных параметров ПЭД по идентификационным параметрам схемы замещения (рис. 1) в зависимости от скольжения заключается в последовательном применении следующих расчетных соотношений.

Сопротивления эквивалентной последовательной ветви намагничивания

$$R_0 = \frac{R_m \cdot X_m}{R_m^2 + X_m^2}, \quad X_0 = \frac{X_m \cdot R_m}{R_m^2 + X_m^2}, \quad (3)$$

где $X_m = 2\pi \cdot f \cdot L_m$ — индуктивное сопротивление параллельной ветви намагничивания, f — частота трехфазного напряжения, подводимого к ПЭД с поверхности по длинной кабельной линии.

Полное сопротивление Т-образной схемы замещения ПЭД

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{(R_0 + jX_0) \cdot \left(\frac{R_2^*}{s} + jX_2^* \right)}{(R_0 + jX_0) + \left(\frac{R_2^*}{s} + jX_2^* \right)},$$

$$X_1 = 2\pi f L_1, \quad X_2^* = 2\pi f L_2^*. \quad (4)$$

Ток в обмотке статора ПЭД

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3} \cdot Z}. \quad (5)$$

Приведенное падение напряжения в обмотке ротора ПЭД

$$\dot{U}_2^* = \dot{I}_1 \cdot \frac{(R_0 + jX_0) \cdot \left(\frac{R_2^*}{s} + jX_2^* \right)}{(R_0 + jX_0) + \left(\frac{R_2^*}{s} + jX_2^* \right)}. \quad (6)$$

Приведенный ток в обмотке ротора ПЭД

$$\dot{I}_2^* = \frac{\dot{U}_2^*}{\frac{R_2^*}{s} + jX_2^*}. \quad (7)$$

Выходная мощность ПЭД

$$P_2 = m_1 \cdot |I_2^*|^2 \cdot \frac{R_2^*}{s} (1-s), \quad (8)$$

где m_1 — число фаз ПЭД. Вращающий момент на валу ПЭД

$$M_2 = \frac{m_1 \cdot p}{100\pi} \cdot |I_2^*|^2 \cdot \frac{R_2^*}{s} \cdot (1-s). \quad (9)$$

Потери мощности в обмотке ротора ПЭД

$$\Delta P_2 = m_1 \cdot |I_2^*|^2 \cdot R_2^*. \quad (10)$$

Ток в ветви намагничивания ПЭД

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_2^*}{R_0 + jX_0}. \quad (11)$$

Таблица 1

Результаты идентификации параметров схем замещения ПЭД при номинальном значении намагничивающего тока I_0

Двигатель	Параметры						
	I_0 , А	R_1 , Ом	R_2^* , Ом	L_1 , мГн	L_2^* , мГн	R_0 , Ом	L_0 , мГн
ЭД(Т)12-117-380	10,5	0,517	0,516	2,173	1,938	194,736	63,686
1ЭД(Т)45-117-1000	18	0,660	1,019	4,677	4,718	231,475	130,798
1ЭД(Т)63-117-1000	24	0,450	0,650	2,815	2,864	212,793	89,946

Суммарные потери мощности в ПЭД

$$\Delta P = m_1 \cdot |I_1|^2 \cdot R_1 + m_1 \cdot |I_m|^2 \cdot R_m + m_1 \cdot |I_2^*|^2 \cdot R_2^* \quad (12)$$

Коэффициент полезного действия ПЭД

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (13)$$

Реактивная мощность ПЭД

$$Q = m_1 \cdot |I_1|^2 \cdot X_1 + m_1 \cdot |I_m|^2 \cdot X_m + m_1 \cdot |I_2^*|^2 \cdot X_2^* \quad (14)$$

Полная (кажущаяся) мощность ПЭД

$$S = \sqrt{(P_2 + \Delta P)^2 + Q^2} \quad (15)$$

Коэффициент мощности ПЭД

$$\cos \phi = \frac{P_2 + \Delta P}{S} \quad (16)$$

Критическое скольжение

$$S_{кр.} = \frac{R_2^*}{\sqrt{(R_2^*)^2 + (X_1 + X_2^*)^2}} \quad (17)$$

Подстановка в формулы (4–17) величин скольжений номинального S_n , критического $S_{кр.}$, пускового $S=1$ режимов и режима идеального холостого хода $S=0$ позволяет получить значения параметров ПЭД, относящихся к данным условиям их эксплуатации. Пусковой момент ПЭД определяется следующим образом [9].

$$M_n = \frac{2M_{кр.} \left(1 + S_{кр.} \cdot \frac{R_1}{R_2^*} \right)}{S_{кр.} + \frac{1}{S_{кр.}} + S_{кр.} \cdot \frac{2R_1}{R_2^*}} \quad (18)$$

На основе формул (4–18) разработана программа SHEM_PAR для оперативного определения эксплуатационных (каталожных) параметров ПЭД по результатам испытаний на установке РПХ-20, реализованная в системе Matlab 7. Панель управления программой (рис. 2а) имеет интерфейс, удобный для использования в цеховых условиях предприятий по ремонту электродвигателей. Исходные данные для программы SHEM_PAR — параметры Т-образной схемы замещения ПЭД (сопротивления X_1, X_2, X_m , величина U_1 и частота f напряжения, подводимого к обмотке статора ПЭД, число фаз ПЭД m_1 , номинальное значение скольжения S_n и число пар полюсов p — заносятся пользователем в соот-

а)

б)

в)

Рис. 2. Панель управления (интерфейс) программы SHEM_PAR:

- а) с каталожными параметрами ЭД(Т)12-117-380;
 б) с параметрами пускового режима и идеального холостого хода;
 в) с параметрами последовательной и параллельной ветви намагничивания

Результаты определения эксплуатационных параметров ПЭД

Двигатель	Эксплуатационные параметры погружных асинхронных электродвигателей								
		I_1 , А	P_2 , кВт	η , %	$\cos \phi$, о.е.	n_2 , об/мин	$M_{p'}/M_{n'}$, о.е.	$M_{кр'}/M_{н'}$, о.е.	$I_{p'}/I_{н'}$, о.е.
ЭД(Т)12-117-380, $I_0 = 10,5$ А	Изв.	26	12	84	0,85	2850	—	—	—
	Получ.	25,31	11,12	84,43	0,85	2850	2,25	3,10	5,78
	Отлич., %	-2,65	-7,33	0,51	0,94	0	—	—	—
ЭД(Т) 45-117-1000, $I_0 = 18$ А	Изв.	36,5	45	85	0,86	2850	—	—	—
	Получ.	34,14	43,92	83,53	0,85	2850	2,02	3,07	5,39
	Отлич., %	-6,46	-2,38	-1,72	-0,23	0	—	—	—
ЭД(Т) 63-117-1000, $I_0 = 24$ А	Изв.	51,5	63	85	0,85	2844	—	—	—
	Получ.	46,53	65,20	85,50	0,86	2844	2,08	3,04	5,57
	Отлич., %	-9,67	3,38	0,58	1,64	0	—	—	—

ветствующие окна панели управления непосредственно с клавиатуры ноутбука установки РПХ-20.

Запуск программы осуществляется нажатием кнопки «Расчет». С помощью кнопки «каталожные данные» на панель управления выводятся каталожные (эксплуатационные) параметры испытуемого ПЭД (рис. 2а). Кнопка «некоторые параметры и коэффициенты» служит для вывода на панель управления SHEM_PAR сведений о параметрах ПЭД в режимах пуска и идеального холостого хода (рис. 2б). При нажатии кнопки «дополнительные возможности» выводятся результаты преобразования параметров параллельной ветви намагничивания Т-образной схемы замещения ПЭД в эквивалентную последовательную ветвь (рис. 2в), параметры которой используются в расчетных соотношениях 4–18.

Результаты, представленные на рис. 2, получены для ПЭД типа ЭД(Т)12-117-380 на основании идентификационных параметров Т-образной схемы замещения, приведенных в табл. 1. Эти результаты, а также данные по определению каталожных параметров ПЭД типов ЭД(Т)45-117-1000, ЭД(Т)63-117-1000 на основе идентификации параметров их схем замещения приведены в табл. 2 вместе с известными каталожными параметрами этих ПЭД, представленными в [10]. Там же указаны отклонения полученных параметров ПЭД от номинальных значений.

Выводы. Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о следующем. Эксплуатационные параметры рассматриваемых типов ПЭД получены средствами программы SHEM_PAR на основе идентификационных параметров их схем замеще-

ния, которые, в свою очередь, были определены по переходным характеристикам затухания тока статора с использованием расчетных соотношений (2). Наблюдаются положительные и отрицательные отклонения полученных эксплуатационных параметров от их номинальных значений. Наименьшие отклонения имеют энергетические параметры ПЭД — коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos\phi$ (не более -2% у обоих). Наибольшее отклонение, достигающее $-9,67\%$, имеет входной ток ПЭД. Все в целом показывает достаточную степень адекватности программ SHEM_PAR, SHEM_ZAM, методики идентификации [5, 6], установки РПХ-20 и определяет целесообразность их применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования для определения измененного технического состояния ПЭД после ремонтного обслуживания и контроля его эксплуатационных параметров.

Библиографический список

1. Ковалев А. Ю., Ковалев Ю. З., Солодянкин А. С. Электротехнологические установки насосной эксплуатации скважин: моногр. Нижегородск: Изд-во НГТУ, 2010. 173 с.
2. Kovalev A. Yu., Kuznetsov Ye. M., Anikin V. V. The parameter identification of submersible motors of electrical centrifugal pump units oil production // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 — PROCEEDINGS. 2015. P. 1–4. 7147111. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147111.
3. Prado Jr. A. do, Heerdt J. A., Junior Jr. S. I. S. Off-line identification of PWM driver induction motors using reference voltages // In IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial

Electronics Society. 2002. Vol. 3. P. 2057–2062. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185289.

4. Razik H., Defranoux C., Rezzoug A. Identification of Induction Motor using a Genetic Algorithm and a Quasi-Newton Algorithm // Proc. IEEE Power Electronics Congress CIEP. October 15–19, Acapulco, Mexico. 2000. P. 65–70.

5. Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Послеремонтное определение эквивалентных параметров асинхронного электродвигателя без сопряжения с нагрузочным устройством // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 76–79.

6. Пат. 2422839 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/26. Способ определения индуктивности рассеяния фазы обмотки статора асинхронного электродвигателя и устройство для его реализации / Ковалев Ю. З., Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М. № 2009139123/28; заявл. 22. 10. 09; опубл. 27.06.11; Бюл. № 18.

7. Kovalev A. Yu., Kuznetsov E. M., Aninkin V. V. Diagnostic unit for electrical submersible motors and their rotor packs // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 11–13 Nov. 2014. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005670.

8. Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Программное обеспечение для расчета параметров схемы замещения асинхронного погружного электродвигателя: программа для ЭВМ. М.: ФИПС, 2012. № 2012661265 от 11.12.2012 г.

9. Качин С. И., Чернышев А. Ю., Качин О. С. Автоматизированный электропривод. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 162 с.

10. ТУ 3381-026-21945400-97. Двигатели асинхронные погружные унифицированной серии ПЭД модернизации М.–Альметьевск: ОАО Алнас, 1998. 42 с.

КОВАЛЕВ Владимир Захарович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Энергетика» Югорского государственного университета (ЮРГУ), г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 4571-7212
AuthorID (РИНЦ): 345037
ORCID: 0000-0002-4512-6868
ResearcherID: K-6022-2012
Адрес для переписки: vz_kovalev@mail.ru

ХАМИТОВ Рустам Нуриманович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: apple_27@list.ru

SPIN-код: 9576-1114

AuthorID (РИНЦ): 548158

ORCID: 0000-0001-9876-5471

AuthorID (SCOPUS): 24467903000

ResearcherID: D-1001-2016

КУЗНЕЦОВ Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

SPIN-код: 7575-5001, AuthorID (РИНЦ): 686008

ORCID: 0000-0002-1744-2206

AuthorID (SCOPUS): 56825202800

ResearcherID: S-9876-2018

Адрес для переписки: kircuznetsov@yandex.ru

АНИКИН Василий Владимирович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и робототехника» Нижневартовского государственного университета.

БЕССОНОВ Владимир Олегович, старший преподаватель кафедры «Энергетика» ЮРГУ, г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 7658-8645

AuthorID (РИНЦ): 777310

ORCID: 0000-0002-5336-5949

Для цитирования

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

Статья поступила в редакцию 26.10.2018 г.

© В. З. Ковалев, Р. Н. Хамитов, Е. М. Кузнецов, В. В. Аникин, В. О. Бессонов