

¹Нижевартовский
государственный университет,
г. Нижевартовск

²Омский государственный
технический университет,
г. Омск

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Надежное и энергосберегающее частотное управление погружными асинхронными электродвигателями требует исследования его работы в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов на базе моделирования. Данный подход ориентирован на разработку способов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Целью исследования являлась разработка способа для определения параметров схемы замещения погружных асинхронных электродвигателей с использованием интеграла кривой затухания тока обмотки статора без дополнительного перехода к частотным характеристикам. Исследование способа проводилось на базе разработанной установки для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей. Для оценки достоверности способа и методики идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием кривой затухания тока статора погружного электродвигателя был проведен эксперимент, показавший наибольшее расхождение между значениями параметров схемы замещения не более 10 %. Разработанный способ идентификации параметров схем замещения погружного послеремонтного электродвигателя, таким образом, позволяет определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя в условиях ремонтных сервисных предприятий.

Ключевые слова: погружной асинхронный электродвигатель, схема замещения, электромагнитные параметры, переходная характеристика, схема включения.

Введение. Повышение требований к качеству и надежности погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД), прошедших ремонтное обслуживание установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), включает необходимость определения параметров двигателя на нефтесервисных обслуживающих предприятиях. Для этого на обслуживающих предприятиях необходимо иметь дорогостоящие и громоздкие стенды приёмо-сдаточных испытаний ПЭД, позволяющие снимать механическую характеристику и экспериментально определять эксплуатационные параметры послеремонтных ПЭД. На основе протокола испытаний, проведенных на стенде, делается вывод о пригодности дальнейшего использования ПЭД и качестве проведенного ремонта. Следует отметить, что стенд для приемосдаточных испытаний — это сложное и дорогостоящее техническое устройство, установка

которого доступна только крупным организациям по обслуживанию нефтепогружного оборудования, в связи с чем появляется проблема оценки технического состояния послеремонтных ПЭД как на сервисных предприятиях, так и непосредственно на территории месторождения, где применение такого стенда практически невозможно.

Обзор экспериментальных способов определения электромагнитных параметров схем замещения асинхронных двигателей. Проблема определения параметров схем замещения наземных асинхронных электродвигателей (АД) посвящена обширная научная и техническая литература [1–8]. В ней освещаются различные методы, имеющие свои достоинства, недостатки и области применения. Данные о методах приведены в табл. 1.

Постановка задачи. В силу существующей проблемы оценки технического состояния по-

Обзор основных способов определения параметров схем замещения АД

№ п/п	Метод определения параметров	Сущность метода, условия реализации
1	Идентификация по опыту хх и кз	Метод требует применения дополнительного нагрузочного и регулирующего оборудования в виде синхронного электродвигателя и ПЧ. Реализация метода на глубине спуска в скважину принципиально невозможна
2	Идентификация по каталожным данным	Метод имеет низкую точность, т.к. параметры схем замещения ПЭД изменяются из-за конструктивных и технологических разбросов, теплового режима и насыщения магнитопровода ПЭД
3	Идентификация с питанием от полигармонического источника	Для реализации метода необходим источник несинусоидального полигармонического источника напряжения
4	Идентификация на основе нейронных искусственных сетей и нечеткой логики	Сложность реализации данных методов пока позволяет отнести их к числу перспективных
5	Идентификация по методу затухания постоянного тока при заторможенном роторе	Методика реализации метода использует трудоемкий дополнительный переход с помощью преобразования Лапласа и интеграла Фурье от характеристик затухания тока статора к частотным характеристикам входного импеданса обмотки статора ПЭД
6	Идентификация по экспериментальным данным рабочего режима при различной нагрузке	Недостатки метода — невысокая точность, необходимость определения скольжения. Параметры обмотки статора должны быть известными
7	Идентификация на основе фильтра Калмана и генетических алгоритмов	Изначально необходима приближенная параметрическая модель ПЭД для реализации поисковых алгоритмов с применением систем дифференциальных уравнений, наблюдателя высокого порядка и других методов. Высокая чувствительность к шумам.

слеремонтных ПЭД необходимо либо выбрать из известных способов определения электромагнитных параметров схем замещения асинхронных двигателей, либо модернизировать известный способ под условия работы нефтесервисных предприятий, либо разработать новый способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных двигателей. На основе анализа условий реализации известных способов (табл. 1) наиболее подходящим для реализации в условиях работы нефтесервисных обслуживающих предприятий является способ, основанный на методе затухания постоянного тока при заторможенном роторе. Данный способ не требует сопряжения с нагрузкой, учитывает насыщение магнитной системы ПЭД и вытеснение тока в стержнях обмотки ротора, имеет перспективу использования при спуске ПЭД в скважину, осуществим на поверхности с помощью компактной переносной установки. Метод базируется на фундаментальных работах В. Ф. Сивокобыленко [4], Е. Я. Казовского [7], А. И. Вольдека [8]. Следует отметить, что в научной и технической литературе проблема упрощения реализации метода и разработки технических средств ее осуществления для ПЭД достаточного рассмотрения и освещения не получили. В связи с этим необходимо провести модернизацию метода затухания постоянного тока при заторможенном роторе для ПЭД.

Решение задачи. Для упрощения реализации способа предлагается разработать методики прямой идентификации параметров схемы замеще-

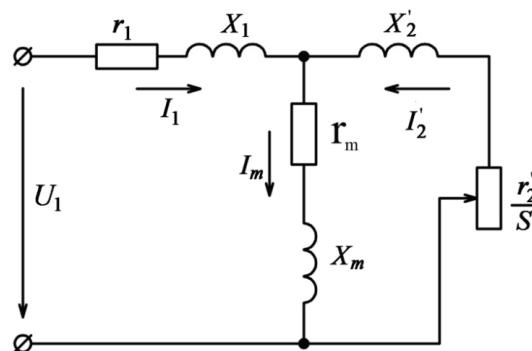


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

ния ПЭД (рис. 1) непосредственно по характеристики затухания постоянного тока обмотки статора при заторможенном роторе.

При рассмотрении тока затухания обмотки статора ПЭД, полученного в ходе опыта, возможно выделить три характерных участка (рис. 2) — пологий (хвостовой) участок, крутой участок и «сверхпереходную» быстро затухающую начальную область.

Каждый участок характеризуется своей аппроксимирующей экспонентой с постоянными времени T_1 , T_2 , T_3 , которые значительно отличаются друг от друга по значению (табл. 2, где I_{m1} , I_{m2} , I_{m3} — начальные значения токов аппроксимирующих экспонент).

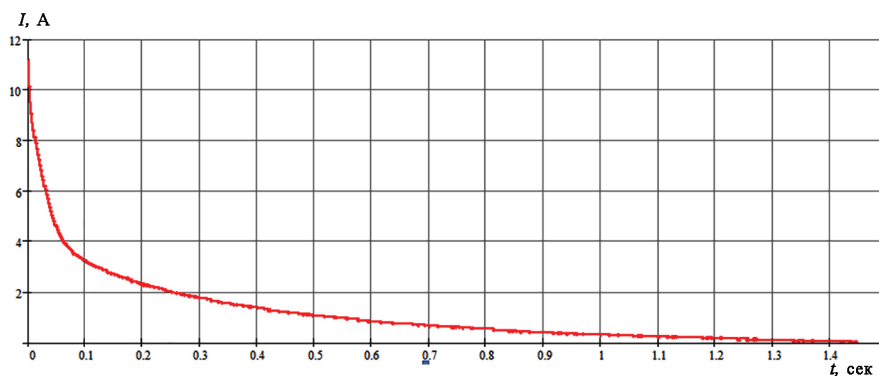


Рис. 2. Кривая изменения тока в статорной обмотке

Таблица 2

Параметры аппроксимации переходных характеристик $i_{\text{эксн}}(t)$ затухания тока статора ПЭД

Двигатель	Параметры аппроксимации					
	$I_{m1'}$, А	$I_{m2'}$, А	$I_{m3'}$, А	T_1 , с	T_2 , мс	T_3 , мкс
ЭД(Т)12-117-380, $I_0 = 10,5$ А	8,335	2,1609	0,0040	0,2872	2,377	4,4760
ЭД(Т)45-117-1000, $I_0 = 18$ А	14,35	3,6452	0,0047	0,345	3,176	3,591
ЭД(Т)63-117-1000, $I_0 = 24$ А	19,90	4,093	0,005	0,366	3,33	3,82
ЭД(Т)90-117-1300 $I_0 = 29$ А	23,779	5,212	0,009	0,2880	2,367	3,16

Данные особенности переходной характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД позволяют выразить эти постоянные времени через параметры схемы на каждом отдельном участке: для пологого участка

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot \int_0^{\infty} i_{\text{эксн}}(t) dt}{I_0 \cdot r_2}. \quad (1)$$

Крутой участок переходной характеристики затухания тока статора ПЭД позволяет выразить постоянную времени T_2 аппроксимирующей экспоненты

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{r_1 + r_2}. \quad (2)$$

для быстро затухающей начальной области — постоянная времени T_3

$$T_3 = \frac{L_1 \cdot L_2}{r_0(L_1 + L_2)}. \quad (3)$$

Выражения 1, 2, 3 для различных участков кривой затухания тока статора АД построены на базе соотношений $r_0 \gg r_1$, $r_1 \gg R_{\text{вн}}$, $r_0 \gg r_2$, $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$, позволяющих без какой-либо значительной ошибки пренебречь:

— влиянием сопротивления r_0 , сопротивлением внешней цепи $R_{\text{вн}}$, на постоянную времени T_1 экспоненты, аппроксимирующей пологий участок характеристики $i_{\text{эксн}}(t)$, который обусловлен

процессами гашения энергии магнитного поля АД на сопротивлениях r_1 и r_2 ;

— влиянием индуктивности L_0 и сопротивлений $R_{\text{вн}}$, r_0 на постоянную времени экспоненты T_2 аппроксимирующей крутой (миллисекундный) участок огибающей переходной характеристики $i_{\text{эксн}}(t)$, который связан с электромагнитными процессами проникновения магнитного поля рассеяния обмотки статора АД в заторможенный ротор.

$$\text{Неравенства } L_1 \frac{di_1}{dt} \gg r_1 \cdot i_1(t), \quad L_2 \frac{di_2}{dt} \gg r_2 \cdot i_2(t),$$

справедливые на сверхпереходном (десятки микросекунд) участке характеристики $i_{\text{эксн}}(t)$ и соотношения $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$, которые дают возможность с очень хорошим приближением не учитывать влияние индуктивности L_0 и сопротивлений r_1 и r_2 на величину постоянной времени T_3 сверхпереходной аппроксимирующей экспоненты кривой затухания тока $i_{\text{эксн}}(t)$.

Определение параметров схемы замещения ПЭД. Из уравнения (1, 2, 3) определяется индуктивность ветви намагничивания эквивалентной схемы ПЭД

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{\text{эксн}}(t) dt}{I_0} - L_1, \quad (4)$$

которую с очень хорошим приближением можно принять равной

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{\text{эксн}}(t) dt}{I_0}. \quad (5)$$

Из уравнения (1) находится приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора ПЭД

$$r_2 = \frac{r_1 \cdot \int_0^{\infty} i_{\text{эксн}}(t) dt}{I_0 T_1 - \int_0^{\infty} i_{\text{эксн}}(t) dt} \quad (6)$$

Сумма индуктивностей рассеяния обмотки статора и приведенной к обмотке статора индуктивности рассеяния обмотки ротора ПЭД определяется

$$L_2 + L_1 = T_2 \cdot (r_1 + r_2) \quad (7)$$

L_1 можно выразить использованием результатов первого измерения тока $i_{\text{эксн}}(t)$ в момент времени t_1

$$L_1 = \frac{I_0 r_1 t_1}{I_0 - i_{\text{эксн}}(t_1)} \quad (8)$$

Сопротивление активных потерь в параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД выражается через постоянную време-

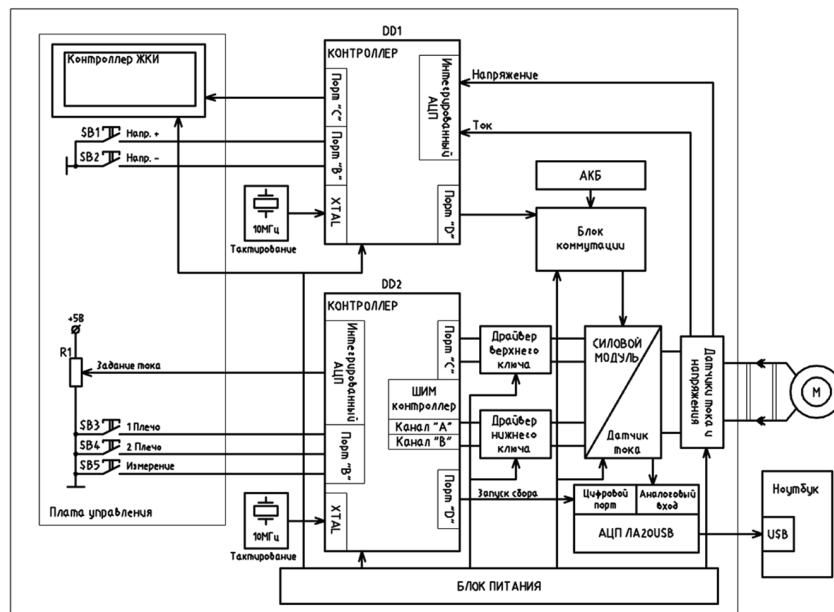


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки

Таблица 3

Результаты определения эксплуатационных параметров ПЭД

Двигатель	Эксплуатационные параметры погружных асинхронных электродвигателей								
	I_1, A	$P_2, кВт$	$\eta, \%$	$\cos\phi, о.е.$	$n_2, об/мин$	$M_n / M_{n'}$ о.е.	$M_{кр} / M_{n'}$ о.е.	$I_n / I_{n'}$ о.е.	
<i>ЭД(Т) 12-117-380</i>									
$I_0 = 10,5 A$	<i>Каталог</i>	26	12	84	0,85	2850	—	—	—
	<i>Эксперимент</i>	25,31	11,122	84,432	0,858	2850	2,250	3,100	5,783
	$\delta, \%$	-2,65	-7,33	0,51	0,94	0	—	—	—
<i>ЭД(Т) 45-117-1000</i>									
$I_0 = 18 A$	<i>Каталог</i>	36,5	45	85	0,86	2850	—	—	—
	<i>Эксперимент</i>	34,14	43,926	83,538	0,858	2850	2,023	3,073	5,399
	$\delta, \%$	-6,46	-2,38	-1,72	-0,23	0	—	—	—
<i>ЭД(Т) 63-117-1000</i>									
$I_0 = 24 A$	<i>Каталог</i>	51,5	63	85	0,85	2844	—	—	—
	<i>Эксперимент</i>	46,53	65,203	85,500	0,864	2844	2,082	3,045	5,577
	$\delta, \%$	-9,67	3,38	0,58	1,64	0	—	—	—

ни сверхпереходного участка кривой затухания $i_{\text{экс}}(t)$ тока статора [9].

$$r_0 = \frac{L_1 \cdot L_2}{T_3(L_1 + L_2)}. \quad (9)$$

Кривая затухания постоянного тока снимается при помощи разработанной установки РПХ-20 [10], блок-схема которой приведена на рис. 3.

Основу установки составляет измеритель, к которому подключается исследуемый ПЭД. В состав входит блок питания, осуществляющий подачу необходимого уровня напряжения ко всем узлам измерителя. Измеритель под управлением двух микроконтроллеров DD1 и DD2 производит подачу постоянного тока от аккумуляторных батарей АКБ в ПЭД и в моменты спада тока в статоре двигателя происходит подача сигнала на запуск измерения плате сбора данных, в результате чего регистрируется кривая затухания тока, которая при помощи датчиков, установленных в измерителе, поступает на аналоговый вход специализированной платы сбора данных LA20USB. В плате происходит оцифровка кривой затухания и посылка данных посредством USB интерфейса в ноутбук где происходит её последующая обработка. Для оценки достоверности способа определения параметров схем замещения ПЭД и методики, основанной на интегральном преобразовании кривой затухания тока обмотки статора ПЭД, проведен эксперимент по идентификации параметров схемы замещения ПЭД типов ЭД(Т). Результаты представлены в табл. 3 вместе с известными значениями, полученными на основе каталожных данных [11].

Заключение. Разработан способ [9] прямой идентификации параметров схемы замещения ПЭД с одноконтурной цепью ротора, основанный на интегральном преобразовании $\int_0^{\infty} i_1(t) dt$ кривой затухания $i_1(t)$ тока обмотки статора и на эквивалентных схемах ПЭД для хвостового (медленного), крутого (миллисекундного) и сверхпереходного (микросекундного) участков кривой затухания. Данный способ и методика [6] идентификации параметров схем замещения ПЭД позволяют определять параметры схемы замещения ПЭД в вычислительном эксперименте с отклонением, не превышающем 10 % относительно известных значений [12].

Предложенный усовершенствованный способ и методика для своей реализации не требуют сложного дорогостоящего оборудования и могут быть наиболее подходящими для работы в условиях нефтесервисных обслуживающих предприятий.

Библиографический список

1. Рогозин Г. Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Киев: Техніка, 1992. 168 с.
2. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кириякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38 – 42.
3. Гридин В. М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2012. № 5. С. 40 – 44.

4. Сивокобыленко В. Ф., Костенко В. И. Определение параметров и характеристик машин переменного тока из опытов пуска и выбега // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Энергетика. 1978. № 3. С. 44 – 48.

5. Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Вычислительные аспекты определения параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1, т. 3. С. 100 – 104.

6. Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Определение электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1, т. 3. С. 95.

7. Казовский Е. Я., Лернер Л. Г., Сидельников А. В. Синтез схем замещения машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам // Электротехника. 1979. № 5. С. 6 – 13.

8. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2010. 543 с.

9. Пат 2623834 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/28. Способ определения электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей / Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. № 2016104186; заявл. 09.02.16; опубл. 29.06.17, Бюл. № 19.

10. Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 162.

11. Электродвигатели асинхронные погружные серии ПЭДН 96, 103, 117 и 130 габаритов. Технические условия ТУ 3381-003-12058737-2010. Пермь: Изд-во ЗАО «Новомет-Пермь», 2010. 47 с.

12. 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.

АНИКИН Василий Владимирович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и робототехника» Нижневартовского государственного университета; соискатель по кафедре «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

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

SPIN-код; 9576-1114, AuthorID (РИНЦ): 548158

ORCID: 0000-0001-9876-5471

AuthorID (SCOPUS): 24467903000

ResearcherID: D-1001-2016

Адрес для переписки: apple_27@list.ru

Для цитирования

Аникин В. В., Хамитов Р. Н. Способ определения электромагнитных параметров погружных асинхронных электродвигателей // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 33 – 37. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-33-37.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019 г.

© В. В. Аникин, Р. Н. Хамитов