

УДК 658.26.001.63; 621.311.172

В.М. Ремезовский, А.Б. Власов, В.А. Мухалёв

## Метод контроля параметров электрического двигателя на основе анализа пусковых токов

V.M. Remezovsky, A.B. Vlasov, V.A. Mukhalyov

## The method for controlling electric machine parameters based on the analysis of starting currents

**Аннотация.** Проведен теоретический и экспериментальный анализ технического состояния электрической машины путем исследования пусковых токов. Показано, что с помощью экспресс-методики испытаний возможно с достаточной степенью точности оценить параметры электрического двигателя.

**Abstract.** The theoretical and experimental analysis of the electric machine technical condition by studying activate currents has been carried out. It has been shown that by means of express-methods it is possible to estimate the electric engine parameters with sufficient degree of accuracy.

**Ключевые слова:** электрический двигатель, пусковой ток, техническое состояние, переходные процессы, экспресс-метод диагностики

**Key words:** electric machine, starting current, technical condition, transient processes, express-method of diagnosis

### 1. Введение

Опыт эксплуатации электродвигателей свидетельствует о большом количестве отказов, происходящих по причине аварийных ситуаций (рис. 1). Аварийность ежегодно составляет 25 % и более. Выход из строя электродвигателя наносит ущерб, связанный с простоем технологического оборудования или порчей продукции вследствие аварии двигателя. Дополнительно к убыткам добавляется снижение электро- и пожаробезопасности из-за возможных коротких замыканий, присутствующих в обмотке статора или ротора поврежденного электродвигателя.

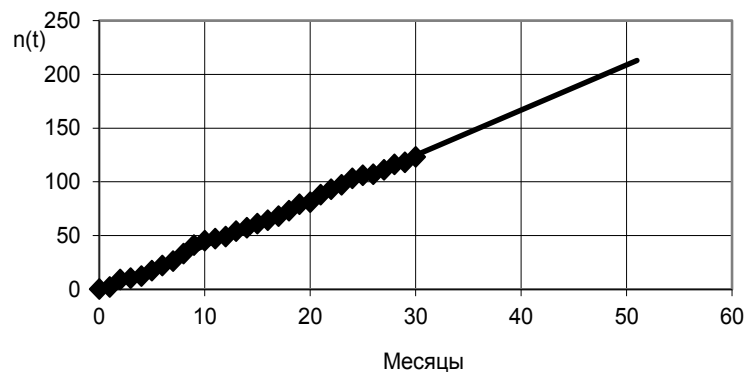


Рис. 1. Накопление отказов электрических двигателей портовых кранов

К капитальному ремонту асинхронных электродвигателей предъявляются серьезные технические требования, направленные на повышение их надежности.

В реальности, большинство отремонтированных электродвигателей не соответствуют этим техническим требованиям, поэтому для обеспечения необходимого качества ремонта появляется необходимость экспресс-диагностики, которая позволяла бы провести ряд испытаний и определить реальные технические характеристики электродвигателя.

### 2. Методы испытаний

#### 2.1. Описание традиционных методов испытаний

После ремонта электрические машины подвергаются испытаниям с целью проверки работоспособности и соответствия их основных параметров нормативным требованиям. ГОСТы (ГОСТ 7217-87, ГОСТ Р 53472-2009) устанавливают перечень испытаний, в том числе: определение тока и

потерь холостого хода; определение тока и потерь короткого замыкания, начального пускового-вращающего момента и начального пускового тока; определение рабочих характеристик, коэффициента полезного действия, коэффициентов мощности и скольжения и другие.

Существующие на данный момент методы испытания электрических машин обладают существенными недостатками, а именно: использование традиционных нагрузочных технологических машин и нагрузочных устройств на заводских стендах испытаний; значительные затраты на электроэнергию; требование больших трудозатрат (стыковка с нагрузочными технологическими машинами и нагрузочными устройствами; центровка).

Например, согласно ГОСТ 7217-87 при испытаниях асинхронных двигателей методом холостого хода, опыт проводится в режиме ненагруженного двигателя при установившемся тепловом состоянии частей испытуемого двигателя. При этом потери холостого хода определяются с учетом зависимости мощности холостого хода от времени обкатки, полученной при приемочных, периодических или типовых испытаниях. При проведении опыта холостого хода измеряются линейные напряжения, токи статора, частота и подводимая мощность. Опыт холостого хода выполняется постепенным понижением приложенного к статору напряжения, начиная с наибольшего значения, равного 130 % номинального, и кончая возможно более низким, при котором еще наблюдается возрастание тока статора. По данным опыта определяется коэффициент мощности холостого хода  $\cos\phi_0$ , потери холостого хода в обмотке статора  $P_{m10}$ , сумма потерь в стали  $P_{ст}$  и механических  $P_{мех}$ . Результаты опыта представляются в виде функциональных зависимостей тока  $I_0$ , потерь  $P_0$  и коэффициента мощности  $\cos\phi_0$  от напряжения  $U_0$  в табличной или графической форме.

Опыт короткого замыкания по стандарту выполняется при заторможенном роторе. К обмотке статора двигателя подводится практически симметричное напряжение номинальной частоты. В процессе опыта одновременно измеряются линейные напряжения, токи, подводимая мощность и т.п. Опыт короткого замыкания начинается в практически холодном состоянии машины или после опыта холостого хода. Двигатель включается на напряжение, составляющее 15-20 % от номинального. По данным опыта определяется коэффициент мощности короткого замыкания  $\cos\phi_k$ , зависимости тока  $I_k$ , потерь  $P_k$ , коэффициент мощности  $\cos\phi_k$  и момента  $M_k$  от напряжения  $U_k$  в табличной или графической форме.

## 2.2. Описание метода и его отличие от испытаний по ГОСТ

Актуальным является разработка нового метода испытаний асинхронных машин, исключающего потери электроэнергии и применение дорогостоящего оборудования. Сущность предлагаемого метода заключается в экспериментальном определении параметров схемы замещения посредством измерения мгновенных значений тока, напряжения и мощности. При известных параметрах схемы замещения рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом.

Особенностью предложенного метода испытаний от метода, рекомендованного ГОСТ и других аналогичных методов испытания асинхронных двигателей, является то, что при проведении опыта короткого замыкания не затормаживается ротор двигателя. Вместо затормаживания ротора производится пуск двигателя при пониженном напряжении, равном напряжению, создаваемому во время опыта короткого замыкания.

Экспериментальные данные, полученные при пуске двигателя при пониженном напряжении и при отсутствии апериодической составляющей пускового тока аналогичны данным, получаемым при заторможенном роторе. Это объясняется тем, что при пуске асинхронного двигателя при пониженном напряжении в первые периоды ротор не вращается ввиду небольшого вращающего момента, пропорционального квадрату напряжения, а измерения параметров производятся при прохождении через обмотки статора периодического тока, что обеспечивает их точность и независимость. Следует отметить, что математическая модель асинхронного двигателя адекватна для периодических значений тока, мощности и т.д.

## 3. Описание методики испытаний

При проведении экспериментов использовался испытательный стенд, предназначенный для процесса послеремонтных испытаний и осуществляющий сбор, обработку информации, моделирование и воспроизведение режимов испытаний в соответствии с данной программой испытаний. При прямом пуске асинхронного двигателя симисторный коммутатор обеспечивает отсутствие апериодической составляющей пускового тока.

Измерительная часть стенда состоит из трех трансформаторов тока, имеющих частоту пропускания свыше 10 КГц, трех трансформаторов напряжения, персонального компьютера, измерительного преобразователя, блока устройства связи с объектом. В качестве устройства связи с объектом в данном испытательном стенде используется модуль Е-440, в котором выполняется первичная

обработка информации. Данный модуль был выбран исходя из соотношения необходимой точности измерений (14 разрядный АЦП). Калибровка измерительных каналов производилась по электроизмерительным приборам класса 0,5, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 11828-86.

Для испытаний были выбраны асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором различной мощности (табл. 1), их экспериментальные данные (полученные в процессе испытаний) и рабочие характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 1. Паспортные данные испытуемых двигателей

Испытуемые двигатели	$P_n$ , кВт	$I_n$ , А	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi_n$	$R_n$ , Ом
АОЛ 42-6	1,7	4,3	930	79	0,75	3,2
GM 80А/4	0,56	1,51	1390	71	0,75	13
АОМЦ 11-2	0,35	1	2760	64	0,8	23

Для обеспечения точности измерения параметров асинхронного двигателя в процессе испытаний произведено четыре аналогичных опыта для каждого двигателя.

#### 4. Результаты испытаний

Для сравнения полученных данных с данными стандартного опыта короткого замыкания с помощью испытательного стенда были произведены испытания одного и того же двигателя опытом короткого замыкания с затормаживанием ротора и при пуске двигателя при пониженном напряжении.

На рис. 2 приведены осциллограммы фазных токов и напряжений при различных условиях испытаний опыта короткого замыкания: с затормаживанием ротора (а) и при пониженном напряжении (б).

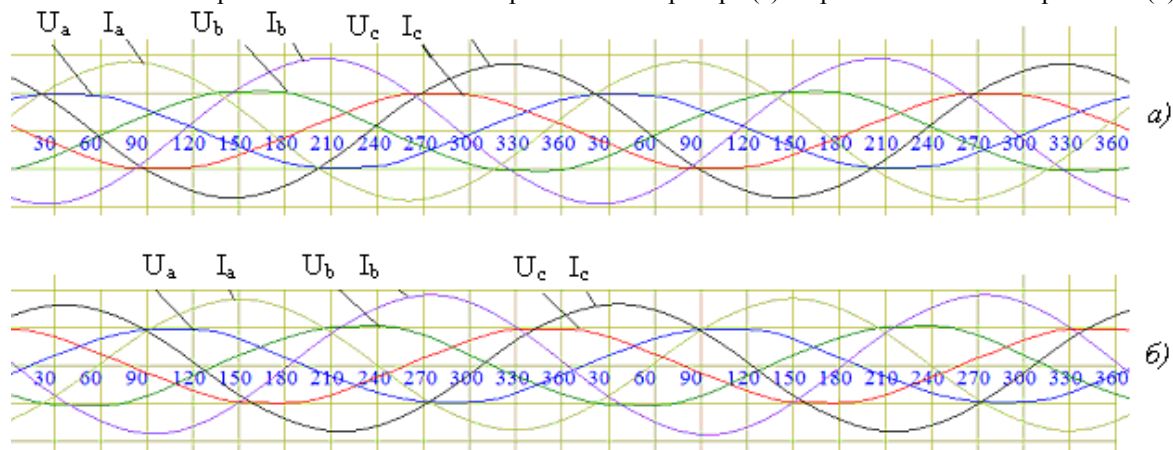


Рис. 2. Осциллограммы пусковых токов и напряжения при различных испытаниях

Расчеты производились интегральным методом на каждой половине периода напряжения для каждой фазы. В результате анализа полученных осциллограмм и расчетов действующих значений  $U$ ,  $I$ ,  $P$  сделан вывод, что действующие значения периодического тока  $I$ , напряжения  $U$ , мощности  $P$ , значение  $\cos\varphi$  в первые 2-3 периода во время пуска при пониженном напряжении полностью совпадают с данными, полученными при заторможенном роторе асинхронного двигателя во время проведения стандартного опыта КЗ.

Рассмотрим основные результаты испытаний на примере двигателя АД номинальной мощностью 550 Вт. Посредством программного обеспечения рассчитываются параметры двигателя, необходимые для построения рабочих характеристик.

В табл. 2 приведены основные параметры, которые определяются в результате расчета по соответствующим схемам замещения.

Таблица 2. Основные параметры, определяемые по схемам замещения и результатам испытаний

Параметр	Единица измерения	Характеристика
$A_1$	Ом	Коэффициент
$R$	Ом	Активное сопротивление схемы замещения
$X$	Ом	Реактивное сопротивление схемы замещения
$Z$	Ом	Полное сопротивление схемы замещения
$I_2$	А	Ток ротора

$\cos\varphi_2$	–	Активная составляющая коэффициента мощности ротора
$\sin\varphi_2$	–	Реактивная составляющая коэффициента мощности ротора
$I_{1a}$	А	Активная составляющая тока статора
$I_{1p}$	А	Реактивная составляющая тока статора
$I_1$	А	Полный ток статора
$I_{21}$	А	Приведенный ток статора
$P_1$	Вт	Подводимая к двигателю мощность
$P_{e1}$	Вт	Электрические потери в обмотке статора
$P_{e2}$	Вт	Электрические потери в обмотке ротора
$P_{доб}$	Вт	Добавочные потери
$W_{pд}$	Вт	Суммарные потери в двигателе
$P_2$	Вт	Мощность на валу двигателя
КПД	–	Коэффициент полезного действия
$\cos\varphi$	–	Коэффициент мощности
$I_{1отн}$	–	Полный ток в относительных единицах
$s$	–	Скольжение двигателя
$n_n$	Об/мин	Частота вращения ротора
$M_n$	Нм	Момент на валу двигателя

В табл. 3 приведены значения параметров, полученные в результате испытаний и расчетов.

Таблица 3. Экспериментальные данные испытаний

Параметры	Расчетные параметры при различных значениях мощности $P_2$													
	94	191	236	319	358	428	461	491	519	546	616	654	670	686
$P_2$														
$A_1$	2562	854	640	427	366	284	256	232	213	197	160	142	134	128
$R$	2576	868	654	441	380	298	270	247	227	211	174	156	149	142
$X$	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13	25	25	25,13	25,13	25,13	25,13
$Z$	2576	868	655	442	381	300	271	248	229	212	176	158	151	144
$I_2$	0,08	0,25	0,33	0,49	0,57	0,73	0,80	0,88	0,95	1,02	1,23	1,37	1,44	1,51
$\cos\varphi_2$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
$\sin\varphi_2$	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,17	0,17
$I_{1a}$	0,45	0,62	0,70	0,86	0,94	1,09	1,17	1,24	1,31	1,38	1,59	1,72	1,79	1,85
$I_{1p}$	0,96	0,97	0,97	0,99	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,08	1,14	1,18	1,20	1,22
$I_1$	1,06	1,15	1,20	1,31	1,37	1,49	1,56	1,62	1,69	1,76	1,96	2,09	2,15	2,22
$I_{21}$	0,09	0,28	0,37	0,54	0,63	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,36	1,51	1,58	1,66
$P_1$	295	403	457	561	612	712	761	809	856	903	1038	1124	1166	1208
$P_{e1}$	44	51	56	66	73	87	94	102	111	120	149	169	180	191
$P_{e2}$	0,5	4,8	8,4	18,6	25,0	40,4	49,3	58,9	69,3	80	117	144	159	174
$P_{доб}$	1,48	2,02	2,29	2,81	3,06	3,56	3,81	4,05	4,28	4,52	5,19	5,62	5,83	6,04
$W_{pд}$	200	212	220	241	254	283	300	317	336	356	422	470	495	521
КПД	0,32	0,47	0,52	0,57	0,58	0,60	0,61	0,61	0,61	0,61	0,59	0,58	0,58	0,57
$\cos\varphi$	0,43	0,54	0,58	0,66	0,68	0,73	0,75	0,76	0,78	0,79	0,81	0,83	0,83	0,83
$I_{1отн}$	0,70	0,76	0,79	0,87	0,91	0,99	1,03	1,08	1,12	1,16	1,29	1,38	1,43	1,47
$s$	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,16	0,18	0,19	0,20

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости параметров расчета и рабочих характеристик испытуемого двигателя от значения  $P_2$ .

Рис. 3, а – по горизонтальной оси отложено значение мощности на валу двигателя  $P_2$ , Вт; по вертикальной оси отложены относительные единицы: 1: КПД; 2:  $\cos\varphi$ ; 3:  $I_{1отн}$ ; 4: коэффициент скольжения  $s$ . На рис. 3, б по вертикальной оси отложены значения: 5:  $P_1$ ; 6:  $Z$ ; 7:  $W_{pд}$ .

## 5. Выводы

Сравнивая экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний, с паспортными данными двигателя, и проанализировав относительную погрешность результатов, можно сделать выводы:

а) экспериментальные параметры двигателя, за исключением КПД и коэффициента мощности, отличаются незначительно;

б) КПД испытуемого двигателя значительно занижен, что, возможно, связано с большим сроком эксплуатации;

в) завышенный коэффициент мощности может быть связан с особенностями методики расчета данной величины.

Представляется актуальным развитие рассматриваемой методики в совокупности с экспресс-испытаниями двигателя на основе методов количественной термографии, представленных в (Власов, 2012).

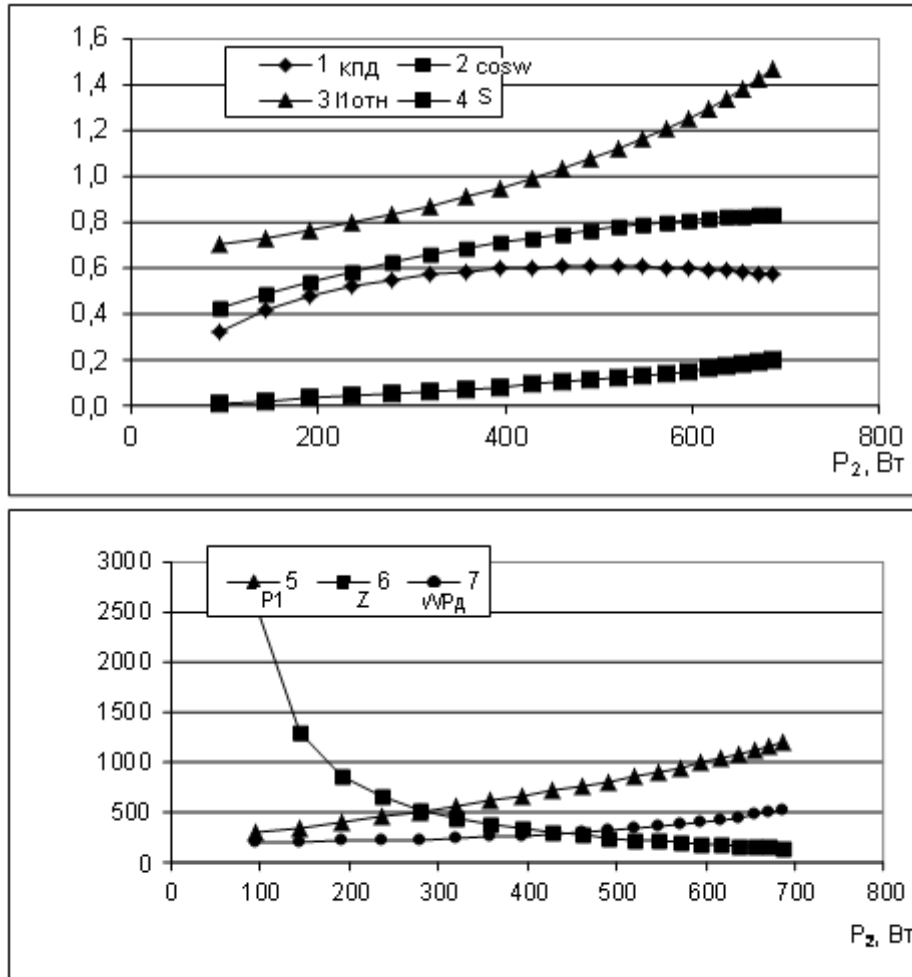


Рис. 3. Зависимость параметров и рабочих характеристик двигателя от величины  $P_2$

### Литература

- Власов А.Б. Оценка теплового состояния электрической машины на основе количественной термографии. Электротехника. 2012. № 3. С. 13-18.  
 ГОСТ 7217-1987. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М., 1998.  
 ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М., 2009.

### References

- Vlasov A.B. Otsenka teplovogo sostoyaniya elektricheskoy mashiny na osnove kolichestvennoy termografii [Evaluation of the thermal state of the electric machine on the basis of quantitative thermography]. Elektrotehnika. 2012. N 3. P. 13-18.  
 GOST 7217-1987. Mashiny elektricheskije vraschayuschiesya. Dvigateli asinhronnye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. AC Motors. Methods of tests]. М., 1998.

GOST R 53472-2009. Mashiny elektricheskie vraschayuschiesya. Dvigateli asinhronnye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. AC Motors. Methods of tests]. М., 2009.

**Информация об авторах**

**Ремезовский Вячеслав Михайлович** – Морская академия МГТУ, кафедра электрооборудования судов, канд. техн. наук, профессор, e-mail: RemezovskiVM@mstu.edu.ru

**Remezovsky V.M.** – MSTU Marine Academy, Department of Ship Electrical Equipment, Cand. of Tech. Sci., Professor, e-mail: RemezovskiVM@mstu.edu.ru

**Власов Анатолий Борисович** – Морская академия МГТУ, кафедра электрооборудования судов, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

**Vlasov A.B.** – MSTU Marine Academy, Department of Ship Electrical Equipment, Dr of Tech. Sci., Professor, e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

**Мухалёв Валерий Алексеевич** – Морская академия МГТУ, кафедра электрооборудования судов, стар. преподаватель, зав. лабораторией общей электротехники, e-mail: muhalev2606@yandex.ru

**Mukhalyov V.A.** – MSTU Marine Academy, Department of Ship Electrical Equipment, Senior Lecturer, Head of Laboratory of General Electrical Engineering, e-mail: muhalev2606@yandex.ru