

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.И. Некрасов, Ю.С. Борисов, А.А. Некрасов, А.В. Ефимов

В статье обобщены результаты многолетних исследований изменения электрического сопротивления изоляции обмоток и зазоров в сопряжениях подшипниковых узлов короткозамкнутых асинхронных электродвигателей с учетом многообразия сочетаний эксплуатационных факторов; сообщается о новом способе контроля нагрева электродвигателей; предлагается метод прогнозирования полного и остаточного ресурсов изоляции обмоток и подшипниковых узлов, а также ожидаемых текущих значений сопротивления изоляции; уделяется внимание увеличению периодичностей технического обслуживания и текущего ремонта электродвигателей.

Ключевые слова: электродвигатель, ресурс, электрическое сопротивление изоляции обмотки, подшипниковые узлы, эксплуатационные факторы, контроль, нагрев, периодичности технического обслуживания и текущего ремонта.

Техническое состояние короткозамкнутых асинхронных электродвигателей (АД) наиболее достоверно можно определить, опираясь на физические характеристики их основных ресурсообразующих элементов – обмотки и подшипниковых узлов. В стране принято следить за величиной электрического сопротивления изоляции Z и размерами зазоров в сопряжениях подшипниковых узлов, при этом их сравнивают с нормируемыми максимально допустимыми значениями. Согласно правилам эксплуатации электрооборудования при техническом обслуживании и текущем ремонте проводятся измерения Z . При текущих и капитальных ремонтах АД, а также ремонтах электрифицированного технологического оборудования сопровождающихся отсоединением АД от рабочей машины, появляется возможность измерить зазоры в подшипниках и их посадочных гнездах. Это позволяет из накопленных сервисными службами страны протоколов и актов получить необходимый статистический материал по характеру и степени изменения во времени качества изоляции обмоток, подшипников и их посадочных гнезд с учетом реальных условий эксплуатации, а также достаточно точно определить их ожидаемые ресурсы.

ВИЭСХ с соисполнителями в течение многих лет накапливал информацию по Z . Установлено, что для описания изменения Z от времени может быть использована параболическая модель: коэффициенты параболы определяются конкретными сочетаниями эксплуатационных факторов, основными из

которых являются температура θ , относительная влажность W воздушной среды в месте расположения АД, количество пусков k , содержание в воздухе агрессивных газов и паров G , в первую очередь аммиака. По каждому из указанных эксплуатационных факторов осуществлена раздельная группировка по их наиболее характерным величинам: для относительной влажности таких групп оказалось 5, по температуре окружающей среды – 3, по количеству пусков – 5, по содержанию агрессивных газов – 2.

Для всех реально возможных сочетаний эксплуатационных факторов набирается по 150 парабол с фиксированной величиной начального (замеренного перед вводом в эксплуатацию смонтированного нового или капитально отремонтированного АД) сопротивления изоляции Z_0 (свободный член уравнения параболы). Точка пересечения той или иной параболы с осью абсцисс прямоугольной системы координат с равномерными шкалами отсекает на ней отрезок, равный полному календарному ресурсу изоляции R . Аналитически он представляет собой положительный корень решения уравнения параболы. Остаточный ресурс $R(\tau)$ по завершению какого-то промежутка времени τ эксплуатации определяется разностью $(R - \tau)$.

Поскольку Z_0 может принимать любое значение в очень широких пределах, численность парабол весьма значительна, что существенно затрудняет их применение. С целью упорядочения зависимостей и получения возможности их практического использования

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

выполнена группировка всех 150 кривых при фиксированном Z_0 таким образом, чтобы погрешность получаемых из каждой эквивалентной (обобщающей) кривой текущих значений $Z(t)$ отличались от аналогичных значений объединяемых зависимостей не более $\pm 5\%$. В итоге получились 33 эквивалентных кривых, каждая из которых объединяет по 2...10 парабол и соответствует тому или иному ряду конкретных сочетаний эксплуатационных факторов [1]. Разнообразие Z_0 учтено вводом так называемого базисного $Z_{об}$, для которого построена серия из 33 парабол. По полученным графикам можно определить ожидаемые R и $Z(t)$ для значений начального сопротивления изоляции обмоток, равному или близкому к $Z_{об}$. Знание $Z(t)$ необходимо для контроля не только состояния изоляции АД, но и уровня электробезопасности людей и сельскохозяйственных животных. Построен также график зависимостей полного ресурса изоляции обмоток АД от величины Z_0 , содержащий 33 таких кривых для разных условий эксплуатации [2]. Совокупность кривых $Z(t)_{\phi}$ для базисного $Z_{об}$ можно использовать для определения текущих значений сопротивления изоляции $Z(t)_{\phi}$ при любом фактическом (замеренном) $Z_{оф}$. При этом для преобладающего конкретного сочетания факторов все $Z(t)_{\phi}$ будут отличаться от соответствующих $Z(t)_{\phi}$ на величину $(Z_{об} - Z_{оф})$. Графики построены для $Z_{об}$, равному 2000, 5000, 10000, 15000 и 25000 МОм, т.е. они охватывают практически весь диапазон возможных значений $Z(t)$, для которого срок службы АД составляет не менее 20...25 лет, предусматривает и нормируемые техническими условиями на АД 15 лет.

Значения полного ресурса изоляции обмоток АД для всех 33 эквивалентных зависимостей при $Z_{оф}$ связаны с таким же ресурсом при $Z_{об}$ степенной функцией $\alpha = R_{\phi} / R_{\phi} = \gamma \beta^c$, где $\beta = Z_{оф} / Z_{об}$ в одинаковых условиях эксплуатации, γ и c - коэффициенты, зависящие от параметров той или иной эквивалентной параболы [1].

Указанные графики объединены в номограммы. На рисунке 1 в качестве примера приведена номограмма для

$Z_{об} = 2000 \text{ МОм}$, объединяющая 8 кривых для сочетаний эксплуатационных факторов, представленных в табл. 1. При этом $\theta 1 = 10...20^{\circ}C$, $\theta 2 = 21...25^{\circ}C$, $\theta 3 = 26...30^{\circ}C$; $W1 < 5\%$, $W2 = 5...15\%$, $W3 = 16...25\%$, $W4 = 26...35\%$, $W5 > 35\%$; $k1 = 1$, $k2 = 2...3$, $k3 = 4$, $k4 = 5$, $k5 > 5$; $G1 = 0...0,1 \text{ мг/м}^3$, $G2 > 0,1 \text{ мг/м}^3$.

Таблица 1 - Группировка эксплуатационных факторов

Номер кривой	Сочетания эксплуатационных факторов
1	$W1\theta 1K1G1; W1\theta 2K1G1;$ $W1\theta 3K1G1; W1\theta 1K1G2$
2	$W4\theta 1K1G1; W3\theta 2K1G2$
3	$W3\theta 1K2G1; W3\theta 2K2G1;$ $W3\theta 3K2G1; W1\theta 2K3G1$
4	$W4\theta 1K3G2; W4\theta 2K3G2;$ $W5\theta 1K3G1; W2\theta 2K4G1;$ $W4\theta 3K3G1; W1\theta 3K4G2$
5	$W3\theta 1K4G2; W3\theta 2K4G2$ $W3\theta 3K4G1; W4\theta 1K4G1;$ $W1\theta 1K5G2; W1\theta 3K5G1$
6	$W5\theta 1K4G2; W2\theta 2K5G2;$ $W3\theta 1K5G1; W5\theta 3K4G1$
7	$W4\theta 1K5G1; W3\theta 2K5G2$
8	$W5\theta 1K5G1; W4\theta 2K5G2$

Номограмма используется следующим образом (указано штриховыми линиями со стрелками). Для конкретных $Z_{оф}$ и преобладающего сочетания эксплуатационных факторов на объекте (например, кривая 3) на оси $0 - Z_0$ откладывают $Z_{оф}$ (например

$Z_{оф} = 1000 \text{ МОм}$) и воздвигают перпендикуляр до пересечения с нужной кривой (в данном случае с кривой 3) и далее - влево горизонталь до пересечения с осью $0 - R$, $R(\tau)$ - на ней отсекается отрезок, равный полному ресурсу изоляции АД R_{ϕ} (в примере $R_{\phi} = 59,5$ мес. = 5 лет) для этих условий.

Если требуется оценить остаточный ресурс по завершении времени τ_{ϕ} (скажем, $\tau_{\phi} = 3$ года) эксплуатации АД, то откладывают τ_{ϕ} по оси $0 - t$, τ и поднимают перпендикуляр

до пересечения с наклонной прямой, ордината точки пересечения равна $R(\tau_\phi)$;

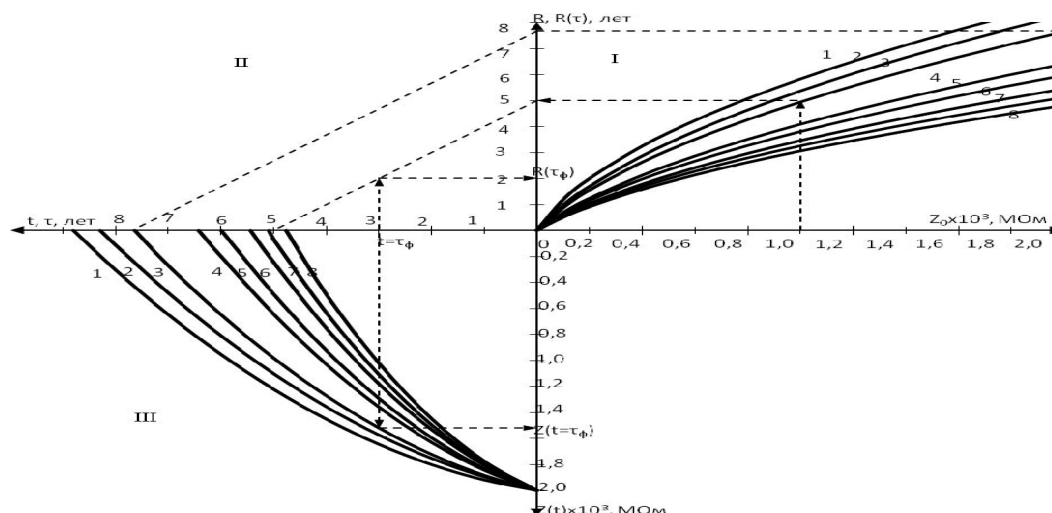


Рисунок 1 - Номограмма для определения сопротивления и ресурса изоляции электродвигателей

$R(t_\phi=3\text{года})=5-3=2\text{года}$. Предварительно строится эта наклонная кривая путем отложения на оси $0-t$, τ , отрезка R_ϕ (т.е. она представляет собой гипотенузу равнобедренного прямоугольного треугольника с катетами, равными R_ϕ). Значение $R(\tau_\phi)$ можно определить и как разность отрезков R_ϕ и τ_ϕ , отложенных на оси $0-R$, $R(\tau)$.

Ожидаемое сопротивление изоляции в рассматриваемом примере по окончании периода эксплуатации $t=\tau_\phi=3$ года можно определить для $Z_{0\phi}=1000$ МОм, используя в качестве базисной кривую 3, построенную для $Z_{0\phi}=2000$ МОм. Для этого из точки $\tau_\phi=3$ года на оси $0-t$, опускаем перпендикуляр до пересечения с параболой 3 и проводим горизонталь до пересечения с осью $0-Z(t)$ — получаем $Z(t=\tau_\phi=3\text{ года})=1520$ МОм для $Z_0=2000$ МОм. Искомое текущее сопротивление изоляции для $Z_{0\phi}=1000$ МОм, согласно изложенной выше рекомендации, $Z(t=\tau_\phi=3\text{ года})=1520,5-(2000-1000)=520,5$ МОм.

На надежность обмотки АД значительно влияет степень ее нагрева. Существующие защиты зачастую не обеспечивают отключение АД при его перегреве. Исследованиями с участием персонала испытательных центров ряда заводов-изготовителей установлена количественная взаимосвязь между температурами нагрева лобовых частей обмоток T_L ,

которые, как известно, нагреваются в наибольшей степени, и стали сердечника статора в гнезде рыв-болта T_r ; $\kappa = T_L / T_r$ [4]. Анализом выявлена возможность объединения АД разных типов в две группы со своими κ (таблице 2).

Таблица 2 - Группировка электродвигателей по значениям коэффициента κ

Параметры АД	Р, кВт	n, мин ⁻¹
$\kappa = 1,4$	0,75	1500
	0,55	1000
	0,25	750
	1,1	1000
	0,55	750
	2,2	1000
	1,5	750
	5,5	1000
	1,5	1000
	1,1	750
	0,75	750
	7,5	1000
	5,5	750
	4,0	750
	18,5	1000
	15,0	750
	160	1500
	160	1000

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

	250	1500
	200*	3000
	315	1500
	15	1000
	15	750
$\kappa = 1,7$	1,1	3000
	2,2	3000
	1,5	1500
	3,0	3000
	2,2	1500
	5,5	3000
	4,0	1500
	7,5	1500
	11	1500
	22	3000
	30	3000
	22	1500
	30	1500
	11	3000
	22	3000
	30	1500
	15	1500
		1000
		750
	30	1500
	22	1500
$\kappa = 1,7$	11*	3000
	7,5*	1500
	11*	1500
	5,5*	1000
	7,5*	1000
	5,5*	750
	22*	3000
	30*	3000
	22*	1500
	30*	1500
	18,5*	1000
Примечание: *) электродвигатели серии 4А, остальные – АИР		

Разработано, изготовлено и испытано базовое устройство контроля нагрева обмоток, представляющий собой портативный прибор, основание которого вворачивается в гнездо рым-болта. Прибор может работать на световой или (и) звуковой сигнал, а также отключать АД при его чрезмерном нагреве [4].

На основании анализа результатов хозяйственных и стендовых испытаний нескольких десятков АД рассчитаны таблицы полных ресурсов, максимально допустимых зазоров и ожидаемой длительности работы до их достижения подшипников разных типов АД и их посадочных гнезд [5]. Учтены осо-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

бенности АД разной высоты оси вращения влияния муфт и ременных передач. Эти таблицы позволяют прогнозировать величину зазоров в сопряжениях подшипниковых узлов, ресурсы подшипников и их посадочных гнезд, оценить степень их влияния на надежность всего узла.

Полученные исследованиями результаты позволяют скорректировать в сторону увеличения и рекомендовать практикам периодичности технического обслуживания и текущего ремонта АД [6]. Так, предложено установить длительность между техническими обслуживаниями АД, размещенных на сельскохозяйственных предприятиях разного типа, в увязке с $Z_{оф}$. Например, в парниках и теплицах, животноводческих и птицеводческих помещениях, складах минеральных удобрений, красок, растворов и т.п., помещениях для протравливания семян, молочных и насосных отделениях ферм, на электрифицированной технике на открытом воздухе или под навесом, предприятиях по утилизации или переработке навоза и отходов производства представляется целесообразным установить периодичности технического обслуживания АД в 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5,5; 6 мес. при $Z_{оф} \cdot 10^3$ МОм равном соответственно: до 2, 2...3, 3...4, 4...6, 6...8, 8...11, 11...15, 15...25, более 25. Периодичности текущих ремонтов, основные операции которых приходится на подшипниковые узлы, увязываются с прогнозируемыми ресурсами и величинами зазоров в их сопряжениях и учитывают типы АД и рабочей машины, ожидаемую с доверительной вероятностью 95% длительность работы АД на агрегате данного типа до достижения зазорами в сопряжениях подшипникового узла максимально допустимой величины. Например, для АД установленного на сепараторе СОМ-3-1000М, эта периодичность составляет 24 мес. для АД серии 4А и 30 мес. – для серии АИР.

Составлена инженерная методика, позволяющая работникам любой квалификации оперативно контролировать и прогнозировать техническое состояние короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, предложены увеличенные по сравнению с действующими периодичности технического обслуживания и текущего ремонта АД, учитывающие особенности АД и рабочих машин, а также условия их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов, Ю.С. Прогнозирование электрического сопротивления и ресурса изоляции обмоток электродвигателей в сельскохозяйственном производстве/ Ю.С. Борисов, А.А. Некрасов /Труды Кубанского государственного аграрного университета, вып. 3(24), Краснодар. – 2010.
2. Борисов, Ю.С. Обоснование критериев контроля сопротивления изоляции электродвигателей/ Ю.С. Борисов, А.И. Некрасов, А.А. Некрасов, А.В. Ефимов - Вестник ГНУ ВИЭСХ. "Энергообеспечение и электротехнологии" в с/х 1(5)–М.: 2010.
3. Борисов, Ю.С. Контроль нагрева электродвигателей /Ю.С. Борисов. -Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 2.
4. Патент № 90942 РФ. Устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей / Некрасов А.И., Некрасов А.А., Борисов Ю.С., Сырых Н.Н. – Опубл. в БИ № 2, 2010.
5. Борисов, Ю.С. Анализ ресурса подшипниковых узлов электродвигателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве/ Ю.С. Борисов, А.И. Некрасов, А.А. Некрасов -Вестник ГНУ ВИЭСХ. Энергетика и электротехнологии в сельском хозяйстве, вып. 1 (4). – М.: 2009.

Некрасов А.И., д.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Эксплуатация электрооборудования в сельском хозяйстве»;

Борисов Ю.С., к.т.н., ведущий научный сотрудник;

Некрасов А.А., научный сотрудник;

Ефимов А.В., инженер, Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства», тел.: 8(499) 171-85-40, E-mail: viesh@dol.ru