

Краткие сообщения

УДК 621.311.019.3(075.8)

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ

Д.А. Андреев¹, И.А. Назарычев¹, И.А. Косорлуков²

¹ Ивановский государственный энергетический университет
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

² Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Приведено выражение для расчета фактического сработанного и остаточного ресурса асинхронных электродвигателей. Разработан подход к планированию режима эксплуатации электродвигателей с целью их надежной эксплуатации на интервале наработки требуемого объема. Рассмотрены примеры по оценке фактического сработанного и остаточного ресурса асинхронных электродвигателей.

Ключевые слова: оценка технического состояния, асинхронные электродвигатели, остаточный ресурс.

Электрические машины и аппараты используются во всех отраслях промышленности. От их надежной работы зависит эффективность и безопасность технологических процессов. Поэтому оценка их технического состояния в процессе эксплуатации является актуальной задачей.

Асинхронные электродвигатели (ЭД) среди всего многообразия электрических машин и аппаратов являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых в энергетике и промышленности [1]. Они работают, как правило, в трех режимах: продолжительном; кратковременном; повторно-кратковременном. Исходя из этого для асинхронных ЭД, работающих в одном из этих режимов, за единицы измерения наработки целесообразно принимать либо временные единицы, либо количество пусков. Примем временные единицы измерения наработки как наиболее универсальные.

По данным исследований [2], одним из основных факторов повреждения обмотки статора ЭД являются электродинамические воздействия от пусковых токов. При работе ЭД в режиме частых пусков происходит ускоренное старение изоляции из-за многократных колебаний температуры и связанных с ними деформаций. При пуске ЭД, а также при переключении с одной скорости вращения на другую в обмотке протекает ток, в 5,5-7 раз превышающий номинальный, что соответствует увеличению динамических усилий в обмотке статора в 30-49 раз. Эти усилия действуют на лобовые части обмотки, вызывая их деформацию, образование местных дефектов

Дмитрий Александрович Андреев – к.т.н., главный технолог.

Илья Александрович Назарычев – аспирант.

Игорь Андреевич Косорлуков – ассистент.

изоляции и трещин. Происходит ослабление шнуровых бандажей, перетирание обмотки на выходе из паза, перетирание изоляции межслоевыми прокладками.

Наиболее характерные и часто встречающиеся в практике эксплуатации повреждения беличьих клеток заключаются в обрыве стержней. Обрыв стержня может произойти либо в пазовой части, либо на выступающем из активной стали конце. Причем при обрыве стержня на выступающем конце бывают два случая: обрыв на выходе из паза, что встречается очень редко, и обрыв стержня у короткозамкнутого кольца. Главными факторами повреждения короткозамкнутых клеток следует считать деформации и разрывы деталей клеток от механических перенапряжений вследствие действия высоких температурных нагревов стержней и колец в процессе пуска двигателя. Таким образом, ухудшение технического состояния асинхронных ЭД обусловлено воздействием практически всех групп эксплуатационных факторов. Однако основной причиной сработки технического ресурса является температура – первопричина как тепловых, так и механических процессов сработки ресурса асинхронных ЭД.

Как уже было отмечено выше, в процессе пуска асинхронного ЭД кратность пускового тока достигает 5,5-7 номинального тока. В связи с этим происходит увеличение температуры обмоток ротора и статора, что приводит к ускорению сработки ресурса по отношению к номинальному режиму работы, при котором все параметры (ток, напряжение, температура и т.д.) также равны своим номинальным значениям или лежат в узком допустимом диапазоне (например, $\pm 5\%$).

Методика, приведенная в [3], позволяет учитывать пусковые интервалы наработки. В этом случае рассматривается интервал наработки R_j , по объему равный величине пускового интервала наработки, если бы на нем эксплуатационные факторы (например, ток, температура и др.) имели свои номинальные значения. Далее R_j корректируется с учетом фактических значений эксплуатационных факторов согласно методике, приведенной в [3].

Таким образом, модель комплексной оценки технического состояния [3] позволяет учесть и пусковые режимы работы асинхронных ЭД.

В результате исследований, основанных на [4, 5], были получены формулы для определения фактического сработанного $R^* = R/R_0$ и остаточного $R_{ocm}^* = R_{ocm}/R_0$ (где R_0 – нормативный ресурс ЭД) ресурса асинхронных ЭД в продолжительных режимах работы:

$$R^* = e^{\frac{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{oxl} + \frac{\Delta PT_0}{C} \right] - 1}{\Delta \vartheta^*}}, \quad (1)$$

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \left(e^{\frac{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{oxl} + \frac{\Delta PT_0}{C} \right] - 1}{\Delta \vartheta^*}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$R_{ocm}^* = R_{0,ocm}^* - \sum_{j=1}^K R_j^* \left(e^{\frac{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{oxl} + \frac{\Delta PT_0}{C} \right] - 1}{\Delta \vartheta^*}} - 1 \right), \quad (3)$$

где ΔP – мощность потерь в ЭД; C – полная теплоемкость ЭД; T_0 – тепловая постоянная двигателя; $\Delta \vartheta^* = \Delta \vartheta / \vartheta_0$ – отклонение температуры ЭД от нормативного значения ϑ_0 ; $R_j^* = R_j / R_0$ – некоторый участок наработки; $\vartheta_{охл}$ – температура окружающей (охлаждающей) среды.

В качестве R_0 для ЭД (серий АО2 и АОЛ2 и др.) можно принять $R_0 = 200000$ ч при $\vartheta_0 = 75$ °С для 1-5 габаритов и 90 °С для 6-9 габаритов [5]. Для других ЭД такую информацию можно получить либо из нормативно-технической документации, например [6], или из паспортных данных на ЭД.

При пусках, и особенно при тяжелых затяжных пусках (разгон ЭД при больших маховых массах на валу, включение заторможенного ЭД, работа ЭД на упор, длительное вращение на ползучей скорости при моментах, близких к номинальному) мощность потерь ΔP велика, а теплоотдача в окружающую среду еще не успевает вступить в действие [5]. Тогда нагрев ЭД идет по прямой. Выражения для расчета фактического сработанного и остаточного ресурса ЭД в именованных единицах запишутся в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} e^{\frac{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{охл} + \frac{r}{N} \left(\frac{4k_i I_{\phi n}}{\pi d^2 n_{np} a} \right)^2 \right] - 1}{\Delta \vartheta^*}} dr - R_j \right), \quad (4)$$

$$R_{ост} = R_{0,ост} - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j} e^{\frac{\frac{1}{\vartheta_0} \left[\vartheta_{охл} + \frac{r}{N} \left(\frac{4k_i I_{\phi n}}{\pi d^2 n_{np} a} \right)^2 \right] - 1}{\Delta \vartheta^*}} dr - R_j \right), \quad (5)$$

где $I_{\phi n}$ – номинальный ток фазы; d – диаметр проводников в пазу; a – число параллельных ветвей в фазе; n_{np} – число проводников в пазу; N – расчетный коэффициент, принимаемый 200 – если процесс начинался при холодном состоянии ЭД, 105 – при исходной температуре обмотки статора 75-90 °С и 145 – при начальной температуре 100 °С и выше; k_i – кратность тока по отношению к номинальному. Если требуется рассчитать фактический ресурс за наработку, отличную от наработки в объеме нормативного ресурса R_0^* , то в соответствующих выражениях необходимо положить значение R_0^* , равное этой наработке.

Рассмотрим примеры по оценке фактического сработанного и остаточного ресурса асинхронных ЭД.

Пример 1. Предположим, двигатель АО2-32-2 работает с постоянной нагрузкой $P_2 = 3.5$ кВт. По кривым из [5] КПД $\eta = 85\%$, или 0.85 о.е. Температура окружающей среды $\vartheta_{охл}$ составляет 30 °С. Примем $\Delta \vartheta = 12.048$ °С, $\vartheta_0 = 75$ °С [5]. По формуле (1) определим фактический сработанный ресурс ЭД:

$$R^* = e^{\frac{\frac{1}{75} \left[30 + \frac{0.618 \cdot 16 \cdot 60}{18} \right] - 1}{12.048/75}} = 0.368,$$

где $C=18$ кДж/(кг·°С) и $T_0=18$ мин по [5]. Можно было воспользоваться формулой (2), но так как известно, что данный режим работы ЭД является постоянным на всем интервале наработки, то по формуле (1) расчет выполняется более просто. Полагая, что нормативный ресурс этого ЭД составляет в именованных единицах 20000 ч, получим фактический сработанный ресурс, равный $R=0.368 \cdot 20000=7360$ ч. При условии эксплуатации данного ЭД в дальнейшем при нормативных условиях его остаточный нормативный ресурс составит $R_{0,ост}=20000-7360=12640$ ч или $1-0.368=0.632$.

Пример 2. Определим фактический сработанный ресурс двигателя АО2-32-2 (см. пример 1) за 1 пуск продолжительностью $t_{II}=10$ с из холодного состояния при температуре охлаждающей среды $\vartheta_{охл}=30$ °С по формуле (4):

$$R = 10 + \int_0^{10} e^{\frac{\frac{1}{75} \left[30 + \frac{r}{200} \left(\frac{4.7 \cdot 4.8}{\pi \cdot 0.4^2 \cdot 4.2} \right)^2 \right] - 1}{12.048/75}} dr - 10 = 2.95 \cdot 10^4 \text{ с или } 8.195 \text{ ч},$$

где принято $d=0.4$ мм; $n_{np}=4$; $a=2$; $N=200$. Значения K_I и $I_{фн}$ взяты для данного ЭД по [4]. В относительных единицах формула (4) может быть записана в виде:

$$R^* = \frac{1}{10} \int_0^{10} e^{\frac{\frac{1}{75} \left[30 + \frac{r}{200} \left(\frac{4.7 \cdot 4.8}{\pi \cdot 0.4^2 \cdot 4.2} \right)^2 \right] - 1}{12.048/75}} dr = 2.95 \cdot 10^3 \text{ о.е.}$$

Таким образом, данный ЭД за 1 пуск продолжительностью 10 с срабатывает 8.195 ч нормативной эксплуатации. Если принять $R_0=20000$ ч, то за нормативный срок службы ЭД может выдержать $20000/8.195=2.441 \cdot 10^3$ пусков из холодного состояния.

Выводы:

1. Разработана методика и комплексная математическая модель определения фактического сработанного и остаточного ресурса электрических машин и аппаратов на примере асинхронных электродвигателей.
2. Разработан подход к планированию режима эксплуатации электродвигателей с целью их надежной эксплуатации на интервале наработки требуемого объема.
3. Рассчитаны контрольные примеры для определения фактического сработанного и остаточного ресурса электродвигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М. Петрова, А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
2. Реуцкий И.А., Неминов А.И. Проблема надежности двигателей собственных нужд электростанций. – К.: Общество «Знание» УССР, 1985. – 19 с.
3. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методика оценки фактического ресурса электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 6. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – С. 288-306.
4. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
5. Бухман Е.И., Мейстель А.М., Найдис В.А. Рекомендации по выбору асинхронных двигателей для металлорежущих станков (на примере двигателей серии АО2). – М.: ЭНИМС, 1972. – 70 с.

6. ГОСТ Р 51757-2001 Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В для механизмов собственных нужд тепловых электростанций.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2010 г.

UDC 621.311.019.3

ELECTRICAL MACHINES AND DEVICES TECHNICAL CONDITION EVALUATION MODEL

D.A. Andreev¹, I.A. Nazarichev¹, I.A. Kosorlukov²

¹ Ivanovo State Energy University
34, Rabfakovskaya st., Ivanovo, 153003

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

In the article a formula for calculation of real worn and left resource of asynchronous motor is given. Approach for planning exploitation regime of asynchronous motor for the sake of their reliable exploitation on the interval of required volume lifetime is developed. Cases of real worn and left resource of asynchronous motor evaluation are examined.

Keywords: *technical condition evaluation, asynchronous motor, remaining lifetime.*

Dmitry A. Andreev – Candidate of Technical Sciences, Chief Technologist.

Ilia A. Nazarichev – Postgraduate student.

Igor A. Kosorlukov – Assistant.

Алексей Игоревич Бузуев – аспирант.