

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРИСОВ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
borisov@krc.karelia.ru

ТАМАРА ПЕТРОВНА ТИХОМИРОВА

кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
tihomiro@krc.karelia.ru

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСОВ ИЗОЛЯЦИИ И ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК

С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа обосновывается максимальное увеличение ресурса изоляции и подшипников электрических двигателей путем перераспределения нагрузки во времени и между ними.

Ключевые слова: электрические двигатели, ресурс изоляции, износ подшипников, метод неопределенных множителей Лагранжа

В связи со значительным износом основных фондов, достигшим в электроэнергетике 60 %, а также низкой степенью инвестирования снизилась надежность работы эксплуатируемого оборудования, в частности электродвигателей, потребляющих до 60 % вырабатываемой в стране электроэнергии [1], [7].

В 85–95 % случаев отказ электродвигателей вызван повреждением обмоток, основные из которых приходятся на межвитковые замыкания при пробое их изоляции. В заключительном периоде эксплуатации увеличивается частота постепенных эксплуатационных отказов, что вызвано старением и износом электродвигателей. В этот период отмечается существенное нарушение свойств изоляции, уменьшение ее электрической прочности, а также износ тел качения подшипников [5]. Ввиду этого в заключительный период эксплуатации электрических двигателей важно эффективно использовать их остаточный ресурс для максимального продления времени эксплуатации. В связи с этим в статье обосновываются методы оптимального распределения нагрузки у самого распространенного типа асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором по критериям минимума наработки ресурса изоляции и подшипников.

Для электрических двигателей с изоляцией, имеющей теплостойкость класса А, расчетный срок службы изоляции T_{us} , или ее расчетный ресурс, определяется зависимостью (в годах) [2], [4]:

$$T_{us} = 7,15 \cdot 10^4 \exp[-0,088(\nu_{oc} + \Delta\nu_n)], \quad (1)$$

где ν_{oc} – температура окружающей среды, принимаемая по ГОСТ 183-74 п. 1.12 равной 40 °C; $\Delta\nu_n$ – превышение температуры изоляции над

температурой окружающей среды (°C), принимаемой для изоляции класса А равной 60 °C [5].

Данная формула и принимаемые значения температур используются для определения длительности непрерывной эксплуатации изоляции двигателей или проектного ресурса их изоляции при номинальной максимальной рабочей температуре [2], [5].

При эксплуатации электрических двигателей распространен мониторинг их нагрузок и крайне редко используются измерения температуры обмоток. Ввиду этого желательно найти возможность определять наработку ресурса изоляции двигателей в зависимости от их нагрузки.

При работе двигателя в продолжительном режиме превышение температуры изоляции обмотки над температурой окружающей среды принимает установившееся значение, равное [5]

$$\Delta\nu = R \cdot \Delta P, \quad (2)$$

где R – тепловое сопротивление поверхности электрического двигателя, $\frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$, ΔP – потери мощности в электрическом двигателе, Вт.

Величину теплового сопротивления двигателя R можно определить исходя из того, что за номинальную мощность электрического двигателя принимается мощность на валу в продолжительном режиме работы, при которой установившаяся температура обмотки превышает температуру окружающей среды на величину $\Delta\nu^{\max}$, соответствующую принятым нормам перегрева класса нагревостойкости изоляции (ГОСТ 183-74). Тогда в соответствии с формулой (2) значение теплового сопротивления

$$R = \frac{\Delta\nu^{\max}}{\Delta P_h}, \quad (3)$$

где ΔP_n – потери мощности двигателя при номинальной мощности на валу, Вт; Δv^{\max} – допустимое классом нагревостойкости изоляции превышение температуры обмотки двигателя температурой окружающей среды, °С.

Величина потерь мощности двигателя при номинальной мощности определяется по формуле

$$\Delta P_n = P_n (1 - \eta_n), \quad (4)$$

где η_n – номинальный (паспортный) КПД; P_n – номинальная мощность двигателя.

Следовательно, установившаяся температура изоляции обмотки при продолжительном режиме составит величину

$$v_{us} = v_{oc} + \Delta v^{\max} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_n}. \quad (5)$$

Потери мощности электрических двигателей переменного тока разделяют на постоянные и переменные, последние зависят от квадрата коэффициента нагрузки K_{nr} . Рекомендации современных методик проектирования электрических машин по выбору потерь мощности дают такое соотношение потерь, что наибольшее значение КПД составляет при коэффициенте нагрузки $K_{nr} = 0,7$ –0,8 или $K_{nr} = 0,75$. Наибольший КПД у них с известным приближением будет получаться при равенстве переменных потерь в проводах обмоток $\Delta P_{\text{пер}}$ сумме постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ [4], [5].

В соответствии с этим примем, что при $P = 0,75P_n$

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пер}}, \quad (6)$$

где P – текущее значение мощности.

Так как суммы потерь мощности в электродвигателе

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}n} \cdot K_{nr}^2, \quad (7)$$

где $\Delta P_{\text{пер}n}$ – переменные потери при номинальной мощности двигателя, то при $P_2 = 0,75P_{2n}$ и $K_{nr} = 0,75$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}n} \cdot 0,75^2 = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}n} \cdot 0,5625,$$

а по условию (6)

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пер}n} \cdot 0,5625. \quad (8)$$

Следовательно,

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пер}n} \cdot 0,5625 + \Delta P_{\text{пер}n} \cdot K_{nr}^2 = \Delta P_{\text{пер}n} (0,5625 + K_{nr}^2). \quad (9)$$

Используя эту формулу и известные КПД двигателя при номинальной нагрузке, когда $K_{nr} = 1$, получаем, что

$$\Delta P_n = 1,5625 \Delta P_{\text{пер}n}, \quad (10)$$

$$\text{откуда } \Delta P_{\text{пер}n} = \frac{\Delta P_n}{1,5625} = 0,64 \Delta P_n,$$

$$\text{а } \Delta P_{\text{пост}} = 0,5625 \cdot 0,64 \Delta P_n = 0,36 \Delta P_n.$$

Тогда потери мощности в электродвигателе во всем диапазоне изменения коэффициента нагрузок $0 \leq K_{nr} \leq 1$ определяются формулой

$$\Delta P = 0,36 \Delta P_n + 0,64 \Delta P_n \cdot K_{nr}^2 = \Delta P_n (0,36 + 0,64 K_{nr}^2). \quad (11)$$

Используя формулы (2, 3, 11), получаем зависимость превышения температуры изоляции обмотки над температурой окружающей среды от коэффициента нагрузки электродвигателя

$$\Delta v = R \cdot \Delta P = \frac{\Delta v^{\max}}{\Delta P_n} \Delta P = \Delta v^{\max} (0,36 + 0,64 K_{nr}^2). \quad (12)$$

Вследствие этого в условиях эксплуатации с изменяющимися v_{oc} и K_{nr} расчетный ресурс изоляции класса А обмоток новых электрических двигателей T_p будет определяться формулой

$$T_p = 7,15 \cdot 10^4 \cdot \exp(-0,088(v_{oc} + \Delta v^{\max} (0,36 + 0,64 K_{nr}^2))). \quad (13)$$

Формула (13) дает зависимость ресурса изоляции электрических двигателей от меняющихся у них коэффициентов нагрузки и позволяет сформулировать следующую задачу наивыгоднейшего распределения нагрузок между параллельно работающими двигателями.

Параллельно на общую нагрузку работают n технологических агрегатов с приводом от электрических двигателей с номинальной мощностью $P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{ni}, \dots, P_{nn}$. Текущее значение суммарной нагрузки двигателей составляет величину P_c

$$P_c = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_n. \quad (14)$$

У каждого i -го двигателя расчетный ресурс изоляции при нагрузке P_i определяется по формуле (13). Учитывая, что $K_{nri} = \frac{P_i}{P_{ni}}$, формула (14) перепишется в виде

$$P_c = K_{nri1} \cdot P_{n1} + K_{nri2} \cdot P_{n2} + \dots + K_{nri} \cdot P_{ni} + \dots + K_{nri} \cdot P_{nn}. \quad (15)$$

Требуется определить при условии (15) такие текущие значения нагрузки каждого электрического двигателя, которые дают максимальный расчетный ресурс изоляции всех двигателей.

Для решения такой задачи запишем ее условия в виде системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{p1} = F(K_{nri1}); \\ T_{p2} = F(K_{nri2}); \\ \dots \\ T_{pi} = F(K_{nri}); \\ \dots \\ T_{pn} = F(K_{nri}); \\ P_c = K_{nri1} \cdot P_{n1} + K_{nri2} \cdot P_{n2} + \dots + K_{nri} \cdot P_{ni} + \dots + K_{nri} \cdot P_{nn}, \end{array} \right. \quad (16)$$

где i – номер электрического двигателя, $i = 1, 2, \dots, n$; K_{nri} – коэффициент нагрузки i -го двигателя.

Требуется найти такие текущие значения коэффициента нагрузки каждого электрического двигателя K_{nri} , которые доставляют максимум суммы

$$\max \sum_{i=1}^n F(K_{nri}). \quad (17)$$

При дифференцируемости функций $T_{pi} = F(K_{nri})$ условный минимум их суммы находится мето-

дом неопределенных множителей Лагранжа [6] при равенстве производных первой степени

$$\frac{\partial T_{p1}}{\partial K_{\text{нр}1}} = \dots = \frac{\partial T_{pi}}{\partial K_{\text{нр}2}} = \dots = \frac{\partial T_{pn}}{\partial K_{\text{нр}n}}. \quad (18)$$

Подставляем в (13) значения $v_{oc} = 40^\circ\text{C}$ и $\Delta v^{\max} = 60^\circ\text{C}$ [5], задаваемые ГОСТами, дифференцируем и, учитывая (18), получаем

$$K_1 = K_2 = \dots = K_i = \dots = K_n. \quad (19)$$

Таким образом, максимальный суммарный ресурс, или календарный срок службы изоляции [2], будет достигаться при одинаковой степени (одинаковом коэффициенте) нагрузки каждого из параллельно работающих на общую нагрузку электрических двигателей с одинаковым классом нагревостойкости изоляции. Из этого вывода вытекают следствия:

1. Ввиду равенства коэффициентов нагрузки $K_{\text{нр}}$, учитывая формулу (15), получаем

$$P_c = K_{\text{нр}} (P_{\text{н1}} + P_{\text{н2}} + \dots + P_{\text{нi}} + \dots + P_{\text{нn}}) = K_{\text{нр}} \sum_{i=1}^n P_{\text{нi}}. \quad (20)$$

Откуда $K_{\text{нр}} = \frac{P_c}{\sum_{i=1}^n P_{\text{нi}}}$, то есть для определения

наивыгоднейшего коэффициента нагрузки каждого из параллельно работающих электродвигателей их заданную суммарную нагрузку необходимо поделить на суммарную номинальную мощность.

2. Равенство в соответствии с формулой (12) температур перегрева и нагрева изоляции обмоток всех двигателей.

3. Равенство наработки ресурса изоляции всех двигателей и, следовательно, теоретически одновременное исчерпание ресурса изоляции.

4. При равенстве номинальных мощностей параллельно работающих двигателей максимальное значение суммы ресурсов их изоляции получается при равенстве нагрузок.

Исходя из последнего следствия при возможности регулирования нагрузки у автономно работающего электрического двигателя максимум ресурса его изоляции или календарного срока ее службы получается при работе с постоянной нагрузкой.

Вторым видом постепенных эксплуатационных отказов электрических двигателей является отказ их узлов трения – подшипников в резуль-

тате износа [5]. Срок их службы также зависит от температуры. Так, в работе [3] отмечается, что «даже относительно небольшой перегрев на $30-5^\circ\text{C}$ по корпусу резко – в несколько раз – снижает срок службы подшипника». Там же приведен линейный график зависимости срока службы подшипника от температуры перегрева корпуса электродвигателя. Эта зависимость может быть описана линейным уравнением вида

$$T_{\text{подшип}} = a - b \cdot \Delta v, \quad (21)$$

где Δv – температура перегрева корпуса электродвигателя; a, b – эмпирические коэффициенты.

Как и в случае с нагревом изоляции электродвигателя, температура перегрева его корпуса пропорциональна квадрату потребляемой от сети мощности P_i , то есть

$$T_{\text{подшип}} = a - b \cdot (K_{\text{нр}i} \cdot P_{\text{нр}i})^2. \quad (22)$$

Эта функция также непрерывна, дифференцируема, как и в случае зависимости срока службы изоляции от температуры.

Вследствие этого и для подшипниковых узлов с целью достижения максимума их суммарного срока службы требуется одинаковый коэффициент нагрузки параллельно работающих машин. Для одиночно работающего двигателя максимальный срок службы подшипников достигается при равномерном распределении во времени его нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. Расчетный ресурс изоляции и подшипников электрических двигателей зависит от квадрата коэффициента его нагрузки или квадрата мощности на валу.

2. Условный максимум ресурса изоляции и подшипников электрических параллельно работающих на общую нагрузку двигателей с одинаковым классом теплостойкости изоляции достигается при равенстве коэффициентов их нагрузки, а при неодинаковых классах изоляции – при равенстве их относительных приростов расчетных ресурсов изоляции и подшипников по нагрузке.

3. Условный минимум использованного ресурса изоляции и подшипников электрического одиночно работающего двигателя достигается при его работе в постоянном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Под ред. И. Я. Braslavskogo. М.: Изд. Центр «Академия», 2004. 256 с.
- ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. 32 с.
- Ильинский Н. Ф. Энергосберегающий электропривод насосов // Электротехника. 1995. № 7. С. 3–8.
- Костенко М. П., Пиоторовский Л. М. Электрические машины. Часть вторая. Машины переменного тока. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. 651 с.
- Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
- Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. Т. II. М.: Физматгиз, 1968.
- Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1715 р. от 13 ноября 2009 г.