

## О ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Шевченко О.А., Якимшина В.В., Пинчук О.Г.

Донецкий национальный технический университет

yvs@stels.net

*The opportunity is demonstrated of fire of an induction motor in the presence of asymmetry of supply voltage. The procedure of an estimation of fire hazard of system "a guard - drive - combustible material" is proposed in the time of her maintenance. The formula for definition of probability of fires and mean time up to the first fire is obtained. The example of calculation is rotined.*

Анализ пожаров, произошедших от повреждения электрооборудования и отказа в срабатывании соответствующих средств защиты показал: на тепловых электростанциях произошло 52%; на подстанциях – 43%; на гидроэлектростанциях – 5% от общего числа пожаров, произошедших по другим причинам, не связанным с электрическим током. Число пожаров, произошедших по вине электрических машин, составило 16% [1].

Перегрев обмоток электрических машин может вызвать воспламенение изоляции проводов, что нередко приводит к пожару в тех случаях, когда на корпусах этих машин имеется отложение пожароопасной пыли, а средства защиты находятся в отказавшем состоянии, либо не реагируют на данный режим работы.

Наиболее часто перегрев обмоток асинхронных двигателей (АД) возникает при заторможенном роторе (заклинивание), обрыве фазы статора, отклонении напряжения сети от нормируемых значений, несимметрии питающего напряжения [2].

Одним из распространённых режимов, вызывающим перегрузки АД является несимметрия первичного напряжения. Значения коэффициента несимметрии при обрыве линейного провода на стороне питающего напряжения [3], как в месте обрыва – 28.7%, так и в близлежащих узлах – 15-28.3% значительно превышают значения, установленные ГОСТ 13109 – 97. Несимметрия питающего напряжения приводит к появлению токов обратной последовательности, которые накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев ротора и статора, что приводит к быстрому старению изоляции [2].

В качестве примера рассмотрим тепловые и электро-механические характеристики АД с короткозамкнутым ротором ЭДКО4-4МУ5, работающего при несимметричном питающем напряжении. На рис.1 приведены зависимости токов фаз А, В, С статорной обмотки от коэффициента несимметрии. Расчёт осуществлялся методом симметричных составляющих, с применением Г - образной схемы замещения для прямой и обратной последовательностей [4]. Из приведенных характеристик следует, что токи в фазах статорной

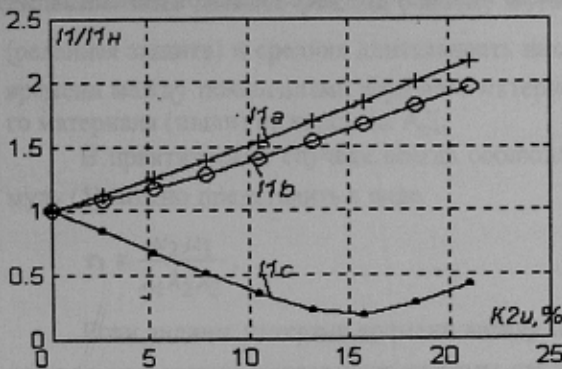


Рисунок 1 – Зависимости токов фаз А, В, С статорной обмотки от коэффициента несимметрии

обмотки ( $I_{IA}$ ,  $I_{IB}$ ,  $I_{IC}$ ) распределены неравномерно вследствие искажения симметрии питающего напряжения, и, при глубокой несимметрии, могут вырасти в 2 и более раз. Рост токов приводит к перегреву обмоток АД. Расчёт теплового состояния двигателя осуществлялся с помощью системы дифференциальных уравнений, полученных с использованием эквивалентных тепловых схем [5]. На рис.2 приведены зависимости превышения температур ( $\theta_{3A}$ ,  $\theta_{3B}$ ,  $\theta_{3C}$ ) наиболее нагретого узла АД - пазовой части обмотки статора для фаз А, В, С в установившемся режиме при различных значениях коэффициента несимметрии. Из рис.2 следует, что превышения температур пазовых частей обмотки статора при  $K_{2U} = 20\%$  равны – 510°C, 480°C, 285°C соответственно для фаз А, В, С, что значительно превышает допустимые. Рост температур обмоток существенно влияет на срок службы изоляции. Пользуясь кривыми нагрева при работе двигателя с  $K_{2U} = 20\%$  (рис.3), и применяя методику расчёта срока службы изоляционных материалов, изложенную в [6], получим срок службы изоляционного материала наиболее нагретого узла 5а равный ~3,2 часа. То есть, при появлении на входе АД несимметрии питающего напряжения 20% и отказе в срабатывании релейной защиты, через ~3,2 часа произойдет пробой изоляции обмоток. Такой режим будет существовать до тех пор, пока не обуглится обмотка статора и произойдет перегорание проводников, при этом температура корпуса двигателя возрастет до температуры, при которой возможно воспламенение горючей пыли случайно находящейся на корпусе, что приводит к возникновению пожара в помещении.

Следовательно, пожар при эксплуатации АД может произойти при совпадении в пространстве и времени следующих случайных событий: недопустимый перегрев корпуса двигателя (например, при обрыве одной из фаз питающих АД); отказ в срабатывании соответствующих средств защиты; наличие горючего материала на корпусах рассматриваемых АД.

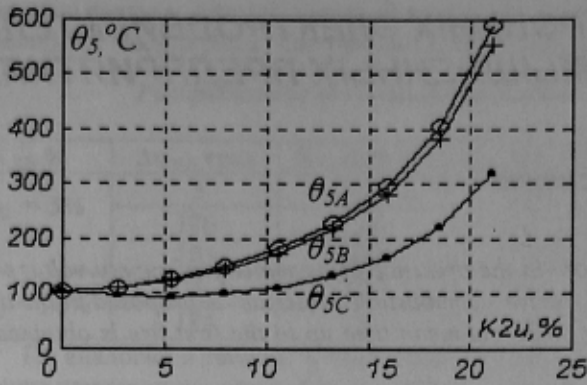


Рисунок 2 – Зависимости превышения температур пазовых частей обмотки статора для фаз А, В, С от коэффициента несимметрии

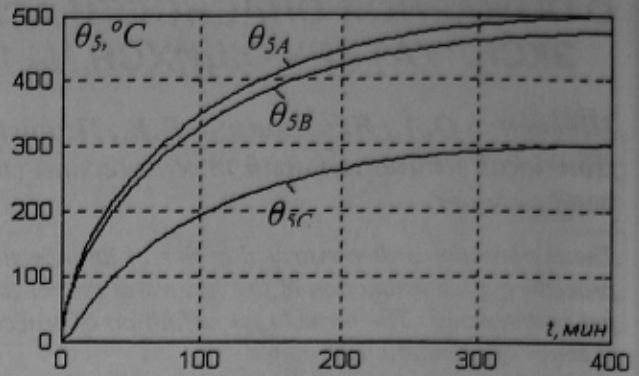


Рисунок 3 – Кривые нагрева пазовых частей статорной обмотки для фаз А, В, С при  $K_{211}=20\%$

Цель данной работы определить, какова вероятность появления пожаров при эксплуатации на промышленных предприятиях АД. Какой надежность должна обладать система релейной защиты, чтобы частота пожаров от пожароопасного узла «защита – АД – горючий материал» была бы на уровне, рекомендуемом ГОСТ 12.1.004-91, т.е.  $N \leq 1 \cdot 10^{-6}$  1/год =  $1,14 \cdot 10^{-10}$  1/час.

Вероятность пожаров  $Q(t)$  от АД в течение времени  $t$  равна вероятности  $P_8(t)$  нахождения всех независимых элементов системы «защита – АД – горючий материал» в опасном состоянии, т.е. в системе наблюдается в момент времени  $t$ : обрыв одной из фаз АД; отказ в срабатывании соответствующих средств защиты; наличие горючего материала на корпусе двигателя. Вероятность  $P_8(t)$  можно найти, пользуясь системой линейных дифференциальных уравнений [7].

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_1(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + \mu_2 P_3(t) + \mu_3 P_4(t) \\ \dot{P}_2(t) &= \lambda_1 P_1(t) - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_2(t) + \mu_2 P_5(t) + \mu_3 P_6(t) \\ \dot{P}_3(t) &= \lambda_2 P_1(t) - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)P_3(t) + \mu_1 P_5(t) + \mu_3 P_7(t) \\ \dot{P}_4(t) &= \lambda_3 P_1(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)P_4(t) + \mu_1 P_6(t) + \mu_2 P_7(t) \\ \dot{P}_5(t) &= \lambda_2 P_2(t) + \lambda_1 P_3(t) - (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3)P_5(t) \\ \dot{P}_6(t) &= \lambda_3 P_2(t) + \lambda_1 P_4(t) - (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3)P_6(t) \\ \dot{P}_7(t) &= \lambda_3 P_3(t) + \lambda_2 P_4(t) - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3)P_7(t) \\ \dot{P}_8(t) &= \lambda_3 P_5(t) + \lambda_2 P_6(t) + \lambda_1 P_7(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система уравнений (1) должна быть решена при начальных условиях  $P_1(0) = 1$ ,  $P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = P_7(0) = P_8(0) = 0$ , которые вытекают из сделанных предположений о том, что в начальный момент времени в сети не наблюдается повреждений, приводящих к обрыву фазного провода; защита АД находится в исправном состоянии; на корпусах рассматриваемых двигателей отсутствует пожароопасная пыль.

Решение системы линейных дифференциальных уравнений будем искать в виде [8]:

$$P(t) = P(0) \exp(At), \quad (2)$$

где  $P(0) = (1, 0, \dots, 0)$  - вектор-строка, содержащий начальные условия;

$$P(t) = [P_i(t)]_{i=1}^8 \text{ - вектор-строка.}$$

$$\exp(At) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A^n t^n}{n!}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), & \alpha_5 &= 1 - (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3), \\ \alpha_2 &= 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3), & \alpha_6 &= 1 - (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3), \\ \alpha_3 &= 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3), & \alpha_7 &= 1 - (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3), \\ \alpha_4 &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3), \end{aligned}$$

Среднее время до первого пожара  $\tau_1$  можно найти из системы уравнений [7]:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\tau_1 - \lambda_1\tau_2 - \lambda_2\tau_3 - \lambda_3\tau_4 &= 1 \\ -\mu_1\tau_1 + (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\tau_2 - \lambda_2\tau_5 - \lambda_3\tau_6 &= 1 \\ -\mu_2\tau_1 + (\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3)\tau_3 - \lambda_1\tau_5 - \lambda_3\tau_7 &= 1 \\ -\mu_3\tau_1 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)\tau_4 - \lambda_1\tau_6 - \lambda_2\tau_7 &= 1 \\ -\mu_2\tau_2 - \mu_1\tau_3 + (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3)\tau_5 &= 1 \\ -\mu_3\tau_2 - \mu_1\tau_4 + (\mu_1 + \lambda_2 + \mu_3)\tau_6 &= 1 \\ -\mu_3\tau_3 - \mu_4\tau_2 + (\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3)\tau_7 &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

В тех случаях, когда  $\frac{\lambda_i}{\mu_i} \leq 0,01$ ,  $i = \overline{1,3}$ , тогда из системы (4) находим  $\tau_1$  - среднее время до первого пожара, если в начальный момент времени все элементы системы находились в безопасном состоянии.

$$\tau_1 \cong \frac{\mu_1\mu_2\mu_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_3(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)}, \quad (5)$$

где

$$\mu_i = \frac{1}{d_i}, \quad \lambda_i = \frac{1}{\bar{d}_i}, \quad i = \overline{1,3}.$$

Здесь  $\bar{d}_1, d_1$  - средний интервал времени между появлениями обрыва фазы АД и средняя длительность существования данного режима работы;  $\bar{d}_2, d_2$  - средний интервал времени между отказами средств защиты (релейная защита) и средняя длительность нахождения их в отказавшем состоянии;  $\bar{d}_3, d_3$  - средний интервал времени между появлениями горючего материала на корпусах АД и средняя длительность нахождения горючего материала (пыли) на корпусах АД.

В практических случаях всегда соблюдается следующее соотношение:  $d_2 \gg d_1$  и  $d_3 \gg d_1$ , тогда формулу (5) можно представить в виде

$$\tau_1 \cong \frac{\mu_2\mu_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}, \quad (6)$$

Если заданы интервал времени между проверками состояния пылевоздушной среды в цехе  $\Theta_3$  и интервал времени между проверками системы отключения коммутационных аппаратов  $\Theta_2$ , тогда  $\mu_3$  и  $\mu_2$  можно найти из формулы [9]:

$$\mu_j = \frac{1}{\Theta_j - \frac{1}{\lambda_j} [1 - \exp(-\lambda_j\Theta_j)]}, \quad (7)$$

При выполнении условий  $\lambda_j\Theta_j < 0,1$ ,  $j = \overline{2,3}$  из формулы (6) находим:

$$\mu_2 = \frac{2}{\Theta_2^2\lambda_2}, \quad (8)$$

$$\mu_3 = \frac{2}{\Theta_3^2\lambda_3}. \quad (9)$$

Подставляя формулы (8) и (9) в формулу (6) находим:

$$\tau_1 \cong \frac{4}{\lambda_1\lambda_2^2\lambda_3^2\Theta_2^2\Theta_3^2}. \quad (10)$$

Вероятность пожаров в цехе, где установлены АД в течение времени  $t$  равна вероятности нахождения системы в поглощающем состоянии 8, т.е.

$$Q(t) = P_8(t). \quad (11)$$

Вероятность  $P_8(t)$  находится из системы линейных дифференциальных уравнений (1).

**Пример.** Даны следующие исходные данные:

$\bar{d}_1 = 7340$  ч. – средний интервал времени между появлениями обрыва фазы в рассматриваемой сети, питающей АД;

$d_1 = 5,6 \cdot 10^{-5}$  ч. – среднее время срабатывания защиты при обрыве фазы АД;

$\bar{d}_2 = 15400$  ч. – средний интервал времени между отказами системы автоматического отключения защитного коммутационного аппарата;

$\Theta_2 = 2160$  ч. – интервал времени между проверками системы отключения защитного коммутационного аппарата;

$\bar{d}_3 = 520$  ч. – средний интервал времени между появлениями горючей пожароопасной пыли на корпусах электрооборудования;

$\Theta_3 = 180$  ч. – интервал времени между проверками наличия горючего материала на корпусах АД.

Определить вероятность пожаров в течение  $t = 8700$  ч. при эксплуатации в цехе АД и сравнить полученный результат с нормируемой ГОСТ 12.1.004-91 величиной  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Решение. Используя исходные данные примера находим:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ .

$$\lambda_1 = \frac{1}{7340} = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч,}$$

$$\mu_1 = \frac{10^5}{5,6} = 17857 \text{ 1/ч,}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{15400} = 6,49 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч,}$$

$$\mu_2 = \frac{1}{2160 - 15400 \left[ 1 - e^{-\frac{2160}{15400}} \right]} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч,}$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{520} = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч,}$$

$$\mu_2 = \frac{1}{180 - 520 \left[ 1 - e^{-\frac{180}{520}} \right]} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ 1/ч.}$$

Подставляя полученные данные в систему уравнений (1) с помощью ЭВМ находим  $P_2(8760) = Q(8760) = 4,42 \cdot 10^{-3}$ . Сравнение полученного результата с нормируемой величиной  $Q_0(8700) = 1 \cdot 10^{-6}$ , показало, что в данном случае пожарная безопасность цеха при эксплуатации АД не обеспечивается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кашолкин Б.И., Мешалкин Е.А. Тушение пожаров в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
2. Корогодский В.И., Кужиков С.Л., Паперно Л.Б. релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
3. Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г., Висящев А.А. Математические модели и анализ неполнофазных режимов ЛЭП. – Техническая электродинамика, 1985, №4.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240с., ил.
5. Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Корощенко А.В. Исследование температур узлов асинхронного двигателя при несимметрии питающих напряжений. – Электротехника
6. Фёдоров М.М., Денник В.Ф., Михайлов В.Е., Малеев Д.М. Основы построения систем контроля расхода ресурса изоляционных материалов обмоток электрических машин. – Наукові праці Донецького Державного технічного університету. – Донецк. – 2002. – с.57-60.
7. Шевченко О.А. О взрывах пылевоздушной смеси элеваторов от токов короткого замыкания// Материалы научно-практической конференции «Донбасс – 2020: наука и техника – производству». – Донецк. – 2002. – с. 390-397.
8. Тихонов В.И., Миронов В.А. Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977. – 340 с.
9. Ковалев А.П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов. – Электричество. – 1991, №8.

Надано до редакції:

Рекомендовано до друку:

25.09.2003

д.т.н., проф. Ковальов О.П.