

УДК 621.313.333.2

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕЖИМА ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Курашкин С.Ф., инженер

Телюта Р.В., инженер

*Таврический государственный агротехнологический университет*

*пр. Б. Хмельницкого 18, г. Мелитополь, 72312, Украина*

*Тел. +38(0619)42-32-63*

**Аннотация** – проведено исследование превышения температуры обмотки погружного электродвигателя как системы трех тел. Установлено влияние кратности тока двигателя на коэффициенты потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляции.

**Ключевые слова** – эквивалентная тепловая схема электродвигателя, нагрев электродвигателя, преобразование электрической энергии, скорость теплового износа изоляции, коэффициент потерь электрической энергии, коэффициент расхода ресурса изоляции.

**Постановка проблемы.** Эксплуатационная надежность погружных электродвигателей остается невысокой, что ведет к перебоям технологического цикла подачи воды. Поэтому требуется совершенствование систем диагностирования эксплуатационных режимов работы с целью снижения аварийности электродвигателей.

**Анализ последних исследований.** Существующие методы исследования режимов работы погружных электродвигателей, как правило, в качестве критерия оценки используют силу электрического тока, не используя такой показатель, как расход ресурса изоляции обмоток электродвигателя.

**Формулирование целей статьи.** Целью статьи является установление зависимости расхода ресурса изоляции обмотки погружного электродвигателя в функции кратности силы электрического тока.

**Основная часть.** К основным эксплуатационным воздействиям, влияющим на температуру обмотки статора погружного электродвигателя и приводящим к выходу ее из строя, относятся длительная перегрузка по току и несимметрия напряжения питания, в том числе неполнофазный режим.

Электродвигатель с короткозамкнутым ротором является сложным сочетанием разнородных тел, обладающих разными теплофизическими свойствами. С точки зрения нагрева большинство схем функциональной диагностики погружных электродвигателей, где учитывается нагрев двигателя, основано на представлении его тепловой схемы телом с одним источником тепловыделения [1, 2] или системы двух тел [3]. Чем большее число эквивалентных эле-

ментов может быть предложено для замены отдельных частей электрической машины, тем точнее окажется результат моделирования. Однако усложнение тепловой схемы должно сочетаться с достижимой точностью результатов.

Учитывая, что основная доля суммарных потерь в погружном электродвигателе типа ПЭДВ приходится на обмотки статора и ротора, а также пакет статора, тепловая модель электродвигателя (рис. 1) рассматривается как система трех тел: обмотка статора (1); обмотка ротора (2); магнитопровод статора (3).

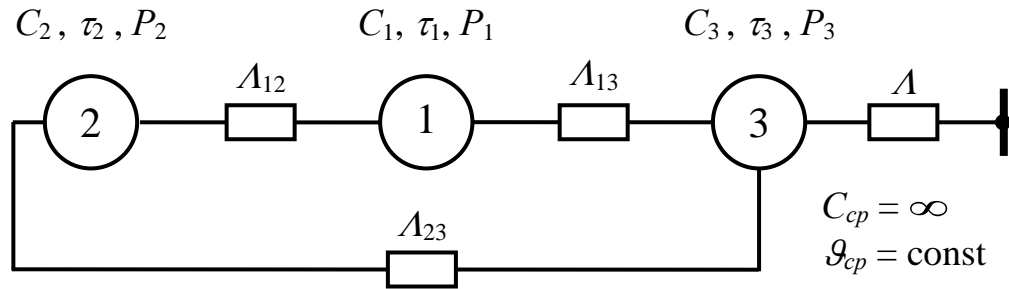


Рис. 1. Тепловая схема замещения электродвигателя ПЭДВ

$C_1, C_2, C_3$  – теплоёмкости соответствующих тел, Дж/°С;  $A_{12}, A_{13}, A_{23}, A$  – тепловые проводимости между телами, Вт/°С;  $P_1, P_2, P_3$  – потери активной мощности в соответствующих телах, Вт;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – превышения температур соответствующих тел над температурой окружающей среды, °С;  $C_{cp}$  – теплоёмкость окружающей среды, Дж/°С;  $G_{cp}$  – температура окружающей среды, °С.

На основании уравнений теплового баланса, составленного для каждого из тел, с помощью операторного метода расчета была получена зависимость превышения температуры обмотки статора:

$$\tau_1(t) = \tau_{1y} - \tau'_{1y} e^{t/T'} - \tau''_{1y} e^{t/T''} - \tau'''_{1y} e^{t/T'''} \quad (1)$$

где  $\tau_{1y}$  – установившееся превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С;

$\tau'_{1y}, \tau''_{1y}, \tau'''_{1y}$  – значения установившихся парциальных превышений температуры обмотки, °С;

$T', T'', T'''$  – парциальные постоянные времени нагрева обмотки, с.

В свою очередь

$$\tau_{1y} = \frac{d_1}{d}; \quad (2)$$

$$\tau'_{1y} = \frac{b_1 p_1^2 + c_1 p_1 + d_1}{p_1 (3a p_1^2 + 2b p_1 + c)}; \quad (3)$$

$$\tau''_{1y} = \frac{b_1 p_2^2 + c_1 p_2 + d_1}{p_2 (3a p_2^2 + 2b p_2 + c)}; \quad (4)$$

$$\tau'''_{1y} = \frac{b_1 p_3^2 + c_1 p_3 + d_1}{p_3 (3a p_3^2 + 2b p_3 + c)}. \quad (5)$$

Здесь

$$d_1 = A_{12}k^2(P_{1н} + P_{2н})(A + A_{13} + A_{23}) + k^2P_{1н}A_{23}(A + A_{13}) + k^2P_{2н}A_{13}A_{23} + P_3(A_{13}A_{12} + A_{13}A_{23} + A_{12}A_{23}); \quad (6)$$

$$d = A_{12}A_{23}A + A_{12}A_{13}A + A_{13}A_{23}A - \alpha k^2P_{1н}(A_{12}A + A_{12}A_{13} + A_{12}A_{23} + A_{23}A + A_{13}A_{23}); \quad (7)$$

$$b_1 = C_2C_3k^2P_{1н}; \quad (8)$$

$$c_1 = C_2k^2P_{1н}(A + A_{13} + A_{23}) + C_3k^2P_{1н}(A_{12} + A_{23}) + C_3k^2P_{2н}A_{12} + C_2P_3A_{13}; \quad (9)$$

$$a = C_1C_2C_3; \quad (10)$$

$$b = C_1C_2(A + A_{13} + A_{23}) + C_1C_3(A_{12} + A_{23}) + C_2C_3(A_{12} + A_{13} - \alpha k^2P_{1н}); \quad (11)$$

$$c = A_{12}(C_1 + C_2)(A + A_{13} + A_{23}) + C_1A_{23}(A + A_{13}) + C_2A_{13}(A + A_{23}) + C_3(A_{13}A_{12} + A_{13}A_{23} + A_{12}A_{23}) - \alpha k^2P_{1н}(C_2A_{13} + C_2A_{23} + C_3A_{12} + C_3A_{23} + C_2A); \quad (12)$$

$$T' = -\frac{1}{p_1}; \quad T'' = -\frac{1}{p_2}; \quad T''' = -\frac{1}{p_3}; \quad (13)$$

$p_1, p_2, p_3$  – корни характеристического уравнения  $3p^2a + 2pb + c$ ;  
 $k$  – кратность тока электродвигателя.

На основании результатов расчета парциальных составляющих исследуемого электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 была получена зависимость для номинального режима:

$$\tau_1(t) = 62,8 - 44,8e^{(-t/1136)} - 9,7e^{(-t/146)} - 8,3e^{(-t/43)}, \quad (14)$$

которая приведена на рис. 2. Видно, что парциальные составляющие с постоянными времени  $T', T''$  оказывают влияние только на начальной стадии нагрева.

Полученная кривая нагрева электродвигателя как системы трех тел  $\tau_1(t)$  может быть аппроксимирована двумя экспонентами.

Первая экспонента моделирует быстрый процесс нагрева в начальной стадии с холодного состояния и характеризуется постоянной времени  $3T''$ :

$$\tau_{1.1}(t) = \tau_{1\phi} \left(1 - e^{t/3T''}\right), \quad (15)$$

или для номинального режима

$$\tau_{1.1}(t) = 62,8 \left(1 - e^{t/438}\right). \quad (16)$$

Вторая экспонента моделирует процесс нагрева с горячего состояния и характеризуется постоянной времени  $T'$ :

$$\tau_{1.2}(t) = \tau_{1\gamma} \left(1 - e^{-t/T'}\right) + \tau_{нач} e^{-t/T'}, \quad (17)$$

или для номинального режима

$$\tau_{1.2}(t) = 62,8 \left(1 - e^{-t/1136}\right) + 18e^{-t/1136}, \quad (18)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальное значение превышения температуры обмотки, °С.

Последнее может быть определено следующим образом:

$$\tau_{нач} = \tau_{1\gamma} - \tau_{1\phi} = \tau_{1\gamma}'' + \tau_{1\gamma}'''. \quad (19)$$

Результат аппроксимации представлен на рис. 3.

Как видно из (2) – (9), (11) – (13) парциальные составляющие, а соответственно и установившееся превышение температуры обмотки статора зависят от кратности тока электродвигателя  $k$ .

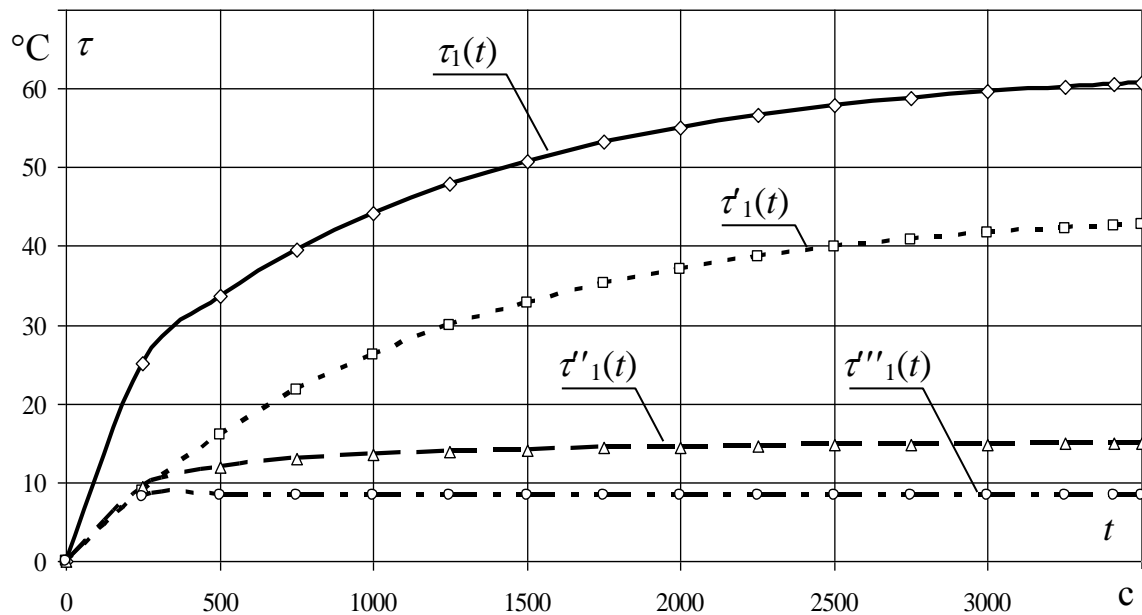


Рис. 2. Парциальные составляющие  $\tau'_1(t)$ ,  $\tau''_1(t)$ ,  $\tau'''_1(t)$  кривой нагрева  $\tau_1(t)$

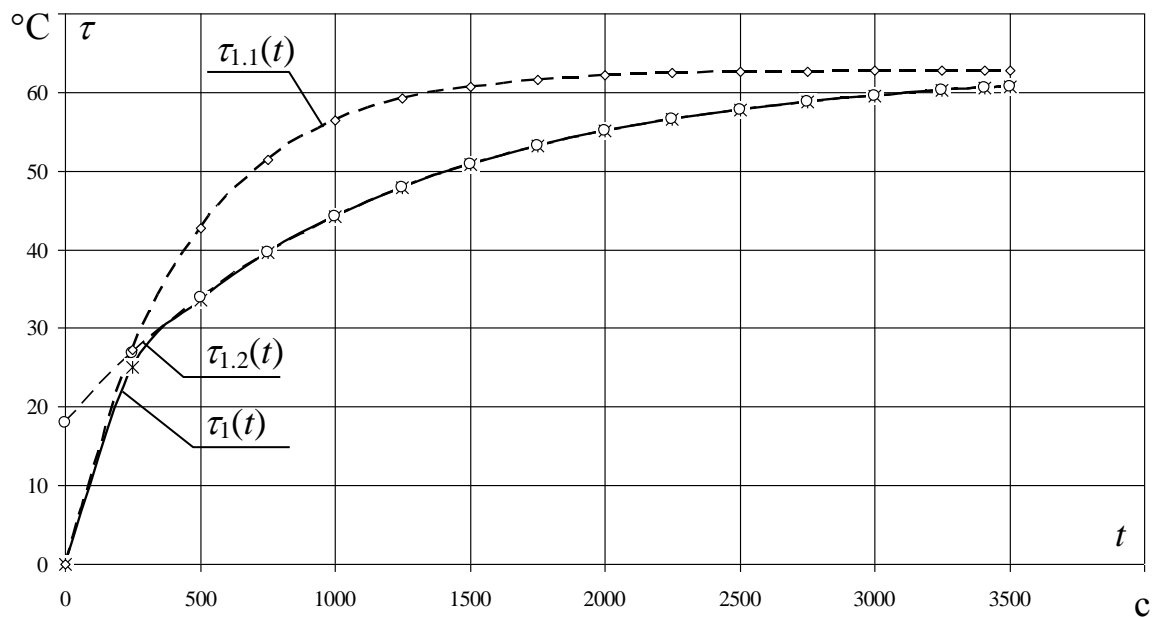


Рис. 3. Аппроксимация зависимости  $\tau_1(t)$

Превышение тока выше номинального ведет к расходу ресурса изоляции электродвигателя, который характеризуется скоростью расхода ресурса изоляции  $\varepsilon$ , которая показывает, сколько базовых часов расходуется за один час работы электродвигателя и рассчитывается по выражению [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left( \frac{1}{\theta_{1n}} - \frac{1}{\theta_{1y}} \right)}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_n$  – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$\theta_{1n}$  – абсолютная номинальная температура изоляции данного класса, К;  
 $\theta_{1y}$  – фактическая абсолютная установившаяся температура изоляции, К;  
 $B$  – показатель, характеризующий изоляцию данного класса, К.

В свою очередь, абсолютная установившаяся температура изоляции:

$$\theta_{1y} = \tau_{1y} + \vartheta_{cp} + 273. \quad (21)$$

Введем понятие коэффициента потерь электрической энергии в асинхронном электродвигателе, который представляет собой отношение фактических потерь активной мощности  $\Delta P$  к номинальным  $\Delta P_n$ :

$$k_n = \frac{\Delta P}{\Delta P_n}. \quad (22)$$

В свою очередь, номинальные потери состоят из номинальных потерь в стали  $\Delta P_{cn}$  и номинальных потерь в меди  $\Delta P_{mn}$ :

$$\Delta P_n = \Delta P_{cn} + \Delta P_{mn}. \quad (23)$$

Фактические потери активной мощности представляют собой сумму номинальных потерь в стали и фактических потерь в меди, которые пропорциональны квадрату кратности силы электрического тока электродвигателя:

$$\Delta P = \Delta P_{cn} + k^2 \Delta P_{mn}. \quad (24)$$

Таким образом, коэффициент потерь энергии:

$$k_n = \frac{\Delta P_{cn} + k^2 \Delta P_{mn}}{\Delta P_{cn} + \Delta P_{mn}}, \quad (25)$$

или в другом виде

$$k_i = \frac{a + k^2}{a + 1}, \quad (26)$$

где  $a$  – отношение потерь в стали к потерям в меди при номинальном режиме;

$$a = \frac{\Delta P_{cn}}{\Delta P_{mn}}. \quad (27)$$

Введем также понятие коэффициента расхода ресурса изоляции, которое представляет собой отношение скорости теплового износа изоляции  $\varepsilon$  к номинальному значению  $\varepsilon_n$ :

$$k_p = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}. \quad (28)$$

Анализ процесса преобразования электроэнергии в электродвигателе показывает, что с помощью коэффициентов  $k_n$  и  $k_p$  возможно функциональное диагностирование электродвигателей. При этом необходимо учитывать непрерывно текущий коэффициент расхода ресурса по текущему превышению температуры изоляции над температурой окружающей среды:

$$k_p = e^{B \left( \frac{1}{\theta_{1n}} - \frac{1}{\tau_1 + \vartheta_{cp} + 273} \right)}, \quad (29)$$

где  $\tau_1$  – текущее превышение температуры изоляции электродвигателя, °С.

Условие нормального режима преобразования электроэнергии в погружном электродвигателе есть:

$$k_n \leq 1 \text{ и } k_p \leq 1. \quad (30)$$

**Выводы.** Таким образом, функциональное диагностирование эксплуатационного режима работы погружного электродвигателя возможно по текущей кратности тока, от которой зависит превышение температуры обмотки статора. Критерием режима работы электродвигателя предложено считать коэффициенты потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляции.

Литература.

1. *Гамзаев М.М.* Повышение эксплуатационной надежности погружных электронасосных установок с помощью температурной защиты. Автореф. дисс. на соиск учен. степени канд. техн. наук. – Челябинск: 1987, 20 с.
2. Устройство для тепловой защиты трехфазных асинхронных электродвигателей: А. с. 1772861. СССР, МКИ 4 Н02 Н5/04 / В. М. Ходырев, Ф.Г. Марьяхин, А.Н. Гераськов (СССР). – № 4867698/07; Заявлено 20.09.90; Опубл. 30.10.92, Бюл. № 40. – 4 с.
3. *Овчаров В. В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. – К.: УСХА, 1990. – 168 с.

## ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕЖИМУ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Курашкін С.Ф., Телюта Р.В.

### *Анотація*

Проведено дослідження перевищення температури обмотки заглибного електродвигуна як системи трьох тіл. Встановлений вплив кратності струму двигуна на коефіцієнти втрати електричної енергії та витрати ресурсу ізоляції.

## PUMP ELECTROMOTOR MODE DIAGNOSTIC

S. Kurashkin, R. Telyuta

### *Summary*

There was researched the wiring temperature of pump electromotor which is presented as a system of three heating bodies. The influence of electromotor current ratio upon factors of electric energy losses and consumption of insulation resource has been defined.