

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ВСТРОЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Стройников В.Г.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Луганской обл., Алчевск, пр. Ленина 16, ДонГТУ, кафедра "Электрические машины и аппараты"
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dgmi.edu.ua

Методика визначення динамічної похибки вмонтованого температурного захисту, що базується на експериментальних даних теплових випробувань електродвигуна із застосуванням математичної моделі.

Методика определения динамической погрешности встроенной температурной защиты, основанная на экспериментальных данных тепловых испытаний электродвигателя с использованием математической модели.

Встроенные температурные защиты с использованием термодатчиков-позисторов получили широкое применение в сфере эксплуатации электродвигателей (ЭД) переменного тока, ввиду большей надежности и точности контроля температуры нагрева ЭД по сравнению с существующими.

Позисторы представляют собой полупроводниковые преобразователи температуры (ППТ) с положительным температурным коэффициентом изменения электрического сопротивления, имеют определенное значение температуры срабатывания, которое изменить нельзя, и встраиваются, как правило, в лобовые части обмотки статора (ЭД).

Однако, несмотря на явные преимущества позисторов в сравнении с другими термодатчиками: небольшие размеры и время реагирования, высокую термочувствительность, калиброванную температуру срабатывания и др.; эффективная температурная защита ЭД обеспечивается лишь при незначительных скоростях роста температуры нагрева обмоток ЭД. При более высоких скоростях роста температуры нагрева обмоток ЭД, зависящих от величины перегрузки ЭД, позисторная защита срабатывает с запаздыванием, которое можно квалифицировать как динамическую погрешность Δv_d встроенной температурной защиты, или как разность температур в момент срабатывания защиты между температурой изоляции обмотки ЭД и классификационной температурой срабатывания термодатчика-позистора. Незапланированный перегрев изоляции обмоток до срабатывания термодатчика-позистора отрицательно сказывается на сроке службы ЭД.

На фоне множества публикаций по разработке и применению позисторных защит лишь ограниченное их число посвящено вопросам динамической погрешности, например [1, 2, 3]. В них упоминаются или рассматриваются общие вопросы динамической погрешности встроенной защиты без учета особенности защищаемого ЭД. Поэтому разработка методики определения величины динамической погрешности встроенной температурной защиты для конкретной категории ЭД, уточнение факторов, от которых она зависит, является актуальной задачей.

Целью данной работы является определение динамической погрешности встроенной температурной (позисторной) защиты ЭД экспериментально-расчетным методом с использованием математической модели.

Введем физическую модель измерения температуры поверхности лобовой части статорной обмотки ЭД на примере ЭД 2ЭДКОФ 250М4 с жесткими секциями для определения динамической погрешности узла ППТ (рис. 1) при следующих допущениях [4]:

1. Распределение температуры по объему ППТ равномерное, так что температура во всех точках его объема в момент времени t есть $V_s(t)$.

2. Теплообмен ППТ с телом (обмоткой ЭД), имеющим температуру $V_t(t)$, и средой (охлаждающим воздухом) с температурой $V_c(t)$ может происходить теплопроводностью, конвекцией и излучением, однако коэффициент теплопроводности k_t между ППТ и телом остается неизменным в процессе измерений.

3. Внутри ППТ действует источник теплоты с мощностью тепловыделения $W_n(t)$.

4. Теплоемкость среды и тела, окружающих ППТ, настолько велики, что теплота выделяемая от ППТ в среду или тело, не влияет на изменение их температуры.

Исходное дифференциальное уравнение теплообмена ППТ для приведенной физической модели может быть записано в следующем виде:

$$C_{\dot{y}} \cdot \frac{dV_{\dot{y}}(t)}{dt} + \alpha \cdot S_c \cdot [v_{\dot{y}}(t) - v_c(t)] + k_{\dot{o}} \cdot S_{\dot{o}} \cdot [v_{\dot{y}}(t) - v_t(t)] = W_{\dot{n}}(t) \quad (1)$$

где $C_{\dot{y}}$ – полная теплоемкость ППТ, Дж/°С; α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, Вт/(м²°С); k_t – коэффициент теплопроводности между телом обмотки ЭД (лобовой частью) и ППТ, Вт/(м²°С); S_c – возможная площадь поверхности теплообмена узла термодатчика с окружающей средой, м²; S_t – возможная площадь поверхности соприкосновения ППТ с телом обмотки ЭД, м².

Общая формула решения уравнения (1) относительно $v_{\dot{y}}$ имеет вид:

$$v_{\dot{y}} = e^{-\frac{t}{\varepsilon_{\dot{o}i}}} \left[\int e^{\frac{t}{\varepsilon_{\dot{o}i}}} (\lambda_1 \cdot v_n + \lambda_2 \cdot v_{\dot{o}} + \lambda_3) \cdot dt + C \right] \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\dot{o}i} = \frac{\tilde{N}_{\dot{y}}}{\alpha \cdot S_c + k_{\dot{o}} \cdot S_{\dot{o}}}$ – постоянная времени узла тер-

модатчика; $\lambda_1 = \frac{\alpha \cdot S_c}{C_{\dot{y}}}$; $\lambda_2 = \frac{k_{\dot{o}} \cdot S_{\dot{o}}}{C_{\dot{y}}}$; $\lambda_3 = \frac{W_{\dot{n}}}{C_{\dot{y}}}$; C –

постоянная интегрирования.

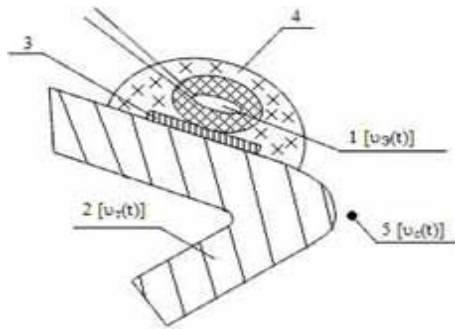


Рис. 1. Физическая модель изменения температуры поверхности лобовой части статорной обмотки ЭД: 1 – термочувствительный элемент ППТ; 2 – фрагмент поверхности лобовой части статорной обмотки ЭД; 3 – контактный зазор, заполненный клеящим компаундом; 4 – оболочка для ППТ из эпоксидного компаунда; 5 – окружающая среда; $V_r(t)$, $V_3(t)$, $V_c(t)$ – соответственно температуры нагрева тела (поверхности лобовой части секции статорной обмотки ЭД); термочувствительного элемента (ППТ - позистора); окружающей среды (охлаждающего воздуха внутри ЭД).

В дальнейшем уравнение (2) используется для определения $v_3(t)$ как при экспоненциальном, так и при линейном законах изменения $v_r(t)$.

При экспоненциальном законе изменения температуры нагрева обмотки ЭД были приняты следующие законы изменения $v_r(t)$ и $v_c(t)$:

$$v_{\delta}(t) = \left[v_{\delta.i.} + \left(1 - 0,74 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - 0,26 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \tau_{\delta \text{н} \delta . \delta} \right], \quad (3)$$

$$v_c(t) = \left[v_{\text{н.и.}} + \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right) \cdot v_{\delta \text{н} \delta . \text{н}} \right]. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) были получены в результате обработки экспериментальных данных тепловых испытаний электродвигателя 2ЭДКОФ 250 М4 с классом нагревостойкости изоляции Н в лаборатории электрических машин ОАО "Первомайский электро-механический завод им. К. Маркса" (г. Первомайск), при этом уравнение (3) характеризует закон изменения $v_r(t)$ в зоне расположения ППТ на лобовой части статорной обмотки ЭД, а уравнение (4) – закон изменения температуры охлаждающего воздуха (среды) вблизи этой же зоны.

Постоянная интегрирования C определялась из начальных условий: $v_3(0) = v_{3.н}$. В результате решения уравнения (2) при экспоненциальном законе изменения $v_r(t)$ получаем:

$$v_y(t) = \left[v_{y.i.} \cdot e^{-\frac{t}{\epsilon_{\delta i}}} + k \left(e^{-\frac{t}{T_c}} - e^{-\frac{t}{\epsilon_{\delta i}}} \right) + M \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{\epsilon_{\delta i}}} \right) \right] + L \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{\epsilon_{\delta i}}} \right) + N \left(1 - e^{-\frac{t}{\epsilon_{\delta i}}} \right) \quad (5)$$

где $k = \frac{\alpha \cdot S_c \cdot (v_{\text{н.и.}} - v_{\delta \text{н} \delta . \text{н}})}{C_y \left(\frac{1}{\epsilon_{\delta i}} - \frac{1}{\delta_{\text{н}}} \right)}$;

$$M = \frac{0,74 \cdot k_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \tau_{\delta \text{н} \delta . \delta}}{C_y \left(\frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\epsilon_{\delta i}} \right)}; \quad L = \frac{0,26 \cdot k_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \tau_{\delta \text{н} \delta . \delta}}{C_y \left(\frac{1}{\delta_2} - \frac{1}{\epsilon_{\delta i}} \right)};$$

$$N = \frac{\alpha \cdot S_c \cdot v_{\delta \text{н} \delta . \text{н}} + k_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \tau_{\delta \text{н} \delta . \delta} + W_I}{C_y \cdot \epsilon_{\delta i}}.$$

Апробация уравнения (5) с целью определения динамической погрешности $\Delta v_{\text{д}}$ производилась для длительного режима работы ЭД при номинальной нагрузке с учетом экспериментальных данных, полученных при тепловых испытаниях электродвигателя 2ЭДКОФ 250 М4. Тепловые испытания указанного ЭД производились с "холодного" состояния при $v_{\text{с.н.}} = 13,9^{\circ}\text{C}$. В лобовой части статорной обмотки ЭД были встроены три термодатчика-позистора типа СТ 14-2-160 с классификационной температурой срабатывания 160°C , относительно которой в дальнейшем определялась динамическая погрешность срабатывания температурной защиты $\Delta v_{\text{д}}$. Экспериментальная кривая нагрева характерного участка обмотки ЭД, со встроенным на нем термодатчиком-позистором, заменялась эмпирическим уравнением (3), полученным по методу Г.М. Кондратьева [5].

Для дальнейших расчетов экспериментально-расчетным путем были установлены значения:

$$\begin{aligned} v_{\text{т.н.}} = v_{\text{с.н.}} &= 13,9^{\circ}\text{C}; & T_1 &= 4500 \text{ с} \\ v_{\text{уст.т.}} &= 156,1^{\circ}\text{C}; & T_2 &= 2577 \text{ с} \\ \tau_{\text{уст.т.}} &= 14,2^{\circ}\text{C}; & T_c &= 3900 \text{ с} \\ v_{\text{уст.с.}} &= 126,3^{\circ}\text{C}; & S_c &= 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \\ \alpha &= 18,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}); & S_c &= 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \\ k_{\text{т.}} &= 27,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}); & W_{\text{п}} &= I_{\text{п}}^2 \cdot R_{\text{п}} = 0,059 \text{ Вт} \\ C_3 &= 0,148 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}; & & \end{aligned}$$

Расчет постоянной времени узла термодатчика $\epsilon_{\text{тн}}$ производился с учетом критерия Ψ_1 введенного Г.М. Кондратьевым, являющимся численной характеристикой того, насколько неравномерно распределение температуры в узле термодатчика:

$$\epsilon_{\delta i} = \frac{C_y}{(\alpha \cdot S_c + k_{\delta} \cdot S_{\delta})} \cdot \frac{1}{\Psi_1}, \quad (6)$$

Если распределение температуры в системе приближается к равномерному, то $\Psi_1 \rightarrow 1$. В случае интенсификации процесса теплообмена $\Psi_1 \rightarrow 0$.

Для длительного режима работы ЭД с "холодного" состояния при номинальной нагрузке расчетное значение критерия $\Psi_1 = 0,9243$. Расчетные значения $v_r(t)$ и $v_3(t)$ для длительного режима работы ЭД с "холодного" состояния при номинальной нагрузке ($n = 1$, где n – коэффициент перегрузки по току) приведены в табл. 1. Расчет $v_r(t)$ и $v_3(t)$ для режимов перегрузки ЭД при $n = 1,2$; $n = 1,5$; $n = 2$; $n = 3$; $n = 4$ производились аналогично по формулам (3) и (5) с "холодного" состояния ЭД, как худшего случая с точки зрения точности срабатывания встроенной температурной защиты, а динамическая погрешность $\Delta v_{\text{д}}$ исчислялась в момент времени t , когда $v_3(t) = 160^{\circ}\text{C}$.

Расчетные значения $v_T(t)$ и $v_3(t)$ при $n = 1$, $v_{T,H}(t) = v_{3,H}(t) = v_{c,H}(t) = 13,9^\circ\text{C}$, $W_H = 0,059 \text{ Вт}$

$t, \text{с}$	600	1800	3600	4800	7200	10800	14400	18000	21600
$v_T, ^\circ\text{C}$	34,71	67,17	99,67	114,14	132,59	145,99	151,67	154,1	155,22
$v_3, ^\circ\text{C}$	39,54	69,89	100,73	114,28	132,23	144,87	150,03	152,15	153,04

*) Для справки приведем паспортные данные электродвигателя 2 ЭДКОФ 250 М4: $U_H = 660 \text{ В}$; $I_H = 60,5 \text{ А}$; $P_H = 55 \text{ кВт}$; $\cos\varphi = 0,86$; $\eta = 90,46$.

При расчетах учитывалось изменение ранее приведенных параметров в связи с интенсификацией процессов нагрева ЭД при перегрузках, рассматривая их как общую зависимость от n – коэффициента перегрузки по току. Учитывалось изменение: $\alpha = f(n)$; $T_1 = f(n)$; $\Psi_1 = f(n)$; $\varepsilon_{TH} = f(n)$; $v_{уст.т} = f(n)$; $v_{уст.с} = f(n)$.

Значение температуры $v_{уст.т}(n)$ определялось по формуле [6]:

$$v_{\text{обд.д}}(n) = \tau_{\text{обд.д.iii}} \cdot n^2 + v_{\text{д.и}}, \quad (7)$$

Значение температуры $v_{уст.с}(n)$ определялось по аналогичной формуле:

$$v_{\text{обд.с}}(n) = \tau_{\text{обд.с.iii}} \cdot n^m + v_{\text{с.и}}, \quad (8)$$

где $m = f(n)$ – коэффициент, учитывающий инерционные свойства охлаждающей среды.

Значения $\alpha = f(n)$; $T_1 = f(n)$; $\Psi_1 = f(n)$; $\varepsilon_{TH} = f(n)$ и $m = f(n)$ приводятся ниже в виде графиков на рис. 2, рис. 3 и рис. 4.

В качестве примера в табл. 2 приводятся расчетные значения $v_T(t)$ и $v_3(t)$ для перегрузки с $n = 1,2$.

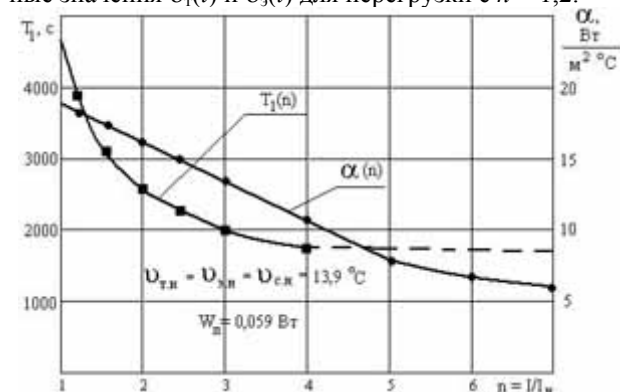


Рис. 2 – Зависимость постоянной времени переходного процесса T_1 и коэффициента теплоотдачи в окружающую среду α от кратности тока перегрузки ЭД

Таблица 2

Расчетные значения $v_T(t)$ и $v_3(t)$ при $n = 1,2$, $v_{T,H}(t) = v_{3,H}(t) = v_{c,H}(t) = 13,9^\circ\text{C}$, $W_H = 0,059 \text{ Вт}$

$t, \text{с}$	600	1800	3600	4800	7200	10800
$v_T, ^\circ\text{C}$	46,31	96,11	144,59	165,45	190,92	208,02
$v_3, ^\circ\text{C}$	48,27	94,83	140,35	160,05	185,76	203,29

*) Для справки: $\Delta v_d = 5,4^\circ\text{C}$.

Из-за ограниченности объема статьи для последующих кратностей тока $n = 1,5$; $n = 2$; $n = 3$; $n = 4$ приводится лишь зависимость $\Delta v_d = f(n)$ на рис. 4.

При значительных перегрузках ЭД по току, включая режим КЗ, изменение $v_T(t)$ подчиняется линейному закону:

$$v_{\text{д}}(t) = v_{\text{д.и}} + b \cdot t_{\text{д}}, \quad (9)$$

где b – скорость роста температуры обмотки, $^\circ\text{C}/\text{с}$.

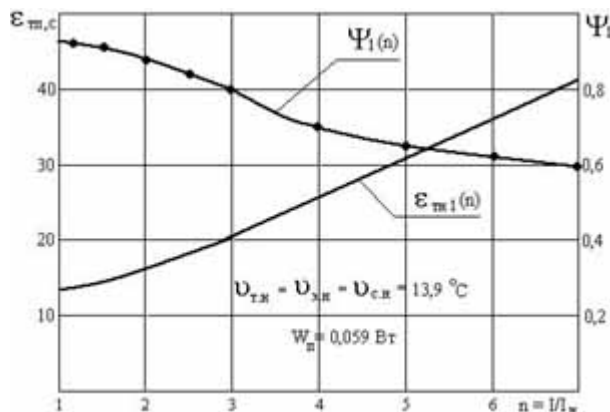


Рис. 3 – Зависимость критерия Ψ_1 и постоянной времени узла термодатчика ε_{TH} от кратности тока перегрузки ЭД.

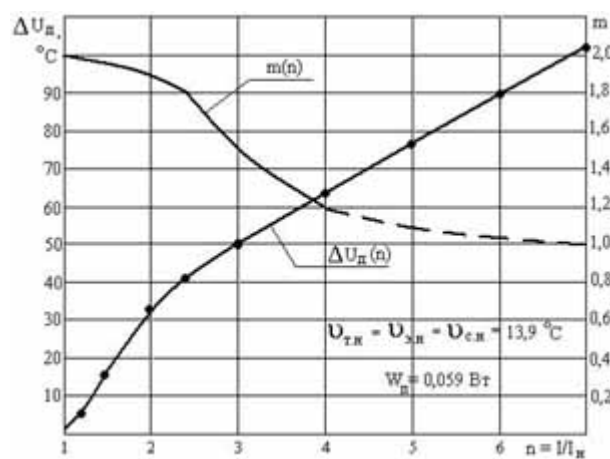


Рис. 4 – Зависимость коэффициента m и динамической погрешности Δv_d от кратности тока перегрузки ЭД.

Таблица 3

Расчетные значения $v_T(t)$ и $v_3(t)$ при $n = 5$. $v_{T,H}(t) = v_{3,H}(t) = v_{c,H}(t) = 13,9^\circ\text{C}$; $b = 2,044^\circ\text{C}/\text{с}$; $k = 1,18$; $W_H = 0,059 \text{ Вт}$

$t, \text{с}$	10	20	50	80	100	150	190
$v_T, ^\circ\text{C}$	34,34	54,78	116,1	177,42	218,3	320,5	402,26
$v_3, ^\circ\text{C}$	21,56	31,07	71,13	117,25	149,56	232,21	299,2

*) Для справки: $\Delta v_d = 76^\circ\text{C}$.

Принимая, что при указанных условиях $v_c = v_{c,H} = \text{const}$, и подставляя уравнение (9) в общую формулу (2), получаем значение $v_3(t)$ в следующем виде:

$$v_{\text{д}}(t) = \left[v_{\text{д.и}} \cdot e^{-\frac{t}{\varepsilon_{\text{д}}}} + \varepsilon_{\text{д}} \left\{ \xi \cdot b \cdot t + (x - \xi \cdot \varepsilon_{\text{д}}) \cdot b \left(1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon_{\text{д}}}} \right) \right\} \right], \quad (10)$$

$$\text{где } \xi = \frac{k_{\text{д}} \cdot S_{\text{д}}}{C_{\text{д}}}; \quad x = \frac{\alpha \cdot S_{\text{с}} \cdot v_{\text{н.и}} + k_{\text{д}} \cdot S_{\text{д}} \cdot v_{\text{д.и}} + W_1}{C_{\text{д}}}$$

Расчеты скорости роста температуры обмотки для кратностей тока перегрузки $n = 5$; $n = 6$; $n = 7$ производились по формуле:

$$b = \frac{j_i^2 \cdot 10^{12}}{\gamma \cdot p \cdot C_i} \cdot \frac{1}{k}, \text{ } ^\circ\text{C/c}, \quad (11)$$

где j_i – плотность тока, А/мм² в обмотке статора ЭД; $\gamma = 54,347 \cdot 10^6$ Ом/м – удельная электрическая проводимость меди; $p = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность меди; $C_M = 400$ Дж/(кг °С) – удельная теплоемкость меди; $k > 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки ЭД при нагреве током перегрузки.

*) значение k составляет для: $n = 5 \rightarrow k = 1.18$; $n = 6 \rightarrow k = 1.15$; $n = 7 \rightarrow k = 1.14$.

Расчет плотности тока j_i производился по формуле:

$$j_i = \frac{I_n \cdot n}{S_i}, \text{ А/мм}^2, \quad (12)$$

где $I_n = 60,5$ А – номинальный ток ЭД; n – коэффициент перегрузки по току; $S_M = 2,5 \times 5,6$ мм² – сечение обмоточного провода статорной обмотки (по паспортным данным на 2ЭДКОФ 250 М4).

Расчет значений $v_T(t)$ и $v_S(t)$ при линейном законе изменения температуры обмотки ЭД производился также для "холодного" состояния ЭД. В качестве примера в табл. 3 приведены расчетные значения $v_T(t)$ и $v_S(t)$ для коэффициента перегрузки по току $n = 5$.

Для последующих кратностей тока $n = 6$ и $n = 7$ приводится лишь зависимость $\Delta v_d = f(n)$.

В качестве контрольной точки для проверки методики расчета Δv_d при линейном законе изменения $v_T(t)$ в лаборатории электрических машин ОАО "Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса" были проведены испытания электродвигателя 2ЭДКОФ 250 М4 в режиме близком к КЗ при пониженном напряжении, кратность тока перегрузки при этом составила: $n = 5,232$. Встроенная температурная защита сработала с динамической погрешностью $\Delta v_d = 83,3$ °С. Расчетное значение $\Delta v_d = 79$ °С при той же перегрузке, что свидетельствует о достаточно высокой степени достоверности разработанной методики определения динамической погрешности Δv_d . Различие в температурах может быть объяснено приборной погрешностью измерения температуры нагрева обмотки ЭД. Как следует из приведенной информации, динамическая погрешность Δv_d зависит от многих факторов, в том числе и от мощности тепловыделения W_n внутри ППТ, на что не обращается должного внимания ни в одной публикации по встроенным температурным защитам. В качестве примера приведен на рис. 5 изменение динамической погрешности Δv_d от мощности тепловыделения в ППТ (позисторе) при $n = 7$ и нагреве ЭД с "холодного" состояния для следующих значений W_n :

1) $I_n = 0,0248$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,059$ Вт.

Примечание: I_n – величина тока, протекающего через позистор; R_n – величина электрического сопротивления одного из позисторов во время тепловых испытаний электродвигателя 2 ЭДКОФ 250 М4;

2) $I_n = 0,03$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,086$ Вт.

3) $I_n = 0,035$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,1176$ Вт.

4) $I_n = 0,040$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,1536$ Вт.

5) $I_n = 0,045$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,1944$ Вт.

6) $I_n = 0,050$ А; $R_n = 96$ Ом $\rightarrow W_n = 0,24$ Вт.

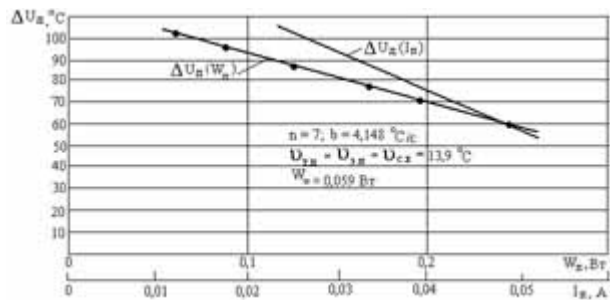


Рис. 5 – Зависимость $\Delta v_d = f(W_n)$ и $\Delta v_d = f(I_n)$ при $n = 7$ и нагреве ЭД с "холодного" состояния

Как видно из приведенной зависимости $\Delta v_d(W_n)$, динамическая погрешность Δv_d уменьшается почти в 2 раза. Это дает возможность использовать электрическую коррекцию для компенсации Δv_d .

ВЫВОД

Разработанная методика определения Δv_d , основанная на экспериментальных данных тепловых испытаний ЭД с использованием математической модели, позволяет достаточно объективно определить величину динамической погрешности, оценить степень влияния на нее различных факторов и принять меры для ее уменьшения при разработке встроенной температурной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузнецов Р.С., Строганов Н.И. Позисторная защита электродвигателей. "Электротехника", 1980, № 12, с. 26 – 28.
- [2] Сыч И.П. Совершенствование термометрического метода контроля нагрева электрических машин. "Электричество", 1982, № 7, с. 61 – 65.
- [3] Унифицированная серия асинхронных двигателей. Интерэлектро/ В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкоп и др. Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
- [4] Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд.-ние, 1990. – 256 с.
- [5] Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с.
- [6] Гимоян Г.Г., Лейбов Р.М. Релейная защита подземного электрооборудования и сетей. – М.: Недра, 1970. – 281 с.

Поступила 30.08.2004