

Е.Б. Ковалёв, Ал.А. Гусаров, Анд.А. Гусаров

## ТЕРМИСТОРНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕЖИМОВ МЕДЛЕННО- И БЫСТРОНАРАСТАЮЩИХ ПЕРЕГРУЗОК

*Скоростной, чувствительный и надёжный датчик температурной защиты – термистор типа NTC S865.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: электродвигатель, быстро нарастающая перегрузка, температурная защита, термистор, схема замещения.*

*Швидкісний, чутливий і надійний датчик температурного захисту – термістор типу NTC S865.*

*К л ю ч о в і с л о в а: електродвигун, швидко нарастаюче перевантаження, температурний захист, термістор, схема заміщення.*

**Постановка проблемы.** Современные экономические условия ставят задачу продления срока службы оборудования, которое можно обеспечить не только соответствующей эксплуатацией, но и диагностированием оборудования в процессе его эксплуатации в различных режимах работы. Надёжность электропривода в угольной промышленности в значительной мере зависит от надёжности работы электродвигателей (ЭД), что, в свою очередь, зависит от их температуры в рабочем режиме. Поэтому создание надёжной температурной защиты является актуальной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Наиболее распространённой и надёжной защитой ЭД в настоящее время является защита с использованием встраиваемых в них термодетекторов: температурных реле или позисторов. Такая система защиты обеспечивает надёжную работу ЭД с медленно нарастающими перегрузками, но практически не обеспечивает их защиту от быстро нарастающих перегрузок, при которых работает большинство электроприводов в угольной промышленности.

Следует отметить и современную тенденцию к переходу от отдельных приборов диагностики к мобильным компьютеризированным комплексам, позволяющим получать в режиме реального времени полную и качественную информацию о происходящих в ЭД процессах и о его текущих параметрах.

На основании анализа литературы по температурной защите ЭД [1– 4] установлено, что:

а) при медленно нарастающей тепловой нагрузке действительная разность между средней температурой обмотки статора и температурой об-

мотки статора в точке установки термодатчика играет важную, первостепенную роль в погрешности срабатывания защиты;

б) при быстронарастающей тепловой перегрузке первостепенную роль играет уже скорость изменения температуры обмоток ЭД;

в) согласно ГОСТ 27888-88 встроенная температурная защита на основе реле или позистора (например, типа ТР211) не удовлетворяет предъявляемым требованиям для медленно- и быстронарастающих перегрузок вследствие большой разницы между значениями температуры термодатчика и температуры обмоток;

г) для измерения текущего значения температуры необходимо вместо реле или позистора применять термистор.

**Цель статьи.** Разработка температурной защиты, обеспечивающей своевременное отключение ЭД при быстронарастающих перегрузках.

**Результаты исследования.** Анализ работы ЭД и разработка его температурной защиты проводится с использованием динамических тепловых схем замещения. Используется тепловая схема в виде двух тел: лобовая часть обмотки статора и термодатчик (рисунок 1).

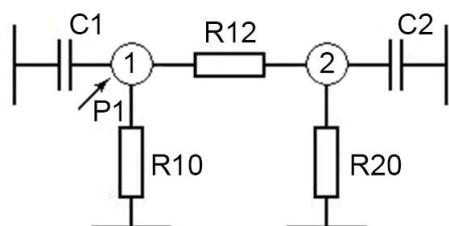


Рисунок 1 – Динамическая тепловая модель системы:  
лобовая часть обмотки статора ①;  
термодетектор ②

Для двигателя 2ЭДКОФ250М4 параметры схемы равны: теплоемкость (Дж/°С)  $C1=4,868 \cdot 10^3$ ;  $C2 = 1,147$ ; тепловые потери (Вт)  $P1= 2,665 \cdot 10^4$ ; тепловое сопротивление (°С/Вт)  $R10=0,075$ ;  $R12=67,568$ ;  $R20=2 \cdot 10^3$ .

Использование упрощенной тепловой схемы замещения оправдывается тем, что анализу подвергаются не абсолютные значения температуры датчика и обмотки, а их разность, что определяет погрешность измерения температуры обмотки термодетектором.

Тепловая модель описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} C1 \cdot s\theta1 + a_{1,1} \cdot \theta1 - a_{1,2}\theta2 = P1; \\ C2 \cdot s\theta2 - a_{1,2} \cdot \theta1 + a_{2,2}\theta2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $s = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа;

$\theta$  – температура;

$a$  – проводимость.

Выразив  $\theta1$  из второго уравнения системы (1), получим:

$$\theta1 = C2/a_{1,2} \cdot s\theta2 + a_{2,2}/a_{1,2} \cdot \theta2, \quad (2)$$

а подставив (2) в первое уравнение системы (1), получим:

$$C1 \cdot C2 \cdot s^2 \cdot \theta 2 + (C1 \cdot a_{2,2} + C2 a_{1,1}) \cdot s \cdot \theta 2 + (a_{1,1} \cdot a_{1,2} - a_{1,2}^2) \cdot \theta 2 = P1 \cdot a_{1,2}.$$

Передаточная функция этого уравнения:

$$W(s) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\theta 2}{P1} = \frac{1}{\left[ \frac{C1C2}{a_{1,2}} s^2 + \frac{(C1 \cdot a_{2,2} + C2 \cdot a_{1,1})}{a_{1,2}} s + \frac{(a_{1,1} \cdot a_{2,2} - a_{1,2}^2)}{a_{1,2}^2} \right]} =$$

$$= \frac{1}{(T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1)},$$

а его характеристическое уравнение:

$$T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1 = 0,$$

где

$$T_m = \frac{C1 \cdot a_{2,2} + C2 \cdot a_{1,1}}{a_{1,1} \cdot a_{2,2} - a_{1,2}^2},$$

$$T_e = \frac{C1 \cdot C2}{C1 \cdot a_{2,2} + C2 \cdot a_{1,1}},$$

$$T = \sqrt{T_e \cdot T_m} = \sqrt{\frac{C1 \cdot C2}{a_{1,1} \cdot a_{2,2} - a_{1,2}^2}}.$$

Пусть  $T_m = 2 \cdot T \cdot \zeta$ , тогда получим:

$$T^2 s^2 + 2 \cdot T \cdot \zeta \cdot s + 1 = 0,$$

$$\zeta = \frac{T_m}{2T} = \frac{C1 \cdot a_{2,2} + C2 \cdot a_{1,1}}{\sqrt{(a_{1,1} \cdot a_{2,2} - a_{1,2}^2) \cdot C1 \cdot C2}},$$

$$s1 = \frac{1}{T}(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}), \quad s2 = \frac{1}{T}(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}).$$

Разделив уравнения системы (1) соответственно на C1 и C2, получим:

$$\begin{cases} s\theta 1 + \frac{a_{1,1}}{C1} \cdot \theta 1 - \frac{a_{1,2}}{C1} \theta 2 = \frac{P1}{C1}; \\ s\theta 2 - \frac{a_{1,2}}{C2} \cdot \theta 1 + \frac{a_{2,2}}{C2} \theta 2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение этой неоднородной системы дифференциальных уравнений можно представить в виде:

$$\begin{cases} \theta 1 = \theta 1_{св} + \theta 1_{np}; \\ \theta 2 = \theta 2_{св} + \theta 2_{np}, \end{cases}$$

где  $\theta 1_{св}$  и  $\theta 2_{св}$  – частное решение однородной системы дифференциальных уравнений (1) без правой части (свободная составляющая температуры);

$\theta 1_{np}$  и  $\theta 2_{np}$  – частное решение неоднородной системы дифференциальных уравнений (1) (принужденная составляющая температуры).

Выражения для  $\theta 1_{np}$  и  $\theta 2_{np}$  получаем из решения алгебраической системы уравнений:

$$\begin{cases} a_{1.1}\theta 1_{np} - a_{1.2}\theta 2_{np} = P1; \\ -a_{1.2}\theta 1_{np} + a_{2.2}\theta 2_{np} = 0, \end{cases}$$

или в матричном виде:

$$A \cdot \Theta = P,$$

где  $A = \begin{vmatrix} a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$  – матрица тепловых проводимостей;

$\Theta = \begin{vmatrix} \Theta 1 \\ \Theta 2 \end{vmatrix}$  – матрица превышения температуры;

$P = \begin{vmatrix} P1 \\ 0 \end{vmatrix}$  – матрица потерь.

Тогда  $\Theta = A^{-1} \cdot P$ , где  $A^{-1}$  – матрица, обратная матрице тепловых проводимостей  $A$ . И в результате получаем установившиеся значения  $\theta 1$  и  $\theta 2$ .

Значения  $\theta 1_{св}$  и  $\theta 2_{св}$  определяем из решения однородной системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} s\theta 1_{св} + \frac{a_{1.1}}{C1} \cdot \theta 1_{св} - \frac{a_{1.2}}{C1} \theta 2_{св} = 0; \\ s\theta 2_{св} - \frac{a_{1.2}}{C2} \cdot \theta 1_{св} + \frac{a_{2.2}}{C2} \theta 2_{св} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно [5, с.531] решение однородной системы уравнений (4) зависит от выполнения условия  $\zeta > 1$ , что соответствует нашему случаю. Система (4), из которой определяем свободную составляющую превышения температуры, имеет вид [5, с.290]:

$$\begin{cases} \theta 1_{ce} = A11 \cdot e^{s1 \cdot t} + A12 \cdot e^{s2 \cdot t}; \\ \theta 2_{ce} = A21 \cdot e^{s1 \cdot t} + A22 \cdot e^{s2 \cdot t}, \end{cases} \quad (5)$$

а решение системы (5) – вид:

$$\begin{cases} s \cdot \theta 1 = A11 \cdot e^{s1 \cdot t} + A12 \cdot e^{s2 \cdot t} + \theta 1; \\ s \cdot \theta 2 = A21 \cdot e^{s1 \cdot t} + A22 \cdot e^{s2 \cdot t} + \theta 2. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициенты  $A11$ ,  $A12$ ,  $A21$ , и  $A22$  определяем из начальных условий. Поскольку имеем четыре неизвестных коэффициента, то для их определения необходимо иметь четыре уравнения. Первые два уравнения получим из условия, что при  $t = 0$ , у нас  $\theta 1_0 = 0$  и  $\theta 2_0 = 0$

$$\begin{cases} A11 + A12 = -\theta 1; \\ A21 + A22 = -\theta 2, \end{cases} \quad (7)$$

а вторые два уравнения получим, продифференцировав (6) при условии, что при  $t=0$

$$\begin{aligned} s \cdot \theta 1_0 &= \frac{P1}{C1} \quad \text{и} \\ s \cdot \theta 2_0 &= 0. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} s1 \cdot A11 + s2 \cdot A12 = \frac{P1}{C1}; \\ s1 \cdot A21 + s2 \cdot A22 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

В результате решения уравнений (7) и (8) получим:

$$A11 = \frac{s1 \cdot (\theta 1_0 - \theta 1) + \frac{P1}{C1}}{s1 - s2};$$

$$A12 = \frac{s2 \cdot (\theta 1_0 - \theta 1) + \frac{P1}{C1}}{s1 - s2};$$

$$A21 = \frac{s1 \cdot (\theta 2_0 - \theta 2)}{s1 - s2};$$

$$A22 = \frac{s2 \cdot (\theta 2_0 - \theta 2)}{s1 - s2}.$$

Имея выражения для определения температуры  $\theta 1$  и  $\theta 2$ , можно анализировать работу термодетектора в переходных режимах. Так, в постоянном режиме работы ЭД, например, типа 2ЭДКОФ250М4 мощностью

55 кВт при  $\vartheta_{окр}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , когда температура лобовой части обмотки статора достигла значения  $\theta 1=116,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура термодатчика ДТ1 составила  $\theta 2=112,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При быстронарастающих перегрузках имеем соответственно  $\theta 1=195,767\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta 2=141,361\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 2), т.е. разница между температурой лобовой части обмотки статора  $\theta 1$  и термодатчика  $\theta 2$  составляет  $54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3). Результаты моделирования показывают, что датчик температуры ДТ1, который обычно используется в рудничных ЭД, не успевает срабатывать при быстронарастающих перегрузках, т.к. лобовая часть обмотки статора не успевает нагреть термодатчик до своей температуры.

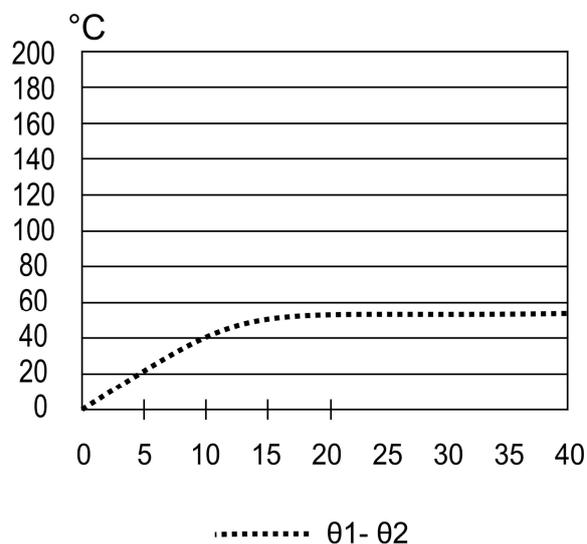
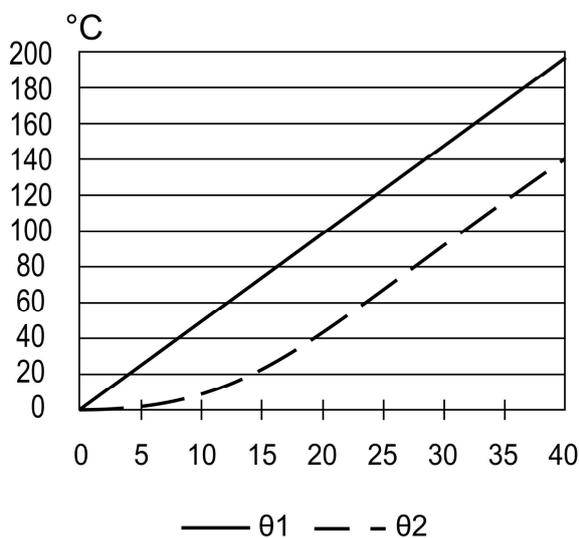


Рисунок 2 – Показания термодатчика  $\theta 2$  и температуры в лобовой части обмотки статора  $\theta 1$

Рисунок 3 – Разница температуры в лобовой части обмотки статора  $\theta 1$  и температуры термодатчика  $\theta 2$

Для устранения этих недостатков предлагается:

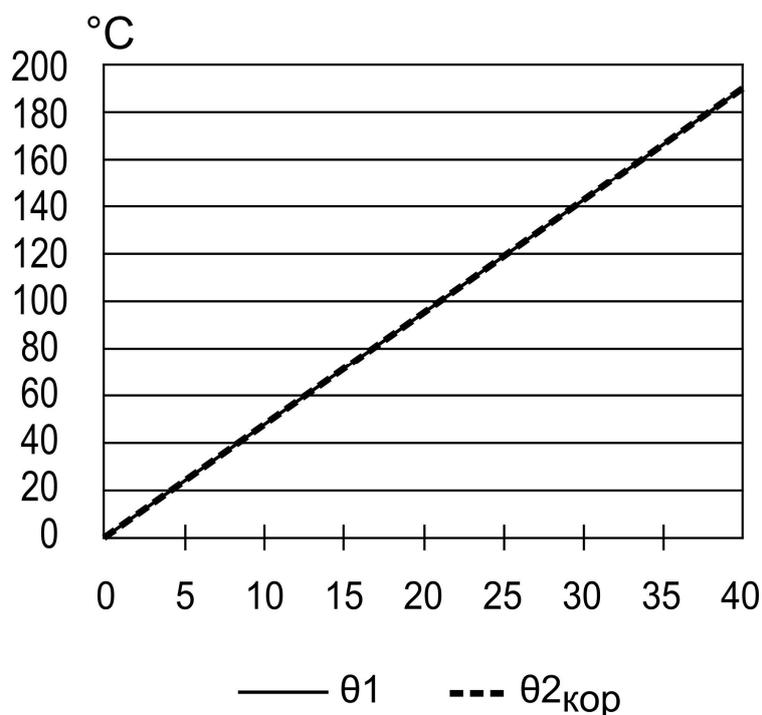
а) в качестве датчика температуры применить быстродействующий, чувствительный и надёжный термистор типа *NTC S865 Kom*, 1%,  $D=4\text{ мм}$  и  $L=5\text{ мм}$ ;

б) вносить поправки в результаты измерения температуры при быстронарастающих перегрузках на основе уравнения (3)

$$s\theta 2 - \frac{a_{1.2}}{C2} \cdot \theta 1 + \frac{a_{2.2}}{C2} \theta 2 = 0,$$

из которого можно определить действительную температуру лобовой части  $\theta 1_{\text{д}}$  по результатам измерения температуры термистора  $\theta 2$ , скорости нарастания температуры термистора  $p \cdot \theta 2$  и предварительно заданным коэффициентам  $a_{22}$  и  $a_{21}$  для защищаемого ЭД. В этом случае:

$$\theta 2_{\text{кор}} = \frac{s \cdot \theta 2 + a_{22\text{кор}} \cdot \theta 2}{a_{21\text{кор}}}.$$



*Рисунок 4 – Скорректированная температура термодетектора  $\theta_{2_{кор}}$  и температура лобовой части обмотки статора  $\theta_1$*

В этом случае, как следует из рисунка 4, скорректированная температура термодетектора полностью совпадает с температурой лобовой части ЭД.

Чтобы вносить поправки в выходные данные термодетектора, целесообразно использовать микроконтроллер Atmel типа ATmega 48/88/16825451 LS, благодаря встроенному аналого-цифровому преобразователю (АЦП) которого решается задача измерения температуры ЭД, что значительно расширяет практические возможности блока температурной защиты.

Схема блока температурной защиты включает в себя (рисунок 5):

а) полупроводниковый термистор  $R1$ , который непосредственно контактирует с ЭД и под действием температуры изменяет свое сопротивление;

б) мост из трёх манганиновых сопротивлений ( $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$ ) и термистора  $R1$ , в котором сопротивление термистора на выходе представлено в виде электрического сигнала – напряжения. Это наиболее надёжный и простой метод широко используется в мировой практике;

в) операционный усилитель на базе микросхемы К154 УДЗ, в котором сигнал от преобразователя сопротивления в напряжение усиливается до значения, нормируемого в соответствии с ГСП и А;

г) преобразователь АЦП преобразует аналоговый сигнал с выхода усилителя в цифровой. Может быть использован либо в виде независимого блока, либо в составе микроконтроллера;

д) микроконтроллер, например, серии AT 90S или ATmega 48/88/ 16825451 LS, позволяющий рассчитывать поправку к показателям термистора.

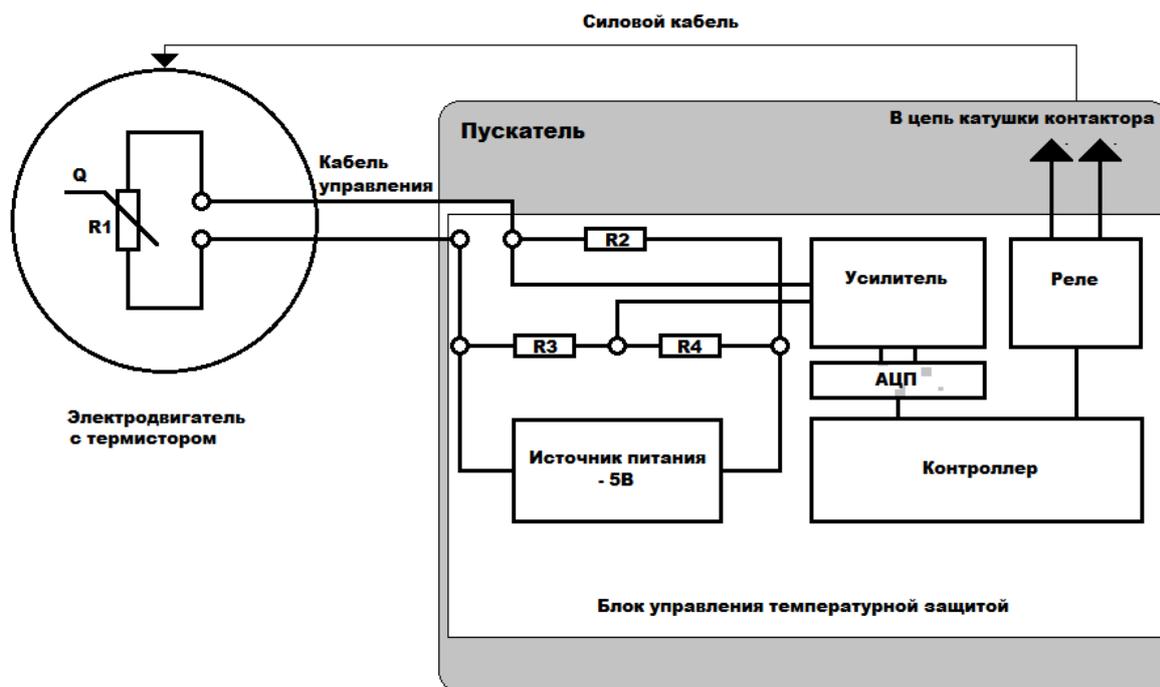


Рисунок 5 – Структурная схема блока температурной защиты привода скребкового конвейера

Принимаем микросхему фирмы ATmega 48/88/16825451 LS, экономичный 8-битовый КМОП микроконтроллер, построенный с использованием расширенной RISC архитектуры AVR, которая включает в себя набор команд и 32 регистра общего назначения. Все регистры подключены к арифметико-логическому устройству (АЛУ), которое даёт доступ к любым двум регистрам за один машинный цикл. Такая архитектура обеспечивает десятикратный выигрыш в эффективности кода в сравнении с традиционным CISC-микроконтроллером. Схема блока температурной защиты привода оснащена световым табло «Перегрев» (дисплей Volymin BC 1602 AGPLCHCT). Источник питания – искробезопасный и выбран из типовых. Питающее напряжение для всех элементов устройства – постоянное 5В.

### **Выводы:**

1. В результате моделирования тепловых процессов в ЭД типа 2ЭДКОФ250М4 установлено, что существующая температурная защита на основе позисторов соответствует требованиям ГОСТ 27888-88 в отношении медленнонарастающих нагрузок с погрешностью менее 5%.
2. Существующая температурная защита на основе позисторов не соответствует требованиям ГОСТ 27888-88 в отношении быстронарастающих перегрузок.

3. Для обеспечения защиты ЭД от быстро нарастающих перегрузок необходимо вводить коррекцию в текущее значение измеренной температуры в зависимости от скорости её изменения.

4. На основе полученных результатов сформулированы основные требования к блоку температурной защиты ЭД на базе термистора *NTC S865*. Разработана структурная, принципиальная электрическая схема устройства температурной защиты. В блоке применён микропроцессор Atmel типа AT90S, что расширяет практические возможности блока.

#### Список литературы

1. Гусаров Ан.А. Анализ современных систем температурных защит асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Ан.А.Гусаров, Ал.А.Гусаров, Е.Б.Ковалёв // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – Вип. 10 (180). – С.45-47.

2. Гусаров Ал.А. Определение температуры элементов тепловой схемы замещения асинхронного двигателя для разработки теплового реле и диагностики / Ал.А.Гусаров, Е.Б.Ковалёв // Взрывозащищённое электрооборудование: сб.науч.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.155-161.

3. Гусаров Ан.А. Анализ современных систем температурной диагностики асинхронных электродвигателей / Ан.А.Гусаров, Ал.А.Гусаров, Е.Б.Ковалёв // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – Вип. 7 (128). – С.174-177.

4. Ковалёв Е.Б. Характеристики температурной защиты электродвигателей от быстро нарастающих перегрузок / Е.Б. Ковалёв, М.Аль-Фаваир, Б.И. Невзлин // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії Інформатизації. – 2004. – № 2 [9]. – С. 7-14.

5. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплоотдача в электрических машинах / А.И.Борисенко, В.Г.Данько, А.И.Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.