

**А.С. КОБОЗЕВ**, канд. техн. наук, Харьков;  
**И.И. СМИЛЯНСКИЙ**, канд. техн. наук, Харьков;  
**А.В. ЗАРАТУЙКО**, инженер. НТУ ХПИ

### ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ПРИ ЧАСТЫХ ПУСКАХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ ОБМОТОК В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье рассмотрена возможность построения системы защиты от перегрузки асинхронных двигателей (АД), работающих в повторно-кратковременном режиме, на основе использования в качестве термодатчиков их собственных обмоток. Для этого предложено при каждом пуске, до начала разворота, измерять суммарную мгновенную мощность трех фаз двигателя. Показано, что анализ соотношения максимума и минимума мгновенной трехфазной мощности в начальный момент пуска, позволяет получить однозначную информацию об изменении активного сопротивления обмоток, обусловленного нагревом, и определить температуру перегрева двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, тепловая защита, контроль температуры

**Введение.** Наиболее известны «интегральные» защиты электродвигателей (ЭД) от токов перегрузки ( $I_L$ ), в которых защитная время-токовая характеристика формируется с использованием «интегральной» уставки  $Q_L = I_L^2 t_L$ , где  $I_L^2$  - квадрат величины тока перегрузки, а  $t_L$  - время срабатывания защиты при перегрузке. Алгоритм работы защиты предусматривает после срабатывания «интегральной» защиты задержку времени повторного включения  $t_{зпв}$ , величина которой выбирается из условия охлаждения ЭД до регламентируемого значения. Тем самым «интегральная» защита обеспечивает косвенный контроль за температурным режимом ЭД.

Однако «интегральная» уставка ЭД, работающего в повторно-кратковременном режиме при частых пусках замедляет работу технологического оборудования и снижает его производительность. Поэтому, в защитных устройствах от токов перегрузки ЭД, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы, передовые фирмы исключают «интегральные» уставки, заменяя их временными уставками.

**Анализ литературы.** Временная уставка, величина которой не  
 © А.С. Кобозев, И. И. Смилянский, А. В. Заратуйко. 2014

велика ( $10 \div 30$ )с, существенно снижает время существования тока перегрузки, и тем самым позволяет значительно быстрее произвести повторное включение ЭД. Примером такого защитного устройства ЭД от токов перегрузки являются реле перегрузки по току LR97 D и LT47 фирмы «Schneider-electric» – [1]. В каталоге на реле LR97D и LT47 указывается, что они разработаны для наиболее полного обеспечения защиты электродвигателей именно в повторно-кратковременном режиме и обеспечивают быстрое обнаружение перегрузки по сравнению с устройствами тепловой защиты на основе «интегральной уставки»  $Q_L$ . Это значит, что «временные» защиты более динамичные, чем «интегральные» и поэтому их применение повышает производительность технологического оборудования.

Но следует учитывать, что исключение «интегральных» уставок исключает и возможность косвенного контроля температуры ЭД. Поэтому в случае достаточно агрессивного режима частых пусков ЭД (без снижения нагрузки на механизм), нагрев обмоток ЭД может оказаться выше допустимого. Это значит, что динамичная «временная» защита не может быть эффективной без использования альтернативных косвенному «интегральному» способов контроля температуры обмоток.

Поэтому передовые фирмы, рекомендуя динамичные «временные» защиты для повторно-кратковременного режима, предлагают и свои ЭД, в которых уже встроены термисторы, которые обеспечивают непосредственный контроль температуры статорной обмотки ЭД. Так, например, фирма «ABB» предлагает электродвигатели типа CM-MSE, CM-MSS и CM-MSN с встроенными термисторами и их защиту соответствующими реле перегрузки - E16DU – E1250DU [2].

Одним из недостатков такого способа контроля температуры является определенная ограниченность его применения – он может применяться только для защиты тех ЭД, у которых в обмотки уже встроены термисторы.

Для защиты ЭД без встроенных в них термисторов необходим другой способ контроля температурного режима, при этом, наиболее привлекательным является использование самих обмоток ЭД в качестве термодатчиков.

Один из таких способов [3] предусматривает контроль температуры путём измерения сопротивления статорной обмотки электродвигателя  $R_{\sigma}$  специальным устройством, которое подключается к обмотке ЭД перед каждым его пуском. Этот способ измерения активного сопротивления обмотки ЭД имеет достаточно серьёзные недостатки, обусловленные повышенными габаритами и стоимостью защитного уст-

ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098) 71

ройства, а также снижением динамичности работы технологического оборудования.

Кроме того, измерение температуры статорной обмотки ЭД не всегда правильно отражают температурный режим обеих обмоток, т.к. в некоторых случаях (для мощных ЭД) критичными по нагреву являются не статорные, а роторные обмотки. Поэтому более предпочтительной следует считать комплексную оценку температурного режима обеих обмоток.

**Цель работы** – разработка нового способа определения температуры асинхронного электродвигателя в момент пуска.

**Основная часть.** Указанную комплексную оценку температуры обеих обмоток ЭД может дать способ, в котором при каждом очередном пуске будет определяться текущее приведенное активное сопротивление схемы замещения ЭД. Вполне очевидно, что для этого необходимо выбрать такой контролируемый параметр процесса пуска ЭД, изменение которого было бы *достаточно значимым* при увеличении температуры обмоток и, соответственно, их активного сопротивления –  $R_{ЭД}$ .

Таким параметром процесса пуска ЭД, как будет обосновано ниже, может быть *величина мгновенной мощности*, а точнее – *соотношение двух значений мгновенной мощности, зафиксированных в первый период изменения пускового тока*.

Зависимости изменения во времени мгновенных мощностей в фазах  $P_{(a,b,c)}(t)$  в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи, описываются следующими выражениями:

$$p_A(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi) \cdot [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi)e^{-t/\tau}] \quad (1)$$

$$p_B(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi + 2\pi/3) \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi + 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi + 2\pi/3)e^{-t/\tau} \right] \quad (2)$$

$$p_C(t) = 2UI \sin(\omega t + \psi - 2\pi/3) \left[ \sin(\omega t + \psi - \varphi - 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi - 2\pi/3)e^{-t/\tau} \right] \quad (3)$$

где:  $U$  и  $I$  - соответственно, действующие значения фазных напряжения и тока,  $\tau$  - электромагнитная постоянная времени цепи,  $\psi$  - начальная фаза возникновения возмущения цепи,  $\varphi$  - аргумент коэффициента мощности фазы заторможенного двигателя, связанный с  $\tau$ , с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью обмотки  $L$  заторможенного двигателя следующим соотношением:

$$\varphi = \operatorname{tg}(\omega \tau) = \operatorname{tg}(\omega L / R) \quad (4)$$

Как следует из выражений (1)-(3) мгновенные значения фазных мощностей  $p_{j(a,b,c)}$  в переходной период изменения тока возмущения определяются (кроме легко контролируемых значений  $U$  и  $I$ ) значениями как  $\tau$ , так и угла  $\psi$ . А это значит, что извлечь информацию о текущем значении  $\tau$  обмоток ЭД по мгновенным значениям мощности в фазе невозможно. Но такую информацию можно извлечь, если анализировать *суммарную для всех трех фаз мгновенную мощность*.

Легко показать, что в симметричной трехфазной системе суммарная мгновенная мощность в переходном режиме не зависит от момента времени возникновения тока возмущения (от случайной величины угла  $\psi$ ), а определяться только значениями  $U$ ,  $I$  и  $\tau$ .

Опуская все простые, но довольно громоздкие промежуточные преобразования, приведем конечное выражение для суммарной мгновенной мощности 3-х фаз в переходном режиме –  $Sp_3(t)$ :

$$Sp_3(t) = 3U \cdot I \left[ \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right] \quad (5)$$

Выражение (5) получено для случая определения мощности как суммы мощностей трёх фаз по методу трех ваттметров. Учитывая, что в существующих системах токовых защит электросетей и электродвигателей используются, как правило, всего 2 датчика тока, представляет интерес рассмотреть случай определения суммарной мгновенной мощности при измерении мощности по схеме двух ваттметров. В этом случае, например, при измерении токов в фазах А и С, выражение для суммарной мгновенной мощности трех фаз в переходном режиме будет определяться соотношением:

$$Sp_2(t) = u_{AB}(t)i_A(t) + u_{CB}(t)i_C(t), \quad (6)$$

где  $u_{AB}(t)$ ,  $u_{CB}(t)$  – мгновенные значения линейных напряжений, указанных фаз,  $i_A(t)$  и  $i_C(t)$  – фазные токи.

Для переходного режима пуска выражение для мгновенной суммарной мощности при измерении её по схеме 2-х ваттметров аналогично (5):

$$Sp_2(t) = \sqrt{3}U_{л} I \left[ \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) e^{-t/\tau} \right], \quad (7)$$

где  $U_{л}$  – линейное напряжение.

Анализ выражений (5) и (7) показывает, что характер изменения функции  $Sp(t)$  в начале переходного процесса имеет вид затухающих

колебаний относительно установившегося значения. На рис. 1 в качестве примера, приведены построенные по выражению (5) зависимости  $Sp(t)$  для двух значений  $\tau$  - для  $\tau = 10$  мс и  $\tau = 15$  мс. Как видно из приведенных графиков, величины «размаха» изменения мгновенной суммарной мощности от своего максимального значения  $Sp_{max}$  к минимальному значению  $Sp_{min}$  при двух значениях  $\tau$  существенно разнятся. Так, величина «размаха» экстремальных значений при  $\tau = 15$  мс получается, примерно, в 2 раза больше, чем аналогичный «размах» экстремальных значений суммарной мощности для  $\tau = 10$  мс. Это значит, что анализ экстремальных значений суммарной мгновенной мощности  $Sp_{max}$  и  $Sp_{min}$  позволяет достаточно быстро и точно оценивать текущее значения постоянной времени обмоток ЭД ( $\tau_{\text{од}}$ ), а по степени изменения величины  $\tau_{\text{од}}$  при нагреве можно определять и температуру обмоток.

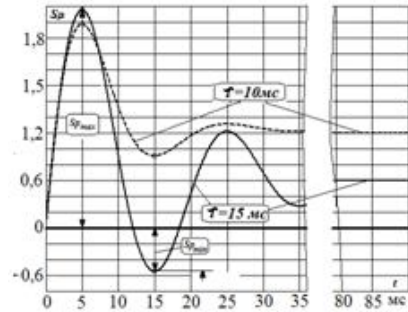


Рис. 1 – Суммарная мгновенная мощность трех фаз в момент пуска АД

Необходимо отметить следующую особенность функции  $Sp(t)$ , которая позволяет значительно упростить алгоритм анализа её экстремальных значений, а, в конечном счете, и температурного режима ЭД. Как показал анализ функции  $Sp(t)$ , максимальные значения  $Sp_{max}$  всегда, возникают спустя 5 мс, а минимальные значения  $Sp_{min}$  спустя 15 мс после возникновения тока возмущения цепи (в частности пуска ЭД) независимо от величины постоянной времени  $\tau$ . Это позволяет при определении «величины» размаха экстремальных значений суммарных мгновенных мощностей при пуске ЭД просто измерить мгновенные значения мощности в указанные выше моменты времени.

Наиболее информативным параметром, характеризующим «размах» функции  $Sp(t)$  при разных значениях  $\tau$ , является отношение разности экстремальных значений мощности к их сумме:

$$K_p = \frac{Sp_{max} - Sp_{min}}{Sp_{max} + Sp_{min}} \quad (8)$$

С учетом того, что значения  $Sp_{max}$  достигаются через 5 мс, а значения  $Sp_{min}$  через 15 мс после момента пуска ЭД, выражение (8) может быть представлено как:

$$K_p = \frac{Sp_5 - Sp_{15}}{Sp_5 + Sp_{15}} \quad (9)$$

На рис. 2 приведена зависимость  $\tau = f(K_p)$  из которой следует, что значения  $\tau$  существенно зависят от величины коэффициента  $K_p$ .

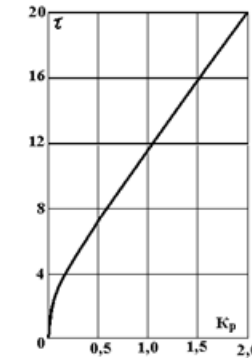


Рис. 2 – Зависимость  $\tau = f(K_p)$

Если величину  $\tau$  при окружающей температуре принять равной  $\tau_{\text{ок}} = 15,6$  мс (что соответствует значению  $\cos\varphi = 0,2$ ), то при увеличении температуры на  $125^\circ\text{C}$  активное сопротивление обмоток увеличится в 1,5 раза. Соответственно в 1,5 раза уменьшится постоянная времени  $\tau_{125} = \tau_{\text{ок}}/1,5 = 10,4$  мс, но при этом, как следует из графика рис.2, значение коэффициента  $K_p$  изменится в 1,7 раза. Это свидетельствует о том, что коэффициент  $K_p$ , действительно, может быть надёжным критерием изменения постоянной времени  $\tau$  обмоток ЭД при их нагревании, а значит и их температуры.

Следует отметить, что только благодаря скорости определению величины постоянной времени обмоток ЭД - всего через 15 мс после пуска, когда ротор ещё остается неподвижным, при реализации предлагаемого способа контроля температуры по величине активного со-

противления исключается труднопредсказуемое влияние на величину этого сопротивления факта вращения ротора.

Алгоритм определения текущей температуры обмоток ЭД при частых пусках путем анализа суммарных мгновенных значений мощностей достаточно прост. Независимо от выбранной схемы измерения - измерение по схеме трех или по схеме «двух ваттметров», значения суммарной мощности всегда определяется через 5 и 15 мс после начала пуска ЭД

В качестве примера, на рис.3 приведена блок-схема алгоритма определения текущей температуры обмоток ЭД при измерении мощности по схеме «двух ваттметров».

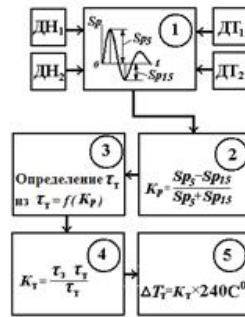


Рис. 3 – Алгоритм вычисления температуры обмоток ЭД

1. В модуле 1 из поступающих от датчиков тока (ДТ) и датчиков напряжения (ДН) из дискретных значений токов и напряжений в моменты времени спустя 5 и 15 мс после начала пуска определяют мгновенные значения суммарных мощностей, соответственно,  $Sp_5$  и  $Sp_{15}$ .

2. В модуле 2 определяют значения коэффициента соотношения суммарных мгновенных значений из выражения

$$K_p = \frac{Sp_5 - Sp_{15}}{Sp_5 + Sp_{15}}$$

3. В модуле 3 по найденному значению коэффициента  $K_p$  определяют текущее значение постоянной времени обмоток  $\tau_t$  из табличной зависимости  $\tau = f(K_p)$ , полученной из анализа выражения (7).

4. В модуле 4 определяют коэффициент изменения текущего значения постоянной времени обмоток из выражения  $K_\tau = (\tau_3 - \tau_t) / \tau_t$ , где  $\tau_3$  – заданное значение постоянной времени (для температуры окружающей среды).

76 ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПИ». 2014. № 56 (1098)

5. В модуле 5 определяют текущее приращение температуры обмоток  $\Delta T_t$  из выражения  $\Delta T_t = K_\tau \times 240C^0$ .

В заключение заметим, что в некоторых случаях может оказаться более целесообразным строить алгоритм защиты, по критерию формулы (8), использующей максимальное и минимальное значения мгновенной мощности. Несмотря на более сложное осуществление такого алгоритма, он позволяет устранить погрешности, вызванные разбросом моментов подачи сигнала на пуск двигателя и действительным началом переходного процесса. Особенно это чувствительно для точности определения момента максимума, наступающего всего через – 5 мс.

#### Выводы:

1. Предложен способ использования обмоток асинхронных электродвигателей в качестве термодатчиков для контроля их температуры при каждом очередном пуске ЭД. Оценка изменения температуры обмоток при реализации указанного способа производится по критерию, сформированному из двух значений суммарной мгновенной мощности трех фаз, зафиксированных, соответственно, в моменты времени через 5 и 15 мс после пуска ЭД ( $Sp_5$  и  $Sp_{15}$ ).

2. Полученные результаты подтверждают возможность использование обмоток в качестве термодатчиков, что позволяет обеспечить эффективную динамическую «временную» защиту тех ЭД, которые не имеют встроенных в их статорные обмотки термисторов и работают в режиме частых пусков (угольные комбайны, лифты и т.д.)

**Список литературы:** 1 - Пускорегулирующая аппаратура TeSys / Каталог Schneider Electric. – 2007. – 567с. 2.- Низковольтное оборудование АВВ. Контактный, реле управления, аппараты защиты электродвигателей / Технический каталог АВВ. – 2010. – 366 с. 3 - Пат. № 2227354 Российской Федерации МПК H02H5/04, H02H7/06 «Способ тепловой защиты двигателя и устройство для его осуществления» / Г.А. Бугаев, Е.Ю. Ерохин, А.Н. Леонтьев, М.А. Шамис. – № 2002108251/092002108251/09. Заявлено 01.04.2002; Опубл. 20.04.2004.

**Bibliographi (transliterated)** 1. Puskoreguliruyuschaya apparatura TeSys Katalog Schneider Electric. 2007. 567. 2.- Nizkovoltnoe oborudovanie ABB. Kontaktnyy, rele upravleniya, apparaty zaschityi elektrodvigatelay. Tehnicheskyy katalog ABB. – 2010. 3 – Pat № 2227354 Rossiyskoy federatsii MPK H02H5/04, H02H7/06 «Sposob teplovooy zaschityi dvigatelya i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya» / G.A. Bugaev, E.Yu. Erohin, A.N. Leontev, M.A. Shamis. – № 2002108251/092002108251/09. Zayavleno 01.04.2002; Opubl. 20.04.2004.

Поступила (received) 12.11.14