

УДК 621.313.33: 62–5

СПОСОБ КОСВЕННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРЕВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГОРНО-ШАХТНЫХ УСТАНОВОК

Брейдо Иосиф Вульфович¹,
jbreido@kstu.kz

Семькина Ирина Юрьевна²,
siyu.eav@kuzstu.ru

Нурмаганбетова Гулим Сахитовна¹,
g_sahitovna@mail.ru

¹ Карагандинский государственный технический университет,
Казахстан, 100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56.

² Институт энергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработать надежную тепловую защиту нерегулируемых асинхронных электроприводов машин и установок горной промышленности, в частности для оборудования подземных горных работ и процессов обогащения. Ключевой особенностью данной задачи является функционирование горно-шахтного электрооборудования в заведомо сложных условиях высокой запыленности и загазованности, включая риск взрыва или пожара вследствие перегрева наружных поверхностей из-за возникновения неисправности, а также эксплуатацию таких электроприводов в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками и тяжелыми условиями работы, характеризующимися изменением нагрузки в широких пределах, длительной работой при нагрузках, выше номинального значения, остановами с последующим запуском двигателя с максимально допустимым моментом сопротивления. Применение для решения данной задачи методов непосредственного измерения температуры оказывается невозможным, поскольку большая часть рассматриваемых асинхронных двигателей не оснащается встроенными термодатчиками. Прямые методы защиты асинхронных электродвигателей от перегрева на основе время-токовой и тепловой токовой защиты не учитывают температуру окружающей среды, различные варианты теплоотвода в электродвигателях горно-шахтных установок, обусловленные условиями их эксплуатации, а в случае останова двигателя после перегрева вследствие перегрузки, при нормализации нагрузки допустят запуск неостывшего двигателя, поскольку фактически эти способы контролируют величину тока, протекающего в питающей цепи, но не нагрев двигателя. Таким образом, тепловая защита электроприводов таких установок, как скребковые и ленточные конвейеры, буровые установки, очистные и проходческие комбайны, компрессорные установки, пульпонасосы и аналогичных, может быть построена только на базе косвенных методов, один из которых рассматривается в данной работе. Внедрение результатов исследования позволит снизить аварийность электроприводов горнодобывающей промышленности, добиться увеличения срока эксплуатации электрооборудования и обеспечит повышение безопасности ведения горных работ.

Цель: разработка устройства защиты от перегрева статорных обмоток для нерегулируемых асинхронных электродвигателей машин и установок горной промышленности на базе косвенных методов.

Объекты: асинхронный электродвигатель нерегулируемого электропривода машин и установок горной промышленности; устройство косвенной защиты от перегрева.

Методы: положения теории электропривода; компьютерное моделирование динамических процессов; планирование эксперимента и обработка результатов.

Результаты. Доказана связь количества пусковых пульсаций тока в асинхронных электродвигателях с температурой нагрева обмоток электродвигателя. Выявлена линейная зависимость между количеством пусковых пульсаций тока и нагревом обмоток электродвигателей в повторно-кратковременных режимах работы в диапазоне температур до 200 °С. Установлена предельная мощность электродвигателя, для которой определение температуры обмоток предлагаемым методом проводится с погрешностью менее 2 %.

Ключевые слова:

Горно-шахтное электрооборудование, нерегулируемый электропривод, асинхронный электродвигатель, тепловая защита, температура нагрева обмоток статора, пульсации пусковых токов.

Введение

Горная промышленность является одной из ключевых ресурсных отраслей Российской Федерации. Согласно [1], с учетом транспортировки полезных ископаемых, энергоснабжения, производства материальных ресурсов и прочих видов деятельности, связанных с добычей полезных ископаемых, вклад этой отрасли в ВВП может достигать 50–60 %, а стоимость продукции, создаваемой одним работником горной промышленности, эквива-

лентна 130 среднедушевым доходам. Однако в настоящее время в связи с задачами импортозамещения в отрасли назревает острая необходимость внедрения современного оборудования, произведенного в России или союзных государствах, в особенности в части оборудования подземных горных работ и процессов обогащения.

Важное место в решении этой задачи занимает разработка электротехнических элементов и систем, обеспечивающих нормальное функциониро-

вание технологического оборудования, например, скребковых и ленточных конвейеров, буровых установок, очистных и проходческих комбайнов, компрессорных установок, пульпонасосов и т. д. При этом следует учитывать, что горно-шахтное электрооборудование эксплуатируется в заведомо сложных условиях высокой запыленности и загазованности, включая вероятность взрыва или пожара вследствие возникновения неисправности. В связи с этим к горно-шахтному электрооборудованию предъявляются повышенные требования по обеспечению надежности срабатывания защитной аппаратуры.

По статистике эксплуатации горно-шахтного электрооборудования [2] наиболее распространенными являются следующие аварии и неисправности: утечка на землю и короткие замыкания между фазами; обрыв или повреждение силовых цепей и цепей управления; нарушение целостности заземления; перегрузка по току. Последнее представляет собой большую опасность, поскольку вследствие длительных перегрузок, ухудшения условий охлаждения, обрыва фазы сети или работы в неполнофазном режиме, частых или затянувшихся пусков электродвигателей, а также заклинивания их ротора возможен недопустимый нагрев наружных поверхностей электрооборудования.

Все указанные факторы свидетельствуют о необходимости разработки надежных современных устройств защиты горно-шахтного электрооборудования от перегрузки. При этом важно учитывать, что подавляющее большинство рассматриваемых электроприемников носит характер асинхронной электродвигательной нагрузки, а значительная часть асинхронных двигателей (АД) установок горнодобывающей промышленности работают в повторно-кратковременных режимах (S3, S4 и S5) с частыми пусками и остановками и имеют крайне тяжелые режимы нагружения, в которых возможно изменение нагрузки в широких пределах, в том числе частые перегрузки, длительная работа при нагрузках выше номинального значения, останов и запуск двигателя с максимальной нагрузкой и т. п. Помимо угрозы взрыва и пожара вследствие перегрева поверхностей, вызванного длительной перегрузкой, особенности режима нагружения электроприводов вызывают перегрев самого АД и сокращают срок его эксплуатации [3].

Следует отметить, что модернизация электроприводов горной промышленности в последние годы идет достаточно активно, причем как для оборудования подземного взрывозащищенного исполнения и обогатительных производств, так и для вспомогательного оборудования. Однако поскольку в большинстве применяемых АД отсутствуют встроенные датчики температуры [4–7], необходимость в защите от перегрева вследствие перегрузок для таких электродвигателей может быть реализована только с использованием косвенных методов защиты от перегрева, основанных на измерениях тока статора. Разработка для нерегулируемых

асинхронных электродвигателей горно-шахтного оборудования устройств защиты от перегрева статорных обмоток на базе косвенных методов позволит значительно повысить надежность и продолжительность работы АД в режимах с частыми пусками [8] и обеспечит повышение безопасности ведения горных работ.

Анализ существующих методов

Применяемые в настоящее время методы тепловой защиты нерегулируемых электроприводов можно разделить на непосредственные, прямые и косвенные.

Непосредственные методы предполагают установку на двигателе приборов и устройств, определяющих либо реагирующих на температуру какой-либо конструктивной части двигателя. Это могут быть как стандартные встроенные датчики – биметаллические пластины либо терморезисторы, так и интеллектуальные устройства. Например, «умный датчик» [9], обеспечивающий удаленный мониторинг состояния низковольтных асинхронных двигателей с передачей данных по беспроводным сетям. Это устройство предполагает накладной монтаж на двигатель и представляет собой объединенный в едином корпусе набор чувствительных элементов, а также интеллектуальную систему со специальным алгоритмом, способным определять ряд технических параметров двигателя, влияющих на его работоспособность, в том числе температуру поверхности двигателя. Недостатком интеллектуальных устройств является недоступность их установки и эксплуатации в условиях некоторых производств, например, в горнодобывающей промышленности.

Прямые методы защиты асинхронных электродвигателей от перегрева в настоящее время реализованы на основе время-токовой и тепловой токовой защиты.

Время-токовая защита [10–12] основана на измерении величины тока статора и вычислении времени задержки на отключение электродвигателя от источника электроэнергии в функции величины тока. Кроме того, этот способ не учитывает температуру окружающей среды, что не позволяет в полной мере использовать нагрузочную способность электродвигателя.

В подавляющем большинстве двигателей, находящихся в эксплуатации, используется тепловая токовая защита [12–15]. К недостаткам данного способа следует отнести большую погрешность в определении температурных постоянных времени электродвигателя и отсутствие контроля температуры окружающей среды, что значительно снижает эффективность защиты и надежность электропривода в целом.

Общий недостаток этих способов заключается в том, что не учитываются различные варианты теплового режима в электродвигателях, обусловленные условиями эксплуатации, включая температуру окружающей среды. Кроме того, в случае запуска

двигателя после длительного перегруза и последующего останова, когда двигатель еще не успел остыть, но нагрузка уже пришла в пределы нормы, такие защиты не смогут предотвратить функционирование перегретого двигателя, поскольку фактически эти способы контролируют величину тока, протекающего через силовые контакты пускателей, но не нагрев электродвигателей.

Косвенные методы защиты основаны на оценивании температуры статора τ_s или ротора τ_r двигателя. Их общая классификация показана в [16].

Некоторые косвенные методы направлены на оценку температурного режима АД посредством анализа информации о его токах и напряжениях с последующим использованием этих данных в тепловой модели двигателя. Например, в [17] предложены варианты определения температуры статора τ_s и ротора τ_r двигателя с использованием его электрической, механической и тепловой моделей, построенные на оценке тепловых потерь двигателя по токам статора и ротора. Особенностью подхода является то, что в модели двигателя учитывается изменение сопротивления обмотки ротора R_r в зависимости от скольжения, т. е. область применения такого метода определения температуры являются широкодиапазонные двигатели. В связи с этим метод [17] мог бы быть применим для двигателей, использующихся в горнодобывающей промышленности, однако область его применения является предметом отдельного исследования, поскольку следует отметить, что в модели двигателя не учитывается зависимость сопротивления обмоток от температуры.

Несколько иной подход применяется и в [16], где автор использует гибридную тепловую и электромеханическую модель двигателя полного порядка, в которой также анализируются токи и напряжения двигателя, оцениваются сопротивление статора R_s и индуктивность статора L_s , а учитывая взаимосвязь этих параметров с температурой, с помощью тепловой модели определяется τ_s . Недостатком данного подхода является необходимость выполнять достаточно сложные вычисления для решения динамических моделей высокого порядка.

Близкими, по сути, являются косвенные методы определения температуры, в основе работы которых лежит только электромеханическая динамическая модель АД, а для функционирования используется паспортные данные двигателя и измеренные токи и напряжения. Например, в [18] предлагается следующий способ оценки температуры ротора. На основе анализа векторов тока и напряжения определяется основная частота питающего напряжения и составляющие токов прямой последовательности. Из этих данных путем анализа динамической модели АД определяется постоянная времени ротора T_r , из которой вычисляется температура ротора τ_r . Способ эффективен как в статических, так и в динамических режимах работы, однако направлен в первую очередь на определение параметров двигателя. Хотя дальнейшее использо-

вание информации о параметрах двигателя и температуре его обмоток может служить основой для устройства тепловой защиты, предусмотренный в [18] гармонический анализ требует достаточно высокой вычислительной мощности, что негативно скажется на стоимости.

Другая группа косвенных методов предполагает оценивание температуры двигателя через R_s , которое определяется по реакции двигателя на добавочные низковольтные сигналы. Так, например, авторы [19] предлагают оценивать R_s путем подачи на одну из фаз двигателя низковольтного добавочного сигнала постоянного тока. При определении сопротивления статора предусмотрена компенсация погрешности, вызванной влиянием сопротивления питающего кабеля. Однако метод [19] нацелен в большей степени не на температурную защиту, а на диагностирование условий охлаждения двигателя, таких как исправность охлаждающего вентилятора, отсутствие препятствий для свободной циркуляции воздуха, а также скопившаяся пыль или загрязнения, или блокирование вентиляционных отверстий посторонними предметами.

Подобный подход применяется в [20], где предлагается непрерывный температурный мониторинг двигателя через R_s , для оценки которого в статорную цепь вводится добавочный сигнал переменного тока, частота которого не совпадает с основной питающей частотой двигателя, а параметры определяются с использованием синхронизирующего усилителя. В [21] также используется добавочный высокочастотный сигнал, однако принципиально особенностью этого метода является использование модели двигателя, в которой отдельно описываются стержни короткозамкнутого ротора.

Необходимость дополнительных элементов питания, независимо постоянного или переменного тока, снижает удобство использования методов [19–21] в составе устройства защиты и ограничивает их применимость в специфических условиях, например, для электроприводов горнодобывающей промышленности.

Поскольку, в соответствии с требованиями безопасности, все нерегулируемые электроприводы промышленных производств оборудуются автоматическими выключателями со встроенными системами время-токовой и тепловой токовой защиты, учитывая проведенный анализ, при повторнократковременных режимах работы двигателей частыми пусками для повышения эффективности тепловой защиты в конструкцию автоматических выключателей следует добавить дополнительное устройство, определяющее температуру обмоток при пуске, построенное на базе косвенных методов, однако не предусматривающее добавочных сигналов и не предъявляющее высоких вычислительных требований к реализации.

Теоретическая база

Для решения поставленной задачи предлагается наблюдатель температуры обмотки статора АД,

основанный на измерении амплитудных значений сигналов тока статора для АД малой мощности, работающих в повторно-кратковременных режимах работы, который позволяет косвенно определить температуру асинхронного электродвигателя. Способ основан на определении количества пульсаций пусковых токов электродвигателя, которое зависит от температуры статорной обмотки.

Работа наблюдателя температуры построена на анализе работы АД с использованием классической электромеханической модели в пространстве состояний в неподвижной системе координат α - β , где в качестве переменных состояния приняты вектор тока статора и вектор потокосцепления ротора [22], которые описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = \left(L_S + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left(\frac{1}{T_S} i_{s\alpha} + \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{r\alpha} - p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{r\beta}; \\ u_{s\beta} = \left(L_S + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left(\frac{1}{T_S} i_{s\beta} + \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{r\beta} + p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{r\alpha}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + p\omega \psi_{r\beta}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - p\omega \psi_{r\alpha}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = p \frac{L_m}{L_R} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_L, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ – составляющие вектора напряжения статора; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ и $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – составляющие векторов тока статора и потокосцепления ротора соответственно; ω – угловая скорость; M_L – момент нагрузки на валу; J – момент инерции ротора; p – число пар полюсов; R_S , R_R – активные сопротивления статора и ротора; L_R , L_S – полные индуктивности ротора и статора; L_m – взаимная индуктивность; T_S , T_R – постоянные времени обмоток статора и ротора:

$$T_S = \frac{L_S}{R_S}; \quad T_R = \frac{L_R}{R_R}.$$

Важно, что параметры АД в процессе эксплуатации всегда отличаются от паспортных. В связи с этим значение температуры τ_s через сопротивление обмотки статора R_S и другие параметры двигателя в конкретный момент времени можно получить только с применением каких-либо методов оценивания параметров. Однако выше было показано, что использовать оценивание для нерегулируемых асинхронных двигателей неоправданно, т. к. это требует достаточно точных датчиков тока и напряжения, высокоскоростных микропроцес-

сорных вычислительных устройств, что значительно удорожает электропривод. Применительно к тепловой защите, поскольку при нагреве двигателя уменьшается электромагнитная постоянная времени обмотки статора [23], разрешением данного противоречия является оценка τ_s не по R_S , а по изменению параметров протекания переходных процессов по току статора, поскольку такие изменения являются индикатором постоянной времени T_S , которая косвенно зависит от температуры.

Гипотеза о возможности оценивания τ_s по току статора будет правомерна, если окажется возможным раздельная оценка тепловых и электромагнитных переходных процессов. Чтобы в полной мере оценить эту возможность необходима тепловая модель двигателя. В данной работе рассматривается упрощенная одномассовая тепловая модель [16], в которой тепловые потери выражены через переменные состояния электромеханической модели двигателя (1), а также принято допущение равной теплоемкости всех элементов двигателя и равенства температур обмотки ротора τ_r и обмотки статора τ_s :

$$\begin{aligned} & \frac{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}{T_S} \left(L_S + \frac{L_m^2}{L_R} \right) + \\ & + \frac{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2}{L_R T_R} - \frac{L_m}{L_R T_R} (\psi_{r\alpha} i_{s\alpha} + \psi_{r\beta} i_{s\beta}) = \\ & = \frac{C_T}{T_T} (\tau_s - \tau_A) + C_T \frac{d(\tau_s - \tau_A)}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где τ_A – температура окружающего воздуха; C_T – теплоемкость двигателя; T_T – тепловая постоянная времени двигателя.

Согласно [16], постоянная времени T_T может составлять от 20 до 35,5 секунд, а исходя из [4–7] значения T_S и T_R лежат в диапазоне от 0,5 до 10 миллисекунд. Исходя из этого и анализируя (1) и (2) совместно, можно утверждать, что для асинхронных двигателей динамика электромагнитных процессов существенно выше, чем для тепловых. Это позволяет разделить динамические процессы на «быстрые» и «медленные», на основании чего изменением температуры АД в начале электромагнитных и электромеханических переходных процессов можно пренебречь, следовательно, оценка температуры при пуске по изменению параметров протекания переходных процессов тока статора является правомерной.

Результаты исследования

Исследования выполнялись с помощью имитационного моделирования и эксперимента. В качестве объекта рассмотрены АД с номинальной частотой вращения n , 1500 об/мин, и мощностью P от 3 до 45 кВт для температур от 80 до 250 °С. Анализ подвергались переходные процессы амплитуды тока статора. Пример данных для анализа приведен на рис. 1.

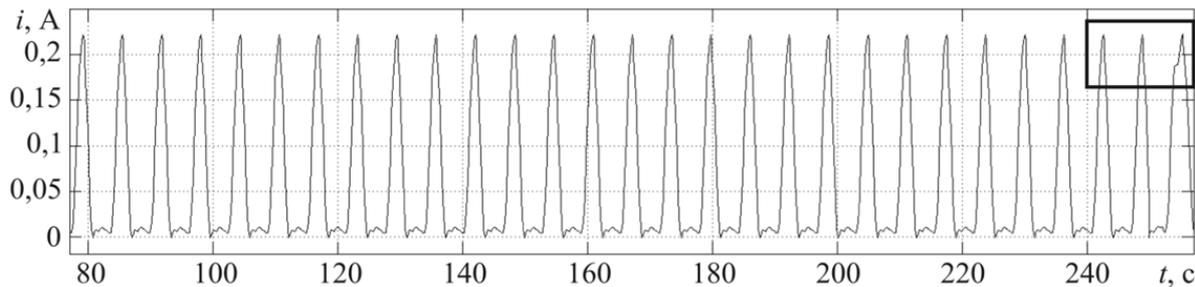


Рис. 1. Переходной процесс амплитуды тока статора при пуске АД мощностью 3 кВт при температуре 80 °С: выделенная область показывает окончание равномерных пульсаций тока

Fig. 1. Transients of the stator current amplitude at start-up for the 3 kW motor and stator temperature 80 °C: the selected area shows the completion of uniform current pulsations

В ходе исследований было установлено, что повышение температуры нагрева обмоток электродвигателя приводит к увеличению количества пульсаций тока статора m . Некоторые из результатов определения m представлены в таблице, а обобщенная зависимость количества пульсаций в функции температуры обмотки статора для двигателя мощностью 30 кВт показана на рис. 2, который свидетельствует, что зависимость m от τ_s близка к линейной в пределах до 200 °С. Использование показанной зависимости для двигателя типа 4A180M4 обеспечивает определение температуры нагрева обмоток с относительной погрешностью не более 1,5 %.

Таблица. Результаты определения пульсаций тока для разных температур

Table. Results of determination of current pulsations at different temperatures

Тип двигателя Motor type	P , кВт kW	n , об/мин rpm	τ_s , °C	m , ед. units	Погрешность, °C Assagasy, °C
4A180M4	3	1500	80	81	1,7
			250	110	
4A180M4	30	1500	80	36	3
			250	73	
4A200L4Y3	45	1500	80	11	8,5
			250	31	

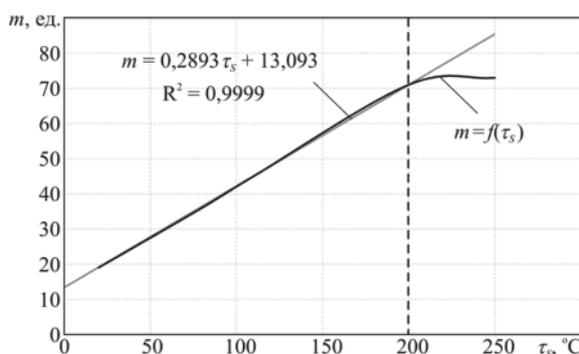


Рис. 2. Зависимость количества пульсаций тока от температуры статорных обмоток в режиме пуска для двигателя 4A180M4

Fig. 2. Dependence of current pulsation number on stator temperature at start-up for 4A180M4 motor type

Аналогичный характер данной зависимости m от τ_s подтвержден с помощью моделирования в диапазоне мощностей двигателя от 3 до 200 кВт. Однако с увеличением мощности количество пульсаций тока уменьшается, что приводит к повышению погрешности определения температуры предложенным методом. Руководствуясь критерием обеспечения точности определения температуры для построения косвенной тепловой защиты, был задан порог относительной погрешности метода, равный 2 %. Исходя из этого установлено, что с учетом дискретности ряда мощностей АД предельная мощность электродвигателя, для которой предложенный метод будет обеспечивать заданную точность, равна 30 кВт.

Поскольку установленная зависимость количества пульсаций пускового тока от температуры обмоток линейна в диапазоне изменения температуры обмоток до 200 °С, можно утверждать, что предлагаемый способ температурной защиты подходит для асинхронных электродвигателей с любым классом изоляции от Y (90 °С) до C (более 180 °С).

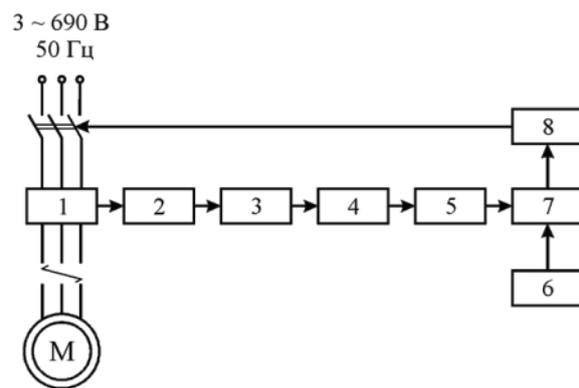


Рис. 3. Блок-схема устройства температурной защиты: М – асинхронный электродвигатель; 1 – датчик тока; 2 – вычислитель производной сигналов тока; 3 – нуль орган; 4 – фильтр; 5 – счетчик; 6 – задатчик уставки; 7 – устройство логического сравнения; 8 – обмотка пускателя

Fig. 3. Thermal protection device block diagram: M is the induction motor; 1 is the current sensor; 2 is the derivation of current signals; 3 is the null detector; 4 is the filter; 5 is the counter; 6 is the setpoint adjuster; 7 is the logical comparison; 8 is the solenoid starter

Блок-схема устройства, обеспечивающего изменение количества пульсаций тока, представлена на рис. 3. Она предполагает следующий принцип работы. При каждом пуске АД осуществляется измерение амплитудных значений сигналов тока статора посредством датчика тока. Сигнал с датчика тока поступает на вход вычислителя производной сигналов тока, на выходе которого с помощью нуля-органа выделяются сигналы, равные нулю. С помощью фильтра выделяются пульсации перерегулирования тока, которые суммируются с помощью счетчика. Полученное таким образом число пульсаций логически сравнивается с заданным максимальным количеством, определяемым уставкой, а в случае превышения формируется команда на отключение обмотки пускателя, что приводит к отключению напряжения на статорной обмотке двигателя.

Заключение

В результате исследования установлено, что количество пусковых пульсаций тока в асинхронных

электродвигателях, работающих в повторно-кратковременных режимах (S3, S4, S5), связано с температурой нагрева обмоток электродвигателя. Выявлена линейная зависимость между количеством пусковых пульсаций тока и нагревом обмоток электродвигателей в диапазоне температуры до 200 °С. Установлено, что для двигателей мощностью до 30 кВт погрешность в определении температуры обмоток по количеству пульсаций тока составляет порядка 1,5 %.

Предлагаемый способ определения температуры статорных обмоток по количеству пусковых пульсаций тока позволяет создать эффективную тепловую защиту для асинхронных двигателей малой и средней мощности без использования встроенных датчиков температуры на основе датчиков тока статора. Данная разработка для горнодобывающей промышленности позволит не только добиться увеличения срока эксплуатации электрооборудования, но и обеспечить повышение безопасности ведения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Твердов А.А., Никишичев С.Б., Захаров В.Н. Проблемы и перспективы импортозамещения в горной отрасли // Горная Промышленность. – 2015. – № 5 (123). – С. 54–59.
2. Курбатова О.А., Павлюченко В.М. Монтаж и ремонт горных машин и электрооборудования. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – 286 с.
3. Homce G.T. Early Detection of Insulation Failure: Report of Investigations. – Washington: United State department of the interior, bureau of mines, 1993. – 16 p.
4. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
5. Технический каталог. Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения. – Владимир: НИПТИЭМ, 2015. – 64 с.
6. Low voltage. General performance motors, 2016, 9AKK105789 EN 06–2016. URL: <http://www.abb.com/motors&generators> (дата обращения 10.10.2017).
7. SIMOTICS FD Low-Voltage Motors, 2016. Catalog D 81.8. URL: <http://www.siemens.com/simotics-fd> (дата обращения 10.10.2017).
8. Брейдо И.В., Каверин В.В., Нурмаганбетова Г.С. Определение зависимостей параметров динамической электромеханической характеристики в функции температуры // Наука настоящего и будущего: Материалы III Научно-технической конференции с международным участием. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2015. – С. 38–41.
9. ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors: service note, 2017, 9AKK106713A3853 EN 04–2017. URL: <http://www.abb.com/smartsensor> (дата обращения 10.10.2017).
10. Юндин М.А. Токовая защита электроустановок. 2-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 288 с.
11. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
12. Martin W., Eason A., Patel A.G. Low Voltage Motor Protection. – Milwaukee: Rockwell Automation, 2016. – 30 p.
13. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
14. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электрооборудования. – М.: Высшая школа, 2006. – 640 с.
15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – V. 6. – Iss. 8. – P. 5120–5125.
16. Zhi Gao. Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines: PhD Diss. – Atlanta, 2006. – 220 p.
17. Abdelwanis M.I., Selim F., El-Sehiemy R.A. An Efficient Sensorless Slip Dependent Thermal Motor Protection Schemes applied to Submersible Pumps // International Journal on Power Engineering and Energy (IJPTEE). – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 566–571.
18. Zhi Gao, Turner L.A., Colby R.S. Method and apparatus for estimating induction motor electrical parameters: United States Patent no. US 8,102,140 B2; Provisional application no. 61/053,941; Filed on 16.05.2008; Date of Patent 24.01.2012. – 36 p.
19. Lee Sang-Bin, Habetler T.G. A Remote and Sensorless Thermal Protection Scheme for Small Line-Connected AC Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – V. 39. – № 5. – P. 1323–1332.
20. Online Sensorless Induction Motor Temperature Monitoring / M.O. Sonnaillon, G. Bisheimer, C. de Angelo, G.O. Garcia // IEEE Transactions On Energy Conversion. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 273–280.
21. Cho Kyung-Rae, Seok Jul-Ki. Induction Motor Rotor Temperature Estimation Based on a High-Frequency Model of a Rotor Bar // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 1267–1275.
22. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. – СПб: Корона принт, 2001. – 320 с.
23. Брейдо И.В., Нурмаганбетова Г.С. Косвенная защита статорной обмотки асинхронного электродвигателя от превышения температуры нагрева // Автоматика. Информатика. – 2013. – № 2 (33). – С. 21–24.

Поступила 22.10.2017 г.

Информация об авторах

Брейдо И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Карагандинского государственного технического университета.

Семькина И.Ю., доктор технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации, директор Института энергетики Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

Нурмаганбетова Г.С., докторант, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов Карагандинского государственного технического университета.

UDC 621.313.33: 62–5

METHOD OF INDIRECT OVERHEATING PROTECTION FOR ELECTRIC DRIVES OF MINING INSTALLATIONS

Iosif V. Breido¹,
jbreido@kstu.kz

Irina Yu. Semykina²,
siyu.eav@kuzstu.ru

Gulim S. Nurmaganbetova¹,
g_sahitovna@mail.ru

¹ Karaganda State Technical University,
56, Mira Boulevard, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan.

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of reliable thermal protection for noncontrolled induction motor drives of mining machinery and installations, especially for underground mining and enrichment processes. The key feature of this task is operating of mining electrical equipment at obviously arduous conditions with two factors. The first is the high content of dust and gas in the air that raises up the explosion hazard due to overheating of external surfaces caused by fault inception and its progression. The second is the electric drives intermittent duty with frequent starting and shutdown of mining installations in heavy loading conditions involving a wide range of load variation, frequent overloads including long-term operation, motor shutdown and starting with maximum load. The application of direct temperature measurement methods for solving this problem is impossible because the most part of induction motors under consideration is not equipped with built-in thermal sensors. In-situ methods of induction motors overheating protection based on the time-current protection or the thermal current protection do not take into account the ambient temperature and the different variants of electric motors heat removal in mining machinery and installations caused by conditions of their operation. In addition, in case of motor shutdown after overload-caused overheating, when the load normalizes, both these protection types will allow the motor to start even if it has not chilled yet, because these in-situ methods control the current of the supply circuit, but not the heating of the motor. Thus, the electric drive thermal protection for such installations as chain-and-flight or belt conveyors, drill rigs, shearers and road headers, compressor units, slime pumps and similar could be built only on the basis of indirect methods one of which is considered in this paper. Implementation of the research results could decrease the amount of failure for electric drives in the mining industry, will ensure the longer operating life of electrical equipment and in addition the mining safety.

The main aim of the research is the development of thermal protection device for the stator winding of noncontrolled induction motor drives for mining machinery and installations based on an indirect method.

Objects of the research are the induction motor in the noncontrolled electric drives of mining machinery and installations; the thermal protection device based on an indirect method.

Methods: basics of electric drive theory; computer simulation of dynamic processes; experimental design techniques and results processing.

Results. The authors have verified the relation between the pulsations of motor starting current and the stator temperature. In intermittent periodic duty, it was found out that the dependence of the number of pulsation on the stator temperature is linear in a range up to 200 °C. The authors prescribed the motor capacity limit within the boundaries of which the stator temperature is calculated with inaccuracy up to 2 %.

Key words:

Mining electrical equipment, noncontrolled drive, induction motor, thermal protection, stator temperature, pulsations of starting current.

REFERENCES

1. Tverdov A.A., Nikishichev S.B., Zakharov V.N. Problems and prospects of import substitution in mining sectorio *Gornaya Promyshlennost*, 2015, no. 5 (123), pp. 54–59. In Rus.
2. Kurbatova O.A., Pavlyuchenko V.M. *Montazh i remont gornykh mashin i elektrooborudovaniya* [Installation and repair of mining machines and electrical equipment]. Vladivostok, DVGSU Publ., 2004. 286 p.
3. Homce G.T. *Early Detection of Insulation Failure*. Report of Investigations. Washington, United State department of the interior, bureau of mines, 1993. 16 p.
4. Lihachev V.L. *Elektrosvigateli asinkhronnye* [Induction motors]. Moscow, SOLON-R Publ., 2002. 304 p.
5. *Tekhnicheskii katalog* [Technical catalogue]. Science-research design and technological institute of electric machine industry. Vladimir, NIPTIEM Publ., 2015. 64 p.
6. *Low voltage. General performance motors*, 2016, 9AKK105789 EN 06–2016. Available at: <http://www.abb.com/motors&generators> (accessed 10 October 2017).
7. *SIMOTICS FD Low-Voltage Motors*, 2016. Catalog D 81.8. Available at: <http://www.siemens.com/simotics-fd> (accessed 10 October 2017).
8. Breido I.V., Kaverin V.V., Nurmaganbetova G.S. Opreделение zavisimostey parametrov dinamicheskoy elektromekhanicheskoy kharakteristiki v funktsii temperatury [Determination of dependence of dynamic electromechanical characteristic parameters in temperature function]. *Materialy III Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Nauka nastoyaschego i budushchego* [Proc. of the III Scientific and technical conference with international participation. Science of present and future]. St. Petersburg, LETI Publ., 2015. pp. 38–41.
9. *ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors*. Service note, 2017, 9AKK106713A3853 EN

- 04–2017. Available at: <http://www.abb.com/smartsensor> (accessed 10 October 2017).
10. Yundin M.A. *Tokovaya zashchita elektroustanovok* [Current protection of electrical installations]. St. Petersburg, Lan Publ., 2011. 288 p.
 11. Bass E.I., Doroguncev V.G. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electric power systems]. Moscow, MPEI Publ., 2002. 296 p.
 12. Martin W., Eason A., Patel A.G. *Low Voltage Motor Protection*. Milwaukee, Rockwell Automation, 2016. 30 p.
 13. Kireeva E.A., Cyruk S.A. *Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection and automation of electric power systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2013. 288 p.
 14. Andreev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektro-snabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 640 p.
 15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6, Iss. 8, pp. 5120–5125.
 16. Zhi Gao. *Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines*. PhD Diss. Atlanta, 2006. 220 p.
 17. Abdelwanis M.I., Selim F., El-Sehiemy R.A. An Efficient Sensorless Slip Dependent Thermal Motor Protection Schemes applied to Submersible Pumps. *International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 566–571.
 18. Zhi Gao, Turner L.A., Colby R.S. *Method and apparatus for estimating induction motor electrical parameters*. United States Patent no. US 8,102,140 B2, 2012.
 19. Lee Sang-Bin, Habetler T.G. A Remote and Sensorless Thermal Protection Scheme for Small Line-Connected AC Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1323–1332.
 20. Sonnaillon M.O., Bisheimer G., De Angelo C., Garcia G.O. Online Sensorless Induction Motor Temperature Monitoring. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 273–280.
 21. Cho Kyung-Rae, Seok Jul-Ki. Induction Motor Rotor Temperature Estimation Based on a High-Frequency Model of a Rotor Bar. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1267–1275.
 22. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MatLab 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MatLab 6.0]. St. Petersburg, Korona print Publ., 2001. 320 p.
 23. Breido I.V., Nurmaganbetova G.S. Indirect Overheating Protection of Asynchronous Motor Stator Winding. *Avtomatika. Informatika*, 2013, no. 2 (33), pp. 21–24. In Rus.

Received: 22 October 2017.

Information about the authors

Iosif V. Breido, Dr. Sc., professor, Karaganda State Technical University.

Irina Yu. Semykina, Dr. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Gulim S. Nurmaganbetova, postgraduate student, Karaganda State Technical University.