puter program was used to create a 3D design of the sensor and measure its parameters, then the sensor case was made using a 3D printer.

Field trials involved comparing 2 identical drills under identical conditions. The drill equipped with the seeding control system had better indices of time saving and efficiency (by 22 %). The study results

allowed us to develop the software for the seeding control system and determine the optimal design and process parameters of the seeding control sensor for a pneumatic drill in order to reduce clogging in the seed pipes and improve the quality of seed distribution.

© Галлямов Ф.Н., Шарафутдинов А.В., Пятаев М.В.

УДК 631.171:621.311

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-55-3-107-112

А.И. Некрасов, А.А. Некрасов

КОНТРОЛЬ НАГРЕВА ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: *электродвигатель; контроль нагрева; обмотка статора; гнездо рым-болта; защитное устройство.*

Введение. За прошедшее время изменились организационная форма, структура и экономическая основа сельскохозяйственного производства, оснащение электрифицированной техникой и оборудованием сельхозпредприятий, фермерских и крестьянских хозяйств, появились новые серии электродвигателей и виды электрооборудования, требующие инновационных подходов и методов обслуживания с контролем технического состояния ресурсообразующих элементов и узлов [1]. В сельскохозяйственном производстве асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (ЭД) являются основным видом привода стационарного технологического оборудования и машин. Более половины от общего числа ЭД работают в неблагоприятных условиях, поэтому свыше 80 % их отказов приходится на пробой изоляции и сгорание обмотки статора. Отказы электродвигателей приводят к нарушениям технологических процессов и простою технологического оборудования, что сопровождается снижением качества, недопроизводством или значительными потерями сельскохозяйственной продукции и значительными экономическими ущербами [2]. Для повышения эксплуатационной надежности сельских электроустановок необходим комплексный подход к решению общей задачи совершенствования системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования сельхозпредприятий, обеспечивающей снижение эксплуатационных затрат и увеличение выпуска сельхозпродукции.

Цель и задачи исследования – повышение эксплуатационной надежности сельских элект-

роустановок и эффективности использования электрооборудования сельхозпредприятий за счет совершенствования системы технического обслуживания и применения инновационного метода контроля теплового состояния обмотки статора электродвигателей, установление количественной связи между фактической температурой нагрева обмотки и температурой нагрева корпуса электродвигателя в непосредственной близости от обмотки.

Условия, материалы и методы. Основной характеристикой изоляции является электрическая прочность, зависящая от ряда других качеств, снижение уровня которых приводит к ее уменьшению. Изоляция должна сохранять высокую теплопроводность для работы при возникновении и повышенных местных нагревов, сопровождающихся ускоренным ее разрушением. Необратимые отрицательные изменения структуры и химического состава изоляции, происходящие под воздействием неблагоприятных эксплуатационных факторов, называют старением, а процесс ухудшения свойств изоляции в результате старения называют износом. Одним из основных факторов, определяющих срок службы изоляции ЭД, является тепловое старение [3, 4].

Различают понятия теплоустойчивости и нагревостойкости. Теплоустойчивостью называют способность электроизоляционного материала сохранять свои свойства на определенном уровне при относительно кратковременном повышении до определенного уровня нагрева. Материал не должен при этом разрушаться и расслаиваться, изменять свой химический состав, не должно возникать значительных пластичес-

ких деформаций, вытекания или разрушения связующих компонентов. Нагревостойкость характеризует способность материала без существенного ухудшения характеристик выдерживать воздействие предельно допустимой для данного типа изоляции температуры в течение срока службы ЭД и при обусловленных величинах других эксплуатационных воздействий. Для практических целей нагревостойкость служит более важной характеристикой изоляции, поэтому именно она положена в основу классификации электроизоляционных материалов. К важному фактору износа и старения изоляции относятся термомеханические нагрузки, возникающие в результате сменяющихся нагревов и охлаждений обмоток, что весьма распространено в сельскохозяйственном производстве. В обмотках позволяют механические напряжения, обусловленные периодическими изменениями температуры из-за переменной загрузки рабочих машин (от холостого хода до перегрузки). Определенную роль в процессе разрушения изоляции играют термомеханические явления, связанные с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и проводниковых материалов. Они приводят к образованию в изоляции трещин, разбуханию, расслоению и взаимному смещению отдельных ее слоев. Термомеханические процессы активизируются при работе ЭД в форсированных режимах и при частых переходных процессах (например, повторно-кратковременных режимах работы, реверсах), сопровождающихся тепловыми ударами [5, 6].

Результаты исследования. При работе электрифицированной техники довольно часто наблюдается перегрузка ЭД, обрыв фазы из-за повышенной вибрации, ухудшение охлаждения вследствие загрязнения или заваливания обрабатываемым материалом, заклинивания ротора. Основным показателем приближающейся аварии служит чрезмерное повышение температуры обмотки и соответственно корпуса ЭД. Современные ЭД изготавливаются в целях экономии активных материалов (в первую очередь меди), с высоким заполнением паза проводниками, что снижает устойчивость обмотки к перегреву и повышает требования к защите от вызывающих его режимов.

Недостатком типовых защит является несоответствие превышений номинального тока в обмотках статора ЭД температуре их нагрева. Например, перегрев обмоток часто происходит от ухудшения обдувания корпуса при сильном загрязнении и перекрытии вентиляционных каналов, повреждений вентилятора, завале ЭД технологическим материалом (кормом, соломой,

травой, навозом и др.). В этом случае даже при номинальном значении тока ЭД температура нагрева обмоток может превысить допустимые значения, а исправная защита не сработает. Для повышения надежности защиты выпускают ЭД со встроенными в лобовую часть обмотки термодатчиками (позисторами), которые подают сигнал на отключение ЭД при чрезмерном повышении температуры [6]. Но температура срабатывания позисторов в значительной мере зависит от точности соблюдения инструкции по их установке. Кроме того, требуется прокладка дополнительных проводов для их связи с исполнительным блоком и магнитным пускателем. Это усложняет конструкцию, увеличивает стоимость и трудозатраты, снижает надежность защиты. К тому же замена вышедших из строя термодатчиков в условиях эксплуатации невозможна. Ремонт отказавших ЭД, особенно большой мощности, весьма затруднителен ввиду отсутствия в сельской местности требуемым образом оснащенных ремонтных предприятий и низкой квалификации их персонала. Стоимость капитального ремонта ЭД приближается к цене нового электродвигателя, а качество ремонта соответствует восстановлению ресурса на 60–70 % [3].

В существующих условиях целесообразны разработка и внедрение в практику простых, дешевых и доступных сельским электрикам методов и технических средств, позволяющих контролировать состояние электродвигателей в процессе их эксплуатации. Одним из таких методов является контроль степени нагрева обмоток ЭД посредством измерения температуры его корпуса. Например, состояние подшипниковых узлов оценивают измерением их температуры (максимальная рабочая температура не должна превышать температуры окружающего воздуха более чем на 45–50 °С, при этом абсолютное ее значение – не более 80 °С).

Температуру электродвигателей можно измерять тепловизорами TESTO 875-2, Guide BritIR B0, термометрами СП-2К, термопреобразователями сопротивления ТСМ, ТСР, ТДВ, термопарами типа ТХА, ТХК, ТПП, ДТПЛ015 00 60, J (Fe-CuNi), с диапазоном измерения температур до +250–500 °С, или другими средствами отечественного и зарубежного производства.

Для дистанционного контроля температуры наружного нагрева и выявления неисправностей в работе электродвигателей удобными в применении являются тепловизоры с диапазоном измеряемых температур до +500 °С, которые позволяют осуществлять обследование, не прерывая рабочий процесс, при доступной стоимости

и высоком уровне безопасности персонала. Повысить эффективность и сократить затраты времени на проверки позволят тепловизоры для электрооборудования с заданной функцией температурной сигнализации. Использование термометров в данном случае не обеспечивает нужной точности измерения температуры обмоток статора электродвигателей из-за влияния обтекающего корпус электродвигателя потока воздуха, изменяющего результаты измерения.

Для повышения точности и безопасности измерения предложен метод эксплуатационного контроля температуры обмотки статора проведением замеров температуры в полости гнезда для рым-болта в корпусе электродвигателя. Эта зона выбрана, во-первых, из удобства доступа на большинстве рабочих машин; во-вторых, вывернув временно рым-болт, можно наиболее достоверно измерить температуру стали (поскольку в глубине гнезда рым-болта отсутствует движение воздуха); в-третьих, появляется возможность использования датчиков или сигнальных устройств, выполненных с возможностью ввертывания их в гнездо рым-болта.

Для применения данного метода на практике необходимо определить количественную связь между фактическими температурами нагрева лобовых частей обмотки и корпуса электродвигателя в гнезде рым-болта. С данной целью были проведены исследования ряда электродвигателей серий 4А и АИР различной мощности и частоты вращения [6]. В результате анализа выявлена возможность объединения ЭД разных типов в две группы, для каждой из которых определено значение коэффициента K_T , равного отношению фактической температуры лобовых частей обмотки к фактической температуре внутренней поверхности гнезда рым-болта.

Установлено, что для электродвигателей с частотой вращения 1000 и 750 с⁻¹ целесообразно использовать коэффициент $K_T = 1,4$, а для электродвигателей с частотой вращения 3000 и 1500 с⁻¹ – коэффициент $K_T = 1,7$, $K_T = K_{обм} / K_{корп} = 1,4-1,7$. Путем измерения температуры корпуса ЭД в гнезде рым-болта и умножением полученного результата на соответствующее значение K_T получают величину фактического нагрева обмотки в наиболее нагреваемой части. Итоговый результат сравнивают с предельно допустимой температурой нагрева изоляции соответствующего класса и делают выводы о степени нагрева ЭД. По стандарту Международной электротехнической комиссии, максимальная длительно допустимая температура нагрева изоляции классов В и F составляет 130 и 155 °С [7]. Обмотка ЭД серий 4А и АИР, у которых высота

оси вращения равна 50...132 мм, имеет класс нагревостойкости В или F, а при высоте 160...200 мм – F. В электродвигателях сельскохозяйственного и специального назначения изоляцию класса F зачастую стараются использовать по требованию В, тем самым создавая тепловой запас.

Исходя из полученных данных, составлены технические требования на устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей. Эти устройства могут состоять из двух блоков (универсального съемного исполнительного органа и датчика температуры), помещаемых в нижнюю часть полого стального болта нужного диаметра, либо представлять собой единый съемный прибор. Вворачиваемое основание должно иметь номер резьбы (по ГОСТ 7751-73) М8 для ЭД, у которых высота оси вращения равна 90, 100 и 112 мм, М10 – для 160 мм и М20 – для 180, 200 и 225 мм. С увеличением мощности защищаемого ЭД возрастает диаметр гнезда его рым-болта и соответственно диаметр вворачиваемой части устройства, что улучшает теплообмен и условия для более точного измерения температуры.

Устройство может быть изготовлено с электропитанием от клеммной коробки ЭД, от малогабаритного аккумулятора либо от специального блока питания, использующего электромагнитное поле самого защищаемого ЭД. Устройство срабатывает с подачей светового, звукового сигнала либо сигнала на отключение ЭД от электрической сети, а также контролирует температуру непрерывно или путем периодического ее измерения. На рисунке представлена общая схема устройства контроля нагрева и защиты электродвигателя [8, 9].

Рисунок 1
Схема устройства контроля нагрева и защиты электродвигателя

Устройство содержит полый металлический болт 1 с головкой под гаечный ключ, вворачиваемый в гнездо рым-болта электродвигателя 3, соединенного валом с рабочей машиной. Внутри нижней части полого металлического болта 1 установлен термодатчик 2, соединенный с усилителем 4, имеющим автономный источник блока питания 5. К выходу усилителя 4 подключен вход сигнального блока 6, имеющего датчик 7. К выходу сигнального блока 6 подключен индикатор-светодиод 8, звуковой генератор-зуммер 9 и отключающее устройство 10, соединенное с магнитным пускателем 11, который управляет работой электродвигателя 3. Датчиком 7 задают порог срабатывания сигнального блока 6, учитывающий значение предельно допустимой температуры перегрева обмотки защищаемого электродвигателя для данного класса изоляции, создают необходимый температурный запас. При помощи сигнального блока, светодиода, зуммера подают световой и звуковой сигналы, свидетельствующие о возникновении аварийной ситуации по причине нагрева обмоток выше допустимого значения и необходимости принятия срочных мер по ликвидации аварийной ситуации с отключением электродвигателя от сети. Термодатчик 2, установленный в торце полого болта 1, плотно прилегает к сердечнику электродвигателя, в пазах которого расположена обмотка статора, и контролирует их температуру. Для улучшения теплопроводности в местах контакта соединяемые части покрывают теплопроводящей пастой.

Измерение и контроль температуры статора электродвигателя осуществляется в зоне гнезда рым-болта, где нет обдувающего движения потока воздуха, воздействующего на показания термодатчика. Гнездо рым-болта – это предусмотренное технологией и временно не используемое в процессе работы электродвигателя наиболее близкое место доступа к обмотке, удобное для установки датчиков и других устройств, изготовленных с возможностью ввертывания.

Все элементы электрической схемы устройства смонтированы на печатной плате и вместе с малогабаритным аккумулятором, светодиодом, зуммером и отключающим устройством помещены в теплоустойчивый, герметичный пластиковый корпус, прочно соединенный с металлической вворачиваемой частью, выполненной в виде полого болта с гайкой под ключ, и представляет собой один съемный узел эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателя, который удобно применять для визуального и звукового контроля обслуживающим

персоналом степени нагрева электродвигателей, а также может быть эффективным его использование с действием на отключение. Разработан экспериментальный образец устройства с питанием от клеммной коробки электродвигателя. Диапазон контролируемых температур 20...200 °С [6].

В сельскохозяйственном производстве разработанное устройство следует применять для эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей мощностью 11 кВт и более, задействованных в технологических процессах, не допускающих внезапных перерывов, связанных с потерей продукции и большими материальными ущербами. Постоянно обновляемая информация о температурном состоянии обмоток статора электродвигателей позволяет персоналу своевременно принимать необходимые меры по устранению аварийных ситуаций в системе электроприводов технологического оборудования.

Выводы. Разработан новый метод эксплуатационного контроля нагрева и защиты обмоток статора электродвигателей, основанный на измерении и контроле температуры корпуса электродвигателя в зоне гнезда рым-болта. Установлена количественная связь между фактической температурой нагрева обмотки $T_{обм}$ и температурой нагрева корпуса $T_{корп}$ электродвигателя в непосредственной близости от обмотки, где нет обдувающего движения потока воздуха, воздействующего на показания термодатчика. Установлена зависимость соотношения температур обмотки статора электродвигателя и его корпуса и определено значение коэффициента $K_T = K_{обм} / K_{корп} = 1,4–1,7$. Измеренное значение температуры корпуса электродвигателя $T_{корп}$ умножают на соответствующее значение K_T и получают фактическое значение температуры нагрева обмотки $K_{обм}$. Вворачиваемое в гнездо рым-болта устройство удобно применять для визуального и звукового контроля степени нагрева электродвигателя или с действием на отключение его от сети.

В сельскохозяйственном производстве метод и устройство наиболее целесообразно применять для контроля и защиты относительно мощных электродвигателей, задействованных в технологических процессах, не допускающих внезапных перерывов и связанных с потерей продукции и большими материальными ущербами. Постоянно имеющаяся информация о температурном состоянии обмоток статора электродвигателей позволяет персоналу своевременно принимать необходимые меры по устранению аварийных ситуаций и предотвращению преждевременного выхода электродвигателей из строя.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия сельского хозяйства России на период до 2020 года [Текст]. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. 64 с.
2. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий [Текст]. М.: Агропромиздат, 1987. 187 с.
3. Сырых, Н.Н. Теоретические основы эксплуатации электрооборудования [Текст] / Н.Н. Сырых, Н.Е. Кабин. М.: Агробизнесцентр, 2007. 514 с.
4. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин [Текст] / О.Д. Гольдберг. М.: Высшая школа, 2000. 255 с.
5. Мусин, А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты [Текст] / А.М. Мусин. М.: Колос, 1979. 112 с.
6. Борисов, Ю.С. Эксплуатационный контроль нагрева обмотки электродвигателя. Энергетика, электрификация и автоматизация технологических процессов защищенного грунта [Текст] / Ю.С. Борисов // Сб. научн. тр. ВИЭСХ. 1992. Т. 79.
7. Стандарт МЭК 34-11, ч. 2. Правила защиты вращающихся электрических машин [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 1982.
8. Патент РФ № 2 409 884. Способ эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей [Текст] / А.И. Некрасов, А.А. Некрасов, Ю.С. Борисов и др. БИ № 2, 2011.
9. Патент РФ на полезную модель № 90942. Устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей [Текст] / А.И. Некрасов, А.А. Некрасов, Ю.С. Борисов, Н.Н. Сырых. Оpubл. в БИ № 2, 2010.

Сведения об авторах

1. **Некрасов Алексей Иосифович**, ORCID: 0000-0001-6141-984X, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение федеральный научный агроинженерный центр «Всероссийский институт механизации» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), 109428, Россия, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2, e-mail: nalios@mail.ru.

2. **Некрасов Антон Алексеевич**, ORCID: 0000-0001-5816-8939, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр «Всероссийский институт механизации» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), 109428, Россия, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2, e-mail: nalios@mail.ru.

Надежность работы асинхронных электродвигателей зависит от состояния изоляции их обмоток, которое обусловлено степенью нагрева в процессе эксплуатации. Аварийные режимы работы электродвигателей сопровождаются превышением допустимой температуры нагрева обмоток. Типовые защиты по ряду причин во многих случаях не защищают обмотки от таких режимов, поэтому до 80 % отказов электродвигателей в сельском хозяйстве приходится на перегорание обмоток статора. Для совершенствования защиты обмоток от аварийных режимов разработан метод эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей, основанный на измерении и контроле температуры корпуса электродвигателя в зоне гнезда рым-болта. Установлена количественная связь между фактической температурой нагрева обмотки $T_{обм}$ и температурой нагрева корпуса $T_{корп}$ электродвигателя в непосредственной близости от обмотки. В гнезде рым-болта отсутствует обдувающее движение потока воздуха, воздействующего на показания термодатчика. Установлена зависимость соотношения температур и

определено значение коэффициента $K_T = K_{обм} / K_{корп} = 1,4...1,7$. Измеренное значение температуры корпуса электродвигателя $T_{корп}$ умножают на соответствующее значение K_T и получают фактическое значение температуры нагрева лобовых частей обмотки $K_{обм}$. Вворачиваемое в гнездо рым-болта устройство удобно применять для визуального и звукового контроля обслуживающим персоналом степени нагрева электродвигателей. Может быть также эффективным использование устройства с его действием на отключение. Постоянно обновляющаяся информация о температурном состоянии обмоток статора электродвигателей позволяет персоналу своевременно принимать необходимые меры по устранению аварийных ситуаций и предотвращению преждевременного выхода электродвигателя из строя. В сельскохозяйственном производстве устройство наиболее целесообразно применять для контроля относительно мощных электродвигателей, задействованных в технологических процессах, не допускающих внезапных перерывов и связанных с потерей продукции и большими материальными ущербами.

ELECTRIC MOTOR WINDING HEATING CONTROL

Key words: *electric motor; heating control; stator winding; eyebolt socket; protective device.*

Authors' personal details

1. **Aleksey Nekrasov**, ORCID: 0000-0001-6141-984X, Doctor of Technical Sciences, chief researcher of the laboratory of power supply and heat supply, Federal scientific engineering center «All-Russian Institute of mechanization», 109428, 1st Veshnyakovsky proezd, 2, Moscow, Russia, e-mail: nalios@mail.ru.

2. **Anton Nekrasov**, ORCID: 0000-0001-5816-8939, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the laboratory of power supply and heat supply, Federal scientific engineering center «All-Russian Institute of mechanization», 109428, 1st Veshnyakovsky proezd, 2, Moscow, Russia, e-mail: nalios@mail.ru.

The asynchronous motors reliability depends on the insulation state of their windings, which is due to the degree of heating during operation. The emergency operation of electric motors is accompanied by exceeding the permissible temperature of heating the windings. Specific protections, for several reasons, in many cases, do not protect the windings from such modes. Therefore up to 80 % of motor failures in agriculture are due to burnout of the stator windings. The method for operational monitoring of heating and motor protection based on measuring and monitoring the temperature of the motor housing in the area of the eyebolt socket has been developed to improve the protection of the windings from emergency conditions. A quantitative relationship has been established between the actual heating temperature of the T_{wind} winding and the heating temperature of the motor housing T_{corp} near the winding. There is no airflow in the eyebolt socket that affects the readings of the temperature sensor. The dependence of the temperature ratio is estab-

lished, and the coefficient $C_t = C_{wind} / C_{corp} = 1,4 \dots 1,7$ is determined. The measured value of the temperature of the motor housing T_{corp} is multiplied by the corresponding value of the C_t , and the actual values of the heating temperature of the frontal parts of the coil C_{wind} are obtained. The device, screwed into the eyebolt socket, is conveniently used for visual and sound control by maintenance personnel of the degree of heating of electric motors. Using the device with its shutdown effect may also be useful. Always available information about the temperature state of the stator windings of electric motors allows personnel to take timely necessary measures to eliminate emergencies and prevent premature motor failure. In agricultural production, the device is most suitable for monitoring relatively powerful electric motors involved in technological processes that do not allow sudden interruptions and are associated with loss of products and extensive material damage.

© Некрасов А.И., Некрасов А.А.

УДК 631.171:621.311

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-55-3-112-119

А.И. Некрасов, А.А. Некрасов

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ключевые слова: *техническое обслуживание электрооборудования; отказы электродвигателей; технический ущерб; показатели эффективности; оборудование животноводческих ферм.*

Введение. Совершенствование системы эксплуатации электрооборудования позволит увеличить срок службы электрооборудования, сократить материальные затраты на приобретение нового и ремонт отказавшего электрооборудования,

а также снизить возникающие технологические ущербы сельскохозяйственных предприятий. Отказ электродвигателя вызывает экономический ущерб, состоящий из технологической и технической составляющих, возникших