

УДК 681.518.54:621.313.333-213.34



Б. Н. ВАНЕВ,
канд. техн. наук



Е. А. ВАРЕНИК,
канд. техн. наук



А. Н. ОМЕЛЬЧЕНКО,
доктор техн. наук

Техническое диагностирование (далее – диагностирование) – процесс определения технического состояния объектов с заданной точностью, включая поиск дефектов, нарушающих это состояние. Различают следующие состояния объекта:

- исправное (противоположное – неисправное);
- работоспособное (противоположное – неработоспособное);

Диагностирование взрывозащищенных рудничных асинхронных двигателей

Рассмотрено понятие технического диагностирования как процесса определения технического состояния объекта путем выделения на множестве всех технических состояний объекта некоторого подмножества, которому принадлежит его действительное состояние. Процедура проверки состояния объекта представлена как последовательная совокупность функционального и тестового диагностирования, дополняющих друг друга. Для взрывозащищенных рудничных асинхронных двигателей мощностью до 315 кВт приведен перечень процедур диагностирования и порядок их проведения, включая симптомы состояния двигателей, технические и организационные причины появления таких состояний, как основы алгоритма диагностирования. При анализе рекламаций и гарантийного ремонта двигателей учтены дополнительные признаки эксплуатационных отказов, происшедших по вине потребителя.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, исправное состояние, функциональное и тестовое диагностирование, алгоритм, симптом, дефект, организационная причина, эксплуатационные отказы.

Контактная информация: ukrniive@list.ru

- правильного функционирования (противоположное – неправильного функционирования).

Определения первого и второго из перечисленных состояний приведены в государственных стандартах [1, 2]. При третьем состоянии (правильного функционирования) объект выполняет в текущий момент реального времени предписанные алгоритмы функционирования со значениями параметров (например, коэффициента полезного действия, $\cos\phi$, пускового момента), соответствующими заданным требованиям, но может не выполнять их в другие моменты или в другом режиме работы.

Следовательно, **система технического диагностирования** как совокупность диагностируемого объекта, средств диагностирования и устройств сопряжения может быть предназначена для решения одной или нескольких задач:

- диагностирования исправного состояния;
- диагностирования работоспособного состояния;
- диагностирования правильного функционирования.

Таким образом, системы технического диагностирования используются на основных этапах жизненного цикла изделий: изготовления, эксплуатации или ремонта.

Цель разработки и внедрения этих систем на разных этапах жизненного цикла изделий:

при изготовлении – проверка исправности изделия, устранение явных и скрытых дефектов, повышение надежности, снижение количества рекламаций и размера штрафов;

при эксплуатации – проверка работоспособности изделия, раннее выявление появившихся дефектов, определение объема

и регламента работ по техническому обслуживанию и ремонту, уменьшение времени восстановления и ущерба от простоев производства при отказах;

при текущем ремонте – дефектация поступивших в ремонт изделий, определение его объема, повышение надежности отремонтированных изделий;

при гарантийном ремонте – проверка исправности изделия, установление причины передачи изделия в ремонт (по вине завода-изготовителя или потребителя), определение объема ремонта, повышение надежности отремонтированных изделий, снижение количества рекламаций и размера штрафов.

При диагностировании различают *рабочие воздействия*, поступающие на объект во время функционирования (или вырабатываемые объектом), и *тестовые воздействия*, которые специально подаются на объект. Поэтому различают техническое диагностирование *функциональное*, осуществляемое во время работы объекта, и *тестовое*, при котором объект в работу не включен. Процедура проверки состояния объекта и поиска дефектов, нарушающих исправность (работоспособность), состоит из двух частей: вначале тестовое диагностирование и затем проведение (имитация) режима функционирования объекта, во время которого диагностируются дефекты, не выявляемые средствами тестового диагностирования. В задачу тестового не включают диагностирование по таким дефектам, которые введены в задачу функционального, так что обе процедуры дополняют одна другую.

Диагностирование трактуется как процесс выделения на множестве E всех технических состояний объекта некоторого подмножества, которому принадлежит его действительное состояние E^* [3]. Пусть подмножество $E_{и}$ исправно, а остальные определяются множеством рассматриваемых дефектов объекта (рис. 1). *Проверка исправности* объекта состоит в том, чтобы установить, является ли его состояние E^* состоянием $E_{и}$ (объект исправен) или принадлежит подмножеству $E_{н}$ (объект неисправен). *Проверка работоспособности* предусматривает определение, какому из подмножеств принадлежит объект: работоспособному $E_{р1}$ (включая и $E_{и}$) или неработоспособному $E_{р2}$, а *проверка правильности функционирования* – деление

множества E на два других подмножества: правильного функционирования $E_{\phi1}(t)$, включая в него $E_{р1}$ и $E_{и}$, и неправильного функционирования $E_{\phi2}(t)$. В последнем случае деление на подмножества не является фиксированным, а изменяется в реальном времени t в зависимости от того, какую функцию реализует объект в текущий момент.

Процесс диагностирования состоит из отдельных действий – элементарных проверок P объекта, в результате которых получают ответы объекта как совокупность диагностических значений параметров. Формальное описание процесса, т. е. последовательность таких проверок с правилами анализа их результатов, представляет собой *алгоритм* диагностирования. При разработке системы функционального или тестового диагностирования необходимо, изучив структуру и принцип работы объекта диагностирования, указав перечень возможных дефектов, условия и признаки их проявления, составить алгоритм с использованием математической или логической модели объекта.

Таблица, в которой сопоставлены элементарные проверки из множества P и технические состояния из множества E , называется *таблицей функций неисправности* (ТФН). Если в множестве P все проверки имеют один и тот же состав контрольных точек, то построенный по ТФН алгоритм будет представлять собой совокупность входных воздействий. Такие алгоритмы называют *тестами*, задача их построения типична для дискретных объектов, когда за контрольные точки принимают внешние выходы объектов. Если все проверки могут иметь одно и то же

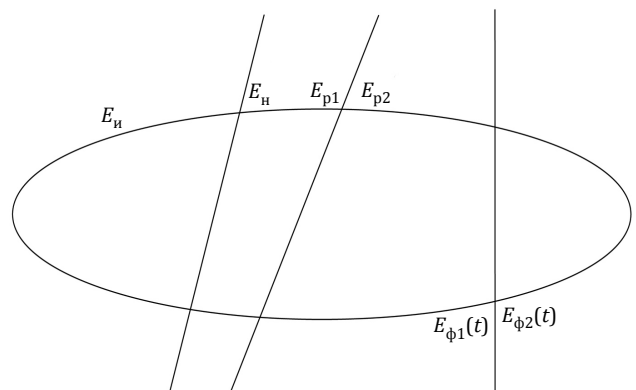


Рис. 1. Диагностирование в терминах разбиения множества технических состояний на подмножества.

входное воздействие (последовательность воздействий) и отличаться только составами контрольных точек, то алгоритм будет представлять собой совокупность контрольных точек, в которых наблюдают ответы объекта при его диагностировании. Такие алгоритмы характерны для аналоговых объектов, представленных их логической моделью.

Например, электродвигатели с этой точки зрения относят к аналоговым объектам, входные, внутренние и выходные координаты которых могут принимать любые из их континуальных значений, а время отсчитывается непрерывно. Техническое состояние аналоговых объектов можно оценить по принципу «в норме – не в норме». При этом используются модели логического типа, которые построены интуитивно, без составления математической модели, только на основании рассмотрения структуры объекта и производственного опыта.

Алгоритмы диагностирования необходимо составлять таким образом, чтобы содержа-

щиеся в них множества P обеспечивали окончательное деление множества E на классы E_k . Реализацию алгоритма диагностирования конкретного объекта завершает выделение класса E_k^* множеств, содержащего состояние E^* .

Различают безусловные и условные алгоритмы диагностирования. В первом случае задают фиксированную последовательность проверок, информация о техническом состоянии поступает и обрабатывается последовательно, а заключение о техническом состоянии объекта дается только после окончания всех проверок. Во втором случае последовательность и состав проверок зависят от результатов анализа предыдущих проверок.

В угольной промышленности широко применяют взрывозащищенные рудничные низковольтные *асинхронные двигатели* (далее – двигатели) мощностью от 0,25 до 315 кВт. На рис. 2 изображен перспективный вариант подобной серии [4]. Для таких изделий проблема диагностирования особенно важна, поскольку

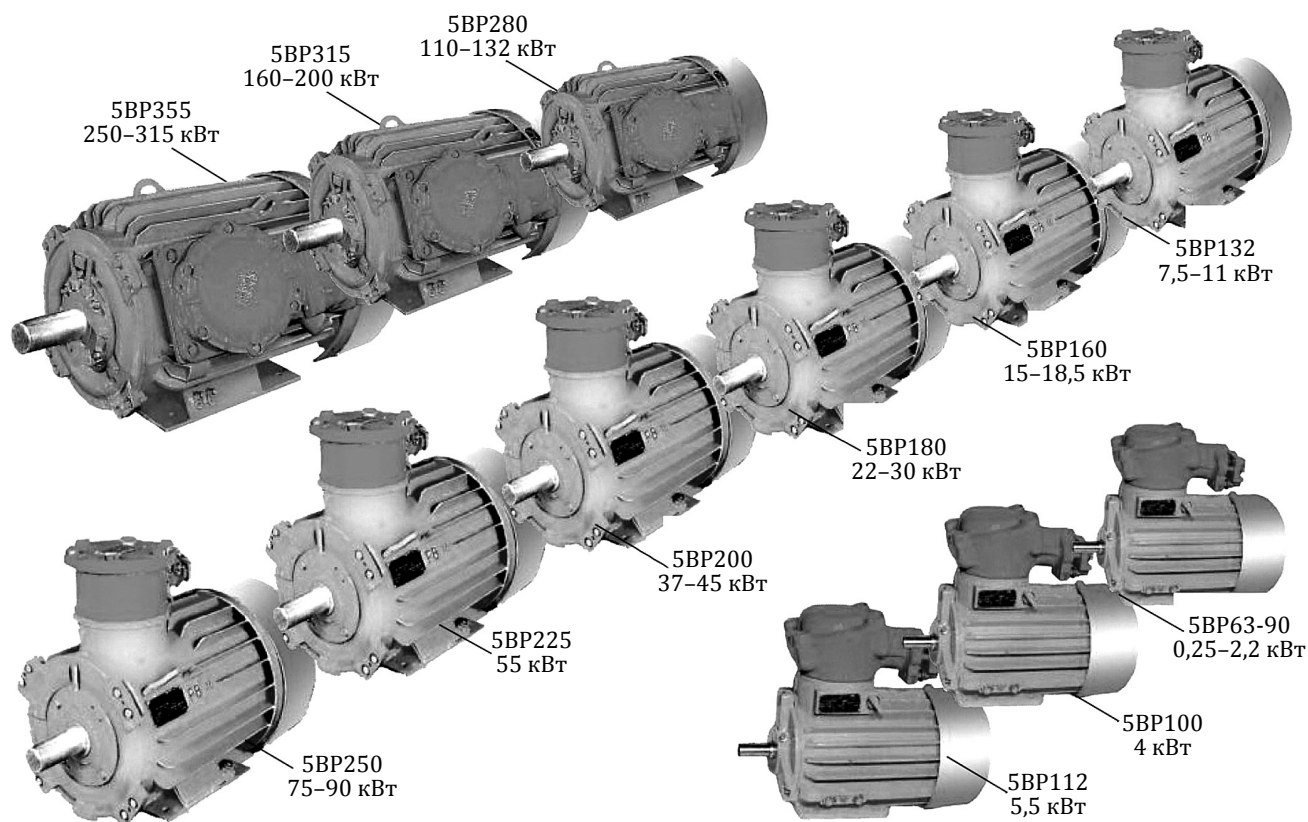


Рис. 2. Серия взрывозащищенных рудничных асинхронных двигателей 5BP63-355 в исполнении по взрывозащите РВЗВ.

ку их отказы могут не только вызвать значительный экономический ущерб у потребителя из-за остановки производства, но и привести к взрыву метановоздушной среды, пожару или поражению шахтеров электрическим током.

Учет специфических условий производства, эксплуатации и диагностирования рассматриваемых двигателей потребовал целенаправленной проработки вопросов диагностирования данных изделий в их совокупности. Итоги этой научной и производственной работы и учет опыта работы одного из заводов-изготовителей, а также ремонтного завода позволили разработать полные алгоритмы диагностирования исправного состояния двигателей [5, 6], регламентированные стандартом [7]*.

Разработка алгоритмов диагностирования исправного состояния двигателей заключается в выявлении основных условий оценки и признаков такого состояния на основании интуитивного анализа принципа работы двигателей, их структуры, конструкции, выполняемых функций и требований безопасности. Часть условий и признаков характерна отдельно для двигателей с воздушным и водяным охлаждением, а также отдельно для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

В начале алгоритма диагностирования проводят 35 тестовых элементарных проверок (от проверки паспорта на двигатель до контроля правильности действий обслуживающего персонала при его включении). Затем следуют 16 элементарных проверок функционального диагностирования. Для обоих видов диагностирования составлена ТФН совпадения 44 симптомов неисправного состояния S_j и 96 вызывающих их дефектов объекта d_i , частично приведенная в табл. 1, в последней графе которой указана организационная причина дефекта: индекс «П» означает, что он произошел по вине потребителя (так называемый эксплуатационный отказ), индекс «З» – по вине завода-изготовителя, индекс «Н» – организационная причина дефекта не определена.

Определение организационной причины дефекта особенно необходимо при анализе ре-

кламаций потребителей, поскольку принятие рекламации на эксплуатационный отказ объекта наносит необоснованный ущерб заводу-изготовителю. Согласно ГОСТ 27.003–83, *эксплуатационным отказом* (дефектом) называется отказ, возникший в результате нарушения установленных правил (или) условий эксплуатации объекта. В нормативном документе [2] наряду с конструкционными и производственными отказами (дефектами) также выделены отказы вследствие перегрузки объекта, превышающей его установленные способности, и вследствие неправильного или неосторожного обращения с ним.

По сложности определения организационных причин дефектов признаки эксплуатационных отказов разделены на основные и дополнительные. Основные признаки следуют из самого вида отказа, из его технической сущности, и обозначены в табл. 1 индексом «П». Дополнительные признаки требуют оценки сопутствующих признаков и представлены частично в табл. 2. В графе 2 табл. 2 приведены симптомы отказов S_j в соответствии с табл. 1, для которых организационная причина отказа ранее не была определена (этому соответствовал индекс «Н»), что потребовало учета 30 сопутствующих признаков, представленных в графе 3 табл. 2.

Разработанный алгоритм диагностирования является условным, т. е. оно может быть прекращено после любой проверки, как только будет доказана вина потребителя или вина завода-изготовителя. Если при анализе рекламации вина потребителя не установлена, то при разработке мер корректирующего воздействия завод-изготовитель использует результаты заводской идентификации (прослеживаемости) этого образца асинхронного двигателя (данные входного контроля материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий, сведения о соблюдении технологического режима, результаты пооперационных и приемо-сдаточных испытаний по групповому маршрутному паспорту). В случае необходимости предъявляются рекламации заводам-изготовителям материалов, полуфабрикатов или комплектующих изделий на поставленные ими партии продукции, а данные о причинах отказов двигателя сообщаются их разработчику с требованием принятия мер по устранению и предупреждению отказов.

* В разработке стандарта принимали участие канд. техн. наук В. М. Гостищев, Г. М. Гринь, канд. техн. наук П. И. Захарченко, С. М. Кожуров, В. Н. Оприян; использованы материалы Ю. В. Качанова, В. Н. Петухова, О. Н. Прас, В. А. Тимошенко.

Таблица 1

Симптом неисправного состояния S_j	Дефект d_i	Организационная причина дефекта
S1. Срабатывание максимальной токовой защиты	d1. Неправильно выбрана уставка защиты	П
	d2. Междуфазное замыкание или замыкание на корпус обмоток двух или трех фаз статора	Н
	d3. Короткое замыкание силовых жил кабеля от пускателя до двигателя	П
	d4. Короткое замыкание в пускателе	П
S2. Срабатывание защиты от утечек тока	d5. Снижение сопротивления изоляции обмотки статора	Н
	d6. Замыкание на корпус в обмотке одной фазы статора	Н
	d7. Снижение сопротивления изоляции силового кабеля или замыкание на корпус жил кабеля	П
	d8. Снижение сопротивления изоляции или замыкание на корпус в пускателе	П
S3. Срабатывание защиты от токовой перегрузки	d9. Перегрузка двигателя	П
	d10. Заклинивание рабочей машины	П
	d11. Затирирование или заклинивание двигателя из-за неточности изготовления	З
S7. Двигатель с короткозамкнутым ротором перегревается и развивает пониженную частоту вращения, пульсация силы тока статора, большой шум	d15. Отрыв стержней обмотки ротора от короткозамыкающего кольца ротора или разрыв этого кольца	З
S9. Затяжной пуск (разгон) двигателя	См. d9, d10, d11 d18. Обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора	З
S18. Повышенная вибрация двигателя	d34. Плохое центрирование двигателя с рабочей машиной	П
	d35. Повреждение соединительной муфты (шестерни, шкива)	П
	d36. Ослабление крепления двигателя к фундаменту или фланцу редуктора	П
	d37. Недостаточная прочность фундамента	П
	d38. Передача вибрации от рабочей машины	П
	d39. Двигатель резонирует со своим фундаментом	П
	d40. Сердечник ротора сместился по валу	З
	d41. Ослабление крепления вентилятора или его поломка	Н
	d42. Износ шпоночного паза свободного конца вала или его шпонки	Н
	d43. Плохая балансировка ротора	З
S19. То же на частоте вращения двигателя	d43. Плохая балансировка ротора	З
S20. То же на частоте от 100 до 600 Гц или от 3000 до 10000 Гц	d44. Износ подшипников	Н
S26. Стук подшипника, нередко сопровождающийся повышением его температуры	d50. Повреждение деталей подшипника (колец, тел качения, сепаратора)	Н
S27. Температура подшипника выше 100 °С, ненормальный шум	См. d34, d35, d50	
	d51. Загрязнена, затвердела или отсутствует смазка подшипника	П
	d52. Чрезмерное количество смазки в подшипнике	П
	d53. В подшипниковом узле отсутствуют осевые зазоры для компенсации температурного удлинения вала	З
	d54. Осевое давление от рабочей машины (например, насоса) передается на вал АД	П
d55. Охлаждающая вода не поступает в теплообменник щитов	Н	
S28. Из подшипникового узла выбрасывается смазка	См. d52	
	d56. Износ уплотнений подшипникового узла	Н
d57. В подшипник заложена низкотемпературная смазка или смазка двух несовместимых марок	П	

1	2	3
S34. Внутрь двигателя протекает масло из редуктора рабочей машины	d67. Износ уплотнений редуктора	П
S35. То же эмульсия при срабатывании турбомуфты	d68. В турбомуфте вместо плавкой пробки ввинчен болт, что вызвало разрыв мембраны и выброс эмульсии d69. Забиты угольным штыбом сливные отверстия в кожухе (проставке), закрывающем турбомуфту	П П
S42. Двигатель с фазным ротором перегревается, частота вращения понижена, сильный шум, пульсация силы тока статора	d89. Плохое контактирование в пайках лобовых частей или нулевой точке обмотки фазного ротора d90. То же в выводных проводах, контактных кольцах или щеточном аппарате d91. То же в пусковом реостате или в контактных соединениях между двигателем и пусковым реостатом d92. Недостаточное сечение соединительных проводов между двигателем и пусковым реостатом	З З П П
S43. Двигатель с фазным ротором работает с 1/2 номинальной частоты вращения, сильный шум	d93. Обрыв в обмотке одной фазы ротора, щеточного аппарата или пускового реостата d94. Обрыв в двух фазах пускового реостата или соединительных проводов между реостатом и двигателем d95. Значительная несимметричность сопротивления ступеней пускового реостата	Н П П
S44. Двигатель с фазным ротором самопроизвольно идет в ход при разомкнутой цепи ротора, при пуске под нагрузкой развивает пониженную частоту вращения и сильно нагревается	d96. Междофазное замыкание в обмотке ротора или между соседними хомутками ее лобовых частей	Н

Таблица 2

Симптом отказа S_j	Сопутствующие признаки	Техническая причина отказа по вине предприятия-потребителя
Отказ обмотки статора и (или) обмотки фазного ротора		
Витковое замыкание, или междофазное замыкание, или замыкание на корпус, или выплавление пайки в схеме соединения, или их совокупность	Потемнение лобовых частей обмотки статора, на поверхности сердечника ротора имеются цвета побежалости, температурная защита исправна, вал двигателя свободно вращается от руки, вентиляторы целы	Систематическая перегрузка двигателя по мощности или за счет частых пусков при преднамеренно отключенной температурной защите или заклинивании рабочей машины У двигателя с водяным охлаждением – эксплуатация без подачи воды У двигателя с воздушным охлаждением – заштыбовка ребер станины или отверстий кожуха вентилятора
	То же, но поломаны лопасти наружного вентилятора или он снят	Эксплуатация асинхронного двигателя при ухудшении его обдува
Междофазное замыкание, или замыкание на корпус, или снижение сопротивления изоляции ниже 0,5 МОм (или коэффициента абсорбции ниже 1,3), или их совокупность	Внутри полости статора видны следы пребывания воды или масла (коррозия внутренней поверхности или ее замасливание); у двигателя с водяным охлаждением течи корпуса нет	Двигатель был залит шахтной водой или эмульсией (из турбомуфты, из гидросистемы) или маслом из редуктора рабочей машины
Равномерное потемнение изоляции обмотки одной фазы (обмотка соединена «треугольником»)	Изоляция обмоток двух других фаз находится в хорошем состоянии	Потеря контактирования в одной фазе питающей сети
То же двух фаз (обмотка соединена звездой)	Изоляция обмотки третьей фазы находится в хорошем состоянии	То же
Отказ короткозамкнутой обмотки ротора		
Выплавление обмотки ротора	Температурная защита исправна, вал двигателя свободно вращается от руки	Заклинивание рабочей машины или перегрузка двигателя с его самопроизвольной остановкой при отключенной защите

1	2	3
Отказ подшипника		
Заклинивание подшипника или его разрушение	Смазка подшипника вытекла, на поверхности сердечника ротора имеются цвета побежалости, температурная защита исправна	Систематическая перегрузка двигателя при отключенной защите вызвала перегрев ротора, вала и подшипника, затем разложение и вытекание смазки
	Смазка подшипника вытекла, сломаны штуцера или уплотнения водяного охлаждения щитов	Эксплуатация без подачи воды из-за повреждений вследствие небрежного транспортирования
	Смазка подшипника затвердела или отсутствует, подшипник потемнел или корродирован	Смазка подшипника не пополнялась длительное время
Заклинивание подшипника с выплавлением короткозамкнутой обмотки ротора	Одна из предыдущих совокупностей признаков	Одна из предыдущих причин
Отказ температурной защиты		
Отключены от зажимов или обрезаны провода защиты или контрольные жилы кабеля	–	Неквалифицированный монтаж или техническое обслуживание
Отказ контактно-щеточного аппарата		
Щетки застревают в обойме и плохо контактируют с кольцами	На обоймах имеются царапины, вмятины, следы ударов	То же
Отказ вводной коробки		
Выплавление паек наконечников выводных проводов или силового кабеля	Слабое контактирование в силовых зажимах (отсутствие пружинных шайб, недостаточное нажатие контактных гаек)	» »

Выводы. Представленная совокупность симптомов неисправного состояния рассматриваемых асинхронных двигателей, технических и организационных причин его появления взята за основу при составлении алгоритма их технического диагностирования, выполняющего функцию обратной связи процесса проектирования, изготовления, транспортирования, хранения и эксплуатации.

Указанный алгоритм позволяет по полученной достоверной информации о видах и причинах дефектов (повреждений, отказов) разрабатывать и осуществлять меры, обеспечивающие: регулирующее воздействие на источники и причины появления дефектов; повышение качества и надежности выпускаемых асинхронных двигателей; снижение количества рекламаций; повышение эффективности производства; снижение ущерба потребителей от отказов двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Надежность* в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – Введ. с 01.07.1990.

2. *Надійність* техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.

3. *Надежность* и эффективность в технике: справочник: в 10 т. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 9: Техническая диагностика / [под ред. В. В. Клюева, П. П. Пархоменко]. – 352 с.

4. *Кайка В. В.* Перспективи впровадження в серійне виробництво нових високоефективних енергозберігаючих вибухозахищених асинхронних двигунів / В. В. Кайка, Г. В. Красніков, О. В. Кукулевський // Взрывозащищенное электрооборудование : сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, Лтд, 2008. – С. 168-173.

5. *Ванеев Б. Н.* Алгоритмы технического диагностирования низковольтных асинхронных двигателей / Б. Н. Ванеев, В. М. Гостищев, С. М. Кожуров, В. Н. Оприан // Уголь Украины. – 2007. – № 3. – С. 31-35.

6. *Техническое диагностирование взрывозащищенных рудничных АД* / [Б. Н. Ванеев, Е. А. Вареник и др.]. – Донецк: ООО АИР, 2009. – 58 с.

7. *Двигатели асинхронные низковольтные взрывозащищенные и рудничные мощностью до 315 кВт.* Система управления качеством. Анализ рекламаций по качеству продукции. Методика технической диагностики отказавших двигателей: СОУ 05758925.204:2005. – Офиц. изд. – Первомайск: ОАО «Первомайский электромеханический з-д», 2005. – 52 с.