

ОБЗОР

УДК 621.313.333(075.9)

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-107-115

ОБЗОР ВИДОВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

Ю. И. Рясков, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Н. М. Шайтор, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

А. В. Горпинченко, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Рассмотрены неисправности электрических машин, которые имеют место вследствие коротких замыканий, перегрузок, изменения напряжения питающей сети. Особое внимание уделено повреждению изоляции обмоток статора и межвитковым замыканиям. Дан обзор применения релейной защиты для предотвращения неисправностей электрических машин при возникновении аварийных режимов. Установлено, что существующие виды защит – мгновенная релейная защита, токовая защита, защита от межфазных коротких замыканий, защита от перегрузки, защита от минимального напряжения – не гарантируют сбережения машины при межвитковых замыканиях. Эти виды защит не обладают достаточной избирательностью, чувствительностью и быстродействием, не учитывают существующую асимметрию напряжения питающих сетей и способны приводить к ложным срабатываниям.

Рассмотрены предпосылки возникновения коротких замыканий: тяжелые условия работы, недостаточная стабильность электрических свойств изоляционных материалов, несовершенная технология укладки обмоток. Установлено, что основными причинами возникновения коротких замыканий в обмотках машин являются: повреждение изоляции под влиянием внешних воздействий, продолжительная работа электродвигателя при повышенной температуре обмоток, естественное старение изоляции.

Рассмотрены особенности физических процессов, происходящих при витковых замыканиях в отдельной фазе статора, при различном соединении катушечных групп обмотки, сопровождающихся образованием электрической дуги и повреждением изоляции.

Особое внимание уделено внедрению релейной защиты для предупреждения межвитковых замыканий в статорных обмотках, следствием которых является неремонтопригодное состояние электрических машин.

Установлено, что перспективным видом является защита, реагирующая на изменение магнитных потоков рассеяния статорных обмоток двигателя, чувствительным элементом которой является кольцевая измерительная катушка, расположенная внутри двигателя у лобовой части обмотки, а ее выводы подключены к реагирующему органу. Однако это изобретение имеет существенные недостатки, а именно: при асимметрии питающего трехфазного напряжения данная защита срабатывает на отключение двигателя подобно срабатыванию при витковом замыкании между секциями одной фазы.

Авторы рекомендуют применять специальный трансформатор, включенный между питающей сетью и выходом измерительной катушки. Вследствие этого асимметричные составляющие компенсируют друг друга, и защита срабатывает только при межвитковом замыкании в фазе обмотки статора.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, аварийные режимы, асимметрия напряжения, фазные обмотки, межвитковое замыкание, поток рассеяния, измерительная катушка.

Введение

Современный мир развивается по пути возрастания потребления электрической энергии. Создаются перспективные структуры энергетических систем и комплексов, разрабатываются новые методы их исследования и оценки качества с целью повышения экономичности, надежности и безопасности.

Асинхронные двигатели (АД) давно и прочно заняли лидирующие позиции в энергетике среди силовых агрегатов различного типа оборудования. Вместе с тем они обладают и относительно высокой повреждаемостью – ежегодно выходят из строя около 25 % от общего числа установленных электродвигателей. Убытки от отказов АД включают в себя производственные

потери, потери сырья, ремонт производственного оборудования, некачественное производство и задержки поставки, убытки от простоя и брака. По этой причине проблема предупреждения отказов электрических машин в электроэнергетических системах и комплексах является острой и актуальной [1, 2].

АД обычно рассчитаны на срок службы 15...20 лет без капитального ремонта при условии их правильной эксплуатации. Однако в реальных условиях имеет место плохое качество питающего напряжения и нарушение правил технической эксплуатации: технологические перегрузки, условия окружающей среды (повышенная влажность и температура), снижение сопротивления изоляции, нарушение режимов охлаждения. В качестве неисправностей асинхронных двигателей в настоящее время отмечают: перегрузка или перегрев статора электродвигателя – 31 %; межвитковое замыкание – 15 %; прочие виды неисправностей – 55 % [3, 4].

Высокая повреждаемость обмоток электрических машин объясняется не только тяжелыми условиями их работы, но и недостаточной стабильностью электрических свойств изоляционных материалов, несовершенной технологией укладки обмоток, которые приобретают качество дефектной неремонтируемой структуры с отложенной аварийностью. В результате повреждения изоляции может произойти замыкание между обмоткой и магнитной системой, между витками катушек или между фазными обмотками [5, 6]. Основной причиной повреждения изоляции является резкое снижение электрической прочности под влиянием увлажнения, загрязнения поверхности обмоток, попадания в электродвигатель металлической стружки, токопроводящей пыли, наличия в охлаждающем воздухе паров агрессивных жидкостей, продолжительной работы электродвигателя при повышенной температуре обмоток, естественного старения изоляции [7, 8].

Цель исследований – обзор современных видов и способов защит с разработкой усовершенствованной и надежной защиты электрической машины при межвитковых коротких замыканиях.

Защита электродвигателей в приводах энергетических систем и комплексов

Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики служат для предупреждения аварийных и аномальных режимов работы в приводах энергетических систем и комплексов. Наиболее тяжелые повреждения связаны

с возникновением коротких замыканий (КЗ) электрических машин, которые сопровождаются электрической дугой и выгоранием изоляционных материалов.

Для электродвигателей напряжением до 1000 В применяются следующие виды защит: мгновенная релейная защита (PЗ); PЗ от межфазных КЗ, PЗ от перегрузки, PЗ от минимального напряжения. Защита от КЗ отключает двигатель при появлении в его силовой (главной) цепи или в цепи управления токов короткого замыкания. В качестве аппаратов защиты используются плавкие предохранители, электромагнитные реле, автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями (Трехфазные асинхронные двигатели). Общие сведения и координация аппаратов АББ. URL: <https://library.e.abb.com/public/db1c75af81f61e73c1257dd3004bf1a2/QT7RU2014.pdf>, [9].

Схема магнитного пускателя и защиты предохранителями показана на рис 1, а. При понижении напряжения питающей сети якорь контактора *YA1* отпадает, и электродвигатель отключается, чем осуществляется защита от минимального напряжения. Для более точного срабатывания защиты асинхронных двигателей применяются схемы защиты с реле, которые позволяют учесть токи пуска и торможения и не реагируют на них (рис. 1, б). Срабатывание максимального реле тока *KA* приводит к выключению магнитного пускателя и обесточиванию двигателя. Защита асинхронных двигателей также осуществляется автоматическими выключателями *QF*. Они могут выполнять функции выключателя, контактора, максимального токового или теплового реле, могут содержать независимый или нулевой расцепитель. В сравнении с плавкими вставками они более точны, надежны и безопасны в работе (Устройства защиты двигателей. URL: <http://www.pro-schneider.ru/production/management%20and%20automation/puskoreg%20apparatura/devices%20protection%20of%20engines/>, [10].

Защита от межфазных КЗ для электродвигателей мощностью до 5 МВт выполняется токовой отсечкой без выдержки времени (рис. 1, в). Токовое реле *KA1* включается через дополнительные трансформаторы тока в цепи статорных обмоток электродвигателя и воздействует на отключающий контактор *KA2*.

Для защиты основной массы двигателей 0,4 кВ применяют двухрелейную схему «неполная звезда» (рис. 2, а). На рис. 2, б приведена схема релейной защиты электродвигателя от межфазных, однофазных КЗ и перегрузки. Токовая от-

сечка от межфазных (реле $KA2, KA4$) и защита от однофазных КЗ (реле $KA1$) действуют без выдержки времени на отключение выключателя Q (независимый расцепитель YA). Реле $KA1$ включено в схему фильтра тока нулевой послед-

овательности и реагирует на однофазные замыкания на землю. Защита от перегрузки (реле $KA3$) действует с выдержкой времени на отключение электродвигателя или на срабатывание сигнализации.

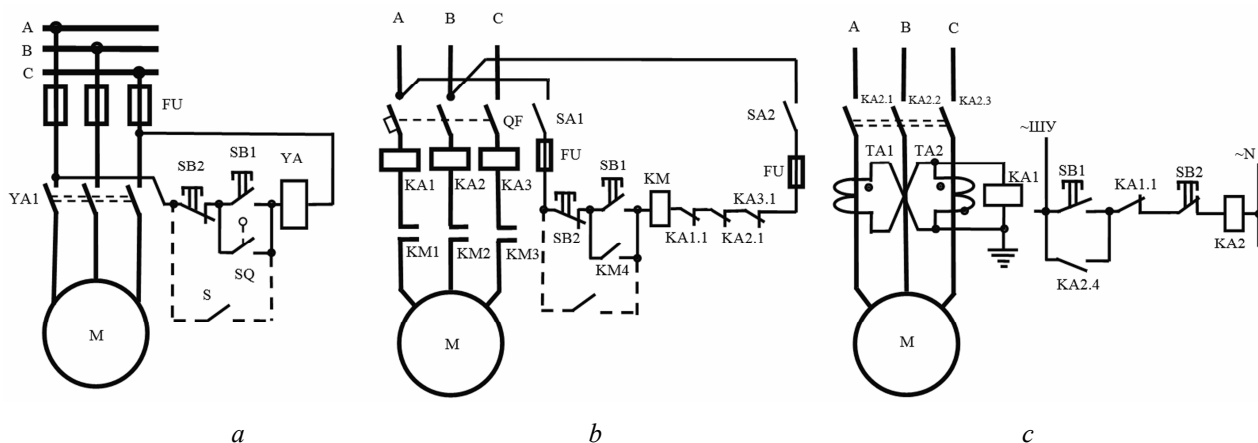


Рис. 1. Схемы защиты асинхронных двигателей:

a – минимальная по напряжению; *b* – максимальная по току; *c* – однорелейная от межфазных коротких замыканий

Fig. 1. Protection schemes of asynchronous motors:

a - minimum voltage; *b* - maximum current; *c* - single-relay protection against phase-to-phase short circuits

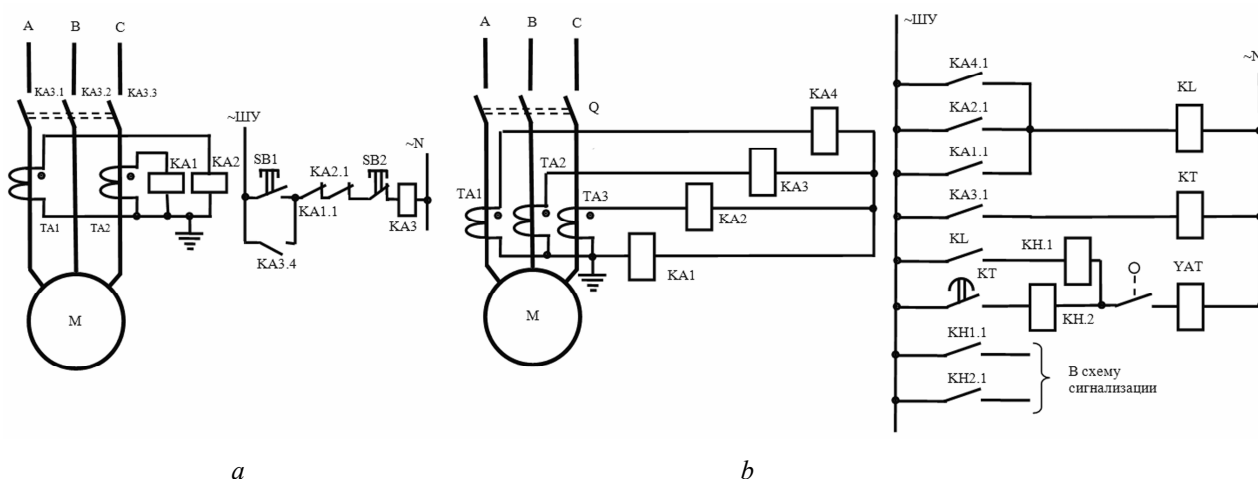


Рис. 2. Схемы защиты от коротких замыканий:

a – двухрелейная от межфазных замыканий; *b* – от однофазных и межфазных замыканий и перегрузки

Fig. 2. Circuit protection against short circuits:

a - two-relay from phase-to-phase closures; *b* - from single-phase and phase-to-phase closures and overload

В отличие от токовой отсечки защита от однофазных КЗ токовым реле KA не требует отстройки от пускового тока электродвигателя (рис. 3, *a*). На рис. 3, *b* представлена схема защиты от перегрузки с тепловым реле KK . Для защиты от перегрузки чаще применяют максимальные токовые защиты с использованием токовых реле. Такую защиту выполняют токовым реле $KA1$, срабатывающим на один из фазных токов (рис. 3, *c*) или на два фазных тока (рис. 3, *d*) [11, 12].

При недостаточной чувствительности, селективности или низком быстродействии защиты применяют микроэлектронную и микропроцессорную защиты [13, 14]. Микропроцессорная защита обладает многофункциональностью, высокой чувствительностью, более стабильными и точными характеристиками, позволяет более полно использовать перегрузочные характеристики защищаемого двигателя, выполняет функцию ранней диагностики развития аварий, имеет функцию самодиагно-

стики. Вместе с тем она не защищает двигатель от межвитковых замыканий статорных обмоток. Эти защиты являются уязвимыми, поэтому

для обеспечения надежности их целесообразно использовать совместно с релейной защитой [15, 16].

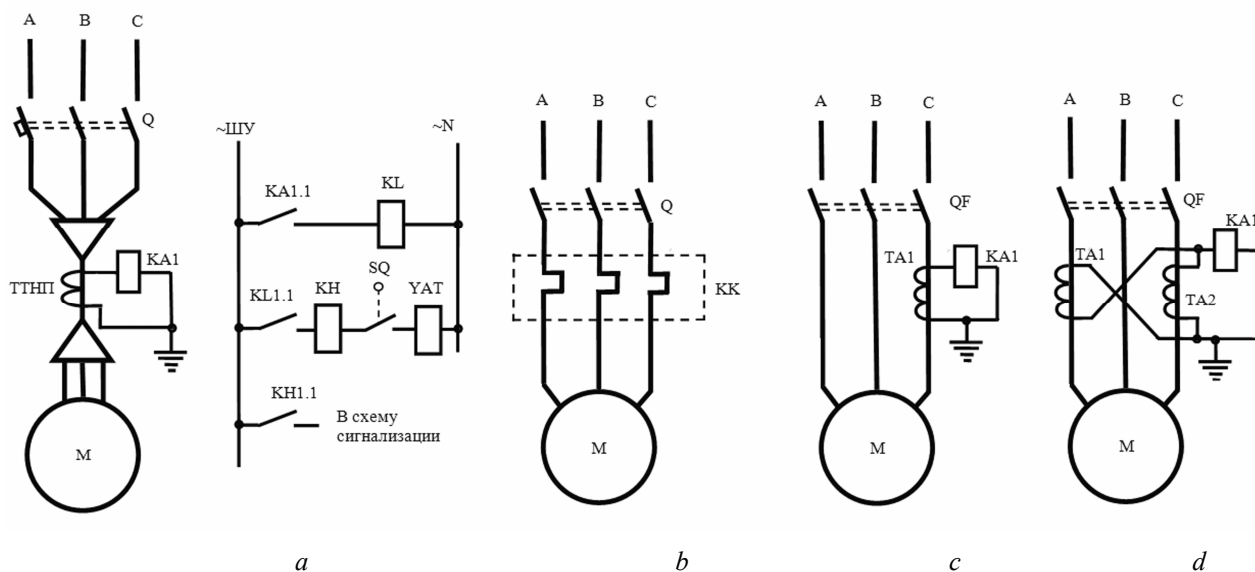


Рис. 3. Схемы защиты от коротких замыканий и перегрузки: *a* – релейная от однофазных замыканий; *b* – тепловая от перегрузки; *c* – однофазная от перегрузки; *d* – двухфазная от перегрузки

Fig. 3. Short circuit and overload protection circuits: *a* - relay from single-phase short circuits; *b* - thermal overload; *c* - single-phase overload protection; *d* - two-phase overload protection

Проблемные вопросы защиты электрических машин от межвитковых замыканий

Межвитковые замыкания в фазе обмотки статора являются достаточно распространенным и тяжелым видом повреждения, так как значение тока в короткозамкнутых витках может быть соизмеримо со значениями тока многофазных КЗ. Однако при этом изменение потребляемого фазой тока из сети незначительно и недостаточно для срабатывания максимальной токовой защиты, токовой отсечки или дифференциальной токовой защиты на ранней стадии развития аварийного процесса. По этой причине выполнение чувствительной защиты от межвитковых замыканий представляет собой сложную задачу [17, 18].

Некоторые авторы полагают, что необязательно устанавливать релейную защиту от межвиткового замыкания ввиду сложности ее идентификации, и считается, что в процессе развития аварии она либо перейдет в замыкание на корпус, либо в замыкание между фазами. В случае межвиткового замыкания двигатель будет отключен этими максимальными защитами [19, 20]. Ошибочность этого подхода опровергается следующими исследованиями. На рис. 4, *a* показано замыкание между секциями одной фазы *A*, соединенными последовательно и находящимися в верхнем и нижнем слоях паза, при этом об-

разуется короткозамкнутый виток. С физической точки зрения это сравнимо с появлением на статоре четвертой неподвижной обмотки, замкнутой накоротко. Поэтому в короткозамкнутом витке установившийся ток короткого замыкания будет равен пусковому току, превышающему в 5...7,3 раза номинальный ток. В соответствии с законом саморегулирования при постоянном питающем напряжении такой ток короткого замыкания в 1 % замкнутых витков вызовет увеличение тока в неисправной фазе только на 5...7 %. Этого недостаточно для срабатывания максимальной токовой защиты.

На рис. 4, *b* показано замыкание между секциями, когда катушечные группы для образования фазы соединены параллельно. В этом случае образуется не один, а два короткозамкнутых контура. На рис. 4, *c* показано замыкание витков секций фазы *A* и фазы *C* при соединении фаз треугольником. В этом случае образуется сложный короткозамкнутый контур, по которому протекает ток короткого замыкания, включая проводники обмотки фазы *B*.

Срабатывание максимальной токовой защиты при рассмотренных межвитковых замыканиях произойдет тогда, когда ток фазы достигнет значений не менее $2,5...3 I_n$, что соответствует повреждению 40...50 % витков фазы. При восстановлении такого двигателя необходимо пол-

ностью заменить сердечник статора и обмотку, а стоимость ремонта составляет около 70 % стоимости нового двигателя.

Исследования показывают, что в процессе образования короткозамкнутого витка при пробое витковой изоляции между секциями глухое металлическое замыкание устанавливается не сразу. Этот процесс перемежается аварийной циклической коммутацией цепи,

что стимулирует сильную электрическую дугу при большой температуре горения. Процесс вызывает лавинообразное повреждение изоляции, оплавление зубцов статора и расширение зоны повреждения. Поэтому очень важно мгновенно определить вид повреждения и отключить двигатель для уменьшения зоны повреждения, времени и денежных затрат на ремонт.

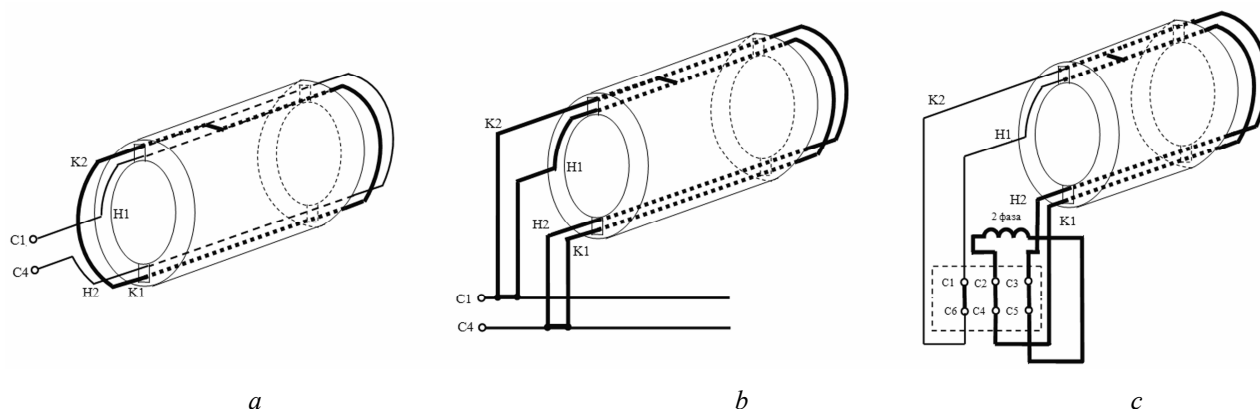


Рис. 4. Вероятные короткие замыкания обмотки статора: *a* – между секциями одной фазы, находящимися в верхнем и нижнем слоях паза; *b* – между секциями одной фазы, соединенными параллельно; *c* – витков секций фазы *A* и фазы *C* при соединении фаз треугольником

Fig. 4. Likely short-circuit the stator windings: *a* - between the sections of one phase, located in the upper and lower layers of the groove; *b* - between the sections of one phase, connected in parallel; *c* - turns of the sections of phase *A* and phase *C* at the junction of the phases of the triangle

По результатам обзора и анализа изобретений, опубликованных за последние десятилетия, авторы статьи считают перспективной защиту от межвитковых замыканий, реагирующую на потоки рассеяния лобовых частей статорной обмотки двигателя (Patent USSR, no. 1046852, 1983). В данном случае чувствительным элементом является кольцевая измерительная катушка, расположенная внутри двигателя в непосредственной близости от лобовой части обмотки так, что ее плоскость перпендикулярна оси вращения ротора, ее геометрический центр находится на этой оси, а ее выводы подключены к реагирующему органу.

Несмотря на кажущуюся простоту, устройство имеет существенные недостатки, которые создали непреодолимые препятствия в его практической реализации. При асимметрии питающего трехфазного напряжения, имеющего место на практике, данная защита срабатывает на отключение двигателя так, как будто произошло витковое замыкание между секциями одной фазы.

Действительно, при симметричном фазном напряжении и отсутствии межвиткового замыкания фазные токи в измерительной катушке тоже симметричны, поэтому их сумма равна

нулю (рис. 5, *a*). Однако при асимметрии питающего напряжения фазные токи и соответствующие им потоки рассеяния неодинаковы по величине. В этом случае на выходе измерительной катушки появляется некомпенсированное напряжение (рис. 5, *b*), которое подается на вход реагирующего органа и вызывает ложное срабатывание защиты [21–23].

Анализ полученных результатов и выводы

Для создания надежной защиты от межвитковых замыканий авторы статьи внесли существенные усовершенствования в устройство, защищенное патентом «Электрическая трехфазная машина с встроенным блоком для защиты от повреждения обмотки статора». На рис. 5, *c* изображены упомянутые усовершенствования, на которые принято положительное решение о выдаче патента (Application for invention RF, no. 2019108937, 2019). Предупреждение ложного срабатывания защиты при асимметрии питающего напряжения обеспечивается двухобмоточным тороидальным трансформатором 1. Первичная трехфазная обмотка 2 трансформатора соединена звездой и подключена к трехфазной цепи 3, питающей двигатель 4. Выходы вторичной однофазной обмотки 5 подключены парал-

лельно и встречно выходам измерительной катушки 6, подключенной к реагирующему органу 7. При симметрии питающего напряжения 3 сумма магнитных потоков, создаваемых токами первичной трехфазной обмотки 2 тороидального трансформатора 1, равна нулю, и на выходе вторичной однофазной обмотки 5 напряжение отсутствует.

При возникновении асимметрии питающего напряжения в режиме работы двигателя 4 под нагрузкой фазные токи также становятся неодинаковыми. Они проходят по лобовым частям 8 обмотки статора и создают три неодинаковых потока рассеяния, сдвинутых по

величине и фазе. Последние индуцируют три неодинаковых ЭДС, которые на выходе измерительной катушки 6 дают сигнал, поступающий на реагирующий орган 7. В то же время сумма магнитных потоков, создаваемых токами первичной трехфазной обмотки тороидального трансформатора, не равна нулю. На выходе вторичной однофазной обмотки трансформатора появится напряжение, равное по величине и противоположное по знаку напряжению, поступающему с выхода измерительной катушки. Вследствие этого напряжение на реагирующий орган 7 не подается, и защита ложно не срабатывает.

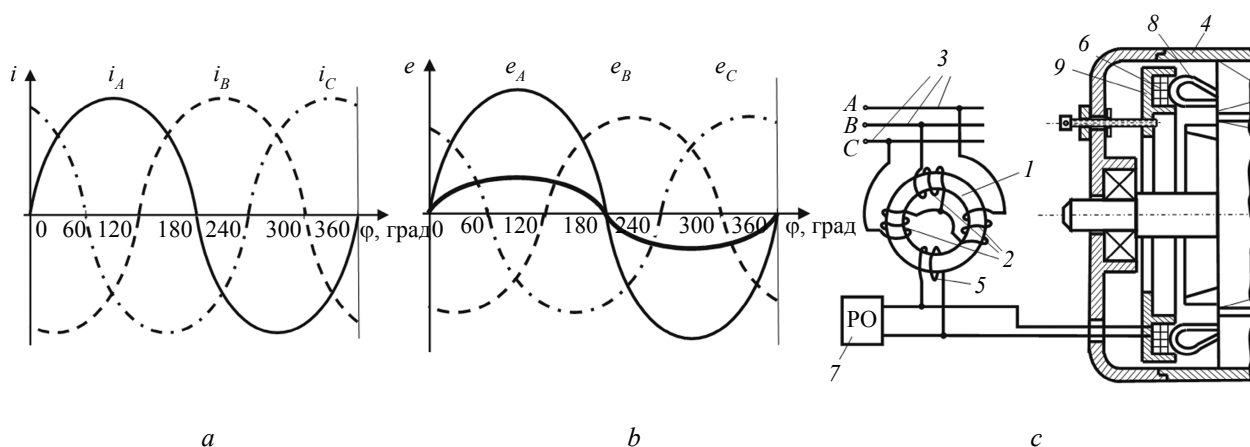


Рис. 5. Физические процессы в обмотках статора и измерительной катушке двигателя: *a* – фазные токи в обмотках статора при отсутствии межвиткового замыкания и симметричном питающем напряжении; *b* – ЭДС, индуцируемые потоками рассеяния лобовой части обмотки статора в измерительной катушке при межвитковом замыкании в фазе *A*; *c* – модифицированное устройство релейной защиты

Fig. 5. Physical processes in the stator windings and the measuring coil of the engine: *a* - phase currents in the stator windings in the absence of inter-winding closure and symmetrical supply voltage; *b* - EMF induced by the scattering currents of the front part of the stator winding in the measuring coil in the inter-winding closure in phase *A*; *c* - modified relay protection device

При симметричном питающем напряжении на выходах вторичной однофазной обмотки тороидального трансформатора встречное напряжение отсутствует. При возникновении межвиткового замыкания в фазе статорной обмотки на реагирующий орган подается напряжение от измерительной катушки, защита срабатывает по сигналу «межвитковое замыкание в фазе обмотки статора», и двигатель отключается от сети. Для увеличения чувствительности измерительной катушки ее вставляют в п-образный паз кольцевого магнитного сердечника – экрана 9, причем паз сердечника обращен к находящейся в непосредственной близости лобовой части 8 статорной обмотки машины.

Таким образом, эффективной защиты электрических машин от межвитковых замыканий, по мнению авторов, можно достичь путем применения трехфазно-однофазного трансформатора.

Трансформатор осуществляет отрицательную обратную связь по асимметричным составляющим питающего напряжения с измерительной катушкой, содержащей те же составляющие и реагирующей на изменение потоков рассеяния при межвитковых замыканиях обмоток статора. Данная защита может быть рекомендована для электрических машин большой и средней мощности, влияющих на экономические показатели работы энергетических систем и комплексов, требующих значительных финансовых затрат для восстановления в случае аварии. В сочетании с существующими релейными, электронными и цифровыми устройствами, предложенный авторами способ завершает разработку комплекса мер по созданию эффективных защит электрических машин, работающих в энергетических системах и комплексах.

Библиографические ссылки

1. Воробьев А. Э., Фатьянов С. О. Анализ причин отказов в работе асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве и в промышленном производстве // Вестник совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2017. № 2 (5). С. 169–174.
2. Браун М., Раутани Д., Пэттил Д. Электрические цепи и электротехнические устройства. Диагностика неисправностей. Саратов : Додека XXI век, 2017. 327 с.
3. Беляев П. В., Головский А. П. Анализ методов обнаружения неисправностей на работающих асинхронных двигателях // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : материалы III Всероссийской научно-технической конференции / Дагестанский государственный технический университет. Махачкала, 2018. С. 38–41.
4. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования / Р. Г. Мугалинов, А. Р. Мугалинова, Ю. А. Калугин, К. Э. Одинцов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 70–78.
5. Привалов Е. Е. Диагностика асинхронных двигателей электроэнергетического оборудования. М. : Директ-Медиа, 2015. 70 с.
6. Сафин Н. Р., Прахт В. А., Дмитриевский В. А. Диагностика неисправностей обмотки статора асинхронных двигателей // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 139–146.
7. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair: second edition. *IEEE Press Series on Power Engineering*. Wiley, 2014, 672 p. DOI: 10.1109/MEI.2004.1307097.
8. Guedesa S., Sovas M. Insulation protection and online stress agent identification for electric machines using artificial intelligence. *Electric Power Applications*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 559–570.
9. Gazyrin V.E., Osintsev A.A., Librinov L.L., Frobva E.I. Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the retom test complex. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 242–247.
10. Волобуев С. В. Техничко-экономическая оценка повышения эффективности защиты асинхронных двигателей от ненормальных режимов работы тепловыми реле // Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования : материалы Международной научно-практической конференции (Волгоград, 31 января – 3 февраля, 2017). С. 234–238.
11. Волобуев С. В. Повышение эффективности защиты асинхронных двигателей при их работе на пониженном напряжении тепловыми реле // Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы (Волгоград, 31 января – 2 февраля, 2018). С. 485–490.
12. Брейдо И. В., Сенькина И. Ю., Нурнаганбетова Г. С. Способ косвенной защиты от перегрева для электроприводов горношахтных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 2. С. 65–73.
13. Анисинов К. В., Попов А. Е. Сравнение аналоговой и микропроцессорной релейных защит // Ключевые проблемы и передовые разработки в современной науке : сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции (Смоленск, 31 октября, 2017). С. 107–111.
14. Захаров О. Г. Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки : монография. М. : Инфра-Инженерия, 2014. 128 с. ISBN 978-5-9729-0073-2.
15. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения. М., 2014. 256 с.
16. Титкина А. П., Певцова Л. С. Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит // Науковедение. 2015. Т. 7, № 2 (27). С. 121–122.
17. Богдан А. В., Соболев А. Н. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 6. С. 72–76.
18. Andreev A.M., Andreev I.A., Lyakhovsky Y.Z. Choosing expert evaluations of diagnostic tests of electric insulation for high-voltage electric machines. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 318–321.
19. Мосалев В. А. Основные направления совершенствования релейной защиты для электродвигателей // Сборник статей ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА». Ижевск, 2015. С. 59–60.
20. Юдаев И. В., Волобуев С. В., Феклистов А. С. Повышение эффективности тепловых устройств защиты асинхронных двигателей // Вестник аграрной науки Дона. 2018. Т. 4, № 44. С. 94–98.
21. Наумов И. В., Шевченко М. В., Белоусова Е. А. Управление режимами работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии напряжений питающей сети // Энергетика и информационные технологии : сборник научных трудов / отв. ред. О. А. Пустовая. Благовещенск, 2017. С. 89–96.
22. Masoum M.A.S., Fudis E.F. Power quality in power systems and electrical machines: second edition. Elsevier. Academic Press, 2015, 635 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-369536-9.X5001-3.
23. Antonov V.I., Naumov V.A., Fomin A.I., Soldatov A.V. Adaptive structural analysis of input signals of digital and relay protection and automation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 391–397.

References

1. Vorobiev A.E., Fatyanov S.O. [Analysis of the causes of failures in the operation of asynchronous elec-

tric motors in agriculture and in industrial production]. *Vestnik soveta molodix ushenix Rjzanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni P. A. Kostycheva*, 2017, no. 2, pp. 169-174 (in Russ.).

2. Brown M., Rawtani D., Patil D. *Elektrisheskie zepi i elektrotehnisheskie ustroistva. Diagnostika neispravnostej* [Electric circuits and electrical devices. Fault diagnosis]. Saratov, Dodeka XXI vek Publ., 2017, 327 p. (in Russ.).

3. Belyaev P.V., Golovsky A.P. *Analiz metodov obnaruzhenij neispravnostej na rabotayshix asinhronnyx dvigateljx* [Analysis of methods of fault detection on working asynchronous motors]. *Materialy III Vserossiyskoj nayshno-texnisheskoj konferenzii "Sovremennye problemy elektroenergetiki i puti ix peshenij"*. Dagestanskiy gosudarstvennyy texnisheskiy universitet [Proc. III all-Russian scientific and technical conference "Modern problems of electric power industry and ways of their solution". Dagestan state technical University]. Makhachkala, 2018, pp. 38-41 (in Russ.).

4. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Kalugin Yu.A., Odintsov K.E. [Method of diagnostics and identification of faults of windings of asynchronous motor in the mode of its functioning]. *Electrotechnical systems i complexes*, 2018, no. 3, pp.70-78 (in Russ.).

5. Privalov E.E. *Diagnostika asinhronnih dvigatelej elektroenergeticheskogo oborudovanij* [Diagnostics of asynchronous motors of electric power equipment]. Moscow, Direkt-Media Publ., 2015, 70 p. (in Russ.).

6. Safin N.R., Pracht V.A., Dmitrievsky V.A. [Diagnostics of faults of stator winding of asynchronous motors]. *Automation in electric power industry and electrical engineering*, 2015, vol. 1, pp. 139-146 (in Russ.).

7. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair: second edition*. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2014, 672 p. DOI: 10.1109/MEI.2004.1307097.

8. Guedesa S., Sovas M. [Insulation protection and online stress agent identification for electric machines using artificial intelligence]. *Electric Power Applications*, 2019, vol. 13, no 4, pp. 559-570.

9. Gazyrin V.E., Osintsev A.A., Librinov L.L., Frobva E.I. [Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the retom test complex]. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 52, no 2, pp. 242-247.

10. Volobuev S.V. *Texniko-ekonomicheskaja ocenka povyshenija zashiti asinhronnyx dvigatelej ot nenopmalnix pezimov pobori teplovimi rele* [Technical and economic assessment of increasing the efficiency of protection of asynchronous motors from abnormal modes of operation by thermal relays]. *Materiali Mezhdunarodnoj naushno-prakticheskoy konferenzij (31 janvarja – 3 fevralja. Volgograd, 2017)*. [Ecological and meliorative aspects of rational nature management: Proc. International scientific-practical conference (Volgograd, January 31 - February 3, 2017)]. Volgograd, 2017, pp. 234-238 (in Russ.).

11. Volobuev S.V. *Povishenie effektivnosti zashiti asinhronnyx dvigatelej pri ix pabote na ponizennom napryazhenii teplovimi rele* [Increase of efficiency of protection of asynchronous motors operating at a lower voltage thermal relays]. *Materiali Mezhdunarodnoj naushno-prakticheskoy konferenzij, posvjshsennoj 75-letiy okonshsanij Stalingradskoj bitvi (31 janvarja – 2 fevralja. Volgograd, 2018)*. [Proc. International scientific-practical conference dedicated to the 75 th anniversary of the battle of Stalingrad (31 January – 2 February. Volgograd, 2018)]. Volgograd, 2018, pp. 485-490 (in Russ.).

12. Breido I.V., Sinicina I.Y., Nurmaganbetova G.S. [Method indirect overheat protection for electric mining installations]. *Izvestij Tomskogo politexnisheskogo universiteta. Inzhiring georesursov*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 65-73 (in Russ.).

13. Anisimov K.V., Popov A.E. *Sravnenie analogovoj i mikroprozessornoj relejnix zashit* [Comparison of analog and microprocessor relay protection]. *Sbornik naushnix trudov po materialam I Mezhdunarodnoj konferenzii (31 oktjabrja. Smolensk, 2017)*. [Collection of scientific works on materials of I International scientific-practical conference (31 October. Smolensk)]. 2017. pp. 107-111 (in Russ.).

14. Zakharov O. G. *Nadeznost zifrovih ustroystv releinoj zashiti. Pokazateli. Trebovanij. Ozenki* [Reliability of digital relay protection devices. Indicators. Requirements. Assessment]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2014, 128 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-0073-2.

15. Gurevich V.I. *Vulnerabilities of microprocessor protection relays. Problems and solutions*. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2014, 256 p. (in Russ.).

16. Tipikina P.A., Pevtsov L.S. [Estimation of software reliability of microprocessor relay protection]. *Internet journal of the sociology of Science*, 2015, vol. 7, no. 2 (27), pp. 121-122 (in Russ.).

17. Bogdan A.V., Sobol A. N. [Information signs of damage to the stator winding for the construction of relay protection of an Autonomous asynchronous generator]. *Izvestij vizshih utshebnih zavedenij. Elektromekhanika*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 72-76 (in Russ.).

18. Andreev A.M., Andreev I.A., Lyakhovsky Y.Z. *Choosing expert evaluations of diagnostic tests of electric insulation for high-voltage electric machines*. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 318-321.

19. Mosalev V.A. [The Main directions of improvement of relay protection for electric motors]. *Sbornik statej FGBOU VO Izhevskaja GSHA. Izhevsk*, 2015, pp. 59-60 (in Russ.).

20. Yudaev I.V., Volobuev S.T., Feklistov A.S. [Improving the efficiency of thermal protection devices induction motors]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2018, vol. 4, no. 44, pp. 94-98 (in Russ.).

21. Naumov I.V., Shevchenko M.V., Belousova E.A. *Upravlenie rezhimami raboty asinhronnogo dvigatelya v usloviyakh nesimmetrii napryazhenii pitayushchei seti* [Control of modes of operation of an asynchronous motor in conditions of asymmetry of the voltage of the supply network]. Blagoveshchensk, 2017, pp. 89-96 (in Russ.).

22. Masoum M.A.S., Fudis E.F. Power quality in power systems and electrical machines: second edition. Elsevier. Academic Press, 2015, 635 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-369536-9.X5001-3.

23. Antonov V.I., Naumov V.A., Fomin A.I., Soldatov A.V. Adaptive structural analysis of input signals of digital and relay protection and automation. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 391-397.

Overview of Types of Protection of Asynchronous Motors Used in Power Systems and Complexes

Yu.I. Ryaskov, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
N.M. Shaytor, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
A.V. Gorpinchenko, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Faults of electric machines that occur due to short circuits, overloads, changes in the voltage of the supply network are considered. Special attention is paid to damage to the insulation of the stator windings and inter-turn faults. The review of application of relay protection for prevention of malfunctions of electric machines at occurrence of emergency modes is given. It is established that the existing types of protection: instantaneous relay protection, current protection, protection against interfacial short circuits, overload protection, protection against minimum voltage - do not guarantee the saving of the machine in case of inter-turn circuits. These types of protections do not have sufficient selectivity, sensitivity and speed, do not take into account the existing asymmetry of the voltage supply networks and can lead to false positives.

The prerequisites for the occurrence of short circuits are considered: severe working conditions, insufficient stability of electrical properties of insulating materials, imperfect technology of laying windings. The main causes of short circuits in the windings of the machines are the damage to the insulation under the influence of external influences, long lasting operation of the motor with high temperature windings, and the natural aging of the insulation.

Features of the physical processes occurring at turn circuits in a separate phase of the stator, at various connection of coil groups of the winding accompanied by formation of an electric arc and damage of isolation are considered.

Special attention is paid to the introduction of relay protection to prevent inter-turn faults in the stator windings, which result in non-maintainable condition of electric machines.

It is established that a promising type is a protection that reacts to changes in the magnetic flux scattering of the stator windings of the engine, the sensitive element of which is an annular measuring coil located inside the engine at the frontal part of the winding, and its terminals are connected to the reacting organ. However, this invention has significant drawbacks, namely, in the case of asymmetry of the three-phase supply voltage, this protection is triggered by switching off the motor, similar to the operation of a loop circuit between sections of one phase.

The authors recommend the use of a special transformer included between the supply network and the output of the measuring coil. As a result, the asymmetric components compensate for each other, and the protection is triggered only at the inter-winding circuit in the phase of the stator winding.

Keywords: asynchronous motors, emergency modes, voltage asymmetry, phase windings, inter-turn closure, scattering flow, measuring coil.

Получено 01.11.2019

Образец цитирования

Рясков Ю. И., Шайтор Н. М., Горпинченко А. В. Обзор видов защиты асинхронных двигателей, используемых в энергетических системах и комплексах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 107–115. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-107-115.

For Citation

Ryaskov Yu.I., Shaitor N.M., Gorpinchenko A.V. [Overview of Types of Protection of Asynchronous Motors Used in Power Systems and Complexes]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 107-115. (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-107-115.