

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ СОБСТВЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. С. Авдеев

Предлагается алгоритм тестового диагностирования технического состояния системы преобразователя частоты синхронного двигателя с постоянными магнитами. Анализ известных методов диагностирования показал целесообразность построения алгоритмов тестового диагностирования, основанных на системе идентификации параметров, базирующейся на синтезе чувствительностей передаточных функций между переменными систем управления к возможным отклонениям параметров электропривода, частотном методе и наблюдателе магнитного потока. На основе упрощенной математической модели преобразователя частоты и синхронного двигателя с постоянными магнитами была показана возможность применения предлагаемого алгоритма. Также представлен пример практической реализации, подтверждающий эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: тестовая диагностика, синхронный двигатель с постоянными магнитами, техническая диагностика, идентификация параметров, частотный метод, неисправности.

Введение

Развитие электроники и микропроцессорных систем управления, улучшение качества и удешевление производства постоянных магнитов положило начало широкому распространению синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) ввиду их более высоких энергетических показателей. Несмотря на достаточно высокую надежность СДПМ, в процессе эксплуатации периодически приходится решать задачи диагностирования их технического состояния за счет планово-предупредительных ремонтов и испытаний, что по статистике [1] фактически не требуется в 50% случаев. В то же время около 70% дефектов СДПМ возникают в процессе их эксплуатации. Отсюда понятна целесообразность их диагностирования непосредственно по факту возникновения неисправностей СДПМ. В этом случае оценка технического состояния и оперативная диагностика неисправности представляет собой важную задачу, способствуя повышению надежности, снижению аварийных ситуаций, сокращению материальных расходов и потерь рабочего времени.

Методы диагностирования

Существует множество методов диагностирования неисправностей электродвигателей переменного тока, в том числе и СДПМ. В целом их можно разделить на две наиболее общие категории по воздействию на объект диагностирования: методы функциональной (неразрушающий контроль) и тестовой диагностики [2].

Методы первой категории в качестве возмущающих воздействий используют естественные сигналы при рабочем функционировании электродвигателя. При этом алгоритмы диагностирования сложны в реализации и интерпретации полученных результатов и, как правило, требуют достаточно высоких вычислительных мощностей и дополнительных информационных датчиков. В каче-

стве примера можно привести работы [3 – 7], где описываются алгоритмы диагностирования на базе нейронных сетей и «нечеткой логики» (fuzzy logic), которые относительно сложны в реализации, требуют больших заранее подготовленных баз данных для их обучения и особого программно-технического комплекса для процесса обучения и накопления данных. Методы вибродиагностики и акустической диагностики [8, 9] также требуют специальных датчиков вместе со средствами обработки их сигналов. Методы спектрального анализа токов и напряжений [10 – 15], а также магнитных полей, как внутренних, так и внешних [16], сталкиваются с необходимостью учета многофакторного влияния параметров питающей сети, характера нагрузки, влияния внешних электромагнитных полей, переходных процессов [17]. Методы, основанные на анализе частичных разрядов [18], сталкиваются с проблемами интерпретации полученных результатов, необходимостью установки дополнительных датчиков и оборудования и отвечают диагностированию электродвигателей большой мощности, так как в маломощных двигателях практически сложно зарегистрировать частичные разряды.

Следует отметить, что и на нейронные сети и подобные им экспертные системы также могут оказывать влияние проблемы, связанные с трудностью учета характера нагрузки, влияния магнитных полей и др. Это связано, прежде всего, с тем, что нейронные сети в качестве входных данных могут принимать данные с датчиков тока, напряжения, магнитных полей, термодатчиков, вибродатчиков, представленных как во временной, так и в частотной областях.

Кроме того, из-за необходимости циклической записи и обработки полученных данных у представленных выше методов могут возникать проблемы с выявлением труднопрогнозируемого отказа, вызванного внешними факторами и никак не связанного с внутренними процессами СДПМ.

Проблемы могут возникнуть и с обнаружением неисправностей, мешающих запуску двигателя, когда двигатель еще даже не тронулся с места.

Вторая категория методов в качестве возмущающих воздействий использует тестовые сигналы, которые могут создавать дополнительные проблемы в режимах нормального функционирования объекта диагностирования. Однако применение подобных методов все же проще в технической реализации и интерпретации полученных результатов. К ним могут быть отнесены методы проверки двигателя по нагреву: метод сопротивлений, метод заложенных термопреобразователей, метод термометра, метод наложения. Проверка изоляции проводится приложением между фазой и землей повышенного напряжения. Подобные методы, как правило, являются обязательной частью испытаний электрических машин, которые проводятся на заводе изготовителе, и регламентируются нормативными документами [19]. Их применение требует специального оборудования и может повлиять на дальнейшую надежность, например на изоляцию обмоток при контроле повышенным напряжением. Более щадящие методы, оценивающие энергетические показатели двигателя [20], в том числе и под нагрузкой [21] могут быть не менее информативны, однако требуют наличия специализированных испытательных стендов. Имеются и простейшие методы определения параметров двигателя с помощью мультиметров, миллиметров, амперметров, вольтметров и др. [22].

Наиболее привлекательными являются частотные методы, которые могут исключать измерения механических параметров [2, 22]. При этом для оценки технического состояния объекта диагностирования используются энергетические параметры: токи, напряжения, их частоты и сдвиг фаз между ними. Подобные методы достаточно просты и их можно применять во время нормального функционирования электропривода при условии, что высокочастотные тестовые сигналы не будут мешать технологическому процессу. Но и они могут потребовать наличия специализированного оборудования для более точной оценки параметров электропривода.

Методы диагностики преобразователя частоты (ПЧ) в свою очередь разделяются на аналогичные категории.

Методы функциональной диагностики электролитического конденсатора силового преобразователя наиболее полно разобраны в работе [23]. Наиболее практичный метод основывается на спектральном анализе токов и напряжений конденсатора на частотах, где влияние емкости наименьшее и отслеживается величина эквивалентного последовательного сопротивления. Однако эти мето-

ды предполагают статичность нагрузки, а также требуют наличия DC/DC-преобразователя, формирующего частотный сигнал. Кроме того может возникнуть сложность в интерпретации данных при большом количестве параллельно включенных блоков конденсаторов или хранении большого объема данных, полученных с дополнительных датчиков тока, установленных индивидуально на каждый конденсатор или небольшую группу конденсаторов. Анализ функциональных методов диагностики силовых модулей ПЧ представлен в работах [24 – 26]. В данных работах наиболее эффективным и предпочтительным методом, способным определить и локализовать неисправность, является метод на основе анализа тока с применением вектора Парка и его модифицированный вариант. Однако, данный метод относительно более ресурсоемок, а также неизвестно достаточно ли его быстродействия (>20 мс) для обнаружения неисправности в векторных бездатчиковых системах. Кроме того, данные методы рассматриваются в разомкнутых системах управления, что может привести к их некорректному функционированию в замкнутых системах.

Методы тестовой диагностики, как правило, заключаются в измерении изоляции и проверке емкости электролитических конденсаторов в ходе технического обслуживания. Проверка силовых модулей, как правило, затруднительна ввиду их физической недоступности.

Таким образом, рассмотренные методы не позволяют производить диагностику основных видов неисправностей собственными средствами электропривода в условиях ограничения ресурсов контроллера (особенно для накопления и хранения больших массивов данных) и отсутствия ряда датчиков.

В данной работе предлагается подход, базирующийся на синтезе чувствительностей передаточных функций между переменными систем управления к возможным отклонениям параметров электропривода [2], частотном методе и наблюдателе магнитного потока.

Отметим, что в работе рассматривается алгоритм диагностирования системы ПЧ-СДПМ на примере ПЧ с неуправляемым выпрямителем и промежуточным звеном постоянного тока (ЗПТ), а также трехфазным СДПМ с включением обмотки статора по схеме «звезда» (рис. 1). Однако данный алгоритм с небольшими изменениями применим для схемы включения «треугольник» и для m -фазного СДПМ. В качестве доступных измеряемых информационных сигналов выступают три фазных тока на выходе инвертора напряжения и напряжение в ЗПТ.

Этапы диагностирования синхронного двигателя с постоянными магнитами

Самодиагностирование системы ПЧ-СДПМ должно являться частью программного обеспечения ПЧ, включая системы управления и другие составляющие (системы идентификации и автонастройки регуляторов, интерфейсы связи с системой более высокого уровня и др.). Все эти программные средства, реализуемые на контроллере ПЧ, как правило, проходят проверку и отладку. Поэтому структура системы управления и ее параметры в процессе функционирования электропривода не могут изменяться под воздействием каких-либо внешних условий (в отличие от аналоговых систем), и можно допустить их постоянство и неизменность. Неисправность может затронуть или контроллер в целом, или его определенный модуль. Поэтому система их диагностирования может функционировать в разомкнутой системе ПЧ-СДПМ без рассмотрения какой-либо замкнутой системы их управления.

Следует уточнить, что под неизменностью параметров системы управления понимается программная часть с определенными коэффициентами регуляторов, обратных связей, фильтров, параметров наблюдателей и т. д.

При этом алгоритм их диагностирования представляет собой последовательность определенных этапов. На *первом* из них выполняется проверка емкости электролитического конденсатора по оценке постоянной времени переходного процесса напряжения в ЗПТ. Оценка производится следующим образом. При включении входных контакторов К1 (рис. 1) подается пульсирующее постоянное напряжение на электролитический конденсатор, при этом зарядный резистор ограничивает ток заряда конденсатора, обеспечивая его плавный заряд с постоянной времени $T = RC$ (R – активное сопротивление зарядного резистора; C – емкость конденсатора). Переходный процесс записывается, и регистрируется величина установившегося напряжения. Далее производится поиск постоянной времени по модели переходного процесса, определяемого следующим выражением:

$$U_{dc} = \frac{U_{вх}}{Tp + 1}, \tag{1}$$

где $U_{вх}$ – амплитуда входного напряжения (установившееся значение); U_{dc} – напряжение ЗПТ; T – постоянная времени переходного процесса; p – оператор дифференцирования.

Идентификация постоянной времени может быть выполнена с помощью любого оптимизационного метода, например методом «золотого сечения» [27].

Следует отметить, что постоянные времени (идентифицируемая и фактическая) будут отличаться в связи с пульсирующим характером напряжения сети. Их отличия будут показаны далее.

Емкость будет считаться неисправной в случае, если постоянная времени, а, следовательно, и емкость (зарядный резистор принимается неизменным), уменьшатся более чем на 80% от номинального заявленного значения [23]. Также в процессе проверки емкости автоматически будет проверен датчик напряжения ЗПТ.

Отметим, что данный метод не учитывает оценку величины эквивалентного последовательного сопротивления и токи утечки. Также снижение точности будет происходить с увеличением числа конденсаторов.

Для более точной оценки необходим мониторинг тока каждого конденсатора в отдельности.

На *втором* этапе проверяется работоспособность модулей инвертора, датчиков напряжения и тока, а также исправность цепей их питания. По существу, данный этап является подготовительным перед диагностикой самого СДПМ и включает в себя алгоритм определения попарного открытия «ключей» инвертора ПЧ (рис. 2):

$$\begin{aligned} VT1: Z_1 &= X_{1-4} \parallel X_{1-6}; \\ VT2: Z_2 &= X_{2-3} \parallel X_{2-5}; \\ VT3: Z_3 &= X_{2-3} \parallel X_{3-6}; \\ VT4: Z_4 &= X_{1-4} \parallel X_{4-5}; \\ VT5: Z_5 &= X_{2-5} \parallel X_{4-5}; \\ VT6: Z_6 &= X_{1-6} \parallel X_{3-6}; \end{aligned} \tag{2}$$

где $Z_1 \dots 6$ – логические переменные, определяющие состояние силовых ключей ПЧ (1 – исправен; 0 – не исправен); $X_{14, 16 \dots 63}$ – логические переменные, соответствующие наличию или отсутствию протекания тока между соответствующими ключами, указанными в индексе (1 – ток присутствует; 0 – ток отсутствует). При этом измерения достаточно произвести только для верхних или нижних ключей, так как для них переменные повторяются.

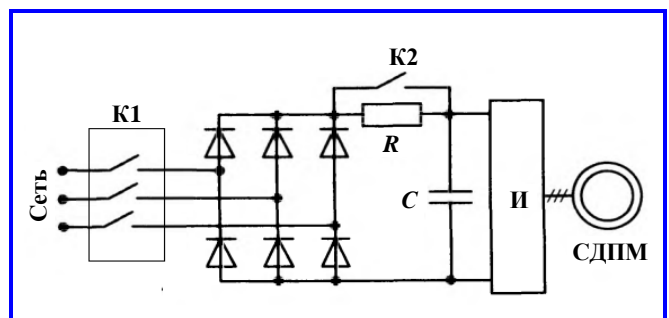


Рис. 1. Структурная схема силовой части системы ПЧ-СДПМ

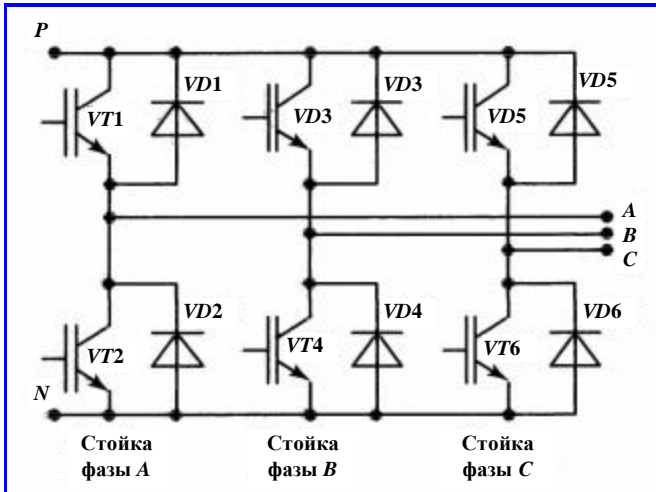


Рис. 2. Силовая схема инвертора напряжения

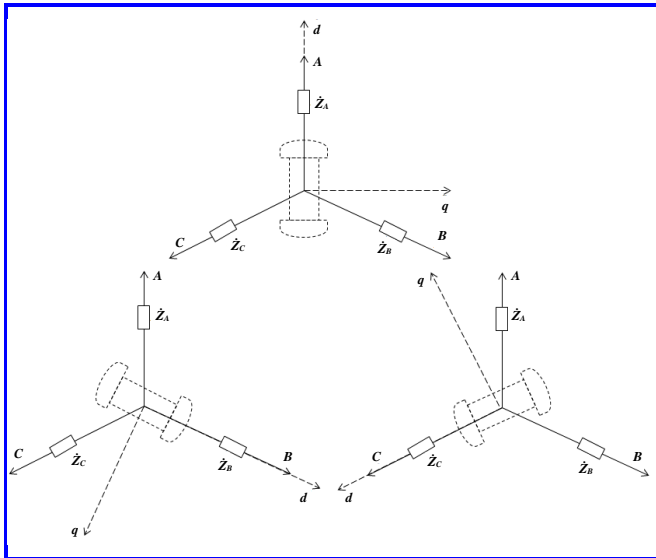


Рис. 3. Позиционирование ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами и системы координат на третьем этапе диагностирования: верхний по центру – нулевое угловое положение; нижний справа – угловое положение $-2\pi/3$; нижний слева – угловое положение $2\pi/3$

При проверке модулей согласно (2) ток проходит через две фазы и соответственно должен регистрироваться двумя датчиками тока. Наличие тока в одной фазе и отсутствие тока в другой будет свидетельствовать о выходе из строя или соответствующего датчика тока, или элемента в цепи измерения вплоть до модуля аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Неопределенность может возникнуть в случае неисправности сразу двух модулей одной стойки (или цепи управления от контроллера до модулей) или обрыва фазы. Однако вероятность выхода из строя сразу двух модулей одной стойки гораздо ниже обрыва одной фазы. Поэтому в первую оче-

редь следует проверить целостность фазной обмотки двигателя.

На *третьем* этапе диагностирования выполняется оценка технического состояния обмоток статора, а также наличие или отсутствие эксцентриситета ротора. Следует отметить, что при возникновении той или иной их неисправности внутренняя структура СДПМ (электрическая и магнитная схемы замещения) может значительно изменяться, что скажется на ее математической модели [10]. Кроме того, параметры подобной модели, учитывающей ряд наиболее распространенных неисправностей (межвитковое замыкание, эксцентриситет ротора), достаточно сложно оценить или идентифицировать, чтобы на их основании сделать заключение о конкретном техническом состоянии СДПМ. Однако подобные неисправности должны явно отражаться в функциональных зависимостях между напряжением и током отдельных фаз тем более в стационарной электромагнитной системе, определяющихся совокупными значениями активного сопротивления, индуктивности и взаимной индуктивности фаз, вне зависимости от особенностей внутренней структуры электрической и магнитной схем замещения.

Отсюда целесообразность оценок активного сопротивления и суммарной индуктивности (индуктивности и взаимных индуктивностей) каждой из фаз обмоток статора СДПМ. Поскольку большинство СДПМ не имеют возможности подключения фаз по отдельности (подключены по классической схеме «звезда»), есть смысл выполнять оценку активного сопротивления и индуктивности обмоток в двухфазной системе координат поочередно, ориентируя систему координат последовательно вдоль каждой из фаз, как показано на рис. 3. Тогда асимметрия фаз, вызванная появлением той или иной неисправности, будет сильнее всего отражаться в оценке тех параметров, вдоль оси фазы которой она выполняется.

Оценка технического состояния СДПМ на данном этапе выполнится на основе метода идентификации параметров, рассмотренного в [28], учитывающего нелинейности электромагнитной системы двигателя, что позволит повысить точность и достоверность оценки параметров. При этом в целях экономии времени и уменьшения влияния погрешностей определения (путем вычисления из измеренной электромагнитной постоянной времени и индуктивности) целесообразно выполнять оценку только постоянных времени и в случае их не равенства (5 – 10 %) делать уточненную оценку.

В табл. 1 представлены возможные соотношения параметров с указанием возможных их видов неисправностей.

Таблица 1

Возможные комбинации параметров

	Соотношение параметров	Вид неисправности
1	R_s во всех положениях системы координат и ротора одинаковы. L_d во всех положениях системы координат и ротора одинаковы	Неисправности отсутствуют
2	В одной из обмоток R_s выше, чем в остальных, при одинаковых L_d или неравномерных (завышенных) L_d	Обрыв/повреждение/ ухудшение контакта/ локальный перегрев фазы
3	В одной из обмоток R_s и L_d ниже, чем в остальных	Межвитковое замыкание
4	Во всех фазах отличаются R_s , но совпадают L_d	Обрыв/повреждение/ ухудшение контакта/ перегрев фазы СДПМ
5	Во всех обмотках различные R_s и L_d . R_s и L_d меньше, чем в исправном состоянии	Межвитковое замыкание нескольких фаз или меж- фазное замыкание
6	Одинаковые активные сопротивления, но отличаются индуктивности	Статический эксцентриситет ротора – повреждение подшипников

Для более достоверной оценки желательно знать параметры объекта в исправном состоянии, так как иначе возникает некоторая неопределенность в результатах, связанная с отсутствием точки отсчета. Кроме того, при числе пар полюсов больше одной необходимо чередовать фазы таким образом, чтобы ротор в итоге выполнил полный механический оборот, тем самым обеспечив условие для оценки индуктивности равномерно по всей длине окружности воздушного зазора.

На *четвертом* этапе производится оценка наличия динамического эксцентриситета, обусловленного несоосностью поверхности ротора относительно оси его вращения и изменением величины воздушного зазора, зависящего от углового положения ротора и влияющего на величину проводимости магнитопровода, и в итоге индуктивности СДПМ. Поэтому для оценки динамического эксцентриситета предлагается выполнять оценку индуктивности, ориентируя систему координат вдоль оси фазы A . Затем перед каждым новым этапом оценки индуктивности вдоль фазы A следует поворачивать систему координат на 90 электрических градусов, производя оценку индуктивности по продольной и поперечной осям. Делать это необходимо до тех пор, пока ротор не совершит половину механического оборота, так как изменение воздушного зазора на второй половине механиче-

ского оборота будет таким же. В итоге можно оценить изменение индуктивности по оси d и q в зависимости от углового положения ротора. Стоит отметить, что при таком алгоритме остальные асимметрии двигателя, связанные с повреждением обмоток статора или статическим эксцентриситетом, не будут влиять на оценку индуктивности. На нее будет влиять только величина воздушного зазора, так как измерения будут происходить всегда в одном и том же положении системы координат.

Однако в предлагаемых методах оценки статического и динамического эксцентриситетов следует отметить следующие практические трудности:

1. Более достоверную оценку наличия или отсутствия динамического эксцентриситета можно получить только при большом количестве пар полюсов. Если же у СДПМ одна пара полюсов, то необходимо знать параметры при исправном состоянии СДПМ, так как в данном случае не получится оценить относительное изменение индуктивности.

2. Изменение суммарного воздушного зазора, наряду с производственными допусками, определяющего величину индуктивности, незначительно. Например, при диаметре статора 165 мм и воздушном зазоре 3,9 мм максимальное изменение суммарного воздушного зазора, перпендикулярного диаметру оси смещения, составляет 1,28%. Данное обстоятельство может создать большие трудности при оценке эксцентриситета у мощных двигателей, где помимо конструкционных допусков большое влияние могут оказывать помехи в каналах измерений и точность датчиков тока.

На *пятом* этапе производится оценка величины магнитного потока СДПМ путем расчета по известным параметрам во время запуска в частотно-токовой системе управления по следующему соотношению:

$$\Psi_f = \frac{E}{\omega_{эл}}, \quad (3)$$

где Ψ_f – магнитный поток от постоянных магнитов; E – электродвижущая сила (ЭДС) двигателя; $\omega_{эл}$ – электрическая угловая частота вращения магнитного потока постоянных магнитов.

При этом ЭДС вычисляется как

$$E = U_s - I_s(R_s + jX_s), \quad (4)$$

где U_s – напряжение, прикладываемое к обмоткам статора; I_s – ток, протекающий в обмотках статора; R_s , X_s – активное и индуктивное сопротивление обмоток статора; j – мнимая единица.

В проекциях на оси d , q выражение (3) определится как

$$E = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} - \sqrt{\left(I_d \sqrt{R_s^2 + \omega_{эл}^2 L_d^2}\right)^2 + \left(I_q \sqrt{R_s^2 + \omega_{эл}^2 L_q^2}\right)^2}, \quad (5)$$

где U_d, U_q – проекции напряжения, прикладываемого к обмоткам статора; I_d, I_q – ток по осям d, q ; R_s – активное сопротивление обмоток статора; L_d, L_q – индуктивности статора по осям d, q .

Параметры для системы частотно-токового управления рассчитываются на основе параметров, полученных на втором этапе диагностирования.

Для более точной оценки магнитного потока целесообразным представляется производить пуск на номинальную скорость, что связано с меньшим влиянием «мертвого» времени в процессе коммутации ключей автономного инвертора напряжения [27, 29].

В табл. 2 представлены возможные комбинации параметров по завершению всех этапов технической диагностики. Здесь можно отдельно отметить случаи увеличения активного сопротивления и индуктивности, связанные с возможными локальными перегревами. Изменение параметров статора при этом связано не с повреждением обмотки статора, а с повреждением магнитопровода – дефектами изоляции пластин электротехнической стали и возникновением вихревых токов. В этом случае рекомендуется отключить СДПМ и дать ему охладиться, после чего повторить диагностику на более низких значениях тока, чтобы исключить подобную вероятность.

Математическое моделирование

Из-за сложности и громоздкости математических моделей, учитывающих вышеприведенные неисправности, полезно выполнить математическое моделирование этапов диагностики непосредственно СДПМ и электролитического конденсатора ЗПТ.

Для этого идентификацию параметров можно продемонстрировать при не симметриях активного сопротивления и индуктивности фаз на базе математической модели трехфазной нагрузки (рис. 4), описывающей следующей системой соотношений:

$$\begin{cases} U_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + U_0; \\ U_b = I_b R_b + L_b \frac{dI_b}{dt} + U_0; \\ U_c = I_c R_c + L_c \frac{dI_c}{dt} + U_0; \end{cases} \quad (6)$$

$$U_0 = (I_a + I_b + I_c) \frac{R}{RCp + 1}. \quad (7)$$

где R_a, R_b, R_c – активные сопротивления фаз; L_a, L_b, L_c – индуктивности фаз; I_a, I_b, I_c – токи фаз; U_a, U_b, U_c – фаз-

ные напряжения; U_0 – нулевое напряжение; C – паразитная емкость; R – сопротивление изоляции.

Таблица 2

Возможные комбинации параметров по завершению диагностирования технического состояния

	Соотношение параметров	Вид неисправности
1	R_s во всех положениях системы координат и ротора одинаковы. L_d во всех положения системы координат и ротора одинаковы	Неисправности отсутствуют
2	В одной из обмоток R_s выше, чем в остальных при одинаковых L_d или неравномерных (завышенных) L_d	Обрыв/повреждение/ухудшение контакта/локальный перегрев фазы
3	В одной из обмоток R_s и L_d ниже, чем в остальных	Межвитковое замыкание
4	Во всех фазах отличаются R_s , но совпадают L_d	Обрыв/повреждение/ухудшение контакта
5	Во всех обмотках различные R_s и L_d . R_s и L_d меньше, чем в исправном состоянии	Межвитковое замыкание нескольких фаз или межфазное замыкание
6	Одинаковые активные сопротивления, но отличаются индуктивности	Статический эксцентриситет ротора – повреждение подшипников
7	Различные значения L_d и L_q на полуобороте ротора на третьем этапе диагностики	Динамический эксцентриситет ротора – повреждение подшипников, несоосность валов
8	Значение магнитного потока ниже номинального	Размагничивание/частичное разрушение постоянных магнитов

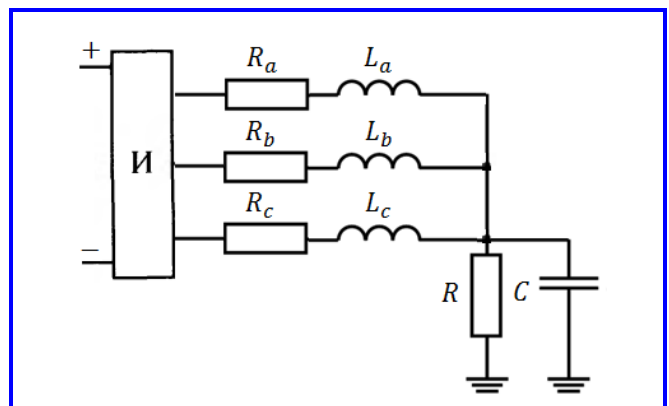


Рис. 4. Схема замещения трехфазной цепи синхронного двигателя с постоянными магнитами с учетом сопротивления изоляции R и паразитной емкости C между ее общей точкой и контуром заземления

Примем следующие параметры фазных обмоток, свойственные ниже исследуемому экспериментально неявнополюсному СДПМ, для его исправного ($R_a = 200$ мОм; $R_b = 200$ мОм; $R_c = 100$ мОм; $L_a = 1$ мГн; $L_b = 1$ мГн; $L_c = 1$ мГн, $R = 1$ МОм, $C = 10$ нФ) и неисправного ($R_a = 200$ мОм; $R_b = 200$ мОм; $R_c = 100$ мОм; $L_a = 1$ мГн; $L_b = 5$ мГн; $L_c = 1$ мГн, $R = 1$ МОм, $C = 10$ нФ) состояний.

Оценка параметров двигателя выполняется при ориентации системы координат вдоль каждой из фаз, как показано на рис. 3. Результаты оценки параметров даны в табл. 3.

Как видно из результатов, оцененные параметры всех фаз отклонились в меньшую сторону по отношению к исправному состоянию, однако наибольшее отклонение произошло при оценке параметров вдоль той фазы, где произошло непосредственно само отклонение. Соответственно, активное сопротивление и индуктивность необходимо идентифицировать при трех разных положениях системы координат.

Функциональная схема, поясняющая последовательность процесса позиционирования системы координат и определения величины тестового импульса, представлена на рис. 5.

Позиционирование осуществляется посредством плавного увеличения напряжения задания по оси d посредством задатчика интенсивности (ЗИ) до тех пор, пока значение тока статора оси d не достигнет заданного номинального значения и не сформируется стоп-сигнал, останавливающий дальнейший рост напряжения задания. Такая последовательность позиционирования выбрана потому, что она не требует дополнительной настройки регуляторов токов. Кроме того, по окончании процесса позиционирования становится известна величина тестового импульса, необходимого для оценки электромагнитной постоянной времени цепи статора.

На следующем этапе в соответствии с рис. 6 выполняется идентификация индуктивности.

Затем выполняется оценка активного сопротивления и процесс повторяется вновь с этапа позиционирования, пока не будет получена окончательная оценка активного сопротивления и индуктивности при каждом варианте ориентации системы координат.

Для учета величины пульсирующего напряжения при идентификации постоянной времени (проверке конденсатора ЗПТ) рассмотрим математическую модель, представленную на рис. 7. Примем следующие параметры схемы: $R = 10$ Ом, $C = 10\,000$ мкФ ($T = 0,1$ с), время включения контакторов 0,1 с. Параметры питающей сети: $U_c = 220$ В, $f_c = 50$ Гц.

На рис. 8 представлены переходные процессы напряжения на конденсаторе и математической модели, описываемой уравнением (1).

По результатам моделирования идентифицируемая постоянная времени равнялась 126 мс. Таким образом, в отличие от поступления идеального ступенчатого сигнала, наличие в нем пульсирующего сигнала с частотой 50 Гц увеличивает оцениваемую постоянную времени. Подобное отклонение от идеальной экспоненты, которое для сети 220 В, 50 Гц может достигать 21,61%, требует дополнительного учета.

Таблица 3

Результаты идентификации параметров при асимметрии фаз

Ориентация системы координат	Оцененная L , мкГн	Оцененное R , Ом
Вдоль A (0°)	889,04	177,78
Вдоль B (120°)	889,04	177,78
Вдоль C (-120°)	665,95	133,33

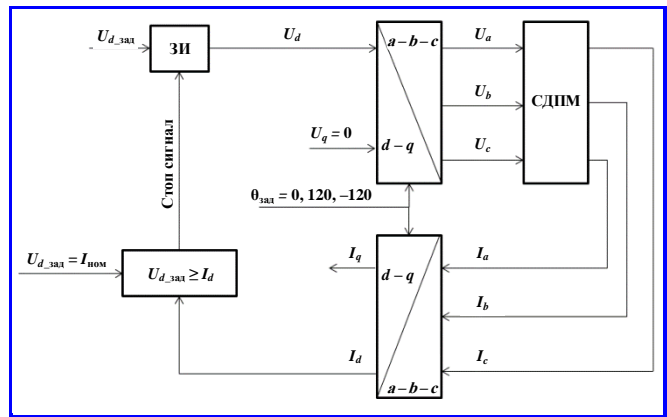


Рис. 5. К позиционированию системы координат и определению величины тестового импульса

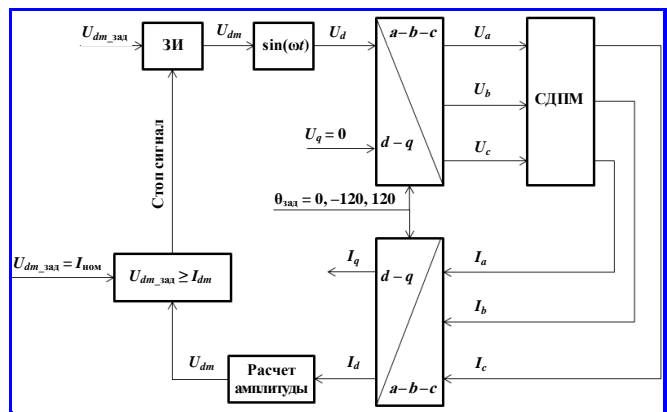


Рис. 6. Функциональная схема последовательности процесса идентификации индуктивности по оси d

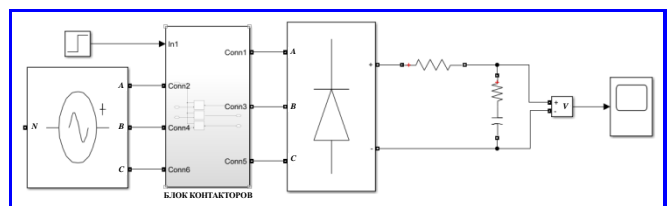


Рис. 7. Структурная схема математической модели для проверки конденсатора звена постоянного тока

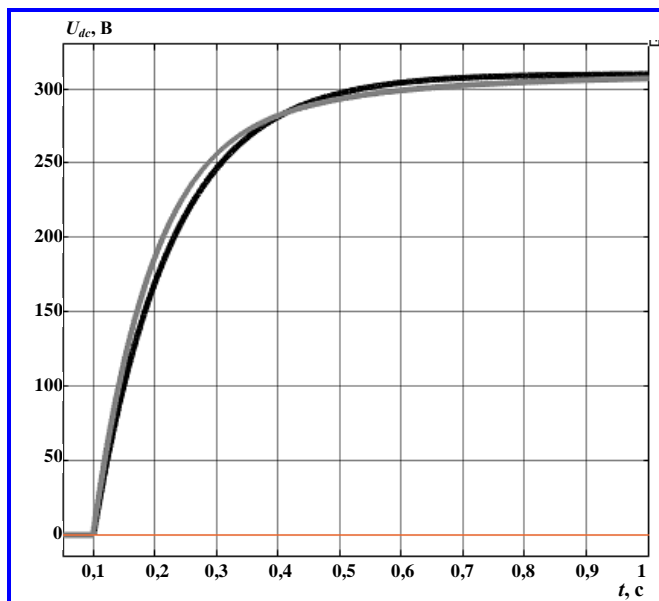


Рис. 8. Переходные процессы заряда емкости звена постоянного тока: серый – «реальный» преобразователь частоты; черный – идентифицируемая модель

Экспериментальное исследование

Проектные технические параметры исследуемых ПЧ и СДПМ представлены в табл. 4. Силовая схема идентична той, что представлена на рис. 1 и 2. Для измерения доступны напряжение ЗПТ и три фазных тока. Фактические параметры СДПМ (активное сопротивление и индуктивность) были предварительно определены специализированными приборами (LC-метром и миллиомметром). При исправном состоянии СДПМ приборы показали симметрию параметров фаз.

На первом этапе производится оценка емкости электролитического конденсатора ЗПТ по идентификации постоянной времени переходного процесса.

На рис. 9 представлен переходный процесс напряжения при заряде емкости и его математической модели. На рис. 10 показана интегральная ошибка между реальным переходным процессом и его математической моделью. Результаты оценки емкости представлены в табл. 5.

Из результатов видно, что нелинейность, проявляемая при идентификации емкости электролитического конденсатора, вносит меньшую погрешность в измерения – порядка 10%. Данную погрешность возможно учесть при заблаговременной отладке и настройке системы идентификации и диагностики.

Поскольку второй этап идентификации связан с оценкой состояния силовых модулей инвертора напряжения, по существу подготовительный и основан на жесткой логике, наибольший интерес в экспериментальной апробации представляют именно те этапы, которые связаны с диагностикой технического состояния СДПМ.

В соответствии с третьим этапом идентификации результаты оценки параметров при разных углах позиционирования системы координат и ротора СДПМ представлены в табл. 6, 7. Частота дискретизации сигнала с выхода датчика тока составляла 10 кГц при работе АЦП на соответствующей частоте широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом были отличия между измерениями активного сопротивления одной и той же фазы, но при разных положениях ротора не превышали 10%. При усреднении же результатов по фазам погрешность не превышала 5%.

Следует отметить, что при увеличении частоты дискретизации АЦП до 2 МГц (запись переходных процессов производилась на специализированном осциллографе) относительная погрешность измерения между фазами уменьшалась до 4%, а после усреднения результатов по фазам сокращалась до 1%.

Результаты четвертого этапа идентификации индуктивности при разных углах положения ротора и одного углового положения системы координат, представлены в табл. 8. Оценка индуктивности производилась с шагом в 90 электрических градусов для трех пар полюсов и, по сути, выполнялась для каждого полюса по осям d и q . Практически индуктивности равны, что указывает на равномерность воздушного зазора по окружности статора и отсутствие динамического эксцентриситета.

Таблица 4

Проектные технические параметры преобразователя частоты и синхронного двигателя с постоянными магнитами

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальная мощность, $P_{ном}$, кВт	5,5	Индуктивность статора по оси q L_q	0,45 мГн
Номинальный ток, $I_{ном}$, А	14,1	Индуктивность статора по оси d L_d	0,43 мГн
Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В	110	Потокоцепление ротора ψ_f	0,1 Вб
Число пар полюсов, p	3	Момент инерции ротора J	0,036 Н·м ²
Активное сопротивление статора, R_s , мОм	175	Номинальная скорость $\omega_{ном}$	314 рад/с
Напряжение звена постоянного тока ПЧ, В	311	«Мертвое» время	1 мкс
Частота ШИМ ПЧ, кГц	10	Дополнительный дроссель, мГн	0,2
Емкость электролитического конденсатора ЗПТ, мкФ	3240	Сопротивление зарядного резистора, Ом	69

Таблица 5

Результаты оценки емкости

Фактическая емкость, мкФ	Оцененная емкость, мкФ	Погрешность, %
3240	3594	10

Таблица 6

Результаты эксперимента третьего этапа

Положение ротора	Индуктивность, мкГн	Постоянная времени, мс	Активное сопротивление, мОм
0 (A0)	414,5	2,4278	170,733
2π/3 (B0)	414,7	2,4067	172,308
4π/3 (C0)	416,0	2,3691	175,593
6π/3 (A1)	416,2	2,3518	176,958
8π/3 (B1)	416,1	2,3143	179,784
10π/3 (C1)	414,9	2,2022	188,429
12π/3 (A2)	416,7	2,4313	171,389
14π/3 (B2)	416,9	2,2936	181,768
16π/3 (C2)	416,5	2,3433	177,745

Таблица 7

Пофазные результаты эксперимента третьего этапа

Усреднение по фазам	A	B	C	Максимальная погрешность (после усреднения), %
Максимальная погрешность (до усреднения), %	0,575	9,291	9,391	
Электромагнитная постоянная времени, мс	2,4036	2,3382	2,3048	4,29
Активное сопротивление, мОм	173,02654	177,953341	180,5888618	4,19

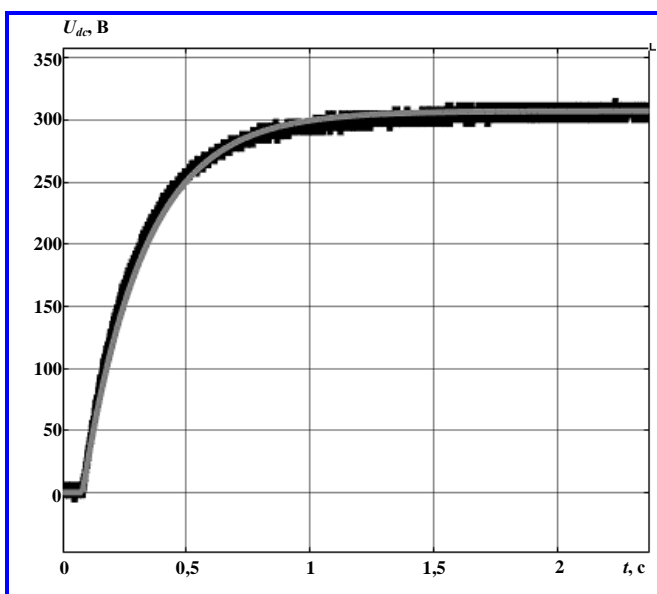


Рис. 9. Переходный процесс напряжения при заряде емкости звена постоянного тока (черный цвет – фактическое напряжение звена постоянного тока; серый цвет – математическая модель)

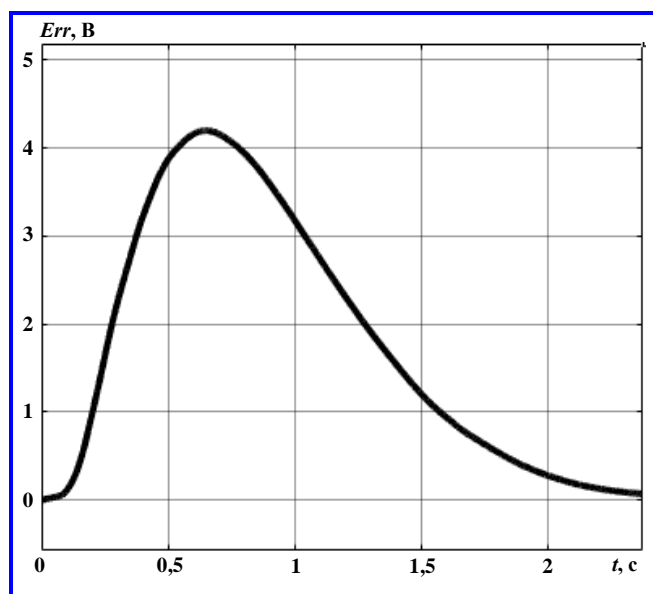


Рис. 10. Интегральная ошибка между реальным переходным процессом и его математической моделью

Таблица 8

Результаты эксперимента четвертого этапа

Индуктивность по оси d (средняя), мкГн	Индуктивность по оси q (средняя), мкГн
d	q
412,70	449,3
415,98	454,2
413,99	445,1

Таблица 9

Результаты идентификации пятого этапа

Потокоцепление ротора, Вб	Оцененное потокоцепление ротора, Вб	Погрешность, %
0,1	0,1051	5,1

Таблица 10

Результаты оценки индуктивности обмоток статора исправного и неисправного синхронного двигателя с постоянными магнитами

Состояние	A	B	C
Исправное, мкГн	581,861	581,86	578,821
Неисправное, мкГн	445,783	543,53	533,104

Результаты пятого этапа идентификации по оценке магнитного потока постоянных магнитов СДПМ практически подтверждают их проектное значение (табл. 9).

Из-за невозможности полноценного создания внутренних неисправностей СДПМ для имитации межвиткового замыкания обмоток в цепь статора были введены дополнительные дроссели, индуктивность которых сопоставима с индуктивностью самого СДПМ. Межвитковое замыкание сокращает количество активных витков, а в короткозамкнутых создает встречное магнитное поле, ослабляющее главный поток. В таком случае индуктивность фазы должна уменьшаться, создавая тем самым асимметрию в двигателе. По этой причине отключение одного дросселя из цепи фазы в первом приближении будет считаться аналогичным межвитковому замыканию.

В табл. 10 представлены результаты оценки индуктивности обмоток статора исправного и неисправного СДПМ при ориентации ротора вдоль каждой из его фаз. Неисправное состояние имитировалось отключением дросселя фазы A и подключением соответствующей фазы напрямую к СДПМ.

По результатам эксперимента видно, что оценка индуктивности при ориентации ротора и системы координат вдоль закороченной фазы, значительно отличается от тех же оценок других фаз. На основе полученных данных можно утверждать о причине возникновения неисправности.

Следует дополнительно отметить, что активное сопротивление дросселя составляло единицы МОм и его изменение с учетом возможной погрешности в 5% весьма сложно зафиксировать. Поэтому основным индикатором при оценке неисправностей

СДПМ предлагается использовать изменение индуктивности обмоток его статора.

Заключение

Предложен метод тестовой системы самодиагностики системы ПЧ-СДПМ, основанный на алгоритме идентификации его параметров с учетом нелинейности электромагнитной системы двигателя.

Предложенный алгоритм и последовательность этапов тестового диагностирования СДПМ относительно просты в реализации и не требуют высоких вычислительных мощностей, что подтверждается положительными результатами как при математическом моделировании, так и при экспериментальном исследовании. Они могут быть применимы при построении систем самодиагностики ПЧ-СДПМ.

Литература

1. Акимов Н. А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования / Н. А. Акимов, Н. Ф. Котеленец, Н. И. Сентюрихин. – Москва : Академия, 2008. – 300 с.
2. Осипов О. И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов / О. И. Осипов, Ю. С. Усынин. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
3. Reconfigurable Monitoring System for Time-Frequency Analysis on Industrial Equipment Through STFT and DWT / E. Cabal-Yepez, A. G. Garcia-Ramirez, R. J. Romero-Troncoso [et al.] // IEEE Trans. Ind. Inform. – 2013. – Vol. 9. – P. 760 – 771.
4. Neural network-based fault detection of PMSM stator winding short under load fluctuation / J. Quiroga, D. A. Cartes, C. S. Edrington [et al.] // In Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Poznan, Poland, 2008. – P. 793 – 798.
5. A New Convolutional Neural Network-Based Data-Driven Fault Diagnosis Method / L. Wen, X. Li, L. Gao [et al.] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2018. – P. (99) 1 – 1. – DOI : 10.1109/TIE.2017.2774777.
6. Experimental Testing of a Neural-Network-Based Turn-Fault Detection Scheme for Induction Machines under Accelerated Insulation Failure Conditions / R. M. Tallarn, T. G. Habetler, R. G. Harley // IEEE Xplore ; Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. – 2003. – DOI : 10.1109/DEMPED.2003.1234547.
7. Анализ результатов прогнозирования технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О. В. Крюков, А. В. Серебряков // ЭСИА. – 2016. – № 1 (30). – С. 39 – 44. – DOI : 10.18503/2311-8318-1(30)-39-44.
8. Костюков В. Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учебное пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко [и др.]. – Омск : НПЦ «Динамика», 2007 – 286 с.
9. Барков А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : СПбМТУ, 2004 – 156 с.
10. Сафин Н. Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкну-

- тым ротором : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сафин Наиль Рамазанович. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
11. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В. И. Петухов // Новости электротехники : информационно-справочное издание. – 2008. – № 1 (49). – URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php> (дата обращения: 15.07.2021).
12. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. И. Петухов, В. Соколов // Новости электротехники : информационно-справочное издание. – 2005. – № 1 (31). – URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (дата обращения: 15.07.2021).
13. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы / В. В. Купцов, А. С. Горзунов, А. С. Сарваров // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 34. – С. 60 – 67.
14. Спектральный анализ состояния асинхронных электродвигателей на компрессорных станциях / Е. В. Бычков // Химическая техника. – 2018. – № 10. – С. 20 – 24.
15. Short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors – an overview / J. Faiz, S. A. H. Exiri // 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). – 2015. – DOI : 10.1109/OPTIM.2015.7427038.
16. Метод диагностики дефектов синхронных генераторов по изменениям внешнего электромагнитного поля / Ю. Б. Казаков, А. Н. Морозов, А. П. Океанский [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 1. – С. 55 – 61.
17. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л. Г. Сидельников, Д. О. Афанасьев // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 127 – 137.
18. Измерение частичных разрядов изоляции статоров высоковольтных машин / DIMRUS : [сайт]. – 2021. – URL : <https://dimrus.ru/texts/stator2.html> (дата обращения: 05.10.2021).
19. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.08.86 № 2403 : введен взамен ГОСТ 11828–75 (кроме разд. 6), ГОСТ 25000–81 : дата введения 01.07.87 / разработан и внесен Министерством электротехнической промышленности. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – [31] с. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200006906> (дата обращения: 05.10.2021).
20. A New Approach to Diagnostics for Permanent-Magnet Motors in Automotive Powertrain Systems / A. Flach, F. Draeger, M. Ayeb [et al.] // 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives. – 2011. – DOI : 10.1109/DEMPED.2011.6063629.
21. Марченко А. А. Искусственное нагружение судовых асинхронных электродвигателей в послеремонтных испытаниях : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марченко Алексей Александрович. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – 160 с.
22. Котеленец Н. Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учебник / Н. Ф. Котеленец, Н. А. Акимова, М. В. Антонов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2003 – 384 с.
23. Imam A. M. Condition monitoring of electrolytic capacitors for power electronics applications : Ph.D dissertation / Afroz M. Imam ; Georgia Inst. Technol. – Atlanta, GA, 2007. – 146 p.
24. A survey of IGBT fault diagnostic methods for three-phase power inverters / B. Lu, S. Sharma // International conference on condition monitoring and diagnosis. – Beijing, Chine, 2008. – DOI: 10.1109/CMD.2008.4580396.
25. The enhancement of park current vectors technique for inverter fault detection / C. B. D. Eddine, B. Azzeddine, K. M. Amine [et al.] // 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC). – 2017. – DOI : 10.1109/ICoSC.2017.7958646.
26. A single fault diagnostics approach for power switches, speed sensors and current sensors in regenerative PMSM drives / I. Jlassi, A. J. M. Cardoso // IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). – 2017. – DOI : 10.1109/DEMPED.2017.8062381.
27. Гребенникова И. В. Методы оптимизации : учебное пособие / И. В. Гребенникова. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – 148 с.
28. Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами / А. С. Авдеев, О. И. Осипов // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3 (52). – С. 38 – 46.
29. Анучин А. С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А. С. Анучин. – Москва : МЭИ, 2015. – 373 с.

Поступила в редакцию 12.08.2021

*Александр Сергеевич Авдеев, аспирант, инженер 3 категории,
т. +7 (977) 257-58-75, e-mail: alex_ac94@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

DIAGNOSTICS OF THE FREQUENCY CONVERTER SYSTEM OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS USING OWN FACILITIES OF ELECTRIC DRIVE

A. S. Avdeev

The algorithm of test diagnostics of the technical condition of the frequency converter system of the synchronous motor with permanent magnets is proposed. The analysis of known diagnostic methods has shown the practicability of constructing test diagnostic algorithms created on the basis of a parameter identification system that is based on the synthesis of the sensitivities of transfer functions between control system variables to possible deviations of electric drive parameters, frequency method and magnetic flux observer. The possibility of using the proposed algorithm is presented based on a simplified mathematical model of a frequency converter and a synchronous motor with permanent magnets. An example of practical implementation confirming the effectiveness of the proposed method is also presented.

Key words: test diagnostics, synchronous motor with permanent magnets, technical diagnostics, parameter identification, frequency method, failures.

References

1. Akimova N. A. Installation, technical operation and repair of electrical and electromechanical equipment / N. A. Akimova, N. F. Kotelenets, N. I. Sentiurikhin. – Moscow : Academy, 2008. – 300 p.
2. Osipov O. I. Technical diagnostics of automated electric drives / O. I. Osipov, Iu. S. Usynin. – Moscow : Energoatomizdat, 1991. – 160 p.
3. Reconfigurable Monitoring System for Time-Frequency Analysis on Industrial Equipment Through STFT and DWT / E. Cabal-Yepez, A. G. Garcia-Ramirez, R. J. Romero-Troncoso [et al.] // IEEE Trans. Ind. Inform. – 2013. – Vol. 9. – P. 760 – 771.
4. Neural network-based fault detection of PMSM stator winding short under load fluctuation / J. Quiroga, D. A. Cartes, C. S. Edrington [et al.] // In Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Poznan, Poland, 2008. – P. 793 – 798.
5. A New Convolutional Neural Network-Based Data-Driven Fault Diagnosis Method / L. Wen, X. Li, L. Gao [et al.] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2018. – P. (99) 1 – 1. – DOI : 10.1109/TIE.2017.2774777.
6. Experimental Testing of a Neural-Network-Based Turn-Fault Detection Scheme for Induction Machines under Accelerated Insulation Failure Conditions / R. M. Tallarn, T. G. Habetler, R. G. Harley // IEEE Xplore ; Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. – 2003. – DOI : 10.1109/DEMPED.2003.1234547.
7. Analysis of the results of predicting the technical condition of electric gas pumping units / O. V. Kriukov, A. V. Serebriakov // EsiK. – 2016. – No. 1 (30). – Pp. 39 – 44. – DOI : 10.18503/2311-8318-1(30)-39-44.
8. Kostiukov V. N. Fundamentals of vibroacoustic diagnostics of machinery : textbook / V. N. Kostiukov, A. P. Naumenko, S. N. Boichenko [et al.]. – Omsk : SPC 'Dynamics', 2007 – 286 p.
9. Barkov A. V. Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis : textbook / A. V. Barkov, N. A. Barkova. – St. Petersburg : SPbMTU, 2004 – 156 p.
10. Safin N. R. Improving the methods of current diagnostics of asynchronous motors with a short-circuited rotor : specialty 05.09.01 'Electromechanics and electrical equipment' : thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Safin Nail Ramazanovich. – Yekaterinburg, 2017. – 152 p.
11. Diagnostics of electric motors. Spectral analysis of modules of current and voltage Park vectors / V. I. Petukhov // News of electrical engineering : information and reference edition. – 2008. – No. 1 (49). – URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php> (date of access: 15.07.2021).
12. Diagnostics of the state of electric motors. The method of spectral analysis of the consumed current / V. I. Petukhov, V. Sokolov // News of electrical engineering : information and reference edition. – 2005. – No. 1 (31). – URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (date of access: 15.07.2021).
13. Development of methods of current diagnostics of asynchronous motors based on oscillograms of non-stationary modes of operation / V. V. Kuptsov, A. S. Gorzunov, A. S. Sarvarov // Bulletin of SUSU. – 2009. – No. 34. – Pp. 60 – 67.
14. Spectral analysis of the state of asynchronous electric motors at compressor stations / E. V. Bychkov // Chemical Engineering. – 2018. – No. 10. – Pp. 20 – 24.
15. Short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors – an overview / J. Faiz, S. A. H. Exiri // 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). – 2015. – DOI : 10.1109/OPTIM.2015.7427038.
16. Method of diagnostics of defects of synchronous generators by changes in the external electromagnetic field / Iu. B. Kazakov, A. N. Morozov, A. P. Okeanskii [et al.] // Bulletin of ISPU. – 2019. – No. 1. – Pp. 55 – 61.
17. Review of methods for monitoring the technical condition of asynchronous motors during operation / L. G. Sidelnikov, D. O. Afanasiev // Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and gas and mining. – 2013. – No. 7. – Pp. 127 – 137.
18. Measurement of partial discharges of insulation of stators of high-voltage machines / DIMRUS : [website]. – 2021. – URL : <https://dimrus.ru/texts/stator2.html> (date of access: 05.10.2021).

19. GOST 11828-86. Electric rotating machines. General test methods : interstate standard : official publication : approved and put into effect by the decree of the USSR State Committee for Standards No. 2403 dated 15.08.86: introduced instead of GOST 11828-75 (except sec. 6), GOST 25000-81 : date of introduction 01.07.87 / developed and introduced by the Ministry of Electrical Industry. – Moscow : IPK Publishing House of Standards, 2003. – 31 p. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200006906> (date of access: 05.10.2021).
20. A New Approach to Diagnostics for Permanent-Magnet Motors in Automotive Powertrain Systems / A. Flach, F. Draeger, M. Ayeb [et al.] // 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives. – 2011. – DOI : 10.1109/DEMPED.2011.6063629.
21. Marchenko A. A. Artificial loading of asynchronous ship electric motors during post-repair tests : specialty 05.09.03 ‘Electrotechnical complexes and systems’ : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Marchenko Aleksei Aleksandrovich. – Petropavlovsk-Kamchatsky, 2017. – 160 p.
22. Kotelenets N. F. Testing, operation and repair of electric machines: textbook / N. F. Kotelenets, N. A. Akimova, M. V. Antonov. – Moscow : Publishing Center ‘Academy’, 2003 – 384 p.
23. Imam A. M. Condition monitoring of electrolytic capacitors for power electronics applications : Ph.D dissertation / Afroz M. Imam ; Georgia Inst. Technol. – Atlanta, GA, 2007. – 146 p.
24. A survey of IGBT fault diagnostic methods for three-phase power inverters / B. Lu, S. Sharma // International conference on condition monitoring and diagnosis. – Beijing, Chine, 2008. – DOI: 10.1109/CMD.2008.4580396.
25. The enhancement of park current vectors technique for inverter fault detection / C. B. D. Eddine, B. Azzeddine, K. M. Amine [et al.] // 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC). – 2017. – DOI : 10.1109/ICoSC.2017.7958646.
26. A single fault diagnostics approach for power switches, speed sensors and current sensors in regenerative PMSM drives / I. Jlassi, A. J. M. Cardoso // IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). – 2017. – DOI : 10.1109/DEMPED.2017.8062381.
27. Grebennikova I. V. Optimization methods : textbook / I. V. Grebennikova. – Yekaterinburg : UrFU, 2017. – 148 p.
28. Identification of electrical parameters of a synchronous motor with permanent magnets / A. S. Avdeev, O. I. Osipov // Electrotechnical systems and complexes. – 2021. – No. 3 (52). – P. 38 – 46.
29. Anuchin A. S. Control systems of electric drives: textbook for universities / A. S. Anuchin. – Moscow : MPEI, 2015. – 373 p.

*Aleksandr Sergeevich Avdeev, Ph. D. Student, 3d Category Engineer,
tel.: +7 (977) 257-58-75, e-mail: alex_ac94@mail.ru.
(JSC «Corporation VNIIEМ»).*