

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки)

Техническое и информационное обеспечение интеллектуальных систем электроснабжения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей

Обучающийся

М.В. Борцов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Д. А. Кретов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| 1 Основные неисправности асинхронных электродвигателей находящихся в эксплуатации..... | 7 |
| 1.1 Повреждение подшипников и их причины..... | 9 |
| 1.2 Электрические повреждения элементов статора..... | 18 |
| 2 Основные методы диагностики асинхронных электрических машин | 22 |
| 2.1 Вибрационный способ..... | 22 |
| 2.2 Методика акустической диагностики..... | 28 |
| 2.3 Метод диагностики технического состояния асинхронного электродвигателя по параметрам электромагнитного поля, создаваемого при работе устройством | 29 |
| 2.4 Метод диагностики по температуре компонентов и узлов асинхронного электродвигателя | 30 |
| 2.5 Метод, основанный на анализе химического состава смазочных материалов..... | 31 |
| 2.6 Методика определения состояния электродвигателя по коэффициенту абсорбции | 32 |
| 2.7 Методы, основанные на анализе электрических параметров машины.. | 33 |
| 3 Разработка концепции системы прогнозирования | 36 |
| 3.1 Упрощённая структурная схема..... | 37 |
| 3.2 Алгоритм работы системы прогнозирования неисправностей..... | 39 |
| 3.3 Моделирование системы прогнозирования неисправностей асинхронного электродвигателя..... | 41 |
| 3.4. Прогнозирование неисправностей асинхронного электродвигателя по анализу температуры секторов корпуса..... | 45 |
| 3.4. Прогнозирование неисправностей по токовым характеристикам..... | 53 |
| 3.5. Прогнозирование неисправности асинхронного электродвигателя по виброхарактеристикам | 66 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Заключение | 79 |
| Список используемой литературы | 81 |

Введение

В настоящее время в мире наблюдается сложная экономическая обстановка. Значительное увеличение плеча логистики ввиду протекающей политической и экономической последствий приводит к значительному росту стоимости оборудования и производств. В следствие чего возникает необходимость в поиске способов сокращения расходов, одним из которых является повышение выработки собственного ресурса оборудования.

Подобный подход позволит значительно сократить расходы на замену оборудования, постольку поскольку своевременный ремонт будет куда менее затратным, а также продлит срок службы оборудования.

Исходя из множества исследования одним из самых распространённых потребителей электроэнергии являются электроприводы, а если быть точнее, то асинхронные электроприводы (асинхронные электродвигатели).

«Асинхронные электродвигатели (АД) одни из самых распространённых видов оборудования. [1, с. 403] Они выделяются простотой обслуживания, износостойкостью, хорошим КПД и рядом других характеристик, благодаря которым они получили широкое распространение. Доказательством высокой надёжности и большого эксплуатационного ресурса может служить диаграмма, изображённая на рисунке 1. На ней приведены данные о распределении асинхронных электродвигателей, находящихся в ведении предприятий Самарской области, по дате производства. Диаграмма построена на основании данных, собранных в 2023 году.» [2, с. 89].

По рисунку 1, построенному по результатам статистического анализа, можно сделать логический вывод, что 52% исследованных электродвигателей (асинхронных), мощность которых варьировалась от 50 до 160 кВт и нормальным рабочим напряжением до 660 В, используются в действующем производстве как минимум 40 лет, в 2% даже больше, что указывает, на то, что это не максимальная эксплуатационная возможность данного типа устройств.

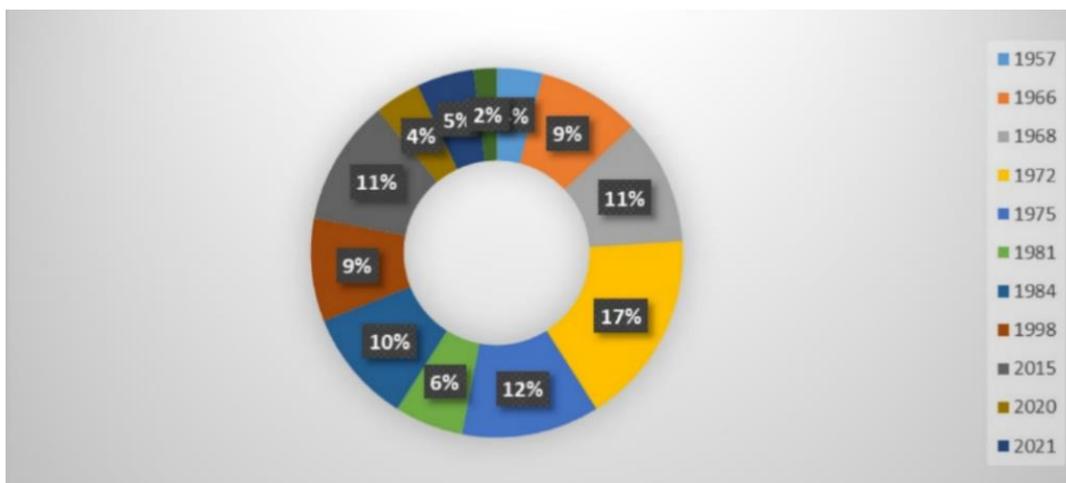


Рисунок 1 – Графическое отображение процентного распределения электродвигателей (асинхронных, номинальной мощностью до 160 кВт) по датам изготовления

Касательно возможных причин, подобного, длительного функционирования электродвигателей (асинхронных), можно рассматривать качественное плановое предупредительное обслуживание (ППО).

«Однако есть предприятия, на которых выполнение подобных мероприятий либо невозможно, либо осложнено в виду особенностей технологии производства. Например, предприятия непрерывного цикла химической промышленности. Как правило в организациях заранее планируется плановое предварительное обслуживание на определённый интервал, а также для него планируется строго определённое время, что может послужить серьёзным недостатком [3, с. 420].

При эксплуатации АД на этапе катастрофического старения [4, с. 3] риски выхода из строя оборудования повышается в разы.

Несмотря на наличие на подобных объектах регулярных осмотров оборудования большое количество дефектов не удастся определить.

Для решения этой проблемы были разработаны некоторые методики диагностики состояния АД.

Далее приведём некоторые из них:

- диагностика АД по среднеквадратичному значению (СКЗ) вибросигнала;

- вибродиагностика АД с помощью фазовых портретов (траекторий колебаний);
- спектральный анализ;
- спектральный анализ огибающей;
- кепстральный анализ;
- ультразвуковая дефектоскопия и акустическая диагностика;
- специальные диагностические параметры;
- вейвлет-анализ;
- статистические методы обработки сигналов вибрации;
- диагностика на основе нейронных сетей. [5, с. 21]

Большая часть из указанных методов в виду сложности технической реализации, экономической неэффективности или же высокой погрешности не нашли применения на практике.

Однако некоторые методы такие как вибро-диагностика и диагностика по спектральному анализу были реализованы на некоторых предприятиях.» [2, с. 89]

«На сегодняшний день методы диагностики не позволяют полноценно диагностировать оборудование во всех условиях эксплуатации, а значит, не влияют на сокращения затрат, связанных с выходом из строя электродвигателя. Поэтому актуальна разработка каких-либо новых методов, либо использование методов, ранее не использовавшихся в диагностике» [6, с. 32].

Исходя из приведённых данных целью работы станет повышение выработки собственного ресурса асинхронных электродвигателей.

Для того, чтобы решить подобную, часто фигурирующую в литературных источниках не тривиальную проблему, как один из множества возможных вариантов видится возможность внедрения системы диагностирования неисправностей, основанной на комплексном методе. Принцип озвученной методики в своей сути основывается на качественном объединении самых эффективных на данный момент методов диагностики в

полноценную систему прогнозирования неисправностей асинхронных электрических двигателей.

В случае если удастся достигнуть баланса эффективности различных методик диагностики, то с высокой долей вероятности удастся повысить качество прогнозирования неисправностей электродвигателей (асинхронных) при этом соблюдая баланс финансовой конкурентоспособности на рынке систем диагностики.

В связи с этим задачами станут:

- анализ неисправностей асинхронных электродвигателей. Рассмотрение их причин возникновения и особенностей проявления.
- анализ существующих методов диагностики, выявление их достоинств и недостатков.
- составление концептуальной логической схемы работы системы.
- определить требуемые для функционирования установки критериев.
- построение структурной схемы системы прогнозирования.

1 Основные неисправности асинхронных электродвигателей находящихся в эксплуатации

Из имеющихся литературных источников можно принять, что на момент написания данной статьи самым распространённым считается асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (беличье колесо), эти данные подтверждаются исследованиями, проводимыми в 2016 году, Хацкелевич А.Н, а также онлайн ресурсом MarketWatch в 2023.

«Статистические исследования по публикуемым открытым данным коммерческой организаций показывает, что асинхронные электродвигатели (АД) на различных промышленных и хозяйственных предприятиях потребляют от 70 до 80 % всей потребляемой мощности.» [7, с.35]

Разумеется, постольку поскольку есть исключения в виде предприятий тяжёлой металлургии, основное потребление электроэнергии которых приходится на плавильные печи.

Следует отметить, что для конечных потребителей в лице крупных промышленных организаций, чаще всего приоритетом при закупке выступают электродвигатели (асинхронные) не без основательно.

Как уже упоминалось ранее в разделе "Введение", данный тип двигателей показывает себя как надёжное, а что ещё не мало важно не сложное в обслуживании электрическое устройство. Особенно данное утверждение без сомнений можно применить к моделям с короткозамкнутым ротором.

Если не вдаваться в технические особенности устройства и конструктивные исполнения, то бесспорным достоинством асинхронного двигателя, в сравнении с электрическими двигателями постоянного тока, можно счесть минимальное количество трущихся деталей, которые как правило раньше всего выходят из строя. В случае с электродвигателем постоянного это, узел коллекторно-щёточного механизма, который является основополагающей частью данного устройства.

Следовательно, напряжение на обмотки статора асинхронных электрических машин подаётся на прямую, без применения трущихся контактов. Это позволяет использовать асинхронный электродвигатель без дополнительных сложностей в большом спектре условий и различных областях промышленности, а также в быту.

Как уже было сказано ранее, из рисунка 1, диаграммы распределения асинхронных электродвигателей по дате изготовления, можно увидеть, что больше 20% двигателей, произведённых более 50 лет назад всё, ещё находятся в эксплуатации.

При всё при этом, электродвигатели асинхронные, как и любое другое устройство в процессе своего производственного цикла, могут быть подвержены повреждениям. Которые естественным образом возникают за длительное время эксплуатации, в независимости от условий. Что как можно логически предположить вызывает сбои в работе, а в худших случаях полный выход устройства из рабочего процесса.

«Основными источниками развития повреждений асинхронных электрических двигателей, на данный момент являются:

- перегрузка или перегрев статора электродвигателя – 31%;
- межвитковое замыкание – 15%;
- повреждения подшипников – 12%;
- повреждение обмоток статора или изоляции – 11%;
- неравномерный воздушный зазор между статором и ротором – 9%;
- работа электродвигателя на двух фазах – 8%;
- обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке – 5%;
- ослабление крепления обмоток статора – 4%;
- дисбаланс ротора электродвигателя – 3%;
- несоосность валов – 2%.» [8]

Нужно отметить, что данные разных источников о частоте распределении неисправностей, разнятся в зависимости от источника. В таблице 1 приведены данные из четырёх различных источников.

Таблица 1 - Обобщение собранных из разных источников сведений о дефектах двигателей (асинхронных), которые встречаются чаще всего

| Наименование дефекта двигателей (асинхронных) | Ниже указаны собранные данные | | | | |
|---|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | [9] | [10] | [11] | [6] | [7] |
| Поломки электрической природы неподвижной обмотки, создающей закрученное магнитное поле. (статор) | 84-86% | 37-39% | 35-37% | 20-22% | 43-45% |
| Выход из строя компонентов, обеспечивающих вращение вала с наименьшим сопротивлением | 4-6% | 39-41% | 39-41% | 68-70% | 25-27% |
| Поломки вращающегося элемента, расположенного на валу. (ротор) | 4-6% | 9-11% | 11-13% | 6-8% | 7-9% |
| Прочие куда менее распространённые дефекты двигателей (асинхронных) | 4-6% | 12 | 12 | 2-4% | 21-23% |

Из приведённых данных следует что наиболее распространены электрические повреждения и износ элементов подшипников.

Рассмотрим их более внимательно.

1.1 Повреждение подшипников и их причины

Одним из важных составных элементов асинхронного электродвигателя являются подшипники именно поэтому их повреждения очень опасны для нормального функционирования устройства. Чаще всего применяются радиально-упорные и шарикоподшипники закрытого типа.

В асинхронных электродвигателях применяются несколько типов подшипников:

- подшипники качения;
- подшипники скольжения.

Рассмотрим возникающие дефекты подшипников на примере подшипников качения.

Постольку поскольку, возможно одной их самых важных деталей многих современных механизмов, к которым относятся и электродвигателя, являются подшипники, подшипники качения в том числе.

Так как рассматриваемая деталь критически важна для нормального функционирования требования надёжности и долговечности к ней пропорционально высоки. В связи с этим не удивителен, тот факт, что сами подшипники так же являются предметом научных исследований.

На сегодняшний день есть целая научная исследовательская область, изучающая подшипники с точки зрения теории, практики и технологических особенностей.

Так, например, исследование SKF AB приводит следующие данные:

«Благодаря проведённым исследованиям стал возможен расчёт долговечности подшипников с высокой точностью. Это сделало возможным согласование между собой долговечности подшипников и машины. Однако время от времени случается, что фактическая долговечность подшипника оказывается ниже расчётной. Это происходит вследствие множества причин. Например, не предполагаемо высокая нагрузка, недостаточное смазывание или неподходящий смазочный материал, неправильный монтаж подшипника, недостаточная эффективность уплотнений, посадка подшипника с чрезмерным натягом и, соответственно, недостаточный внутренний зазор или чрезмерный внутренний натяг подшипника. Каждая такая ситуация порождает специфическое повреждение подшипника, которое находит отражение в характерной картине повреждения. Следовательно, в большинстве случаев становится возможным при исследовании повреждённого подшипника установить причину повреждения и принять соответствующие меры, для того чтобы избежать повторного повреждения подшипника после возобновления работы машины.» [9]

Если сформулировать основную идею более просто, то можно сказать, что при практическом использовании, подшипник физически не может функционировать длительное время. Постольку поскольку за время работы будет накапливаться усталостное разрушение материала, из которого состоит деталь, как следствие станет физически невозможной использование подшипника.

Нужно понимать, что постольку поскольку подшипник является элементом вращающегося механического узла, то скорость образования дефекта, связанна с такими параметрами как скорость.

При всем при том, скорость как повышенная, так и слишком низкая.

Также одним из составных параметров, определяющих скорость возникновения дефектов, является нагрузка, которая оказывается на деталь.

Совместно эти две величины, при условии несоответствия установленного заводом изготовителем нормального значения, будут создавать напряжение на деталь, которое приводит к так называемому усталостному разрушению.

Суть в том, что постольку поскольку внутри металла, из которого состоит подшипник образуются микротрещины. При условии, если он работает в режиме, который для него не является нормальным. Когда этих трещин не много то подшипник вполне может функционировать. Однако со временем, когда их становится много в местах оказания наибольшей нагрузки, происходят отслоения металла. Следствия вы можете пронаблюдать на рисунке 2. По рисунку 2 можно сделать вывод, что данный подшипник более не может использоваться по его прямому назначению.

Напряжения, которые описаны ранее являются первоосновой возникновения трещин. Со временем эти трещины добираются до поверхностных слоёв материала.

Постольку поскольку детали перекатываются по трещинам, то в следствие этого возникает отделение небольших кусочков материала детали.

В исследовании SFT данный процесс обозначен как формирование усталостных раковин. Со временем он продолжается вплоть до достижения состояния полной непригодности подшипника к использованию в работе (рисунок 2).

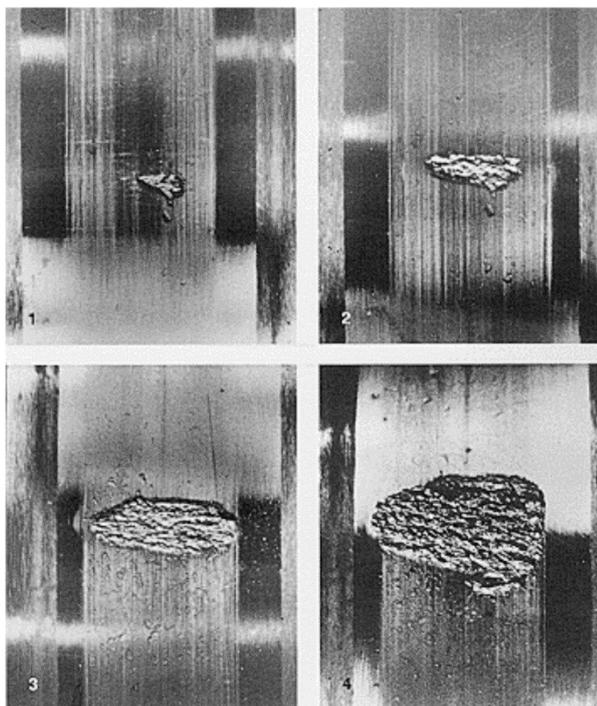


Рисунок 2 – Фото под увеличением. Разные этапы появления неисправности на трущейся поверхности подшипник, отслаивание металла с образованием раковины. [13, с. 5]

Как правило вполне можно рассчитать время возникновения, описанного выше дефекта. Производители, занимающиеся изготовлением подшипников, указывают расчётный период эксплуатации. Как правило они ориентируются на работы в режиме постоянной нагрузки. То есть работу с одинаковой частотой вращения, нагрузкой на валу и противодействующими вращению силами. Как критерий долговечности принимают количество оборотов, которые может совершить устройство при нормальных условиях эксплуатации.

Производители обычно указывают меньшее количество, чтобы выполнить замену подшипника до выхода из строя.

Развитие дефекта происходит весьма медленно, что позволяет заранее диагностировать неисправность по возникающим шумам или по нагреву при своевременном осмотре.

В связи с этим в нормальных условиях удаётся произвести замену до того, как неисправность станет критической.

При осмотре подшипника можно заметить матовые полосы направленные перпендикулярно к оси вращения. Это не сказывается на долговечность процесса, а является особенностью технического процесса при эксплуатации подшипника.

На образование этих матовых пятен влияют много факторы: качество смазки; наличие в смазке примесей; скорость вращения; нагрузка.

Если вскрыть подшипник и произвести его осмотр, то с высокой долей достоверности можно сказать, как он эксплуатировался и в каких условиях работал.

В связи со всем ранее сказанным они так же являются важным фактором диагностики состояния подшипника, постольку поскольку если отследить чем отличаются описание выше матовые пятна, то появляется возможность диагностировать в каких условиях работает подшипник.

Каждая причина повреждения подшипника отражается в характерной схеме повреждения. Эти повреждения, называемые первичными, вызывают вторичные повреждения-усталостные оболочки (питтинг), трещины - которые служат прямой причиной выхода из строя подшипника. Уже первичное повреждение в некоторых случаях может быть причиной потери производительности подшипника.

Например, износ и, следовательно, удаление чрезмерно больших подшипников могут вызвать недопустимо высокую вибрацию и шум. Сочетание первичного и вторичного повреждения часто встречается на неисправном подшипнике.

Из исследования [13] виды повреждений можно классифицировать следующим образом:

- первичные повреждения;
- износ;
- вмятины;
- задиры.

Поверхностные разрушения

- коррозия;
- последствия прохождения электрического тока;
- вторичные повреждения;
- усталостные раковины;
- трещины.

Краткая характеристика дефектов подшипников сведена в таблицу 2.

Таблица 2 – Описание дефектов подшипников

| Н.П.П | Наименование дефекта | Описание |
|-------|----------------------|--|
| 1 | Вмятины | «Царапины на дорожках качения и их телах могут возникать, когда монтажные силы передаются кольцам через элементы тела качения. Точно так же царапины возникают, когда на подшипниковые узлы накладываются чрезмерно тяжелые нагрузки в то время, когда подшипники не вращаются. Причиной царапин может стать попадание посторонних частиц в подшипник.» |
| 2 | Задиры | «Если две недостаточно смазанные поверхности скользят друг относительно друга под нагрузкой, частицы металла переносятся с одной поверхности на другую. Это явление называется агрессией или же задиrom. Поверхности в этом явлении выглядят грубыми. В случае погружения материал подшипника нагревается до температуры, при которой происходит опуск (имеется в виду изменение свойств металла). Существует локальная концентрация напряжений, что приводит к образованию трещин и раковин.» |
| 3 | Износ | «При нормальных условиях эксплуатации нет заметного износа роликовых подшипников. Износ возникает при попадании посторонних частиц в подшипник или недостаточной смазке. Это также может быть результатом вибрации подшипника, который не вращается.» |

Если рассматривать роликоподшипники, то можно пронаблюдать, что у них процесс трения, а именно трения скольжения, совершается в основном между краями роликов и бортиком колец.

Нужно также понимать, что задиры как фактор неисправности могут проявлять себя при всем при том, если соблюдается условие перехода так

называемого "тела качения" в область большой загрузки при значительном ускорении.

«Следствием перемещения колец подшипников относительно шеек валов, посадочных отверстий корпусов и их торцов также может быть возникновение задиров в отверстиях внутренних колец, на наружных поверхностях наружных колец и их торцах.» [14]

В некоторых случаях, напротив, образование задиров может происходить в следствие большой частоты вращения при слишком малой нагрузке. Это характерно, например, для упорных шарикоподшипников.

«Поверхностные разрушения.»

«Если смазывающий слой между дорожками и телами качения слишком тонкий, то вершины шероховатостей кратковременно соприкасаются друг с другом. При этом на поверхностях возникают мельчайшие трещины. Такой процесс именуют поверхностным разрушением. Трещины подобного рода не следует смешивать с усталостными трещинами, которые образуются в подповерхностном слое и приводят к образованию усталостных раковин (шелушение, питтинг). В рассматриваемом процессе поверхностные разрушения первоначально микроскопически малые, затем быстро увеличиваются и, в конце концов, препятствуют плавному вращению подшипника.» [14]

На данный момент самым действенным способом повышения надёжности электродвигательного подшипника является своевременная и качественная смазка.

Обычно, процесс смазки подшипника выполняется при ППО, совместно с остальными мероприятиями по обслуживанию электродвигателя. При этом за счет снижения коэффициента трения, на дистанции увеличивается эксплуатационный ресурс не только подшипника, но и электродвигателя в целом, постольку поскольку возникающие на поверхности подшипника дефекты влекут за собой такие негативные последствия как повышенная вибрация. Под её воздействием при сильной нагрузке может возникнуть

повреждение вала или замыкание ротора о стенки статора. Это может привести к серьёзным последствиям.

Но, конечно, хотя смазка и позволяет оттянуть неизбежное, но веже это лишь вопрос времени, когда под воздействием загрузки, внутренние микротрещины на ложатся друг на друга в месте прохождения бороздок и образуют поверхностный скол.

Так же очень сильное влияние на длительность образования такого дефекта будут оказывать некоторые условия внешней среды, например, температура воздуха, влажность и атмосферное давление. Это связано с тем, что они на прямую влияют на свойства смазочного материала, а это в свою очередь может снизить её эффективность.

«Коррозия»:

Так как подшипник изготавливается из металла, то не удивительно, что со временем он может быть подвержен такому явлению. При чем даже глухая смазка не даёт однозначной гарантии того, что со временем по подшипнику не начнет распространяться ржавчина. Она может возникнуть по нескольким причинам попадание микрокапель воды или же воздействие некоторых соединений, которые по каким-то причинам попали в подшипник.

Сам по себе процесс коррозии подразделяется на несколько типов. Первый это фреттинг коррозия, а второй – щелевой.

Как можно судить из названия первый тип является поверхностным, как правило он явно виден при беглом осмотре, в свою очередь второй мене заметен, но при этом более опасен, так как ослабляет материал в глубь его структуры.

«Другим видом повреждений является воздействие электрического тока».

Как можно судить из названия, данное повреждение образуется за счёт токового воздействия, при замыканиях обмотки статора на корпус или же в случае внешнего воздействия. Так же возможен случай короткого замыкания ротора о статор, с повреждением первого, в этом случае возможно попадание

напряжения на вал двигателя, а так как он представляет собой цельный кусок металла, он передаёт ток на подшипник. Последний под таким негативным воздействием начинает оплавляться в местах контакта металлических элементов.

При высоких значениях тока, вполне можно сравнить протекающие в этот момент в подшипнике процессы с электрической сваркой.

Что в свою очередь приводит к опуску металла, а в некоторых запущенных случаях, до состояния плавления. Там, где металл оплавляется возникают лунки или наплывы.

Как описано выше токовые электрические поражения подшипников приводят к образованию искажений (деформаций) дорожек качения, аналогичные процессы происходят в роликах, но при этом шарики лишь меняют свой цвет, приобретая тёмный оттенок.

Исходя из анализа повреждений, порой очень трудно отличить повреждения от электрического тока и повреждения, вызванные вибрацией, но это всё же возможно.

Постольку поскольку характерным признаком, который бы позволил судить о прохождении электрического тока, является возникновение темных бороздок.

Как правило при повреждениях, вызванных вибрацией, возникают блестящие или ржавые бороздки.

Так же отличительным признаком могут послужить отсутствие повреждений на теле качения, что является характерной чертой при "ложном бринеллинге".

Невозможно избежать разрушений подшипника, описанного вида, если не предотвратить воздействие электрического тока, постольку поскольку в независимости от того, постоянный это ток или переменный, негативное воздействие будет оказываться в независимости от величины тока. Иными словами, даже при малой его величине будут оказываться повреждения.

Анализ данных показывает, что куда сильнее повреждаются вращающиеся подшипники, нежели не вращающиеся.

Так же факторами, влияющими на силу повреждений подшипника, являются:

- скорость (частота вращения);
- нагрузка, оказываемая на подшипник;
- сила тока;
- тип смазки (смазывающий материал).

1.2 Электрические повреждения элементов статора

Статор - это неподвижная деталь в электродвигателе. Обычно он совмещён с корпусом устройства и представляет собой цилиндрическую деталь. Он также состоит из множества пластин для уменьшения нагрева из-за токов Фуко, которые в обязательном порядке окрашиваются специальным лаком. На концах имеются посадочные места для подшипников скольжения или качения.[15]

Как уже упоминалось, электрическое повреждение статора является одной из наиболее распространённых причин выхода асинхронного двигателя из нормального режима работы.[16]

На рисунке 3 фото разобранного неисправного агрегата.

Ниже приведены неисправности статора, их признаки, причины и возможные способы устранения.

В том случае если при холостом ходе активная сталь, из которой состоит сердечник при условии номинального напряжения в питающей сети в отдельных локальных частях стала чрезмерно нагреваться, то с высокой долей вероятности это следствие локального замыкания между отдельными стальными листов сердечника, которое может быть вызвано механическим воздействием. Ударом ротора о статор, заусенцами или же в том случае, если зубцы из активной стали оплавилась и сгорели в следствие короткого замыкания в

обмотке статора. Либо в случае неисправности обмотки в корпусе электродвигателя.[17]



Рисунок 3 – Фотография разобранного электродвигателя, у которого была повреждена обмотка статора

Практика показывает, что после данной неисправности вполне можно восстановить электродвигатель, если удалить заусенцы. А также механически разделить сплавленные между собой шихтованные элементы сердечника, покрыть специализированным защитным лаком и, разумеется, вырезав дефектные участки.

Кроме того, потребуется заложить участки, покрытыми специальным электротехническим лаком, электрокартоном или слюдой.

В том случае если область повреждения очень обширна, то потребуется полностью перемотать электродвигатели с перешихтовкой стали в сердечнике, так как описанный ранее метод будет уже менее эффективен.

Процесс восстановления электродвигателя описанным образом будет весьма длительным и потребует значительные трудозатраты.

Не качественное выполнение мероприятий по подключению электродвигателя. В результате чего, обмотка статора собрана в схему "Звезда" вместо "Треугольник".

В случае неверной сборки схемы питания электродвигателя, напряжение U на клеммах электродвигателя в БРНО будет ниже номинального значения, а как следствие устройство будет работать на повышенном токе при

номинальной мощности. При этом будет равномерно перегреваться вся обмотка статора. У электродвигателя будет нарушена нормальная вентиляция, а сам он будет сильно перегружен.[18]

Для того, чтобы избежать ухудшения состояния устройства его требуется незамедлительно перевести на верную схему «Звезда», обязательно снизить загрузку, а также улучшить его вентиляцию.

При наличии устройств частотного регулирования попытаться снизить значение тока или же увеличить напряжение до номинального

Короткое замыкание между фазами. Короткое замыкание между двумя обмотками разных фаз.

В случае возникновения данного дефекта его удастся легко определить, постольку поскольку при образовании межфазного короткого замыкания появляется токовая не симметрия, то есть ток в разных фазах отличается. Кроме того, появляются сильные вибрации и гул при работе, двигатель очень сильно тормозит. Сама обмотка статора при этом перегревается.

Определить точно неисправность можно если отсоединить обмотку и выполнить пальпацию обмотки.

После такого повреждения вполне можно восстановить электродвигатель, произведя перемотку обмотки или же точно восстановив место повреждения.

Выводы по первому разделу.

Исходя из имеющихся данных становится понятно, что дефекты могут быть как механической, так и электрической природы, постольку поскольку асинхронный электродвигатель электрическое устройство, выполняющее механическую работу.

Из общепризнанной практики чаще электродвигатели получают повреждения при погрузке и выгрузке. Как правило это сколы на корпусе, вмятины и царапины. В редкий случай внутренние повреждения, тесть скрытые дефекты. Так же оборудование можно повредить при неправильном

методе хранения или несоблюдения требований производителя к хранению и транспортировке.

В отличие от явных дефектов, скрытые куда более опасны в виду своей непредсказуемости, и накопительному эффекту. Это в свою очередь приводит к авариям, сбоям производственных циклов и нарушениям технологического режима, а в особо запущенных случаях к человеческим жертвам.

Опасность, которую несёт выход данное явление, не только финансовое.

Хотя в современной промышленности зачастую, экономическую составляющую ставят выше всех остальных, ими всё же не стоит пренебрегать.

Из отчёта ФНПР за период с 2022 по 2023 года растёт число несчастных случаев. По результатам проверок в особенности выросло число случаев с тяжёлым исходом. По предварительным данным значение выросло на 7%.

Не исключено, что причиной этих инцидентов стали непредвиденные поломки оборудования.

Получив исчерпывающую информацию о наиболее распространённых дефектах в асинхронных электродвигателях, необходимо сопоставить её с существующими методами диагностики асинхронных электродвигателей.

Для этого требуется провести сравнительный анализ существующих методов диагностики, с выявлением из достоинств и недостатков. Так же произвести сбор информации о применении существующих методов на практике.

2 Основные методы диагностики асинхронных электрических машин

На данный момент существует значительное количество различных методов предварительной диагностики асинхронных электрических машин, некоторые из которых нашли применение на практике. В научных кругах регулярно поднимаются вопросы о том, какой из методов наиболее качественный и эффективный. Рассмотрим существующие методы с точки зрения эффективности. Выявим их достоинства и недостатки.

2.1 Вибрационный способ

Рассматриваемый метод предварительной диагностики, в своём принципе действия использует функциональные особенности некоторых компонентов электродвигателей (асинхронных), а именно вибрационные процессы, которые возникают как неотъемлемое явления работы устройства и действует по принципу анализа вибрации или же отдельных составляющих вибрации.

Метод сыскал широкую популярность за счёт своей простоты и доступности, а также весьма высокой диагностической способностью при выявлении механических неисправностей в электродвигателе (асинхронном).

При этом важным фактором функционирования оговоренного метода является анализ характеристик вибрационного процесса в различных узлах изучаемых асинхронных машин.

Сам по себе указанный метод породил множество вариантов его применения. От диагностики отдельного компонента, до все системы в целом.

В зависимости от избранного способа диагностики есть разные методы определения вибрационных характеристик.

Так, например в системе диагностики “Балкон” используют метод замера двух плоскостей.

Кода датчики устанавливаются в двух точках электродвигателя, так чтобы они измеряли параметры в перпендикулярных друг другу плоскостях.

В последующих разделах данный метод будет рассмотрен более подробно.

«Основан на проведении анализа вибраций отдельных функциональных компонентов асинхронного агрегата. Рассматриваемый метод вибродиагностики пользуется большой популярностью, постольку поскольку обладает высокой точностью выявления механических дефектов у асинхронных электродвигателей.»[14, с. 82]

«Основополагающий фактором действия является определение вибрационных характеристик в различных узлах исследуемого оборудования, то есть анализ вибраций, создаваемых электродвигателем. Анализ выполняется во всех геометрических проекциях. Иными словами, производится анализ вибрационных характеристик в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях.»[19, с.271]

Широкую известность в научном сообществе заслужили основанные на изучении амплитуды отдельных составляющих виброхарактеристик. Это так называемые методы анализа спектра гармоник виброхарактеристик. Он анализирует отдельные гармонические составляющие сигналов вибрации и тем самым позволяет построить картину вибрационного процесса в устройстве.

Для указанного выше метода диагностики используются следующие параметры вибрационного процесса.

Виброперемещение – промежуток промеж предельно удалёнными точками сдвига колеблющегося компонента исследуемого объекта, вдоль оси измерения. Виброперемещение определяется в линейных единицах:

- мкм – микроны;
- мм – миллиметрах.
- Где $1000 \text{ мкм} = 1 \text{ мм}$.

Как правило достаточно микронов, миллиметры появляются на крайней стадии превышения вибрации, когда оборудование издаёт громкие шумы "грохот".

На практике обычно в дополнении к указанным выше значениям применяются данные о частоте вращения, это позволяет высчитать допустимы диапазоны параметра виброперемещения.

К примеру:

- при 1500 оборотах в минуту виброперемещение не должно превышать 20 мкм;
- при 3000 оборотах в минуту граница составит 10 мкм.

Измерение виброперемещения выполняется во время образования вибрации на низкой частоте, крайний верхний рубеж частотного спектра не больше 200 Герц. Подобные измерения важны в области строительной виброакустике, в процессе выполнения мероприятий роторной балансировке, вовремя обследования электродвигателей, имеющих маленькие зазоры промеж функциональными узлами и компонентами, при исследовании упругих деформаций и прогнозе усталостных разрушений.

Виброускорение - производная виброскорости по времени. Данный показатель описывает силу инерции, которая оказывает действие на исследуемый предмет под воздействием вибропроцессов:

$$F = m \cdot a, \quad (1)$$

где F – сила инерции;

m – масса объекта;

a – виброускорение.

Виброускорение – это смена скорости изменения положения исследуемой части оборудования или же если говорить упрощённо, то это скорость изменения скорости. Виброускорение описывает взаимодействие компонентов аппарата, динамически силовое. Виброускорение измеряется в

метрах на секунду в квадрате, м/с^2 , в некоторых случаях могут применяться единица ускорения свободного падения – g , $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Замер виброускорения выполняется при условии наличия вибрации в большой полосе частот, от 50 Герц до 10 000 Герц и выше. Данный вид замеров выполняется в процессе виброакустической диагностики с целью определения силы ударов и своевременного выявления дефектов в подшипниках качения и зубчатых передачах.

Примечание: так же присутствует нечасто применяемый параметр вибрации – резкость – третья производная перемещения по времени, размерность – км/с^3 .

Если говорить о виброскорости, то обычно в источниках её описывают как производную величину, виброперемещения по отношению ко времени.

Постольку поскольку рассматриваемая величина, представляет собой описание мощности, которая воздействует на деталь и приводит к её разрушению. При этом представляет с какой энергией оно воздействует на контролируемые элементы.

Энергия колебания:

$$E = m \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (2)$$

где m – масса объекта,

V – виброскорость.

Единицей измерения виброскорости является мм/с , что соответствует рассмотренным выше параметрам. Виброскорость в отличие от виброускорения и виброперемещения, учитывает как частоту, с которой совершаются вибрации, так и перемещение изучаемой точки оборудования.

По аналогии с виброускорением и виброперемещением, виброскорость позволяет выявить в каком состоянии находится электродвигатель, либо же

како либо из его отдельных узлов. Диапазон измерений колеблется в границах от 10 до 1000 Гц.

В качестве диагностических параметров могут выступать следующие [4, с. 403]:

«ПИК - максимальное значение сигнала на рассматриваемом интервале времени»;

- «СКЗ - среднее квадратическое значение (действующее значение) сигнала для рассматриваемой полосы частот»;
- «ПИК-фактор - отношение параметра ПИК к СКЗ»;
- «ПИК-ПИК - (Размах) разница между максимальным и минимальным значением сигнала на рассматриваемом интервале времени»;
- «SPM - метод ударных импульсов, основанный на использовании специального датчика с резонансной частотой 32 кГц и алгоритма обработки ударных волн малой энергии, генерируемых подшипниками качения вследствие соударений и изменений давления в зоне качения этих подшипников»;
- «SPM-M: пик-фактор на резонансной частоте акселерометра»;
- «RPF: пик-фактор высших частот вибрации механизмов»;
- «VCC - контроль степени кондиции смазки»;
- «ARP: распределение амплитуд импульсов сухого трения в узлах машин.» [20, с. 63]

На данный момент в практике, некоторые организации уже применяют методы диагностики, использующие анализ рассмотренных ранее параметров, виброхарактеристик.

Используемая в своей основе виброанализ система EVAM, нашла широкое распространение в некоторых областях.

В данном случае EVAM это аббревиатура выражения из данных исследования Мухортикова С.Г. [21] «"Evaluated Vibration Analysis Method". Оно переводится как "Метод анализа вибрации с оценкой состояния".» Для

удобства далее будет употребляться русскоязычная версия данной аббревиатуры МАВОС.

Метод анализа вибрации с оценкой состояния.

Постольку поскольку рассматриваемый "МАВОС" соединяет в себе наиболее эффективные по результатам практических испытаний методик анализа виброхарактеристик, а также программное их программное сопровождение и средства практического анализа состояния оборудования по результатам выполненного анализа.

Данный метод внедряется компанией ViskoTeepak и Viking Malt, которые разрабатывают все требуемые элементы диагностики, а так же разрабатывают для них программное обеспечение.

Так же на практике применяется метод Shock Pulse Method (SPM), в переводе обозначает метод ударных импульсов (МУИ). Он внедряется швейцарской компанией Instrument AB. [22]

Из числа самых распространённых средств измерений характеристик вибрации, наверное, самыми распространёнными являются пьезоэлектрические. Другое их название вибропреобразователи ускорения.

Или же используют акселерометры.

Постольку поскольку диагностика по вибрационным характеристикам представляет высокую статистическую вероятность выявления повреждений, возникает логичный вопрос: - "Почему данный метод диагностики не применяется повсеместно?"

В данном случае причиной являются недостатки, которыми обладает данный метод.

Согласно данным, указанным в опытах Изюмова И.А.

«Методы, основанные на анализе вибраций, диагностируют только механические повреждения отдельных деталей электропривода в целом»;

«Необходим прямой доступ для установки вибродатчиков, что не всегда возможно»;[22]

В случае групповой установки оборудования, работающего в режиме постоянной (монотонной) нагрузки возможно наложение сигналов соседних установок. Однако это характерно либо для большого скопления оборудования, либо для установок большой мощности.

2.2 Методика акустической диагностики

Как понятно из названия, данный метод функционирует на принципе изучения звуковых колебаний, создаваемых рабочей установкой.

Это связано с тем, что существует прямая связь в протекающих физических и механических процессах.

Как уже упоминалось ранее при неисправности подшипника асинхронный электродвигатель начинает сильно вибрировать, а также гудеть.

Схожие признаки характерны для поломок статора или ротора. Так же искривления вала, так же создают своё отклонение в общем создаваемом шуме.

Ввиду этого данный метод очень схож с методом вибродиагностики.

На данный момент не выпускаются готовые приборы для этого метода диагностики, как правило они изготавливаются индивидуально под определённого заказчика.

В данном методе диагностик изучают частоты звуковых колебаний. В идеальных условиях на выходе должен получаться однотонный сигнал, а дефекты будут вызывать некоторые кратковременные импульсы (шумы).

Метод звуковой диагностики вполне приемлем для изучения отдельно стоящих установок. Однако совершенно не подходит для мест большого скопления приборов, так как соседние установки накладывают фоновый шум.

Тем не менее он всё же имеет место быть применён в виду своей простоты и не плохой точности определения механических повреждений.

2.3 Метод диагностики технического состояния асинхронного электродвигателя по параметрам электромагнитного поля, создаваемого при работе устройством

«Постольку поскольку принцип работы объекта исследования основан на взаимодействии электромагнитных полей, вполне логично было бы применить метод, основная суть которого состоит в изучении и анализе электромагнитных полей, генерируемых при работе устройства, а также их отдельных спектров.»[23, с. 316]

«Данный метод предлагает анализировать вторичные, они же внешние, электромагнитные поля. А также магнитные потоки в воздушном зазоре, между ротором электродвигателя и его статором.»[24, с. 111]

«Разумеется, при возникновении неисправности в устройстве возникают искажения в электромагнитных полях, что следственным образом влечет за собой возникновения отклоняющихся компонентов в электромагнитном спектре магнитного потока.»[25, с.388]

В отличие от рассматриваемо ранее метода диагностики по характеристикам вибрации, данный метод имеет более широкий спектр диагностируемых неисправностей, в него входят:

- повреждение подшипника;
- асимметрия ротора;
- загиб вала (повреждения вала);
- короткие замыкания между витков обмоток.

Несмотря на явные преимущества, которыми обладает данный вид диагностик, такие как возможность определять как электрические, так и механические повреждения, он всё же не лишён некоторых недостатков.

«Пожалуй, одним из главных недостатков можно счесть высокую чувствительность устройства к внешним электромагнитным полям, что делает весьма проблемным её применение в местах крупной групповой прокладки оборудования.»[22]

Так же невозможность установки в уже существующие устройства, в которых не предусмотрена возможность установки электромагнитных датчиков.

Кроме того, непригодность для применения в нормальных режимах работы.

Так же сложность в том, что чаще всего он применяется для высоковольтных машин. Что в свою очередь приводит к малой базе знаний по применению в низковольтных машинах, в виду малого количества исследований.

Для применения данного метода требуется специальное испытание.

2.4 Метод диагностики по температуре компонентов и узлов асинхронного электродвигателя

Как можно судить из названия, сущность данного метода заключается в проверке температуры на соответствие установленному значению. Датчики температуры устанавливаются на заводе изготовители в специально определённых для этого местах.

Этот метод с высокой долей достоверности определяет в каком состоянии находится изоляция. Так же позволяет выяснить не износились ли подшипники, так как в случае неисправности они будут сильно нагреваться, за счёт трения. При этом температура может подниматься до состояния плавления металла.

Измерения выполняются при помощи термопары или реле.

Но куда более продвинутой является методика дистанционного измерения, в которой применяются пирометры.

У температурного контроля, есть существенные преимущества, описанные далее.

Самое основное достоинство данного метода измерения, пожалуй, заключается в высокой точности прогнозов. Постольку поскольку прогноз

весьма точен, а стоимость датчиков не велика, данный метод контроля весьма популярен. Как уже было упомянуто, в случаях, когда к двигателю нельзя приблизиться, вполне можно применить дистанционный способ измерения.

Для проведения диагностики не требуется останавливать рабочий процесс, диагностику можно проводить во включенном состоянии. Измерения выполняются максимально просто, без дополнительных расчётов. Высокая надёжность.

Однако, как и любого другого метода измерения, он не лишён своих недостатков. Для высокой точности измерения требуется установка датчика внутри машины, что доступно не всегда, постольку поскольку, есть конструктивные требования, и если производитель не учел возможность установки датчиков, то с высокой долей вероятности их не получится установить.

Для асинхронных двигателей в закрытом исполнении, нет возможности применить бесконтактный метод измерения, а если учесть предыдущий пункт, то диагностика и вовсе может оказаться невозможной.

В виду особенностей физических процессов, данным методом можно определить только состояние изоляции, либо подшипников.

2.5 Метод, основанный на анализе химического состава смазочных материалов

Данный метод, пожалуй, один из самых редко применяемых, так как он очень специфичный, и обладает очень узким диапазоном определяемых неисправностей.

Постольку поскольку метод работает на основании изучения примесей в масле, он применяется для диагностики состояния подшипников и механических узлов.

Ввиду всего этого, данная узко направленность является его главным недостатком. В отличие от прочих методов, которые могут выявлять недостатки как в подшипниках, так и в других элементах установки.

Кроме того, определение наличия дефекта происходит с некоторой задержкой, в виду особенностей протекающих процессов.

Сама по себе процедура выполнения анализ очень затруднительна, а учитывая то, что исследуемая смазка сильно подвержена воздействию внешней среды, качество анализа вызывает некоторые вопросы касательно своей целесообразности.

На данный момент не удалось определить применения данного метода на реальном производстве, кроме предприятия на котором он вводился в экспериментальных целях.

2.6 Методика определения состояния электродвигателя по коэффициенту абсорбции

Куда более эффективным и распространённым методом в сравнении с элементным является анализ коэффициента абсорбции.

На сегодняшний день данный метод диагностики является весьма надёжным, а методика его применения достаточно отработанной.

Данный метод востребован, постольку поскольку изоляция у обмоток двигателей, в силу технологического процесса, подвергается регулярному воздействию, высоких температур, в некоторых случаях тяжелой загрузки в том числе и механическим повреждениям. Кроме того, изоляция со временем стареет и теряет свои свойства.

Как результат при длительной эксплуатации в оборудовании накапливаются скрытые дефекты, качество изоляции снижается, а в последствии происходит пробой изоляции с последующими замыканиями на корпус или между фазами.

Для проведения диагностики требуется полное отключения двигателя. Исключением в данном случае являются высоковольтные двигатели. Здесь речь идёт о способе частичных разрядов.

В качестве диагностических характеристик принимают показания сопротивлений обмоток, между разными фазами и на корпус.

Так же проверяется значение коэффициента абсорбции (I15/I60сек).

Обычно этого достаточно, но также для достоверности могут проверить значение индекса поляризации.

Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты при измерении на низком напряжении и зависимость диэлектрических потерь от приложенного напряжения при подъёме последнего до 1,1 U.

Несмотря достоинства в виде высокой точности и отработанной методики у данного метода есть важный недостаток.

Недостатком данного метода является то, что мероприятия выполняются при отключении машины. А также, данный метод позволяет оценить лишь одну из множества характеристик двигателя.

2.7 Методы, основанные на анализе электрических параметров машины

Несмотря на большое число методов диагностики, наверное, самыми предпочтительными будут те, которые позволяют проверить состояние исследуемого аппарата на расстоянии. Это вызвано тем, что не редки случаи использования устройств с изолированным корпусом, или же если устройство погружено в среду, например, как погружные насосы на насосных станциях.

В таком случае такие методы как рассматриваемый сейчас наиболее предпочтительны.

«Наиболее предпочтительными методами являются методы, основанные на анализе электрических параметров работающего оборудования, а именно токов, напряжений и потребляемых мощностей.

Использование данных методов возможно без непосредственного доступа к диагностируемой машине.» [27. с. 31] в качестве диагностических параметров используются:

«гармонические составляющие спектра тока статора, гармонические составляющие спектра потребляемой мощности, спектральные составляющие амплитуды и фазы вектора Парка» [28, с. 29].

Пусть данный метод анализа состояния асинхронных машин и эффективен, увы он тоже имеет свои слабые стороны.

Как и всякий другой метод, который позволяет проводить диагностику на расстоянии для его применения следует учесть влияние сторонних параметров.

Например, помехи от соседних машин, подключенных к тому же фидеру или распределительному пункту.

Либо же, если есть ЧПУ помехи от данной установки. Это вызвано тем, что ЧПУ создаёт сигнал определённой частоты, который может неверно истолковываться системой диагностики.

В совокупности все эти недостатки сдерживают доминирование данного вида диагностики. [15]

Выводы по разделу 2.

Из анализа существующих методик следует, что большинство методик диагностики неисправностей электрооборудования обладают небольшим диапазоном диагностируемых неисправностей.

Несмотря на все достоинства методов диагностирования неисправностей электродвигателя, в каждом из них существуют недостатки, в связи с этим кажется весьма перспективным использование вместо отдельно направленной методики прогнозирования неисправностей, комплексной системы диагностики.

Из раздела 1 нам известно, что наиболее часто встречающимся дефектом на практике являются повреждения подшипников, а также

электрические повреждения статора. Менее распространённым являются механические повреждения ротора.

В связи с этим для реализации надёжной и максимально эффективной системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей, потребуется объединение методов, которые эффективно выявляют перечисленные дефекты.

Так же нужно учитывать, что важна не только эффективность, но и экономическая целесообразность комбинирования методов диагностики.

Таким образом в комплексной системе прогнозирования будут применяться следующие методы диагностики:

- метод вибро-диагностики;
- метод термического (анализа отдельных узлов);
- метод анализа электрических характеристик (анализ электрических характеристик обмотки статора).

Для реализации системы прогнозирования далее сформулируем концепцию, а также составим упрощённую структурную схему отдельных элементов системы.

Для получения достоверных данных о работоспособности выбранных методов прогнозирования, выполним эксперимент на физическом аппарате.

3 Разработка концепции системы прогнозирования

Для качественного построения системы прогнозирования неисправностей потребуется проработать концепцию. В предыдущих разделах были рассмотрены основные неисправности асинхронных электродвигателей, которые встречаются в практике эксплуатации.

Были рассмотрены существующие методы диагностики асинхронных электродвигателей и выявлены их недостатки. Для устранения, которых было принято решение объединить несколько существующих методов диагностики с целью получения полной комплексной системы диагностики неисправностей.

Нужно понимать, что разрабатываемая система диагностики должна соответствовать следующим критериям:

- возможность установки в уже существующее оборудование;
- обеспечивать диагностику наиболее распространённых дефектов;
- должна обладать высокой надёжностью.

Так же рекомендуемым, но необязательным требованием к системе прогнозирования будет удобство интегрирования в существующие системы диспетчеризации и низкая себестоимость.

Разработка концепции системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей выполняется в несколько этапов:

- построение упрощённой структурной схемы установки;
- описание алгоритма работы системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей;
- подробное описание требуемых теоретических данных (формул, уравнений, графиков).

Нужно понимать, что концепция системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей, лишь первый этап, и не несёт в себе цели подробно описать методы и способы сборки системы. Её

цель построить чётко выстроенную картину, описывающую то, как данная система должна функционировать.

3.1 Упрощённая структурная схема

Первым этапом отобразим упрощённую структурную схему установки, для реализации данной задачи воспользуемся программным обеспечением в виде Компас 19. Полученная схема изображена на рисунке 4.

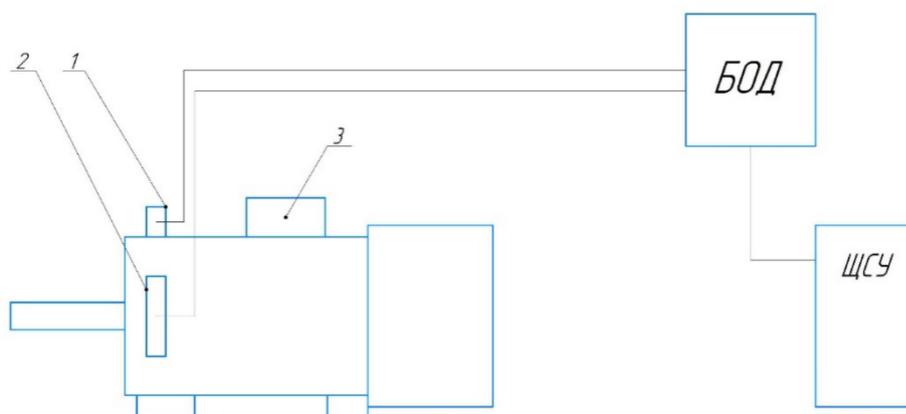


Рисунок 4 – Упрощённая структурная схема системы прогнозирования неисправностей

На рисунке 4 указаны следующие компоненты:

- позиция 1 – датчик вибрации;
- позиция 2 – датчик температуры;
- позиция 3 – миниатюрный трансформатор тока;
- БОД – Блок обработки данных;
- ЩСУ – Щит силовой управления.

Из приведённой структурной схемы можно увидеть, что исследуемому асинхронному двигателю устанавливаются датчик вибрации (планируется использовать ДВСТ-4).

Датчики виброскорости с токовым выходом ДВСТ -4 предназначены для преобразования среднеквадратичного значения виброскорости объекта в стандартный сигнал тока 4-20 мА.

Данное исполнение датчика позволяет производить замеры параметров вибрации в двух плоскостях.

Задача которого отслеживать виброхарактеристики, и передавать сигнал по цепям связи в блок обработки данных.

В дополнении к датчику вибрации, на корпусе двигателя устанавливаются 3 датчика температуры накладных, задача которых преобразовывать изменения температуры в сигнал, который по сетям связи будет передаваться в блок обработки данных.

На данном этапе работ планируется использовать уже применяемые на рынке программируемые управляемые контролеры типа SMH или их аналоги от компании ОВЕН.

В данном случае применяется программируемый логический контроллер Segnetics SMH2010.

Программируемый логический контроллер Segnetics SMH2010 - это контроллер начального уровня, простой и надежный. большое количество входов и выходов по привлекательной цене. Благодаря наличию двух независимых интерфейсов RS-485, он может одновременно работать в режиме Master и Slave, являясь узлом в сети. Производительность панели управления позволяет размещать ее вне электрических шкафов и использовать в качестве пульта управления. SMH2010 программируется с использованием пакета smlogix, который создает пользовательские управляющие приложения на языке функциональных блоков FPD:

На кабель, отходящий на каждую из обмоток статора в БРНО (блок распределения начала обмоток), устанавливается мини трансформатор тока.

Важно отметить, что это рекомендуемое место установки трансформатора тока, так как наиболее приближено к статору. В виду того, что наиболее часто запитка двигателя осуществляется 3-х фазным кабелем,

установка внутри корпуса существующими конструктивными решениями не представляется возможным. В связи с чем возникает необходимость решить данную задачу. Более подробно она будет рассмотрена далее.

3.2 Алгоритм работы системы прогнозирования неисправностей

Как уже упоминалось выше система диагностики состоит из датчиков и блока обработки данных. На данном этапе проработки концепции будет использоваться программируемый контроллер SEGNETICS SMH2010-1221-01-5. Функциональные возможности которого позволят выполнять математические вычисления и выполнение логических задач.

На рисунке 5 изображено предварительное логическое древо алгоритма системы прогнозирования. Оно содержит в себе несколько условий:

Анализ параметров трёх критериев. Соответствие Δt - разности температур в разных зонах корпуса электродвигателя, K_v - коэффициент отклонения параметров вибрации от ГОСТ ИСО 10816-1-97 и K_c - коэффициент соответствия вольт-амперных характеристик на наличие 22 и 23 гармоник, а так же превышение расхода электроэнергии.

Выдача уведомления в систему сигнализации при превышении показаний в допустимом диапазоне.

Отключение системы в случае превышения показаний одного из установленных критериев выше допустимого диапазона.

Отключение системы в случае превышения показаний трёх из установленных критериев в допустимом диапазоне.

Алгоритм функционирования системы прогнозирования представлен на рисунке 5.

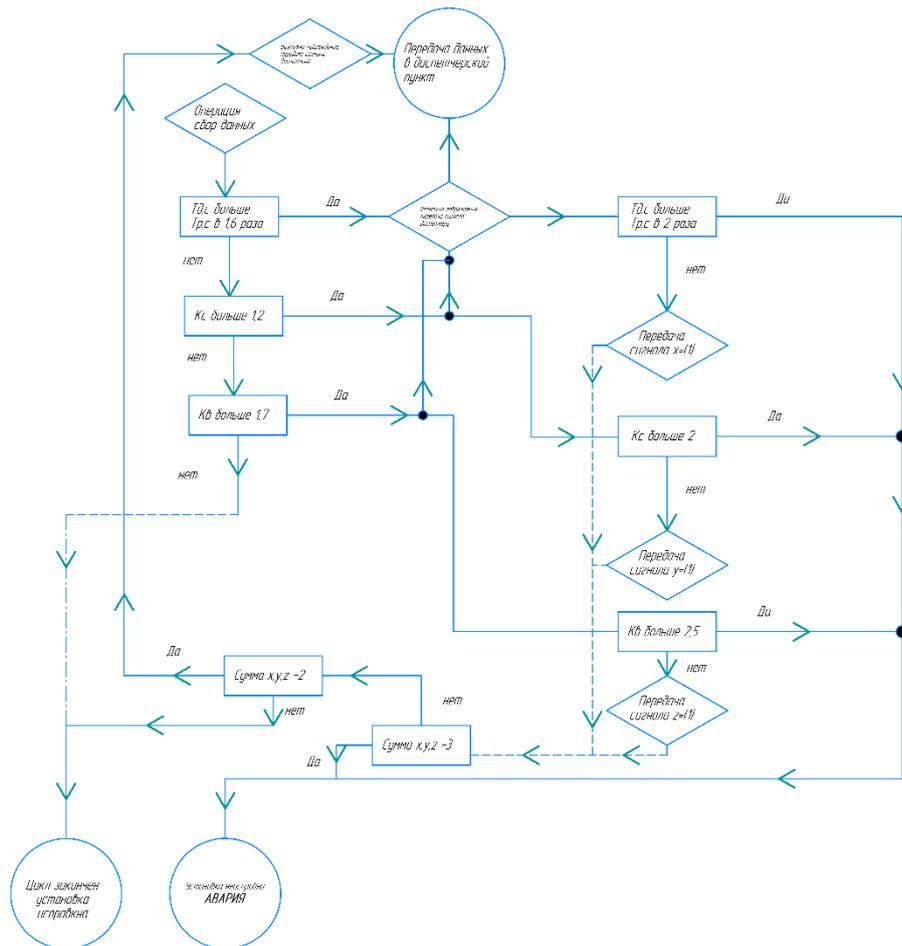


Рисунок 5 – Алгоритм функционирования системы прогнозирования неисправности асинхронных электродвигателей

Как видно из приведённого изображения на рисунке 5, в алгоритме присутствуют следующие обозначения:

- Тд.с – среднее отношение температуры сегмента двигателя;
- Трс.с – расчётный коэффициент ненормального отклонения;
- Кс – коэффициент соответствия ВАХ;
- Кв – коэффициент соответствия отклонения виброхарактеристик.

Далее опишем принцип работы температурного анализа.

3.3 Моделирование системы прогнозирования неисправностей асинхронного электродвигателя

3.3.1 Математическая модель представления экспериментальных данных

Так как разрабатываемая система функционирует с использованием 3х методов анализа состояния, то необходимо рассмотреть существующие математические модели данных систем, на основании открытых источников.

Сформулированная задача системы диагностирования заключается в следующем:

«Для решения задач диагностики технологического состояния оборудования с практической точки зрения наиболее применимы экспериментальные методы, которые позволяют создавать модели объектов по результатам измерения их входных и выходных величин. Процесс построения моделей этих объектов называют идентификацией (Генкин, 1987).» [29]

«В общем случае под идентификацией понимают определение структуры и параметров математической модели, которые обеспечивают наилучшую близость выходных величин модели и объекта в смысле заданного критерия при совпадающих входных воздействиях.»

«Для построения математической модели возможно использование способа, предложенного Барковым (2000 г) и Янковской (2011), он выражается в следующем.»

«Предположим, что состояние объекта диагностирования можно оценить набором диагностических параметров, представленным в виде некоторого вектора.»

$$D = \{d_1, d_2 \dots, d_n\} \quad (3)$$

где d_i – фактор, характеризующий состояние i -го объекта, $i = 1, 2 \dots n$.

«Будем считать, что параметры d_i являются диагностическими признаками только в том случае, если они могут быть непосредственно измерены или вычислены на основе измеренных параметров диагностируемого объекта. А также, если они являются функцией структурных параметров объекта p_j , ($j = 1, 2 \dots m$), состояние которых необходимо контролировать и изменение их может привести к появлению отказа в диагностируемом объекте:»

$$d_i = f_i(p_1, p_2 \dots p_m) \quad (4)$$

«В этом случае определение текущих значений диагностических факторов d_i и сравнение их с эталонными значениями параметров $d_i^{эТ}$, величины которых определены априори и соответствуют нормальному (бездефектному) состоянию технической системы, позволяют в принципе осуществить оценку состояния всей системы.»

«При определении эталонных значений диагностических показателей $d_i^{эТ}$, необходимо устанавливать пределы допустимых отклонений $\Delta d_{i \max}$ для бездефектного состояния объекта, т. е. пороговых значений $d_{i \max}^{эТ}$ ($d_{i \min}^{эТ}$), набор которых соответствует границе работоспособности объекта.»

«В целях получения наиболее достоверной информации будем считать, что статистически значимые отклонения от нормы компонентов диагностического вектора состояния $\Delta D_i \approx D$. Учитывая, что изменение со временем наработки технической системы какого-либо ее структурного параметра (появление дефекта) может привести к изменению одного или нескольких (и даже всех) диагностических признаков-компонентов вектора D , в общем случае каждому j -му структурному параметру можно поставить в соответствие n -мерный вектор диагностических признаков»

$$D_j = (S_{1j}, S_{2j}, \dots, S_{nj}), J = 1, \dots, m \quad (5)$$

«что и является основой для решения задачи распознавания вида неисправности в процессе диагностики оборудования.» [29, с. 86]

3.3.2 Определение критерия оптимальности эксперимента и составление плана эксперимента

Эксперимент будет считаться успешным, в том случае, если система прогнозирования будет верно идентифицировать состояние моделируемой установки в более чем 90% случаев.

Система должна диагностировать состояния машины как формирующаяся неисправность в диапазоне 30%-70%.

Для проведения эксперимента потребуется составить его план, который заключается в следующих пунктах:

- построение структурной схемы системы диагностики;
- построение на основании структурной схемы модели системы в программе моделирования.

Провести эксперимент следующим образом:

- ввести параметры модели соответствующих состоянию реальной установки “исправно”;
- запустить программную модель;
- записать результат;
- ввести параметры модели соответствующих состоянию реальной установки “неисправно”;
- запустить программную модель;
- записать результат;
- ввести параметры модели соответствующих состоянию реальной установки “исправно” с шагом отклонения 10% для каждого последующего введения параметров;
- оформить полученный результат.
- повторить эксперимент с изменением некоторых параметров экспериментальной модели не менее 10 раз.
-

3.3.3 Построение модели в программе MATLAB/Simulink

Перед переходом к составлению системы прогнозирования как конечной установки выполнена попытка построения модели в системе программ MATLAB/Simulink. На рисунке 6 изображено графическое представление.

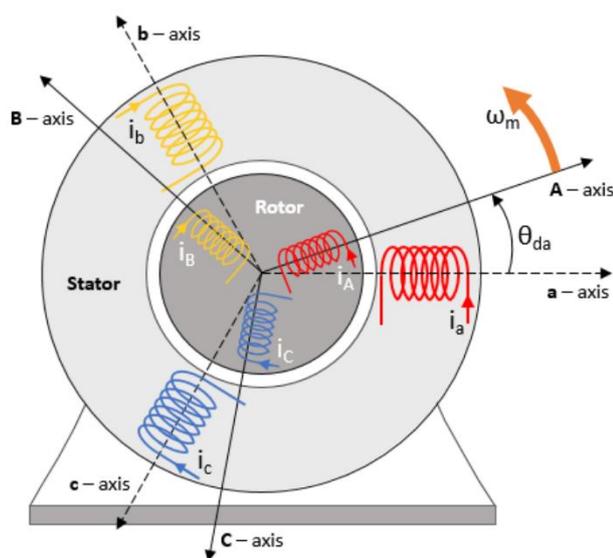


Рисунок 6 – Электрическая система трехфазной синусоидальной модели

Для расчётов использовались следующие блоки:

$$\omega_{em} = P \times \omega_m \quad (6)$$

где ω_m – угловая скорость ротора (рад/сек);

P – количество пар полюсов;

ω_{em} – электрическая скорость.

Так данная версия программы не позволяет смоделировать создаваемые при работе установки вибрации, опыт было решено прекратить.

В целях проверки работоспособности методов диагностики, были проведены эксперименты с каждым методом по отдельности.

—

3.4. Прогнозирование неисправностей асинхронного электродвигателя по анализу температуры секторов корпуса

Как всем вполне очевидно электродвигатель является электротехнической установкой, и функционирует по всем известным законам физики. Не исключением является закон Джоуля-Ленца, формула 7. [30, с. 14]:

$$Q = I \times U \times t = I^2 \times R \times t = \frac{U^2}{R} \times t \quad (7)$$

где I – ток в проводнике (в нашем случае обмотке);

U – падение напряжения в проводнике;

R – сопротивление проводника;

t – время процесса.

Так как характеристики меняются со временем, то более актуальной будет следующее вид данной формулы:

$$Q = \int_0^t R \times I^2 \times dt \quad (8)$$

Исходя из знания принципа работы асинхронного двигателя известно, что обмотки электродвигателя отстоят друг от друга с углом 120° . Поскольку, для нормального функционирования асинхронного электродвигателя все обмотки по своим характеристикам должны быть максимально приближены друг к другу, для избегания несимметрии генерируемого статором электромагнитного поля, а также равномерно распределены в пространстве.

Ввиду того, что в идеальном случае сопротивление R каждой из обмоток будет равно трём другим (по ПУЭ изд.7 п. 1,8 в холодном состоянии отклонение в сопротивлениях обмоток статора не должно превышать 2%),

точно так же, как и прочие характеристики питающей сети в виде частоты f , напряжения U и тока I .

Постольку поскольку все характеристики должны быть идентичны, исходя из этого можно предположить, что в идеальном случае тепловыделение на каждую обмотку будет идентично.

Нужно понимать, что в реальном асинхронном электродвигателе устройство обмотки статора существенно отличается от того, как его отображают в теории. Он представляет собой сложную структуру. На рисунке 7 представлено графическое отображение обмотки статора асинхронного электродвигателя. [31, с.283]

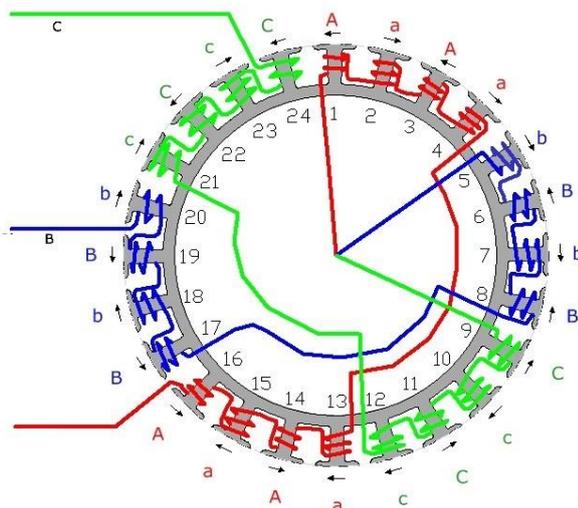


Рисунок 7 – Графическое отображение обмотки статора асинхронного электродвигателя

Система контроля по температуре функционально позволит отслеживать повреждения в обмотке статора, а также несимметрию фаз. Так как повреждение обмотки статора будет приводить либо к увеличению сопротивления R или же к его уменьшению, это отразится на тепловыделении.

Для реализации данного метода на корпус статора асинхронного электродвигателя потребуется установить датчик температуры, таким образом, чтобы он мог фиксировать температуру, выделяемую обмотками в

трёх зонах. На рисунке 7 данные зоны будут соответствовать виткам 1-8 для первой зоны, 9-16 для второй зоны и 17-24 для третьей зоны. Описанное выше распределение в геометрическом пространстве будет располагаться аналогично для любого трёхфазного двигателя. Важным аспектом будет являться одинаковая площадь покрытия поверхности корпуса электродвигателя каждым датчиком. Постольку поскольку, в противном случае несоответствия могут возникнуть чрезмерные отклонения в показаниях.

В случае если описанное выше суждение истинно, можно логически заключить, что при замере показаний будет верно выражение (9).

$$\begin{cases} Q_1 - Q_2 = 0 \\ Q_2 - Q_3 = 0 \\ Q_1 - Q_3 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

где Q_1 - количество тепла выделяемого обмотками статора в зоне 1;

Q_2 - количество тепла выделяемого обмотками статора в зоне 2;

Q_3 - количество тепла выделяемого обмотками статора в зоне 3.

Так как при условии, что корпус электродвигателя цельное изделие из однородного материала изменение t будет пропорционально Q , можно получить выражение (10):

$$\begin{cases} t_1 - t_2 = 0 \\ t_2 - t_3 = 0, \rightarrow \Delta t = 0, \\ t_1 - t_3 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

где t_1 - температура первой зоны;

t_2 - температура второй зоны;

t_3 - температура третьей зоны;

Δt – разность температур разных зон.

Взаимосвязь температуры и количества выделяемого тепла можно отследить по выражению (11):

$$Q = C \times m \times (t_n - t_k) \quad (11)$$

где C - удельная теплоёмкость материала, из которого изготовлен корпус двигателя;

m – масса корпуса двигателя;

$(t_n - t_k)$ – разность температуры в начальный и конечный момент времени.

Из выражений (9) – (11) следует, что изменение температуры в трех зонах корпуса в нормальных условиях происходит одновременно, в виду чего при изменении показателя Δt , можно судить о неисправности установки. Однако, как уже было сказано выше, это актуально, для идеального случая.

В связи с чем необходимо выполнить расчёт значения Δt , которое бы гарантированно судило о наличии неисправности.

Для определения требуемого коэффициента было проведено исследование на лабораторном стенде, где за неисправное состояние были приняты характеристики ВАХ, как при коэффициентах несимметрии по нулевой последовательности (12), в пограничных состояниях.

$$K_{0U} = \frac{U_0 \sqrt{3}}{U_1} \times 100\%, \quad (12)$$

где U_0 – напряжение нулевой последовательности;

U_1 – напряжение прямой последовательности.\

Для выражения (12) значения определяются как:

- нормально допустимое значение $K_{0U} - 2\%$;
- предельно допустимое $K_{0U} - 4\%$.

Для тестирования была использована установка, состоящая из комплекта Arduino Nano и входящих в его комплект датчиков температуры. В качестве тестируемого оборудования использовался электродвигатель типа АИР количеством пар полюсов 2, номинальной мощностью 1,5 кВт, 3000 об/мин. Так же для эксперимента использовались три реостата, с помощью которых модерировались отклонения в характеристиках обмотки статора. Замеры вольтамперных характеристик выполнялись при помощи бытового мультиметра DT-830В.

Описание хода и результата эксперимента.

Из имеющихся в наличии компонентов была собрана опытная установка по схеме, изображённой на рисунке 8.

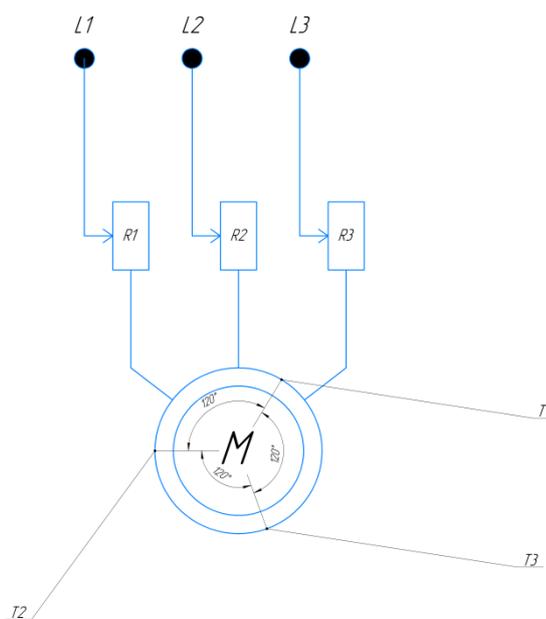


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки

Для рисунка 8 приняты следующие обозначения:

- R_1, R_2, R_3 – реостат фаз А, В, С соответственно;
- М – электродвигатель АИР (1,5 кВт, 3000 об/мин);
- T_1, T_2, T_3 – датчик температуры зон 1,2 и 3 соответственно.

Путём регулирования сопротивления обмотки статора, регулируя положение ролика на реостате, были поочерёдно выставлены характеристики соответствующие несимметрии сети.

С помощью комплекта Arduino Nano записывалось показания Δt разности температур в зонах статора с шагом ожидания 10 секунд, всего 6 измерений на каждое положение.

По результатам составили графики изображённые на рисунках 9-12.

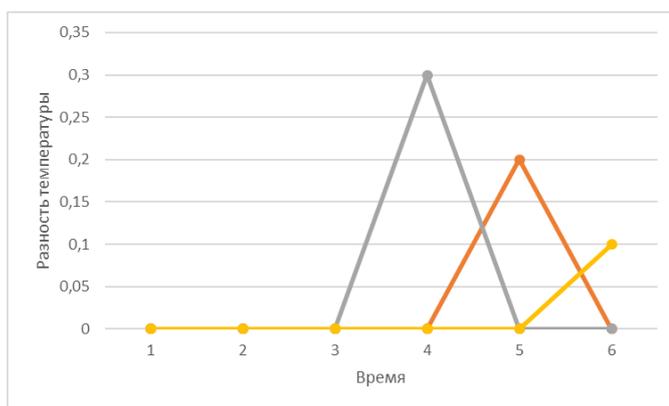


Рисунок 9 – Эксперимент замера разности температур в зонах в нормальном режиме без нагрузки

На данном графике видно максимальное отклонения от $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, в данном случае это допустимая погрешность компонентов прибора измерения Arduino которая по приведённым в инструкции характеристикам составляет $0,5$ градуса.

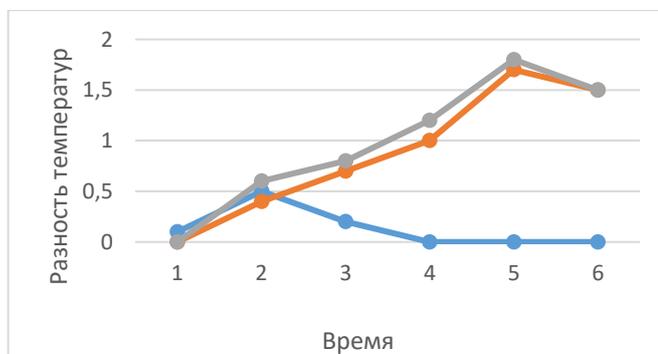


Рисунок 10 – При имитации не симметрии $K_{0U} = 1\%$

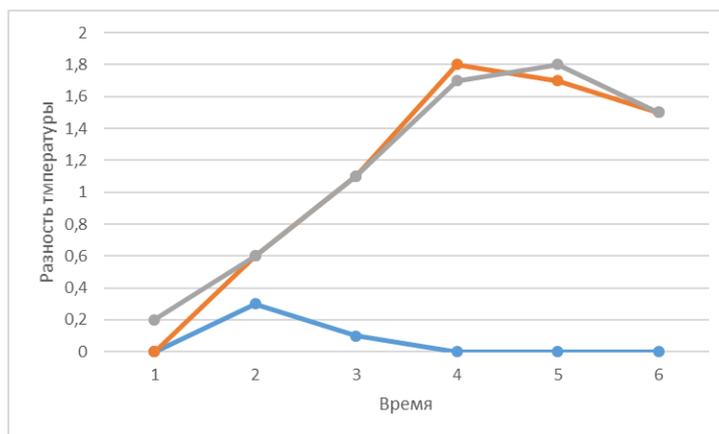


Рисунок 11 – При имитации не симметрии $K_{0U} = 2\%$

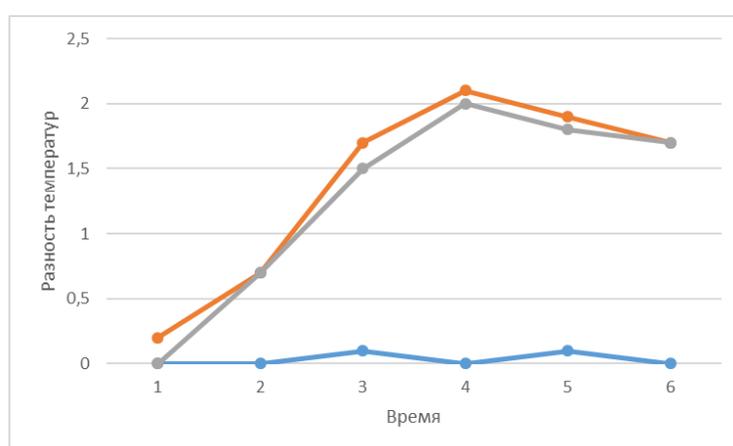


Рисунок 12 – При имитации не симметрии $K_{0U} = 3\%$

Опыт с имитацией не симметрии напряжения 4% не удалось провести в виду повышенной вибрации исследуемого электродвигателя и возможных рисков.

При реализации эксперимента возникла сложность с креплением датчиков температуры. Для проведения опытов на действующих установках потребуется проработать методы крепления датчиков, так как ожидаются более сильные вибрации.

Для проведения опыта с реальной установкой планируется использовать накладной датчик температуры Pt100.

Датчик температуры представляет собой металлический стержень диаметром 50 мм и специальную прокладку с небольшим изгибом для измерения поверхности трубопроводов и далее. Для повышения

теплопроводности и точности измерений между измеряемой поверхностью и специальной прокладкой датчика наносится термопаста или другой материал с высокой теплоотдачей. Этот материал может использоваться в качестве теплоизоляционного материала для защиты от перегрева. Материал: металлические зажимы используются для надежного закрепления датчика на измеряемой поверхности.

Из собранных данных видно, что чем выше сопротивление на обмотке, тем больше выделяемое количество тепла в зонах, связанных с ней, а как следствие больше Δt .

Так же можно сделать вывод, что чем больше Q , тем быстрее происходит нагрев.

Кроме того, для всех экспериментов характерно следующее, после достижения максимальной точки нагрева происходит медленное уменьшение Δt , что связано с тем, что корпус является монолитной установкой внутри которого находится обмотка статора. За счёт чего на длительном промежутке времени температура выравнивается.

По итогу фактического эксперимента на стенде можно заключить, что при отклонении сопротивления в одной из обмоток, на некоторый период времени возникает разность температур в разных зонах статора.

Исходя из экспериментальных данных для системы прогнозирования неисправностей, приняты следующие значения $\Delta t = 1,6$, соответствующее состоянию возникающей неисправности и $\Delta t = 2$, соответствующее состоянию оборудования неисправно. Данные характеристики будут занесены в алгоритм системы прогнозирования неисправностей (смотреть рисунок 5).

Описанный метод в корне отличается от применяемых на данный момент методов термодиагностики, постольку поскольку в отличие от них не требует наличия заранее вмонтированных в электродвигатель датчиков температуры, а может быть установлен как дополнительная функция с минимальными затратами.

Главным требованием станет соблюдение правильности монтажа датчиков температуры, а также правильность расчёта отклонения температуры.

Следующим компонентом системы прогнозирования неисправности, является диагностика по токовым характеристикам. Рассмотрим её более подробно.

3.4. Прогнозирование неисправностей по токовым характеристикам

Как видно из алгоритма работы комплексной системы прогнозирования неисправностей, изображённого на рисунке 5. Помимо сравнения разности температуры статора, так же выполняется сверка электрических характеристик.

Как было указано ранее в разделе два, метод анализа токовых характеристик с высокой точностью определяет повреждения электрической природы.

Но при этом он так же позволяет определить нарушения в вибрации асинхронного электродвигателя. Так как имеется взаимосвязь между вибрацией и изменениями в токовых характеристиках, через связь с электромагнитным полем и крутящим моментом.

В разрабатываемой комплексной системе прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей будет применяться метод на основании спектрального анализа тока статора.

Ввиду того, что значительное количество как электрических, так и механических повреждений узлов асинхронных электродвигателей вызывает электромагнитный отклик в электрической сети.

В число таких процессов входят такие явления как «смещение ротора, поломка подшипника или повреждение обмотки статора, приводит возникновению эксцентрика ротора. При этом из-за воздействия радиальных сил, как механических, так и электромагнитных, происходит отклонение оси

вращения ротора от своих первоначальных, предусмотренных конструкцией мест. При этом меняется зазор между обмотками статора и вращающимся ротором», что связано с возникающими периодическими радиальными усилиями.

При таком не нормальном состоянии двигателя значительно растёт шанс того, что ротор при вращении будет соприкасаться со статором. Разумеется, подобное негативным образом скажется на работоспособности электродвигателя, в месте соприкосновения будет перегреваться сердечник, так же произойдёт пробой изоляции.

Исходя из проведённых литературных изысканий известно, что эксцентриситет ротора приводит к изменению тока питания, он возрастает. Так же эксцентриситет негативно влияет на технические и экономические показатели асинхронного электродвигателя. Это подтверждается из исследования Н.Р. Сафина и В.А. Прахта, по их данным при высоком эксцентриситете в асинхронном электродвигателе, КПД использования электроэнергии существенно снижается, растут непродуктивные затраты на электроэнергию. Согласно исследованию, перерасход в среднем составляет 5-7%.

Так, например для двигателя АИР 71 А2 У2 IM1081, при условии работы 20 часов в сутки, за год потери составляют $\approx 30\,222$ кВт·ч, подробный расчёт приведён в выражении (13).

$$\sum W_1 = \Delta P_1 \times t_{20ч} \times n_d = 4140 \times 20 \times 365 = 30\,222 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (13)$$

где ΔP_1 – суммарные потери (определяются по выражению 3.12);

$t_{20ч}$ - время работы двигателя за сутки в ч.;

n_d - количество рабочих дней.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \Delta p_{\varepsilon 1} + \Delta p_m + \Delta p_{\varepsilon 2} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_d = P_1 - P_2, \\ \Delta P_1 &= 1230 - 750 = 480 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (14)$$

где $\Delta p_{\varepsilon 1}$ – электрические потери в обмотке статора;

Δp_m – магнитные потери;

$\Delta p_{э2}$ – электрические потери в обмотке ротора;

$\Delta p_{мех}$ – механические потери;

Δp_d – добавочные потери.

При таких условиях потери электроэнергии могут даже превысить стоимость самого электродвигателя. К тому же неравномерность воздушного зазора приводит к значительному росту потерь в стали почти до 30%, так же появляются провалы в кривой момента и замедляется разгон электродвигателя до номинальной частоты оборотов.

На рисунке 13 изображены типы эксцентрика, встречающиеся в асинхронных электродвигателях, обобщённые данные сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Типы эксцентриков электродвигателей и их описание

| Н.П.П | Название типа эксцентрика | Описание | Обозначение на рисунке |
|-------|---------------------------|---|------------------------|
| 1 | Смешанный | «Для данного типа характерно что ось вращения ротора не совпадает ни с осью симметрии, ни с осью статора O_s , а также не совпадает с собственной осью симметрии O_r .» | (а) |
| 2 | Динамический | «Для такого типа эксцентрика характерно, что ось вращения ротора совпадает с осью симметрии O_s статора, но не совпадает с собственной осью симметрии O_r .» | (б) |
| 3 | Статический | «У такого типа эксцентрика ось вращения ротора совпадает с его осью симметрии O_r , но не совпадает с осью симметрии статора O_s .» | (в) |

Выявить наличие эксцентрика можно несколькими способами:

- механический осмотр с использованием щупа;
- метод вибродиагностики при помощи датчика вибрации (данный метод будет в следующем подразделе);
- емкостной метод;

- электрический метод, который мы рассмотрим более углубленно, так как он применяется в нашей системе прогнозирования неисправностей асинхронного электродвигателя.

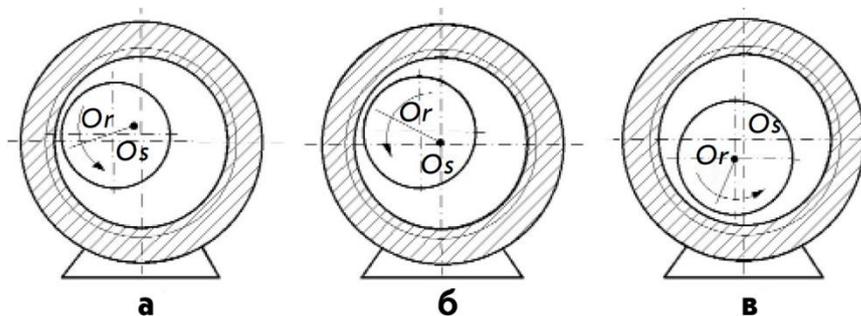


Рисунок 13 – Схематическое отображение разных типов эксцентриков (приложение к таблице 3)

Исходя из регулярно публикуемых исследования можно заключить, что «методы вибродиагностики и метод, основанный на спектральном анализе потребляемых токов статора весьма распространены. Преимуществом метода спектрального анализа» тока является то, что с его помощью можно проводить удалённый мониторинг при наличии доступа к шкафу силовому или РП от которого запитан электродвигатель. В связи с этим, такой метод очень эффективен для погружных насосов скважин, к которым нет возможности получить доступ, либо же требуется произвести трудозатраты мероприятия по извлечению устройства.

Данный метод даёт возможность выявить следующие неисправности:

- электрические дефекты элементов ротора: электрическая несимметрия в обмотке ротора и обрывы обмоток;
- электрические дефекты элементов статора: обрыв обмотки и несимметрия силовой обмотки;
- нарушение формы воздушного зазора, в том числе учитывая статические и динамические эксцентриситеты в асинхронном электродвигателе с возможностью определения причин возникновения;

- сильное накопление повреждений в подшипнике;
- -нарушение формы питающих тока и напряжения, (проблемы с питанием установки).

«В нагруженных на электродвигатель механизмах у агрегатов по потребляемому двигателем току могут быть обнаружены не соосность валов, соединяемых муфтами в линию вала, дефекты муфт (в том числе фрикционной или гидравлической); дефекты меренных, зубчатых и цепных передач; дефекты насаженных на вал рабочих узлов, таких как лопасти рабочих колес, эксцентрики (вместе с нагруженными на них клапанами и т. п.), поршни (вместе с цилиндрами цилиндрической группы) и т. д.; увеличенный момент сопротивления нагруженного на двигатель механизма.»[32, с.77]

«Так уже существует ряд исследования методики выявления эксцентриситета в электродвигателе по анализу спектрального анализа токов статора и анализу влияния, которое описываемые неисправности оказывает на вольтамперные характеристики асинхронного двигателя. В целях подтверждения эффективности данного метода он был повторён на тестовой установке.»[33, с.84]

Данный метод диагностики планируется включить в систему прогнозирования неисправности асинхронных электродвигателей, поэтому было принято решение проверить его эффективность на тестовом стенде.

Так как описываемый метод диагностики уже неплохо изучен, за основу эксперимента было взято исследование из Сафина Н.Р. и Прахта В.А. посвященному изучению диагностики неисправностей асинхронного электродвигателя.

«Для исследования эксцентриситета ротора на основе спектрального анализа токов статора и оценки влияния данной неисправности на энергетические характеристики двигателя в качестве испытуемой машины был использован двигатель АИР 71 А2У2 IM1081 (номинальная мощность 0,75 кВт; номинальная скорость 2 820 об./мин). Испытания проводились в двух

условиях: с заводским подшипником марки 6204 и с подшипником марки 6005 с втулкой (рисунок 14).»

«Размеры подшипников и втулки приведены ниже.»

- «подшипник марки 6204 (рисунок 14): внутренний диаметр $d = 20$ мм; внешний диаметр $D = 47$ мм; ширина подшипника $B = 14$ мм;»
- «подшипник марки 6005 (рисунок 14): внутренний диаметр $d = 25$ мм; внешний диаметр $D = 47$ мм; ширина подшипника $B = 12$ мм; внешний диаметр втулки 24,95 мм; внутренний диаметр втулки 20,05 мм (рисунок 14).»

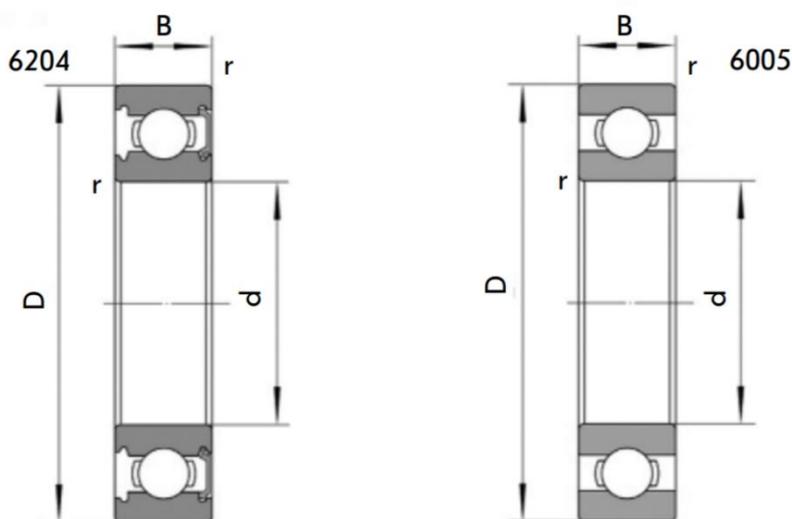


Рисунок 14 – Эскизы подшипников

«При работе асинхронного двигателя с подшипником 6005 с внутренней втулкой эксцентриситет ротора создаются за счёт разницы посадки втулки подшипника к валу машины (диаметр вала 19 мм и внутренний диаметр втулки 20,05 мм).»

«При этом, когда двигатель работает, происходит циклическое изменение воздушного зазора по окружности ротора (т. е. смешанный эксцентриситет). Данный способ искусственного получения эксцентриситета ротора описан в некоторых зарубежных работах [7, 6]. Методика определения эксцентриситета ротора в асинхронном двигателе изложена в [32, 17].»

«К великому сожалению, на данный момент статистика эксцентриситетов ведётся не для всех машин, измерение воздушного зазора обычно производится с помощью щупов. Нормами допускается предельная величина эксцентриситета $\varepsilon = 0,15$, однако расчёты и опытные данные показывают, что в ряде случаев эксцентриситет значительно больший. Как правило, измерение воздушного зазора в машине осуществляют в четырёх точках по схеме «сверху–снизу» и «слева–справа» [7].»

«При испытаниях с изначальным подшипником 6204 (эксцентриситет ротора отсутствует) воздушный зазор составляет $\delta = 0,275$ мм. Далее вместо подшипника 6204 был установлен подшипник 6005 с внутренней втулкой (втулка применялась к одному из подшипников двигателя). В этом случае эксцентриситет ротора, как отмечено выше, создаётся за счёт разницы диаметров вала двигателя (19 мм) и внутреннего диаметра втулки (20,05 мм).»

«В этом случае воздушный зазор составлял $\delta = 0,295$ мм (усреднённое значение, после четырёх точек). Следовательно, при этом, когда машина работает, мы имеем некоторое циклическое смещение ротора относительно статора машины.»

Эксцентриситет ротора машины определяется относительной величиной $\varepsilon = (0 < \varepsilon < 1)$, которая равна [10]:

$$\varepsilon = \frac{\delta - \delta_{min}}{\delta} = 0,3 \quad (15)$$

где δ – значение воздушного зазора при эксцентриситете ротора, м; δ_{min} – минимальное значение воздушного зазора, м.

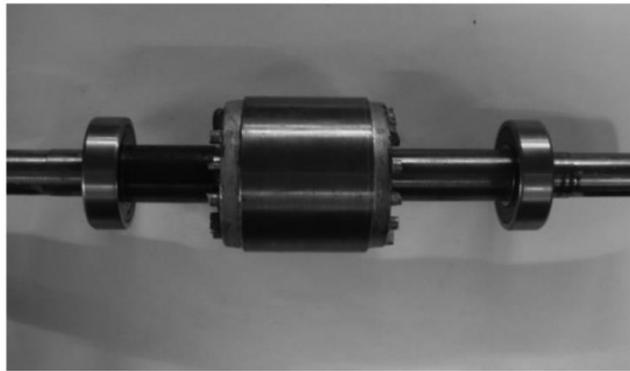
Величина эксцентриситета ротора превышает нормированное значение в два раза ($\varepsilon_1 = 0,15$ и $\varepsilon = 0,3$). Испытания проводились на экспериментальном стенде. Нагрузочный момент создавался электромагнитным порошковым тормозом «Metrobel FAT 350» 35 Н·м, 3000 об./мин, для измерения момента использовался датчик момента TRD-3К (3

кгс·м), для измерения скорости – датчик частоты вращения МР-981, для соединения валов испытываемой машины с нагрузочным устройством – муфты марок VoWex M-19 и Ruflex 0-3TFx6-20. Электропитание двигателя производилось напрямую от трёхфазной сети. Для сопоставимости результатов эксперимента значения нагрузочных моментов задавались равными (2,64 Н·м) при обоих режимах (с исправным и неисправным подшипником).

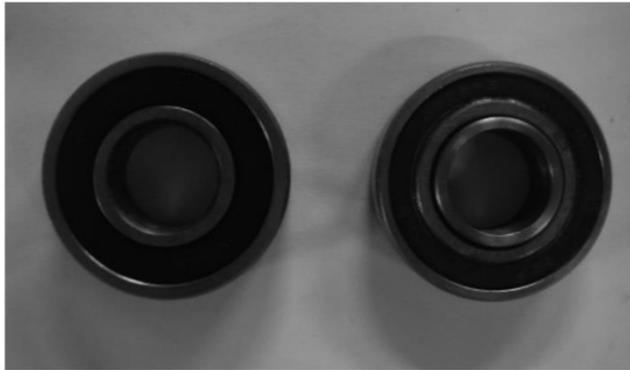
«Ниже показан вид ротора и подшипников (рисунок 15). Запись мгновенных значений токов и напряжений выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя USB3000 и измерительной платы с тремя датчиками токов LEM НХ 02-Р [15] и тремя датчиками напряжений LV25-Р SP5 [16]. Полученные значения использовались для спектрального анализа в пакете Matlab на основе быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform).»

«При проведении испытаний мгновенные значения токов и напряжений отцифровывались и записывались на компьютер для дальнейшей обработки в MATLAB.»

«Исходя из полученного графика по потребляемому току можно отметить, что двигатель с повреждённым подшипником вызывает повышенный перерасход электроэнергии 65,74 Вт (рисунок 15). Кроме того, среднеквадратическое действующее значение токов при обоих режимах составляет: в случае с исправным подшипником $I_1 = 2,1$ А; в случае с повреждённым подшипником $I_2 = 2,2$ А.»



а



б

Рисунок 15 – Фото используемых в качестве экспериментальных образцов подшипники

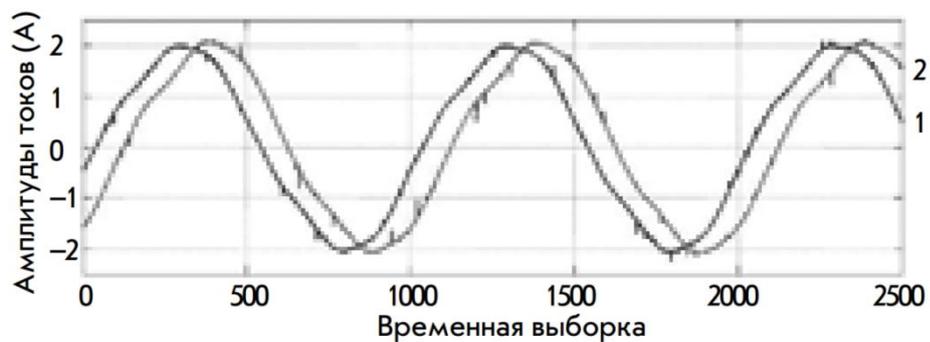


Рисунок 16 - Сравнительный график полученных токов при питании напрямую от сети

Для рисунка 16 приняты следующие обозначения:

- 1 – бездефектный асинхронный двигатель;
- 2 – с повреждённым подшипником.

«При сравнении полученных графиков (рисунок 17 и 18) видны определённые различия, в частности, на рисунке 17 среди спектрального

состава выделяются частоты 150 Гц. На рисунке 18 на этой частоте виден рост амплитуды до -80 дБ, что свидетельствует о наличии механической неисправности [8].»

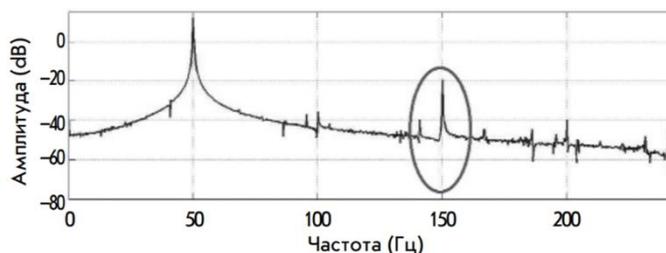


Рисунок 17 – Спектральный состав тока асинхронного двигателя с исправным подшипником при питании напрямую от сети

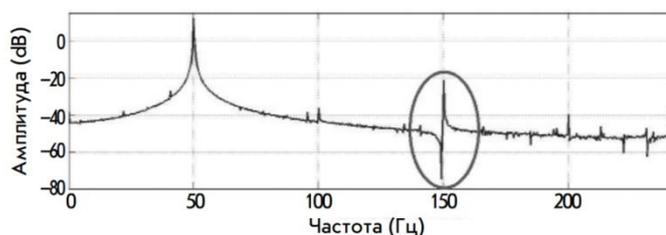


Рисунок 18 – Спектральный состав тока асинхронного двигателя с повреждённым подшипником при питании напрямую от сети

«Как правило, при спектральном анализе токовых характеристик сравнивают увеличение количества частотных полос и рост их величины и определяют выделяющиеся характеристические частоты, которые соответствуют определённым видам повреждений.»

«В данном случае амплитуды на 150 Гц являются относительно большими (рисунок 18) по сравнению с графиком с исправным подшипником (рисунок 17).»

«Ниже на рисунке 19 приведён сравнительный спектр токов, исходя из которого можно отметить, что в случае с повреждённым подшипником (нижний график, рисунок 19) имеется увеличение количества частотных полос и рост их величины (при значительном уровне сигналов в частотной области

от -80 дБ, как показано прямой линией), что является признаком наличия неисправности – технологического эксцентриситета ротора [8].»

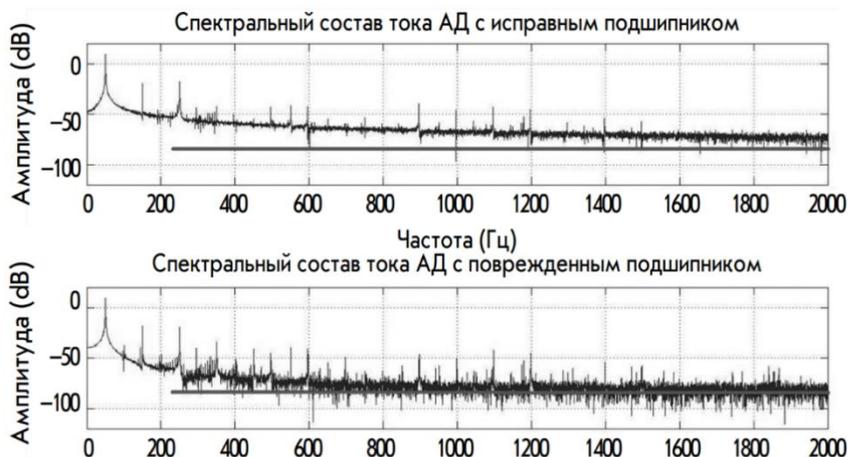


Рисунок 19 – Изображение графиков исправного и неисправного. Показывающий отличие выходных характеристик токовых значений. Верхний целый, а нижний с искусственной неисправностью

«После испытаний полученные значения коэффициента полезного действия при питании двигателя от сети выглядят следующим образом: с исправным подшипником $\eta_1 = 0,61$; с повреждённым подшипником $\eta_2 = 0,59$.»

Как можно понять по результату эксперимента, есть определённая корреляция. Чем выше вибрации в двигателе, тем выше эксцентриситет.

А чем выше эксцентриситет, тем выше потери при работе электродвигателя.

При эксперименте оно составило 3,4%. Что соотносится ранее проводимыми экспериментами.

Из тестовой установки следует, наличие эксцентрика ротора вызывает искажение в токовой характеристике статора, смотри рисунок 19. В целях подтверждения эксперимента, был проведён опыт на действующем объекте АО «АВТОВАЗ» ПСВ-2.

Данный объект представляет собой комплекс насосных станций, в котором применяются погружные насосы, что, собственно, затрудняет другие

методы диагностики, в связи с чем было принято приступить к диагностике данным методом.

На данном объекте поступило сообщение о неисправности насоса седьмой скважины. По имеющимся данным имеющийся в комплекте шкафа управления универсальный блок защиты двигателя УБЗ – 302 выполнил аварийное отключение насоса, в архиве записана авария AU^- , что соответствовало обозначению перекос фаз.

В ручном режиме был выполнен замер сопротивления изоляции обмоток, зафиксировано отклонение от результатов замера прошлого года. Показания меньше требуемых по ПУЭ пункт 1.8.

Было решено провести аналогичное тестовому испытание на данном неисправном насосе. По результатам построены графики рисунки 20-22.

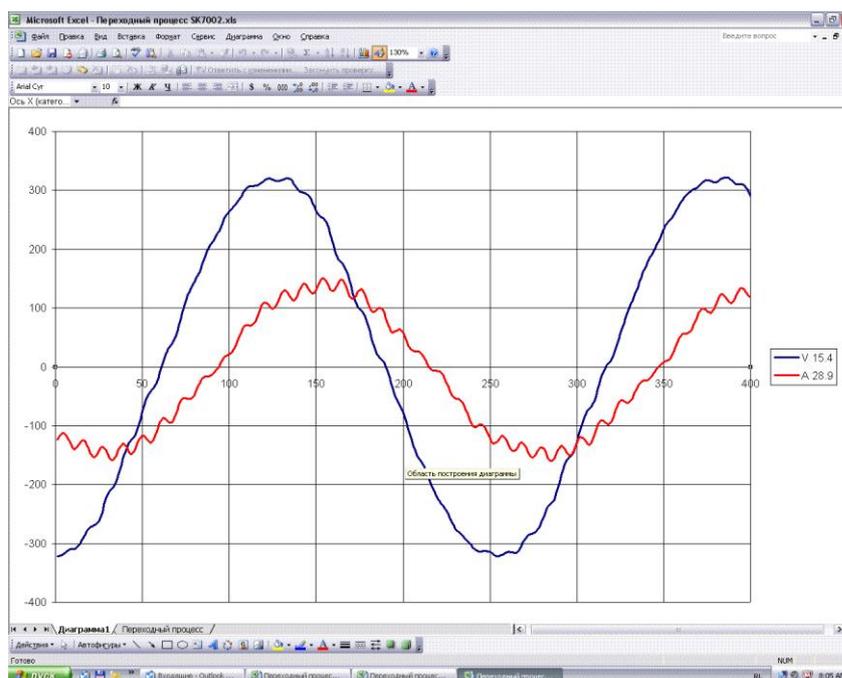


Рисунок 20 – Диаграмма испытания неисправного двигателя.

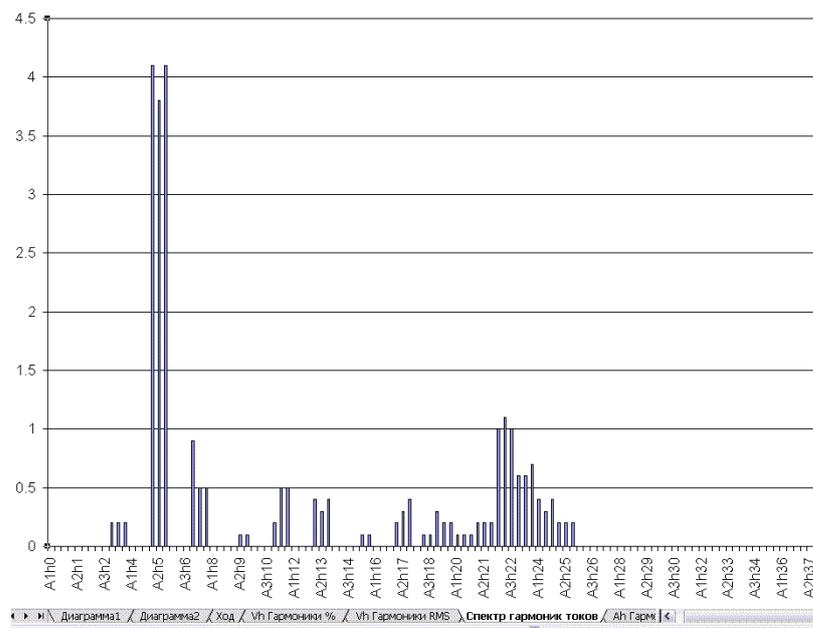


Рисунок 21 – Спектр гармоник тока

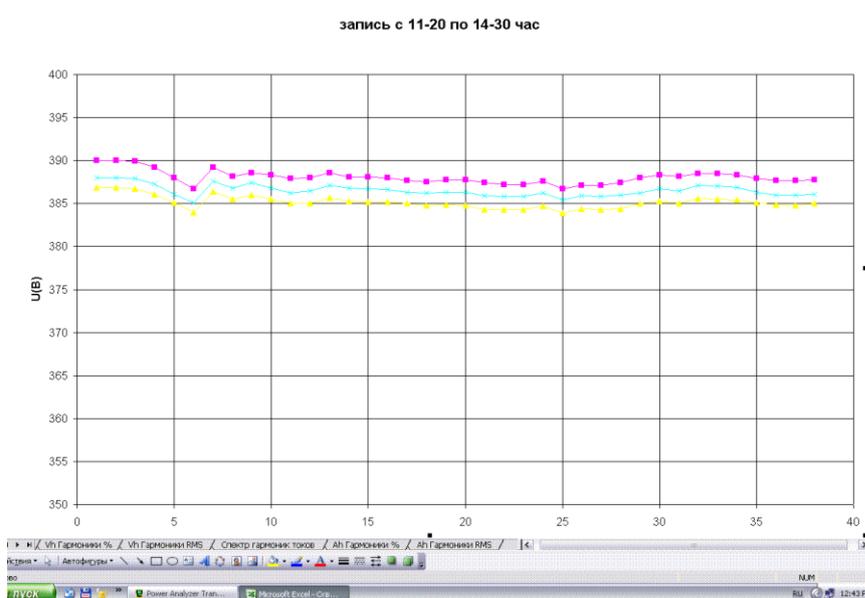


Рисунок 22 – График выходных характеристик за 3 часа 10 минут

По данным исследования отображённых на рисунках 20-22, следует, что частота пульсаций 1150Гц при амплитуде 22А. Это 22 -23 гармоника, по ГОСТ – ISO – 20958 пункт 4.2.2 это неравномерность воздушного зазора.

Исходя из данных приведённым к акту расследования неисправности, расход электроэнергии за месяц до выхода из строя электродвигателя вырос на 2,9%.

Следовательно, подтверждается, что возникающие гармоники, вызванные эксцентриком, повышают расход электроэнергии.

По имеющимся экспериментальным и практическим данным при явной неисправности он составляет $\approx 3\%$. В связи с этим в дополнении к определению гармоник, чтобы избежать критического выхода из строя оборудования, при росте потребляемой электроэнергии больше чем на $\Delta P = 2\%$ оборудования будет отключаться по сигналу авария, а при отклонении $\Delta P = 1,6\%$ будет выводиться информационный сигнал предупреждения о надвигающейся неисправности.

Расчёт будет выполняться по выражению (16):

$$P = \sqrt{3} \times I_{л} \times U_{л} \times \cos\varphi \quad (16)$$

где $I_{л}$ – линейный ток,

$U_{л}$ – линейное напряжение;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

3.5. Прогнозирование неисправности асинхронного электродвигателя по виброхарактеристикам

Последним в числе методов, применяемых в комплексной системе прогнозирования неисправностей, станет вибродиагностика.

Для разрабатываемой системы прогнозирования будет применяться хорошо зарекомендовавшая себя методика вибродиагностики по которой работает Балком – 1, для начала рассмотрим её подробнее на примере балансировки вент агрегата ВЦ 4-76 №20.

Этап 1: устанавливаем виброметры возле 1-го и 2-го подшипников на уровне установки пробных грузов (рисунок 23).

Примечание: на фото не совсем корректное расположение датчиков, т.к. грузы мы будем вешать на радиусе 850 мм то соответственно датчики необходимо установить ниже вала на 850 мм.

Датчик, у подшипника, который ближе к колесу он будет показывать первую плоскость.

Датчик, у подшипника, который ближе к шкиву он будет показывать вторую плоскость.

Датчики магнитные, крепятся к металлической поверхности.

Замерять можно: вертикальную, горизонтальную и осевую плоскость.



Рисунок 23 – Крепление датчиков к установке

Этап 2. Устанавливаем Тахометр между двумя подшипниками, лазерный луч должен быть направлен в центр вала. На вал крепим фото-отражающую ленту (полоска 50×10мм), так чтобы лазерный луч тахометра смотрел в центр этой ленты (рисунок 24). У тахометра магнитное основание, крепится к металлу.

Примечание: так же можно фото-отражающую ленту приклеить к шкиву вала и лазерный луч тахометра направить на шкив вала. Возможно, данный метод установки будет эффективнее, так как увеличится точность определения угла дисбаланса из-за большего диаметра шкива по отношению к диаметру вала.



Рисунок 24 – Установка приборов

Этап 3. Подключение датчиков и тахометра к прибору Балком 1 (рисунок 25):

- X1 – датчик первой плоскости V1o (ближе к колесу);
- X2 – датчик второй плоскости V2o (ближе к шкиву);
- X3 – тахометр.



Рисунок 25 – Подключение проводов к прибору

Этап 4. Подключаем прибор к ноутбуку (рисунок 26)



Рисунок 26 – Подключение прибора к ноутбуку

Этап 5. Запускаем программу Балком 1, показано на рисунке 27 (предварительно, на данный ноутбук должна быть скачена и установлена).

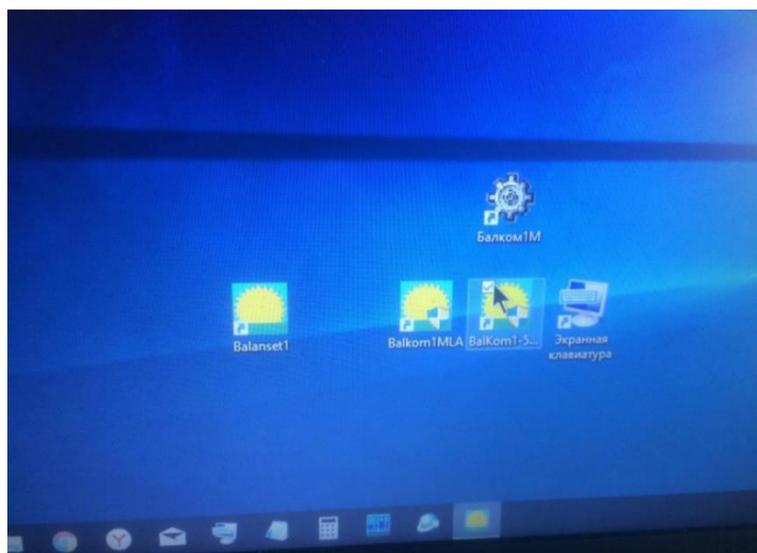


Рисунок 27 – Программа и закачены драйвера

В меню открываем F5 – Виброметр (рисунок 28).

Делаем запуск двигателя и после разгона рабочего колеса до номинальной частоты, замеряем вибрацию (F9 – Пуск).

Примечание: замер производить не менее 5 раз, подряд, в трёх положениях (вертикальное, горизонтальное и осевое).

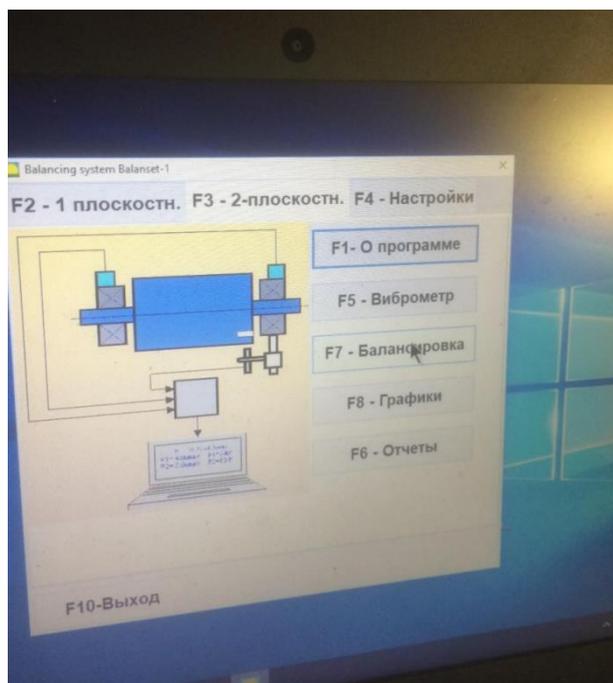


Рисунок 28 – Меню программы

Измеряемые показатели (рисунок 29):

- $N_{об}$ – частота вращения вала;
- V_{1s} , V_{2s} – общая суммарная вибрация на первой и второй плоскостях (не только колеса, но и остальных элементов, по типу двигателя или виброопор). Если данная частота выше V_{o1} , V_{o2} более чем в 2 раза, при этом V_{o1} , V_{o2} в допуске, то источник повышенной вибрации не вентилятор с валом, а другой элемент цепи вентагрегата (например ЭД).
- V_{o1} , V_{o2} – вибрация вентилятора на первой и второй плоскостях.
- F_1 , F_2 – фаза вибрации. Определяется точка, в которой происходит дисбаланс. Если данная величина при последующим измерении изменяется более чем в 10% от предыдущей величины, то скорее всего резонанс. Допуск изменения по фазе не более $\pm 10\%$.

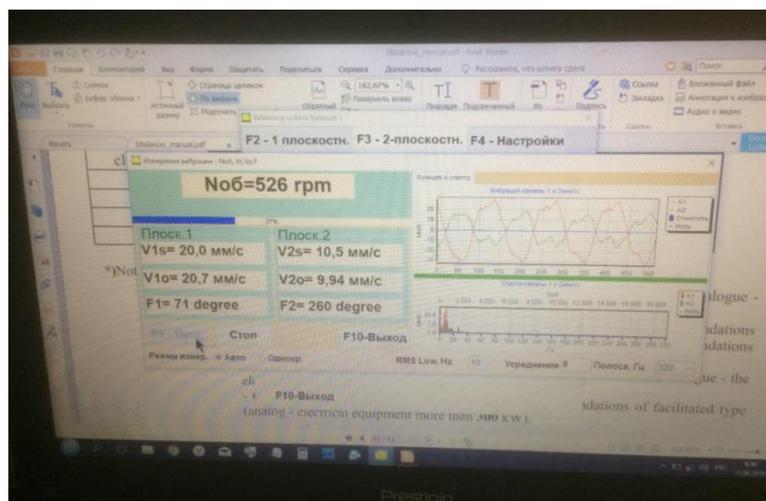


Рисунок 29 – Рабочее поле программы с показаниями

Этап 6. Если виброметр показывает, что агрегат в допуске, то вентилятор балансировать не требуется.

Если виброметр показывает, что агрегат не в допуске, то переходим к разделу «БАЛАНСИРОВКА».

Допустимые уровни вибрации, должны соответствовать критериям стандарта ГОСТ ИСО 10816-1-97 и приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Классификация вибраций электрической машины

| Класс электрической машины | Классификация по уровням вибрации, мм/сек | | | |
|----------------------------|---|---------|-----------|-------------|
| | Идеально | Хорошо | Допустимо | Недопустимо |
| Первый | <0,7 | 0,7-1,8 | 1,8-4,5 | >4,5 |
| Второй | <1,1 | 1,1-2,8 | 2,8-7,1 | >7,1 |
| Третий | <1,8 | 1,8-4,5 | 4,5-11 | >11 |
| Четвертый | <2,8 | 2,8-7,1 | 7,1-18 | >18 |

Первому классу соответствуют небольшие электрические машины, установленные на жестких фундаментах (аналог – электродвигатели мощностью до 15кВт);

Второму классу соответствуют средние машины, установленные без отдельных фундаментов (аналог – электродвигатели мощностью 15-75кВт), а также приводные механизмы на отдельных фундаментах мощностью до 300 кВт;

Третьему классу соответствуют крупные машины, установленные на жестких фундаментах (аналог – электрооборудование мощностью свыше 300кВт);

Четвертому классу соответствуют крупные машины, установленные на фундаментах облегченного типа (аналог – электрооборудование мощностью свыше 300кВт).

Далее приступаем к балансировке.

Этап 7. Балансировка. В меню заходим в F7 – Балансировка (рисунок 30).

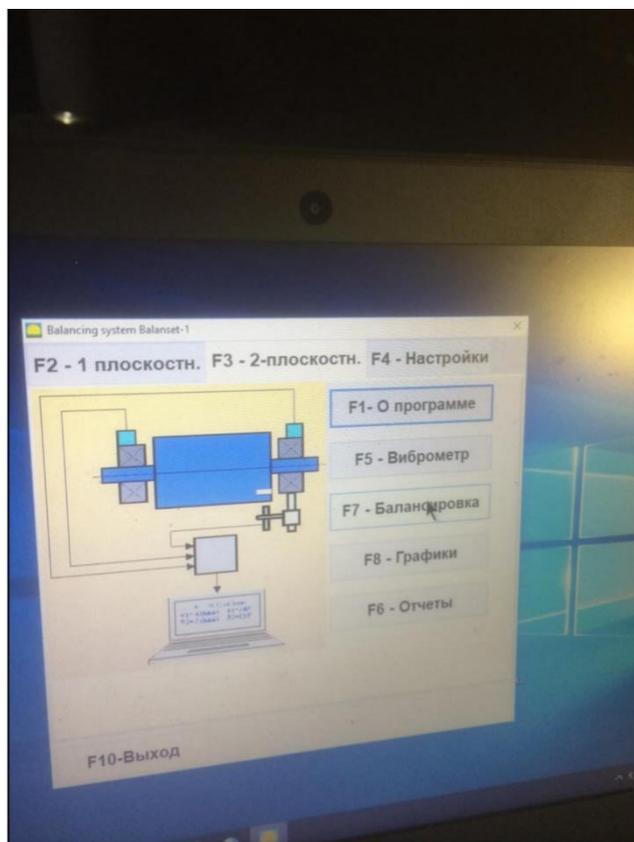


Рисунок 30 – Рабочее поле программы

Этап 8. Открывается окно «Архив» как на рисунке 31, заполняем строки «Тип ротора», «Дата и время», «Рлсе».

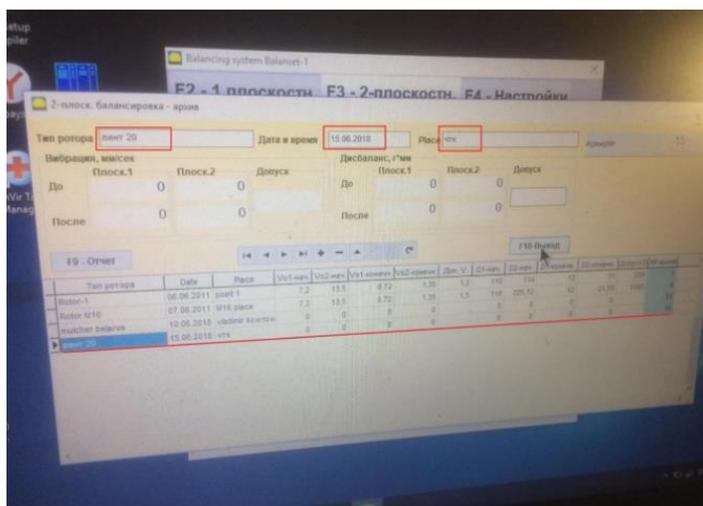


Рисунок 31 – Вводимые параметры

Этап 9. Далее переходим к настройке балансировки. Для балансировки необходимо:

- при себе иметь: пробный груз 300 грамм – 2 шт; балансировочные грузики 100 грамм – 4 шт; балансировочные грузики 50 грамм – 4 шт.
- сварочный аппарат, сварочные электроды, краги, маску, молоток, плоскогубцы; болгарка, круги; переноска; фонарь; краску и кисть для замазки сварки.

В настройках заполняем:

- вид балансировки – первичный;
- масса пробного груза – 300 грамм (в примере 400 гр, но это слишком тяжело);
- разделить груз – лопасть – 12 (так как у нас вентилятор ВЦ4-76 №20, то он имеет 12 лопастей);
- радиус установки пробного груза – плоскость 1 = 850 (мм); плоскость 2 = 850 (мм). (так как вентилятор ВЦ4-76 №20 имеет диаметр колеса 2000 мм, то мы практически у самого края привариваем грузики, с небольшим отступом в 15 см). Отслеживаем показания в окне, рисунок 32.

Примечание: место установки, середина лопасти на плоскостях.

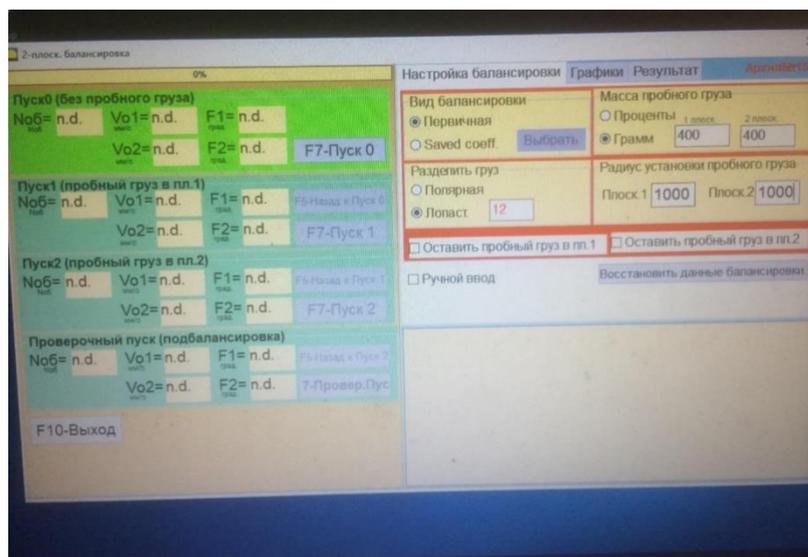


Рисунок 32 – Настраиваемое поле балансировки

Этап 9. После того как задали все значения, запускаем вент-агрегат.

Этап 10. После того как запустили вент-агрегат, ждём, когда он наберёт номинальную частоту вращения (смотрим на табло тахометра), и далее в программе слева на против Пуск нажимаем на «F7 –Пуск» и после отключаем электродвигатель вентилятора.

Этап 11. Как мы видим на рисунке 33, из полученных данных на этапе 10: частота вращения вентилятора $N_{об}=525$ об/мин.



Рисунок 33 – Выходные параметры балансировки

Вибрация в первой плоскости $V_{10}=15,4$ мм/с (для ЭД 75 кВт должно быть в диапазоне 1,1-2,8 мм/сек); Вибрация во второй плоскости $V_{20}=12,1$ мм/с (для ЭД 75 кВт должно быть в диапазоне 1,1-2,8 мм/сек). Отсюда следует, что вентилятору необходима балансировка, следовательно, переходим к следующему пункту.

Этап 12. При неудовлетворительных показаниях при Пуске0, необходимо приварить (прихватить) балансировочный груз на первую плоскость вентилятора (дальняя от шкива) на расстоянии радиуса указанного в п.8 (850 мм). После приварки груза, необходимо пронумеровать лопатки между которыми его закрепили по ходу движения цифрами 12 и 1.

Примечание: грузик необходимо повесить у той лопасти (на том углу) на котором находится фотолента тахометра на валу (шкиву), т.е. если фотолента направлена строго вниз, то это значит, что мы должны вешать пробный груз у самой нижней лопасти.

Этап 13. После того как приварили первый балансировочный груз, необходимо удалиться из вентилятора и подать напряжение на двигатель.

Этап 14. После того как двигатель набрал номинальные обороты в программе наживаем на F7 – Пуск1.

Этап 15. Далее необходимо отключить вент-агрегат. После полной его остановки, срезать первый пробный груз и приварить второй пробный груз на против места первого пробного груза (между 12 и 1 лопастями) на второй плоскости (ближе к шкиву) на расстоянии радиуса, указанного в п.8 (850 мм).

Этап 16. После того как приварили второй балансировочный груз, необходимо удалиться из вентилятора и подать напряжение на двигатель.

Этап 17. После того как двигатель набрал номинальные обороты в программе наживаем на F7 – Пуск2.

Этап 18. Далее необходимо отключить вент-агрегат. После полной его остановки, срезать второй пробный груз как на рисунке 34.



Рисунок 34 – Пример крепления балансировочного груза

Этап 19. Мы видим, что наш вент-агрегат не попадает в допуск (1,1-2,8 мм/с) по одной из плоскостей.

Этап 20. В программе выходит следующее табло «Результат». В нём говорится на какую плоскость какие грузики необходимо повесить (куда и какой массой):

- на плоскости 1 необходимо установить один грузик массой 59 грамм на 8ой лопасти (между 7 и 8) относительно первого пробного груза ($Z8 = 59 \text{ g}$), а так же на 9ой лопасти (между 8 и 9) ещё один грузик массой 6,8 грамм ($Z9 = 6,8 \text{ g}$).
- на плоскости 2 необходимо установить один грузик массой 15,6 грамм на 8ой лопасти (между 7 и 8) относительно второго пробного груза ($Z8 = 15,6 \text{ g}$), а так же на 9-ой лопасти (между 8 и 9) ещё один грузик массой 35,8 грамм ($Z9 = 35,8 \text{ g}$).

Примечание 1: грузики необходимо обваривать (приваривать на мертво, так как они больше срезаться не будут) и закрасить все сварные швы, чтобы не появлялась коррозия.

Примечание 2: при расчёте груза, необходимо учитывать массу электрода (ориентировочно 7 грамм).

Примечание 3: балансировочные грузики устанавливаются идентично пробным грузикам необходимой плоскости, только у другой лопасти.

Примечание 4: отсчёт лопастей производится от места установки пробного груза по направлению вращения вентилятора.

Примечание 5: место установки пробного груза считается за «Первую» лопасть (Z1).

Этап 21. После того как пункт 20 выполнен в полном объёме, необходимо удалиться из вентилятора и запустить электродвигатель, дождаться разгона колеса до номинальной частоты и нажать повторно «F7 – Провер Пуск» как на рисунке 35.

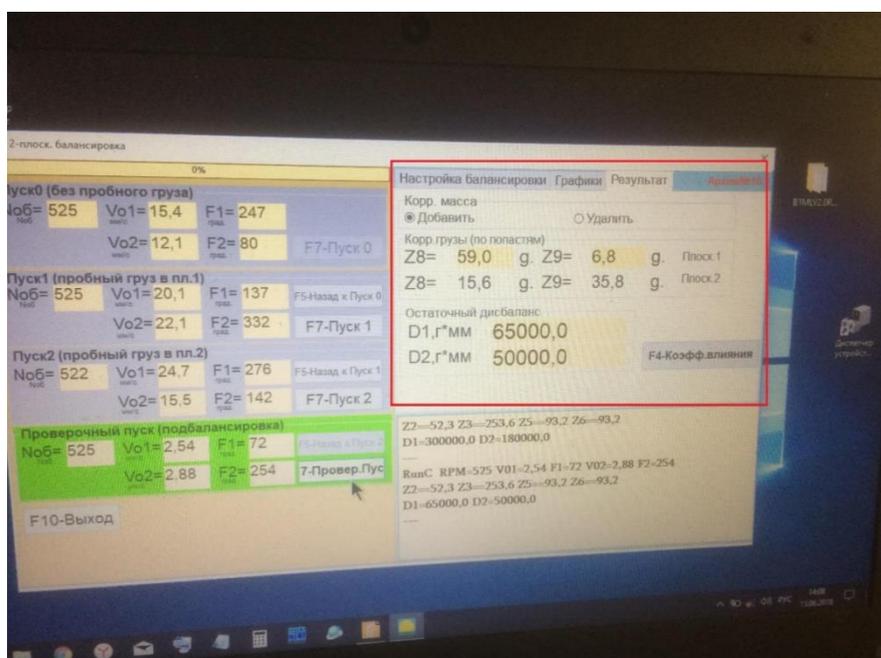


Рисунок 35 – Окно программы

Этап 22. Как мы видим обе плоскости в допуске ($V_{o1} = 1,46$ мм/с; $V_{o2} = 1,82$ мм/с, что входим в диапазон 1,1 – 2,8 мм/с), следовательно дальнейшая балансировка необязательна.

Если хотя бы одна из плоскостей будет не в допуске, то этапы 20 и 21 повторяются до тех пор, пока результаты не станут как на этапе 22 (в допуске).

Примечание: если фазы меняются более $\pm 10\%$ то значит и не получается от балансировать, это значит резонансная частота или проблема в чём-то другом.

Примечание: проверять необходимо не менее 5 раз, если 1 раз из 5 проскочил дисбаланс, необходимо вернуться к п.20 и п.21. Если в допуске все 5 раз, то вент-агрегат считается годным.

В отличие от описанной выше методики балансировки в разрабатываемой системе прогнозирования планируется использовать один датчик, измеряющий показания вибрации в двух плоскостях (ИВД-3 или аналог, соответствующий условиям эксплуатации).

Показания вибро-датчика формируются по выражениям 17 и 18.

$$V_1 = I_1 \times K_1 \quad (17)$$

$$V_2 = I_2 \times K_2 \quad (18)$$

где V_1 и V_2 – уровень вибрации в мм/сек в плоскостях 1 и 2 соответственно;

I_1 и I_2 – выходной ток аналогового сигнала на выходе 1 и 2 соответственно;

K_1 и K_2 – коэффициент преобразования, определяется по калибровочному стенду завода изготовителя.

Таким образом за счёт сравнения показания датчиков вибрации с данными ГОСТ ИСО 10816-1-97 система будет судить допустимом уровне вибрации установки, что позволит выявлять возникающие неисправности на этапе возникновения.

За счёт взаимосвязи физических процессов вибрация электродвигателя имеет обратную связь с токовыми характеристиками, а как следствие с температурными характеристиками двигателя.

Таким образом можно подвести заключение.

Заключение

По результатам проведённого исследования можно заключить, что выбранная тема является актуальной и востребованной в современной технико-экономической обстановке.

Позволяет повысить срок эксплуатации асинхронных электродвигателей путём своевременного выявления дефектов по трём ключевым методам диагностики. Где метод термического контроля является оригинальной идеей и ранее не применялся.

Выбранные за составные компоненты системы прогнозирования неисправности методы, были подтверждены экспериментально как на тестовых, так и на реальных установках.

Полученное углублённое понимание методов диагностики на основании проведённых экспериментов позволило, так как в виду отсутствия технических возможностей не удалось провести опыт моделирования системы и построить электронную модель в программе MATLAB/Simulink, был проведён по отдельности каждый метод диагностики неисправности, в результате эксперимента элементы системы подтвердили свою эффективность, что может судить о возможности её реализации на практике.

Это позволяет открыть путь к дальнейшим практическим исследованиям системы на реальной установке.

В ходе работы подтверждён на практике метод токовой диагностики по спектральному анализу тока, определены параметры токовой диагностики, это наличие 22 и 23 гармоники в токовой характеристике, повышение потребления электроэнергии более чем на 3%.

Проведено углублённое ознакомление с методом анализа виброхарактеристик на примере диагностики вибрации (калибровки) с использованием Балком-1, на базе которого принято решение о использовании вместо комплекса вибродатчиков, одного многофункционального, измеряющего параметры вибрации одновременно в нескольких плоскостях.

Данное решение позволит, с одной стороны, удешевить конечную стоимость системы, а также

Была разработана структурная схема комплексной системы прогнозирования неисправностей асинхронного электродвигателя, включающая в себя три метода диагностики: температурной, токовой и вибрационной.

На базе структурной схемы и экспериментальных данных составлена логическая схема системы прогнозирования неисправностей асинхронных электродвигателей.

Путём проведения эксперимента доказана работоспособности каждого метода на практике и подтверждены выбранные параметры измерений:

- V_1 и V_2 – уровень вибрации в мм/сек в плоскостях 1 и 2 соответственно;
- ΔP - разность расходуемой мощности при условии идентичных условий функционирования;
- Δt – разность температур разных зон статора.

Постольку поскольку на данном этапе научной проработки системы прогнозирования асинхронных электродвигателей применяется уже существующий программируемый логический контролер типа SMH.

При успешном применении системы прогнозирования неисправности, описанной в данной работе, на действующем производстве, планируется продолжить научные изыскания и оснастить систему прогнозирования собственным логическим блоком, постольку поскольку это позволит в дальнейшем полностью закрыть вопрос диагностики состояния электродвигателей

Список используемой литературы

1. Бахарёв А.В. Анализ методик оценки технического состояния электродвигателя / А. В. Бахарёв, А. Д. Умурзакова. - Текст : электронный // Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». - 2017. - №3. - С. 402-409. - URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2017/energ/pages/Articles/402.pdf> (дата обращения: 15.04.2023).
2. Борцов М.В. Повышение выработки собственного ресурса асинхронных электродвигателей путём внедрения комплексных систем диагностики / М.В. Борцов. - Текст: электронный // Научный электронный журнал «Матрица научного познания». - 2024. - №4-2. - С. 88-91. - URL: <https://os-russia.com/SBORNIKI/MNP-2024-04-2.pdf> (дата обращения: 23.05.2024).
3. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного электродвигателя / В. А. Шевчук, А. С. Семёнов. - Текст : электронный // Международный студенческий вестник. - 2015. - №3. - С. 419-423. - URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14100> (дата обращения: 15.04.2024).
4. Ассоциация ЕАМ: Реализация отказов на стадии эксплуатации оборудования.–URL: <https://eam.su/realizaciya-otkazov-na-stadii-ekspluatacii-oborudovaniya.html> (дата обращения 20.04.2024).
5. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. кандидата технических наук: 05.09.01 / Сафин Наиль Рамазанович; науч. рук. В.А. Прахт; УФУиПРБНЕ.- Екатеринбург, 2017. – 152 с.
6. Bonnett, A.H. Increased efficiency versus increased reliability / A.H. Bonnett, C. Yung // IEEE Industry Applications Magazine. – 2008. - Vol. 14. – Iss. 1. – pp. 29-36.

7. Zhang, P. A survey of condition monitoring and protection methods for mediumvoltage induction motors / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47. – No. 1. – pp. 34-46.

8. Соркин, М.Д. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы [Электронный ресурс] / М.Д. Соркин // Новости электротехники, № 2 (32), 2005. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php> (дата обращения: 12.10.23).

9. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

10. Петухов, В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Электронный ресурс] / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники, № 1(31), 2005. - Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (дата обращения: 10.09.23).

11. Рогачев, В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Рогачев Вячеслав Анатольевич. – Новочеркасск, 2008. – 173 с.

12. SPM .–URL: <https://www.spminstrument.fr/ru-RU/News/2021/> (дата обращения 12.03.2024).

13. Повреждения подшипников качения и их причины. –URL: https://detmeh.ru/img/pdf/0_pdf_0e919b9c185b72bba196596e7a5e2e2b.pdf (дата обращения 10.02.2024).

14. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова. - СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. - 156 с.

15. Соболев А.Н. Повреждения статорной обмотки асинхронного генератора / А. Н. Соболев, А. А. Андреева. - Текст : электронный // The scientific heritage. - 2022. - №84. - С. 58-61. - URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/povrezhdeniya-statornoy-obmotki-asinhronnogo-generatora> (дата обращения: 11.12.2023).

16. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надёжность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

17. Хомутов С.О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе: Дис ... канд. техн. наук. – Барнаул, 1999

18. Грибанов А.А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе: Дисс. ... канд. техн. наук; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2001. – 168 с

19. Судаков, А.И. Надежность электрических машин: учеб. пособие / А.И. Судаков, К.А. Чабанов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 332 с.

20. Сафин, Н.Р. Диагностика повреждений подшипников асинхронных двигателей в условиях горнодобывающих предприятий / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 60-64.

21. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980.-360 с., ил.

22. Перспективы использования комплексной системы диагностики асинхронных электродвигателей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://regconf.vogu35.ru/index.php/archive/sborniki?download=85:sbornik-materialov-foruma-za-2024-god> (Дата обращения: 26.05.24).

23. Бобров В.В. Оценка технического состояния асинхронных двигателей методом вихретокового контроля. Материалы конференции научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития. – 2012.

24. Tuaimi, H.A Al. Detection of incipient rotor bar faults and air-gap asymmetries in squirrel-cage motors using stator current monitoring: master thesis / Al Tuaimi Hamad A. – Oregon. – 2005. – 126 p.

25. Wang, J. Current envelope analysis for defect identification and diagnosis in induction motors / J. Wang, S. Liu, R.X. Gao, R. Yan // Journal of Manufacturing Systems. – 2012. – № 31. – 380-387

26. ГОСТ Р 8.674-2009 Общие требования к средствам измерений и техническим системам и устройствам с измерительными функциями: национальный стандарт российской федерации: дата введения 2011-03-01 / Государственная система обеспечения единства измерений. - - Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018 – 133 с.

27. Средства неразрушающего контроля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://defektoskopia.narod.ru>. (Дата обращения: 26.01.24).

28 Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трёхфазном и однофазном режимах: учебник для вузов /И.И.Алиев.-М.:ИП РадиоСофт, 2024. - 128 с. - (Высшее образование). ISBN 5-93037-125-3.

29.Янковская Т.А. Математическое моделирование процесса вибродиагностирования технического состояния горного оборудования / Т.А. Янковская - Текст : электронный // «Хвойные бореальной зоны». - 2012. - №5-6. - С. 85-88. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protssessa-vibrodiagnostirovaniya-tehnicheskogo-sostoyaniya-gornogo-oborudovaniya> (дата обращения: 03.04.2023).

30. Голдовская А.А. Актуальность создания и применения системы теплового контроля асинхронных тяговых электродвигателей / А. А. Голдовская, Е. С. Дорохина. - Текст : электронный // Доклады ТУСУРа. - 2014. - №2. - С. 315-318. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-sozdaniya-i-primeneniya-sistemy-teplovogo-kontrolya-asinhronnyh-tyagovyh-elektrodvigatelye/viewer> (дата обращения: 11.04.2023).

31. Хомутов О.И. Параметры теплового режима асинхронного электродвигателя для прогнозирования остаточного ресурса работы / О. И.

Хомутов, С. О. Хомутов. - Текст : электронный // Ползуновский вестник. - 2004. - №1. - С. 279-284. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-teplovogo-rezhima-asinhronnogo-elektrodvigatelya-dlya-prognozirovaniya-ostatochnogo-resursa-raboty/viewer> (дата обращения: 28.03.2024).

32. Сильвашко, С.А. Спектрально-импульсные методы повышения разрешающей способности информационно-измерительных систем контроля асинхронных микродвигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Сильвашко Сергей Анатольевич. – Оренбург, 2013. – 159 с.

33. Wu, L. A reliable rotor eccentricity detection scheme for induction machines in the presence of a position dependent load torque oscillation / L. Wu, T.G. Habetler, R.G. Harley // IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2007. – pp. 83-88.