

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)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка системы мониторинга электродвигателей системы охлаждения
силовых масляных трансформаторов

Обучающийся

В.В. Чиндин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

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

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| 1 Температура наиболее нагретой точки, системы мониторинга и управления системой охлаждения силового трансформатора..... | 9 |
| 1.1 Влияние температуры на техническое состояние силового трансформатора..... | 9 |
| 1.2 Решения применяемые на практике..... | 11 |
| 2 Неисправности асинхронного электродвигателя и методы их обнаружения..... | 22 |
| 2.1 Дефект клетки ротора..... | 22 |
| 2.2 Эксцентриситет..... | 24 |
| 2.3 Межвитковые замыкания в обмотке статора..... | 29 |
| 2.4 Дефекты подшипников..... | 30 |
| 3 Применение методики оценки технического состояния асинхронных электродвигателей в режиме реального времени..... | 34 |
| 3.1 Испытательный стенд..... | 34 |
| 3.2 Исследуемые асинхронные электродвигатели..... | 37 |
| 3.3 Анализ записанных файлов и выявление неисправностей..... | 45 |
| Заключение..... | 67 |
| Список используемой литературы и используемых источников..... | 71 |

Введение

Актуальность и научная значимость настоящего исследования обусловлены тем, что надежность электроэнергетической системы (ЭЭС) в значительной степени зависит от уровня технического состояния силового трансформатора. Силовые трансформаторы играют ключевую роль в обеспечении стабильной работы ЭЭС, и их работоспособность напрямую влияет на общую надежность всей системы. Одним из основных факторов, определяющих надежность масляного трансформатора, является температура наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки. Температура ННТ является критическим параметром, так как она отражает эффективность работы системы охлаждения трансформатора [43].

Асинхронные электродвигатели (АД) выступают в качестве основных агрегатов, приводящих в движение системы охлаждения силовых масляных трансформаторов с типами охлаждения Ц и ДЦ [6]. Эти двигатели также используются в приводах устройств регулировки под нагрузкой, обеспечивая их корректное функционирование. Однако условия эксплуатации асинхронных машин часто бывают далеки от идеальных. Они могут работать в замкнутых, запыленных помещениях с низким качеством электроэнергии и под нагрузками, превышающими допустимые значения [21]-[22]. Столь агрессивные условия могут привести к преждевременному выходу оборудования из строя, что негативно сказывается на надежности всей системы.

На рисунке 1 представлена классификация возможных повреждений асинхронного электродвигателя, возникающих в процессе эксплуатации. Эти повреждения могут включать механические износы, перегрев обмоток, коррозию и другие проблемы, связанные с неблагоприятными условиями работы [25]. Анализ и понимание этих повреждений позволяют разработать меры по улучшению эксплуатации и обслуживанию асинхронных

электродвигателей, что в конечном итоге способствует повышению надежности электроэнергетической системы в целом.

Таким образом, исследование надежности силовых трансформаторов и асинхронных электродвигателей, а также факторов, влияющих на их эксплуатационные характеристики, имеет высокую актуальность и научную значимость. Улучшение этих аспектов позволит повысить эффективность и устойчивость работы электроэнергетических систем, что является важным шагом в развитии современных технологий и инфраструктуры [10].

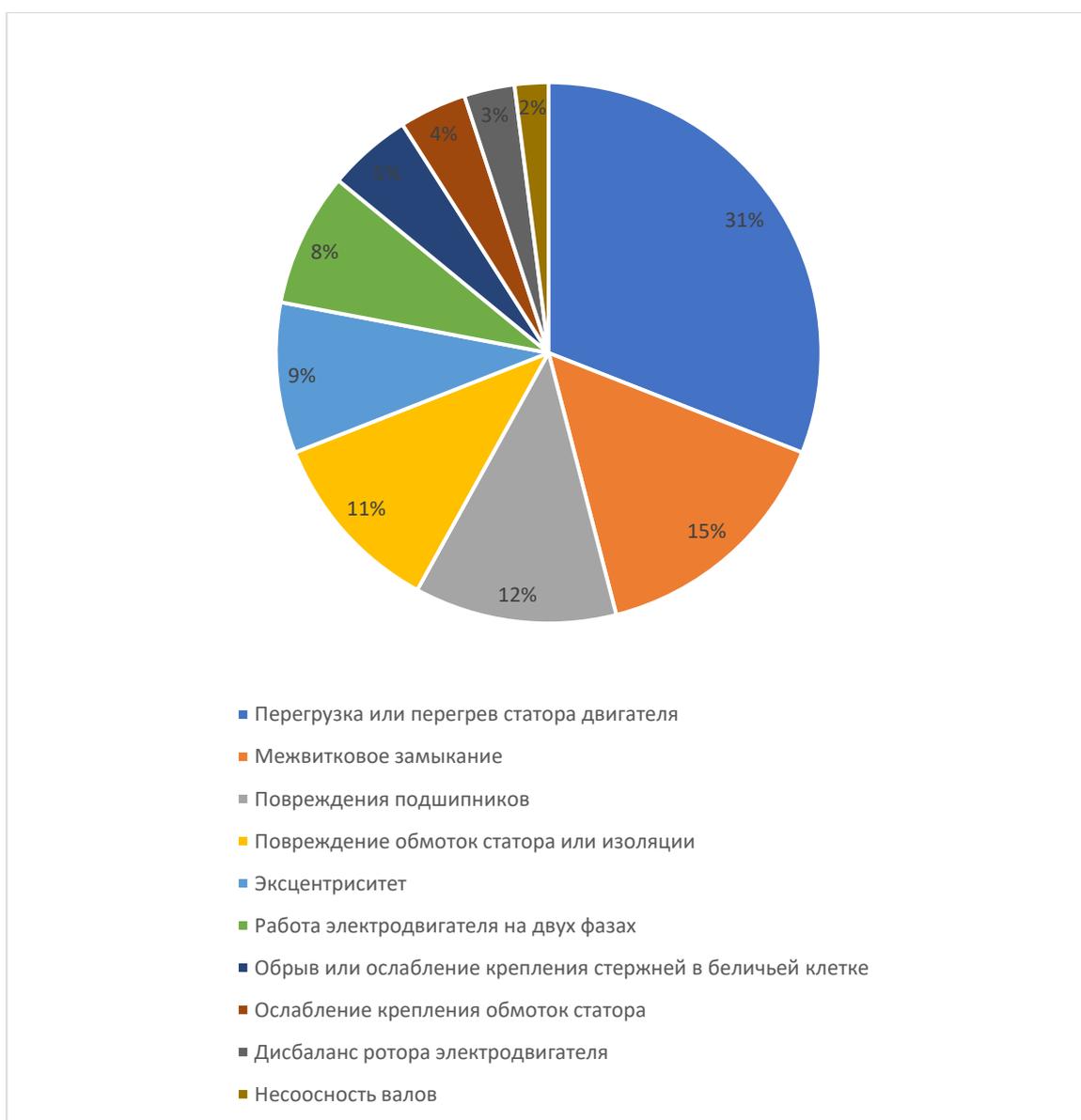


Рисунок 1 – Повреждения АД

На основании проведенного анализа причин выхода из строя асинхронных электродвигателей можно определить три основные категории неисправностей: внутренние, внешние и электрические [12].

К внешним неисправностям АД относятся:

- обрыв одного или нескольких питающих проводов;
- неверная схема подключения обмоток;
- колебания напряжения питающей сети;
- перегрузка двигателя, приводящая к его перегреву и ускоренному износу;
- плохая вентиляция, вызывающая перегрев и сокращение срока службы двигателя.

Внутренние неисправности включают следующие повреждения:

- дефект подшипника;
- неисправность вала ротора (якоря);
- глубокая выработка;
- трещины.

Электрические повреждения включают:

- межвитковые короткие замыкания;
- обрывы в обмотках;
- пробой изоляции;
- старение изоляции;
- распайка соединений;
- неправильная полярность полюсов;
- неправильные соединения в обмотках.

Понимание и классификация этих неисправностей позволяют более эффективно разрабатывать меры по профилактике и устранению проблем, связанных с эксплуатацией асинхронных электродвигателей [1]. Это, в свою очередь, способствует повышению надежности и долговечности электроэнергетических систем [2].

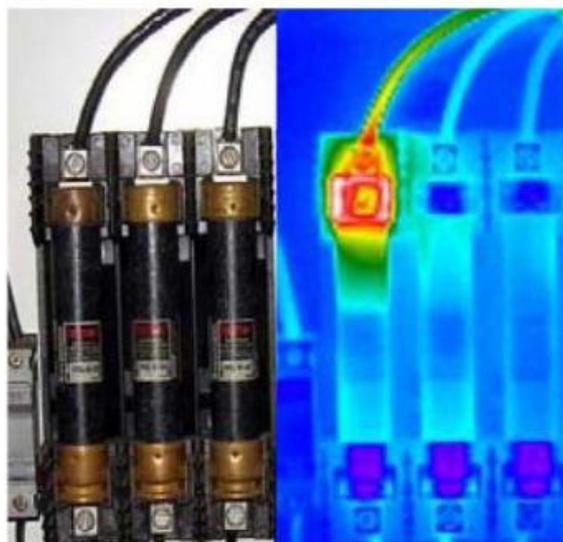


Рисунок 2 – Виды повреждений асинхронных машин

Стоит отметить, что асинхронные электродвигатели обладают высокой чувствительностью к состоянию своих узлов и компонентам, и неисправность одного узла может значительно повлиять на работу всей машины. Наблюдаемость технического состояния асинхронного электродвигателя и прогнозирование развития дефектов позволяют выявить зарождающиеся неисправности и предотвратить полное разрушение машины.

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР): создание системы мониторинга асинхронного электродвигателя с функциями предиктивной аналитики.

Предмет исследования: техническое состояние асинхронных электродвигателей по данным системы мониторинга.

Научная новизна: при разработке программного обеспечения мониторинга асинхронных электродвигателей было обращено внимание на уже имеющиеся методики оценки технического состояния асинхронных машин. В основу работы положены работы: Морозова А.Л., «Метод моментов дробного порядка и прибор на его основе для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей» [8], а также Радимова Н.В., Труднева С.Ю., Марченко А.А. Диагностика асинхронного электродвигателя для электроприводов тепловых насосов и компрессорных

установок методом спектрального анализа потребляемого тока с применением пакета Spectrumab [12].

Практическая значимость: используемые методики и программные решения направлены на снижение эксплуатационных затрат и рисков, связанных с аварийным выводом из работы масляного трансформатора по причине отказа системы охлаждения за счет повышения наблюдаемости скрытых дефектов асинхронных электродвигателей, приводящих в движение маслонасосы и воздушные вентиляторы. Разработанное программное обеспечение позволит в перспективе уйти от обслуживания по регламенту к обслуживанию на основе получаемых из системы данных что в значительной мере упростит проводимые работы и положительно скажется на снижении издержек эксплуатации.

Объект исследования: асинхронный электродвигатель, цифровой осциллограф, программное обеспечение.

Задачи ВКР:

- анализ методик определения повреждений асинхронного электродвигателя;
- разработка методики оценки технического состояния асинхронного электродвигателя с программной реализацией;
- создание программного обеспечения анализа асинхронного электродвигателя в режиме реального времени.

Внедрение такой системы обеспечит:

- раннее выявление дефектов: Система будет способна обнаруживать зарождающиеся неисправности до того, как они приведут к серьезным поломкам.
- повышение надежности и эффективности: Постоянный мониторинг и аналитика помогут оптимизировать режимы эксплуатации электродвигателей, продлевая их срок службы и снижая затраты на обслуживание.

- снижение эксплуатационных затрат: Прогнозируемое обслуживание на основе реальных данных позволит сократить частоту и стоимость ремонтов, а также уменьшить простои оборудования.

Создание и внедрение системы мониторинга с функциями предиктивной аналитики для асинхронных электродвигателей является важным шагом в повышении надежности и эффективности их эксплуатации [44].

Научная новизна исследования заключается в разработке и применении альтернативной методики оценки и прогнозирования фактического технического состояния асинхронных электродвигателей, которые входят в состав системы охлаждения силового трансформатора с типами охлаждения Ц и ДЦ. Эта методика позволяет определить текущее состояние электродвигателя и прогнозировать развитие скрытых дефектов, что предоставляет возможность своевременно запланировать ремонтные работы или замену агрегата.

Таким образом, предлагаемая методика оценки и прогнозирования технического состояния асинхронных электродвигателей, входящих в состав системы охлаждения силового трансформатора, представляет собой значительный шаг вперед в области повышения надежности и эффективности эксплуатации электроэнергетических систем. Это исследование вносит весомый вклад в развитие технологий мониторинга и предиктивного обслуживания, что особенно важно в современных условиях, когда требования к надежности и экономичности промышленных систем постоянно растут.

1 Температура наиболее нагретой точки, системы мониторинга и управления системой охлаждения силового трансформатора

1.1 Влияние температуры на техническое состояние силового трансформатора

Нагрузочная способность силового трансформатора во многом определяет его температурный режим. Распределение температуры масла относительно высоты обмотки представлена на рисунке 3 [45].

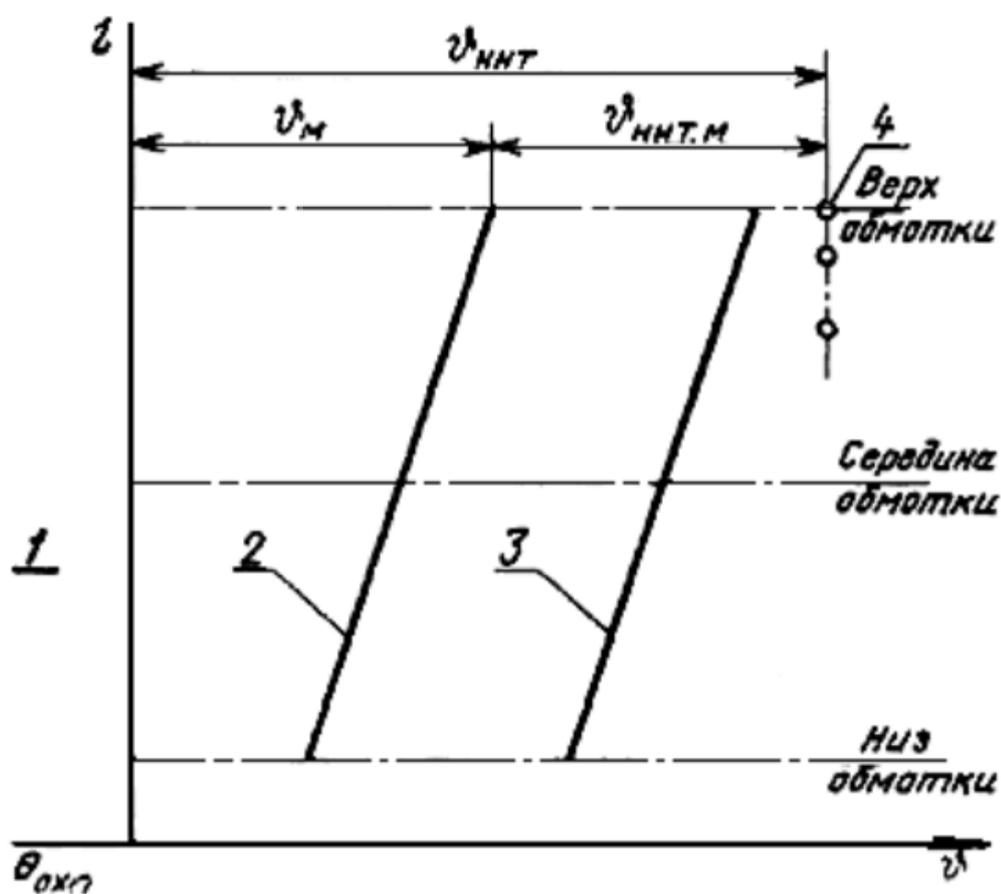


Рисунок 3 – Упрощенная схема распределения температуры трансформаторного масла

Регулярные превышения коэффициента нагрузки трансформатора могут привести к его повреждению и преждевременной деградации изоляции обмоток. Изоляция обмоток играет ключевую роль в надежности и долговечности трансформатора, и её состояние напрямую зависит от рабочей температуры. Зависимость скорости старения изоляции от температуры представлена в таблице 1, где видно, что повышение температуры значительно ускоряет процессы деградации изоляции.

Повышение температуры трансформатора может быть вызвано несколькими основными факторами:

- повышенные потери в сердечнике или обмотках. Потери в сердечнике и обмотках трансформатора увеличиваются при работе на высоких нагрузках, что приводит к выделению дополнительного тепла. Это тепло, в свою очередь, увеличивает общую температуру трансформатора;
- отсутствие надлежащей циркуляции трансформаторного масла. Трансформаторное масло используется для охлаждения и изоляции обмоток. Неправильная циркуляция масла может привести к неэффективному отводу тепла от обмоток, что вызывает повышение их температуры и ускорение старения изоляции;
- закупоривание масляных каналов. Масляные каналы внутри трансформатора обеспечивают циркуляцию масла. Закупорка этих каналов уменьшает поток масла, что снижает эффективность охлаждения и приводит к повышению температуры трансформатора.

Температура является одним из критических факторов, определяющих скорость старения изоляции обмоток трансформатора [41], [49]. Повышение температуры ускоряет химические реакции, приводящие к разложению изоляционного материала. Это может привести к следующим последствиям:

- снижение электрической прочности. Деградирующая изоляция теряет свои электрические свойства, что может привести к пробое и короткому замыканию;

- уменьшение механической прочности. Изоляция становится хрупкой и менее устойчивой к механическим воздействиям, что может привести к её повреждению при вибрациях и других механических нагрузках;
- повышение риска аварийных ситуаций. Повреждение изоляции может вызвать аварийные ситуации, такие как возгорание трансформатора или его выход из строя, что приведет к дорогостоящим ремонтам и простоям [31].

Таблица 1 – Зависимость старения изоляции обмоток трансформатора от температуры

| Температура трансформаторного масла, °С | Стандартная бумажная изоляция | Улучшенная бумажная изоляция |
|---|-------------------------------|------------------------------|
| 80 | 0,125 | 0,036 |
| 86 | 0,25 | 0,073 |
| 92 | 0,5 | 0,145 |
| 98 | 1,0 | 0,282 |
| 104 | 2,0 | 0,536 |
| 110 | 4,0 | 1,0 |
| 116 | 8,0 | 1,83 |
| 122 | 16,0 | 3,29 |
| 128 | 32,0 | 5,8 |
| 134 | 64,0 | 10,1 |
| 140 | 128,0 | 17,2 |

Согласно ИЕС 60076-7 (2018) «Трансформаторы силовые. Часть 7. Руководство по нагрузке масляных силовых трансформаторов», оптимальная температура трансформаторного масла в самой горячей точке не должна превышать 98°С для обычной бумажной изоляции и 110°С для улучшенной изоляции. При таких температурах коэффициент деградации изоляции обмоток трансформатора является наиболее оптимальным [23].

1.2 Решения применяемые на практике

На сегодняшний день производители систем мониторинга систем

охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением добавляют в свои устройства помимо функций слежения за температурой трансформаторного масла и температурой наиболее нагретой точки, функцию управления системой охлаждения [31]. При достижении определенного температурного порога система мониторинга может задействовать дополнительные группы охлаждения, включающие маслонасосы и вентиляторы, для снижения текущего температурного значения. Это позволяет эффективно управлять тепловым режимом трансформатора и предотвращать перегрев [40].

На российском рынке существует несколько ведущих производителей систем мониторинга систем охлаждения силового трансформатора. К ним относятся:

Dimrus. Компания специализируется на разработке и производстве систем мониторинга и диагностики для энергетического оборудования, предлагая решения, которые обеспечивают высокую точность измерений и надежность работы [16].



Рисунок 4 – Система мониторинга силового трансформатора от компании «Димрус»

Пергам Инжиниринг. Этот производитель предлагает широкий спектр решений для мониторинга и управления состоянием трансформаторов, включая системы, которые могут автоматически регулировать режим охлаждения в зависимости от текущих условий работы [17].



Рисунок 5 – Система мониторинга силового трансформатора от компании «Пергам инжиниринг»

Мирономика. Компания известна своими подходами и разработками в области мониторинга и управления энергетическим оборудованием. Их системы отличаются степенью интеграции и возможностью адаптации под конкретные условия эксплуатации [19].



Рисунок 6– Система мониторинга силового трансформатора от компании «Мирономика»

Устройства мониторинга систем охлаждения силовых трансформаторов от таких производителей, как Dimrus, Пергам Инжиниринг и Мирономика, включают следующие функции:

- контроль температуры масла на входе и выходе охладителя. Это позволяет оценить эффективность охлаждения и своевременно выявлять отклонения в работе системы;
- контроль расхода масла в охладителях. Мониторинг расхода масла помогает поддерживать оптимальный режим охлаждения и предотвращать перегрев трансформатора;
- подсчет моточасов и пусков. Эта функция позволяет отслеживать режимы работы трансформатора, что важно для планирования технического обслуживания и замены оборудования;
- управление системой охлаждения. Устройства могут управлять различными системами охлаждения (Д, ДЦ, Ц, М/Д/ДЦ), автоматически включая или отключая маслонасосы и вентиляторы в зависимости от текущих условий эксплуатации;
- контроль наиболее нагретой точки. Температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора является критическим показателем,

который напрямую влияет на срок службы изоляции и надежность работы трансформатора.

1.3 Методы оценки температуры наиболее нагретой точки

1.3.1 Косвенные методы оценки

Косвенные методы оценки температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора включают расчет температуры на основе следующих параметров:

- температура масла на входе в охладитель. Этот параметр дает представление о начальной температуре охлаждающей жидкости;
- температура окружающей среды. Внешние условия существенно влияют на эффективность охлаждения;
- коэффициент нагрузки. Увеличение нагрузки приводит к росту тепловыделения в обмотках трансформатора;
- удельная теплоемкость трансформаторного масла. Этот параметр определяет способность масла поглощать и отводить тепло.

1.3.2 Прямые методы оценки

Прямые методы оценки температуры наиболее нагретой точки включают непосредственное измерение температуры с помощью оптических датчиков, установленных на обмотках трансформатора. Эти датчики обеспечивают точные данные о текущей температуре, что позволяет более эффективно управлять системой охлаждения и предотвращать перегрев [26].

В трансформаторах с сердечником горячая точка обычно расположена в верхней части обмоток. Если обмотки охлаждаются осевым масляным потоком, наиболее вероятным местом является диск номер 1 или 2, если смотреть сверху. При охлаждении обмоток зигзагообразным потоком масла один из первых трех верхних дисков является наиболее вероятным местом. Следовательно, следует отметить, что расположение горячей точки специфично для трансформатора и сильно зависит от конструкции

трансформатора.

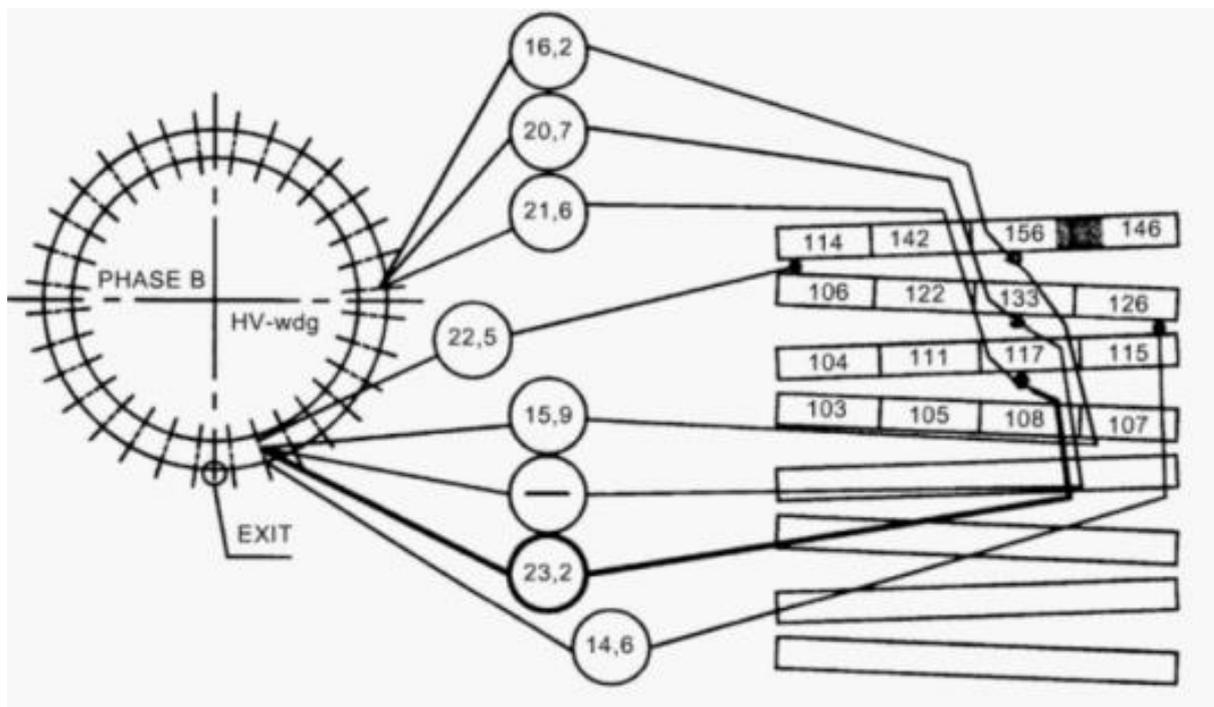


Рисунок 7 – Схематичное расположение оптических датчиков в обмотке трансформатора

Несмотря на важность оценки технического состояния и эффективности работы системы охлаждения силового трансформатора, производители систем мониторинга часто игнорируют мониторинг асинхронных электродвигателей и прогнозирование развития в них неисправностей. Однако контроль технического состояния приводов насосов и вентиляторов, которые составляют группы охлаждения трансформаторов, напрямую влияет на их эксплуатационный период [36].

В большинстве случаев системы мониторинга, представленные на рынке, работают по следующему принципу:

- сбор информации. На вход поступает информация с первичных датчиков и SCADA систем, включающая данные о температуре верхних и нижних слоев масла, температуре окружающей среды, напряжении, токе и других параметрах;

- расчет температуры наиболее нагретой точки. Система использует математическую модель для расчета температуры наиболее нагретой точки, независимо от того, поступает ли информация от датчика температуры, установленного непосредственно в обмотку трансформатора;
- учет типа системы охлаждения и коэффициента нагрузки. При расчете температуры наиболее нагретой точки система принимает во внимание тип системы охлаждения трансформатора (М, Д, Ц, ДЦ, НДЦ, НЦ) и коэффициент нагрузки на момент расчета. Расчет производится по соответствующим формулам (1-2):

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left(\frac{1 + R \cdot K}{1 + R} \right) + H_{qr} \cdot K^y \quad (1)$$

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left(\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} \right) + 2(\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br}) \cdot K^y + H_{qr} \cdot K^y \quad (2)$$

где θ_h - температура наиболее нагретой точки;

θ_a – температура охлаждающей среды;

$\Delta\theta_{br}$ – повышение температуры в нижней части обмотки;

R – отношение потерь;

K – коэффициент мощности;

$\Delta\theta_{imr}$ – превышение средней температуры масла;

H_{qr} – превышение температуры масла в верхней части обмотки;

y – показатель степени обмотки.

- сравнение с предельно допустимыми значениями. Расчетное значение температуры наиболее нагретой точки сравнивается с предельно допустимыми значениями для конкретного типа охлаждения, вида изоляционной бумаги и мощности трансформатор;
- реакция системы мониторинга. В зависимости от полученного значения система мониторинга может либо выдать рекомендации

диспетчерскому персоналу о необходимости включения или отключения дополнительных групп охлаждения, либо непосредственно произвести включение или отключение дополнительных масляных насосов и вентиляторов.

Тем не менее несмотря на широкий выбор систем мониторинга и управления системой охлаждения силового трансформатора производители, которые все такие производят системы мониторинга электродвигателей не интегрируют функцию мониторинга электродвигателей в основную систему мониторинга охлаждения выпуская устройства оценки технического состояния ЭД в виде отдельных приборов, которые представляется использовать в динамическом режиме либо в статическом. Таковым прибором является устройство «FDM» от компании «Димрус».



Рисунок 8– Устройство мониторинга асинхронных электродвигателей от компании «Димрус»



Рисунок 9 – Устройство оценки технического состояния асинхронных машин от компании «БО-ЭНЕРГО»

Выводы по разделу.

Температурный режим силового трансформатора является критическим фактором, определяющим его надежность и долговечность. Проанализировано влияние температуры на техническое состояние трансформатора и методы мониторинга и управления системой охлаждения, а также современные решения в этой области.

Установлено, что увеличение температуры наиболее нагретой точки трансформатора существенно влияет на скорость старения изоляции обмоток. Регулярное превышение допустимых температур может привести к ускоренной деградации изоляции, что в свою очередь снижает электрическую и механическую прочность трансформатора, повышает риск аварийных ситуаций и сокращает его срок службы [50].

Определены факторы, влияющие на повышение температуры наиболее нагретой точки трансформатора способные значительно повысить

температуру как наиболее нагретой точки, так и трансформатора в целом, что требует тщательного мониторинга и своевременного вмешательства.

Факторы влияющие на повышение температуры силового трансформатора:

- повышенные потери в сердечнике и обмотках при высоких нагрузках;
- неправильная циркуляция трансформаторного масла;
- закупорка масляных каналов, снижающая эффективность охлаждения.

Показано, что использование систем мониторинга и управления охлаждением трансформатора позволит снизить вероятность отказа трансформатора из-за перегрева.

По результатам анализа современных систем мониторинга, включающих в себя функции контроля температуры трансформаторного масла, управления системой охлаждения, и мониторинга наиболее нагретой точки определено, что на российском рынке выделяются такие производители, как Dimgus, Пергам Инжиниринг и Мирономика.

Выделенные производители предлагают надежные и высокоточные решения для мониторинга и управления системой охлаждения силовых трансформаторов.

Проанализированы существующие методы оценки температуры наиболее нагретой точки, которые классифицированы как:

- косвенные методы, включают расчет температуры на основе параметров, таких как температура масла, температура окружающей среды, коэффициент нагрузки и удельная теплоемкость масла;
- прямые методы предполагают непосредственное измерение температуры с помощью оптических датчиков, установленных на обмотках трансформатора.

Предложено практическое применение и реакция систем мониторинга: в составе современных системы мониторинга, интегрированных в SCADA-

системы. Такие системы способны собирать данные с первичных датчиков и вычислять температуру наиболее нагретой точки с учетом типа системы охлаждения и коэффициента нагрузки. На основе полученных данных система может рекомендовать оперативному персоналу действия по включению или отключению дополнительных групп охлаждения или автоматически управлять масляными насосами и вентиляторами для поддержания оптимального температурного режима. Кроме того, рассмотрены системы мониторинга технического состояния асинхронных электродвигателей, которые являются самостоятельными устройствами и не связаны с системами мониторинга охлаждения силовых трансформаторов с принудительным охлаждением. Примеры таких приборов включают «FDM» от компании «Димрус» и устройство «FLUXTRACII-R» от производителя «БО-ЭНЕРГО».

2 Неисправности асинхронного электродвигателя и методы их обнаружения

2.1 Дефект клетки ротора

При выявлении дефектов клетки ротора в АД учитываются не только методики основанные на учете тока в статоре, который зависит от мощности и сопротивления, а также магнитное поле, которое создается вращением ротора. Суть метода сводится к тому, чтобы выявить ток статора и наведенный ток ротора [24], [26].

При наличии неисправности метод позволяет выявить помимо основной частоты питающей сети боковые полосы, которые характерны для дефекта клетки ротора. Выявленные боковые полосы при неисправной клетке ротора представлены на рисунке 5.

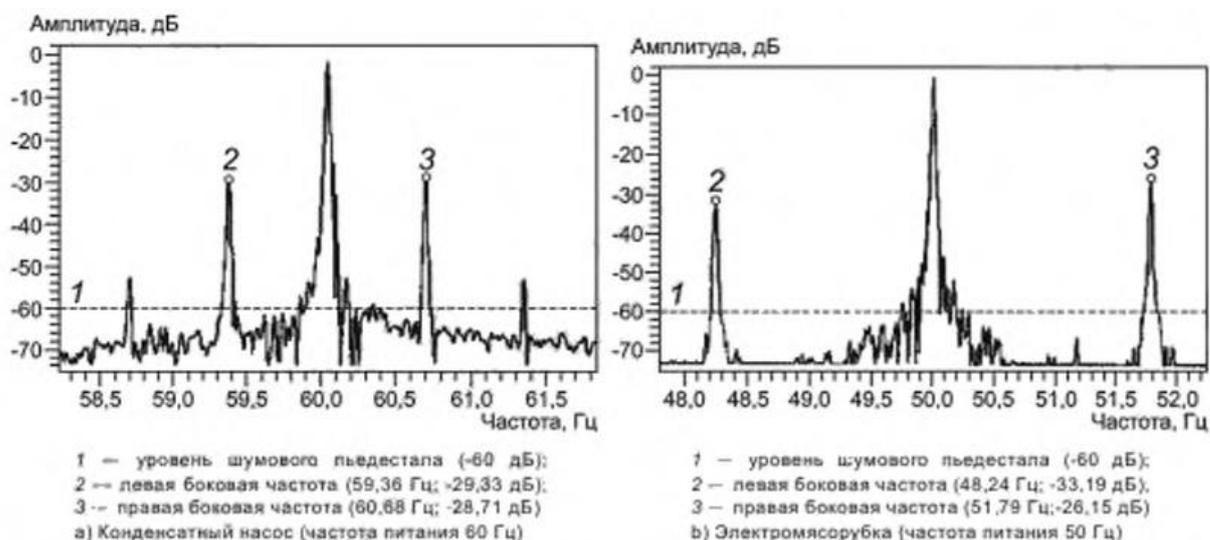


Рисунок 10 – Пример боковых полос при деформированной клетке ротора

Методика сигнатурного анализа зарекомендовала себя как достоверный и качественный способ определения дефектов клетки ротора в асинхронной машине в режиме реального времени. Ее распространение и интеграция в системы АСУ-ТП позволили повысить процент выявленных обрывов

стержней и трещин в кольцах короткозамкнутого ротора контролируемых асинхронных двигателей. Возникновение гармонических колебаний в неисправном электродвигателе, функционирующем в номинальном режиме, свидетельствует о наличии неисправности в обмотке ротора [28].

При использовании данной методики для диагностики асинхронного электродвигателя на предмет неисправности клетки ротора необходимо учитывать подаваемую мощность, электрическое сопротивление обмотки, а также индукцию, создаваемую магнитным полем при протекании тока в обмотке статора [27].

Как было сказано выше, асинхронные электродвигатели обладают высокой чувствительностью к состоянию своих узлов и компонентов, и неисправность одного узла может значительно повлиять на работу всей машины. Обмотка статора является индикатором, так как она особенно чувствительна к дефектам ротора. При использовании методики сигнатурного анализа необходимо точно разделять ток статора, необходимый для вращения ротора, от гармонических составляющих, возникающих из-за деформации ротора. Такое разделение возможно, если использовать анализ с минимально необходимым частотным разрешением, поскольку боковые полосы обычно образуются на небольшом расстоянии от основной гармоники питающей сети [29], [30].

$$f = (1 \pm 2ks) \cdot f_1, \quad (3)$$

где s – скольжение асинхронного двигателя;

f_1 – основная частота питающей сети;

k – номер частотной составляющей в боковой полосе, $k = 1, 2, 3, \dots$

Токи в обмотке ротора создают эффективное трехфазное магнитное поле с тем же числом полюсов, что и у магнитного поля статора, которое вращается с частотой скольжения относительно вращающегося ротора. При возникновении асимметрии токов в роторе появляется результирующее

вращающееся поле, отстающее на частоту вращения от частоты вращения ротора. Причинами такой асимметрии могут быть обрывы одного или нескольких стержней ротора или разрывы в короткозамыкающем кольце, препятствующие нормальному протеканию тока [48].

Можно показать, что «отстающее» магнитное поле вращается в том же направлении, что и ротор, с частотой, равной частоте тока питания обмоток статора, умноженной на коэффициент $(1 + 2S)$. Это приводит к появлению в обмотке статора, составляющей тока с частотой $(1 - 2S)f$, которая известна как нижняя боковая частота, вызванная обрывом стержня ротора. В свою очередь, данная составляющая вызывает модуляцию тока статора, что приводит к колебаниям вращающего момента ротора на удвоенной частоте скольжения $2Sf$, и соответствующим колебаниям скорости вращения ротора. Эти колебания скорости вращения ротора вызывают появление составляющей на верхней боковой частоте $(1 + 2S)f$ в токе статора [48].

Таким образом, обрыв стержня ротора приводит к появлению боковых частот f_{sb} в токе статора, которые можно вычислить по формуле 4:

$$f_{sb} = (1 \pm 2s) \cdot f_1 \quad (4)$$

где f - частота питания обмоток статора,

s - коэффициент скольжения.

2.2 Эксцентриситет

В асинхронном двигателе есть три оси: ось симметрии ротора O_r , ось симметрии статора O_s и ось вращения ротора O_w , которые в идеальном состоянии совпадают друг с другом. Если существует эксцентриситет, то происходит смещение любой из осей относительно двух других осей или смещение всех осей [4]. Эксцентриситет приводит к неравной длине воздушного зазора по окружности статора и ротора. Эта неравная длина

воздушного зазора может быть статической или динамической в зависимости от типа эксцентриситета. Если ось симметрии статора O_s отделена от двух других осей, минимальная/максимальная длина воздушного зазора является статической и называется статическим эксцентриситетом. Если ось симметрии ротора O_r отделена от двух других осей, а минимальная/максимальная длина воздушного зазора динамически перемещается, то это динамический эксцентриситет. Если все три оси разделяются, то это смешанный эксцентриситет.

В асинхронном двигателе есть три оси: ось симметрии ротора O_r , ось симметрии статора O_s и ось вращения ротора O_w , которые в идеальном состоянии совпадают друг с другом. Если существует эксцентриситет, то происходит смещение любой из осей относительно двух других осей или смещение всех осей [4]. Эксцентриситет приводит к неравной длине воздушного зазора по окружности статора и ротора. Эта неравная длина воздушного зазора может быть статической или динамической в зависимости от типа эксцентриситета. Если ось симметрии статора O_s отделена от двух других осей, минимальная/максимальная длина воздушного зазора является статической и называется статическим эксцентриситетом. Если ось симметрии ротора O_r отделена от двух других осей, а минимальная/максимальная длина воздушного зазора динамически перемещается, то это динамический эксцентриситет. Если все три оси разделяются, то это смешанный эксцентриситет. Три типа эксцентриситета показаны на рисунке 11.

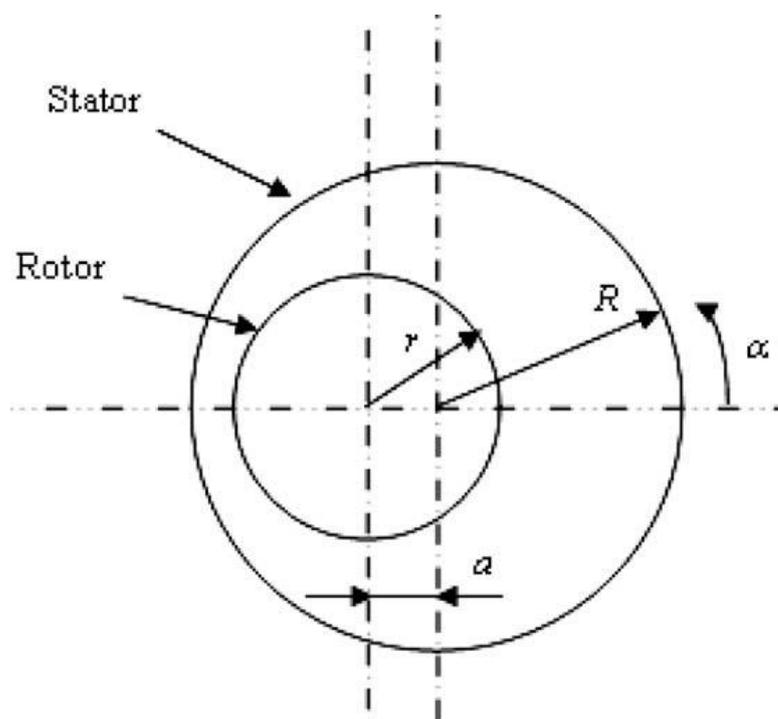


Рисунок 11 – Ротор с эксцентрической опорой
Причины, вызывающие эксцентриситет, описаны ниже [3]-[4]:

- работа двигателя на критической скорости;
- неправильное расположение ротора и статора во время изготовления;
- механический резонанс при критической нагрузке;
- овальное внутреннее сечение статора;
- неправильное расположение осей нагрузки и вала ротора;
- износ шарикоподшипников.

Из-за эксцентриситета между ротором и статором возникает радиальное неуравновешенное магнитное притяжение, которое усиливает степень эксцентриситета внутри двигателя. Создается огромная нагрузка на машину, что приводит к износу шарикоподшипников. Кроме того, нежелательные вибрации возникают в обмотках статора из-за радиальных магнитных сил, вызванных эксцентриситетом. Хуже всего, когда эксцентриситет вызывает трение ротора о статор, что приводит к необратимому повреждению сердечника статора и сепаратора ротора [7], [8].

Вот некоторые негативные последствия для характеристик двигателя, вызванные эксцентриситетом:

- увеличиваются потери мощности, из-за чего снижается КПД;
- повышается температура обмоток;
- общий средний крутящий момент уменьшается;
- колебания скорости и крутящего момента увеличиваются.

Любое изменение от нормальной работы двигателя, которое можно измерить, может служить показателем неисправности для обнаружения и диагностики неисправностей. Идеальный индекс может давать результаты во всех возможных условиях. Но иногда может случиться так, что мы измеряем изменение индекса или физической величины из-за одновременного существования двух или более неисправностей. Тогда нам нужен такой индекс, который показывает изменения в результате одной неисправности и остается неизменным в результате другой неисправности. Это поможет нам в отдельной диагностике одновременно существующих двух или более неисправностей. Для измерения различных индексов требуются различные датчики и преобразователи. Поэтому можно провести сравнение между индексами на основе простоты измерения, точности обнаружения и диагностики неисправности, поведения индекса при колебаниях нагрузки, магнитном насыщении машины, колебаниях напряжения и дисбалансе напряжения [33]. Основная цель данной работы - провести сравнение между различными индексами неисправностей, чтобы предоставить исследователю полную информацию о том, какой индекс будет лучше всего подходить для преобладающих условий и постановки эксперимента.

Эксцентриситет воздушного зазора можно выявить по характерным частотным компонентам в спектре тока. Эти частоты, обозначаемые как f_{ec} , могут быть рассчитаны по формуле (5).

$$f_{ec} = f_1 \cdot \left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \mu_{ws} \right) \pm f_1 \left(\frac{1-s}{p} \right) \quad (5)$$

где f_1 – частота питания;

R_s – число пазов (стержней) ротора;

μ_{ws} – нечетное целое число, $\mu_{ws} = 1, 3, \dots$;

s – скольжение асинхронного двигателя;

p – число пар полюсов.

Правая часть формулы (5) состоит из двух слагаемых: частоты прохождения пазов ротора, определяемой по формуле:

$$f_{rs} = f_1 \left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \mu_{ws} \right) \quad (6)$$

и субгармоники частоты вращения ротора f_r , определяемой по формуле:

$$f_r = f_1 \left(\frac{1-s}{p} \right) \quad (7)$$

Таким образом, диагностическими признаками эксцентриситета воздушного зазора являются частоты прохождения пазов ротора и их боковые частоты, отстоящие на величину f_r . Опыт показывает, что выявить эксцентриситет воздушного зазора проще всего в трехфазных асинхронных двигателях с ротором, не имеющим скошенных пазов [11]. Это объясняется тем, что скошенные пазы ротора уменьшают амплитуды магнитного потока на частотах прохождения пазов ротора, что снижает действующие в двигателе электромагнитные силы, вибрацию сердечника статора и акустический шум.

Для обнаружения и измерения частот прохождения пазов ротора и их боковых составляющих применяются измерительные устройства, использующие преобразование Фурье с высоким разрешением по частоте. Оценка эксцентриситета воздушного зазора в двигателе проводится следующим образом:

- определяют частоту прохождения пазов ротора с максимальной амплитудой;
- вычисляют разность между амплитудой этой составляющей и полусуммой амплитуд на ее боковых частотах, отстоящих на величину f_r (все расчеты выполняются для логарифмических значений).

Чем больше эта разность, тем значительнее эксцентриситет воздушного зазора между ротором и статором [15], [20].

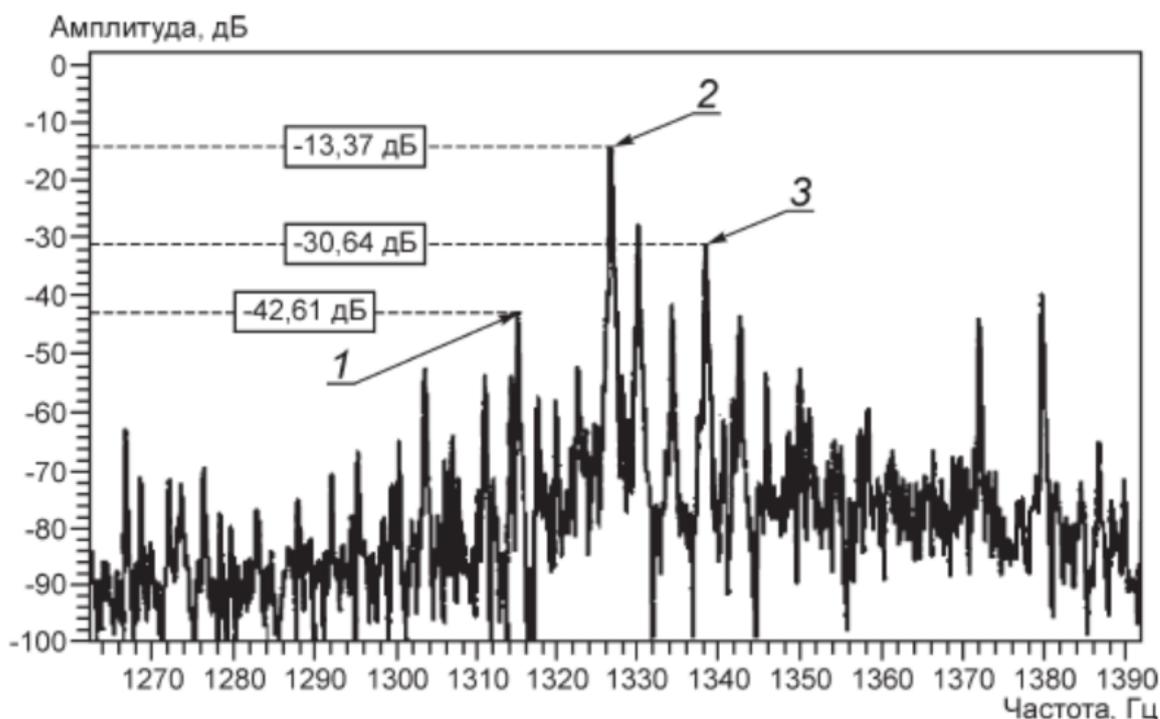


Рисунок 12 – Частотная характеристика АД при эксцентриситете

2.3 Межвитковые замыкания в обмотке статора

Так же, как и при деформации клетки ротора в случае обрыва стержней, при возникновении межвитковых замыканий в обмотке статора могут возникать гармонические колебания, характерные для данного типа неисправности асинхронного электродвигателя. Межвитковые замыкания часто происходят из-за неправильной эксплуатации АД, вызванной частыми

перегревами и повышенной нагрузкой. В таких случаях выявление составляющих тока f_{st} при межвитковых замыканиях возможно по формуле:

$$f_{st} = f_1 \left[\frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad (8)$$

где f_1 – частота питания;

n – нечетное целое число, $n = 1, 3 \dots$;

k – нечетное целое число, $n = 1, 3 \dots$;

p – число пар полюсов;

s – скольжение асинхронного двигателя.

2.4 Дефекты подшипников

Разные дефекты подшипника качения обуславливают появление в токе статора составляющих на характерных частотах (диагностических признаков). Эти частоты зависят от размеров подшипника, вида и места повреждения. Контроль составляющих на характерных частотах позволяет выявить дефекты внутренней и внешней дорожек качения, а также тел качения. В таблице 2 приведены формулы для расчета характерных частот в случае шарикового подшипника с известными размерами и известным числом тел качения [32].

Таблица 2 – Расчет частот для определения дефектов в подшипнике

| Место повреждения | Характерная частота |
|--------------------|---|
| Тело качения | $f_{sb} = \left(\frac{D_{pit}}{D_{ball}} \right) f_{rm} \left[1 - \left(\frac{D_{ball}}{D_{pit}} \cos \beta^2 \right) \right]$ |
| Внешняя дорожка | $f_{ro} = \left(\frac{n}{2} \right) f_{rm} \left[1 - \left(\frac{D_{ball}}{D_{pit}} \cos \beta \right) \right]$ |
| Внутренняя дорожка | $f_n = \left(\frac{n}{2} \right) f_{rm} \left[1 + \left(\frac{D_{ball}}{D_{pit}} \cos \beta \right) \right]$ |

В формулах таблицы 2 использованы следующие обозначения:

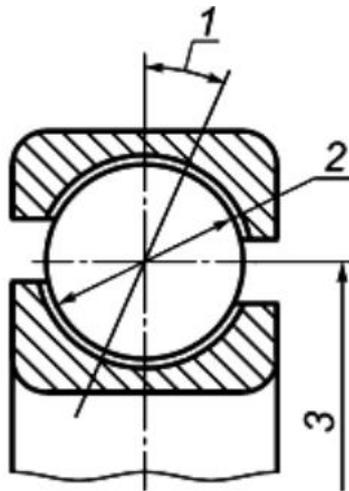
f_{rm} – частота вращения ротора;

n – число шариков в подшипнике;

β – угол контакта;

D_{pit} – диаметр окружности центров шариков;

D_{ball} – диаметр шарика.



1 - угол контакта; 2 - диаметр шарика D_{ball} ; 3 - диаметр окружности центров шариков D_{pit}

Рисунок 13 – Размеры шарикового подшипника

Если число шариков находится в диапазоне от 6 до 19, то для расчета характерных частот для дефектов внутренней и внешней дорожек подшипника можно использовать следующие формулы соответственно (9-10):

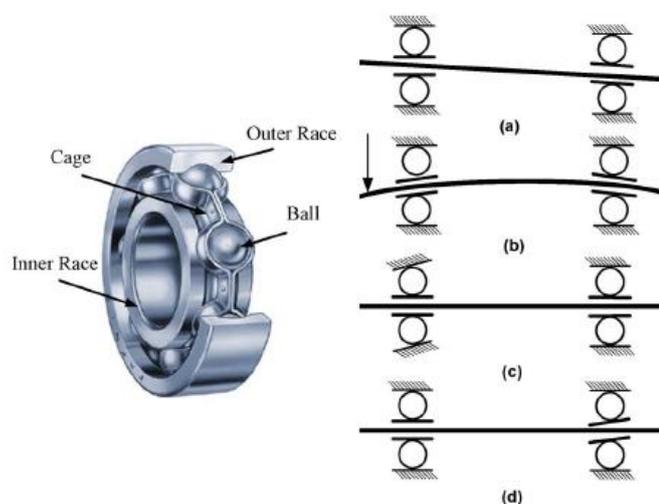
$$f_i = 0,6nf_{rm} \quad (9)$$

$$f_i = 0,4nf_{rm} \quad (10)$$

Формулы (9)-(10) можно использовать также для роликовых подшипников с числом роликов от 12 до 18 [34], [35].

Таким образом, с помощью средств измерений, позволяющих измерять и идентифицировать составляющие тока статора на характерных частотах, можно локализовать дефекты подшипников качения. Кроме того, старение подшипника и связанные с ним неисправности можно контролировать по тренду гармоник, связанных с характерными частотами [37], [38].

Ряд программных средств сигнатурного анализа тока содержит характеристики разных подшипников и позволяет рассчитывать характерные частоты для них по формулам таблицы 1.



а – несоосность; b - прогиб вала; c - перекошенное наружное кольцо; d - перекошенная внутренняя дорожка качения

Рисунок 14 – Типовые неисправности шарикоподшипника

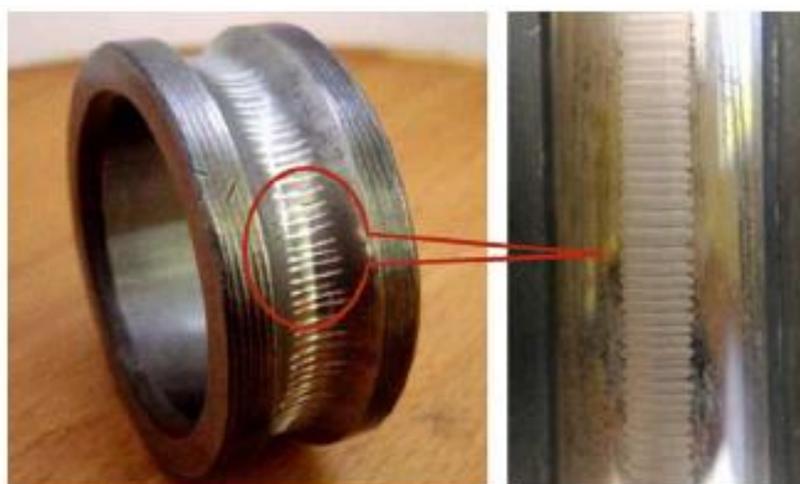


Рисунок 15 – Рифление подшипника

Вывод по разделу.

Во второй главе детально рассмотрены типичные неисправности асинхронных электродвигателей, а также методы их обнаружения и диагностики. Глава включает в себя анализ дефектов ротора, эксцентриситета воздушного зазора, межвитковых замыканий в обмотке статора и дефектов подшипников, подчеркивая важность своевременной диагностики для предотвращения серьезных поломок и обеспечения надежной работы оборудования.

Дефект клетки ротора.

Диагностика дефектов клетки ротора, таких как обрывы стержней и трещины в контактных кольцах, проводится с помощью сигнатурного анализа тока. Метод основывается на спектральном анализе тока обмотки статора, где при наличии неисправностей в роторе появляются характерные боковые полосы. Применение спектрального анализа с высоким разрешением позволяет эффективно выявлять такие дефекты, что способствует своевременному ремонту и снижению эксплуатационных затрат.

Эксцентриситет воздушного зазора определяется по частотным компонентам в спектре тока. Для диагностики используются частоты прохождения пазов ротора и их боковые частоты. Применение измерительных устройств с высоким разрешением по частоте позволяет точно выявлять и оценивать степень эксцентриситета, что важно для поддержания стабильной работы двигателя и предотвращения механических повреждений.

Межвитковые замыкания в обмотке статора приводят к появлению специфических частотных составляющих в спектре тока. Диагностика этих неисправностей осуществляется путем анализа сигнала тока с использованием преобразования Фурье. Это позволяет обнаруживать замыкания на ранних стадиях, предотвращая более серьезные повреждения и увеличивая срок службы электродвигателя.

Дефекты подшипников выявляются по характерным частотам, зависящим от размеров подшипника и места повреждения. Контроль частотных составляющих тока статора позволяет локализовать дефекты подшипников качения, что важно для предотвращения механических отказов и поддержания надежности работы электродвигателя. Программные средства анализа тока позволяют автоматически рассчитывать характерные частоты и отслеживать тренды их изменения, что способствует своевременному обслуживанию и замене изношенных подшипников.

3 Применение методики оценки технического состояния асинхронных электродвигателей в режиме реального времени

3.1 Испытательный стенд

Для определения технического состояния асинхронного электродвигателя необходимо проанализировать его токовую характеристику, выявить гармонические колебания и определить наличие или зарождение неисправности. Анализ токовых характеристик позволяет своевременно обнаруживать потенциальные проблемы и проводить необходимое обслуживание для предотвращения серьезных повреждений [12].

Для получения токовых характеристик была собрана испытательная установка, представленная на рисунке 16.

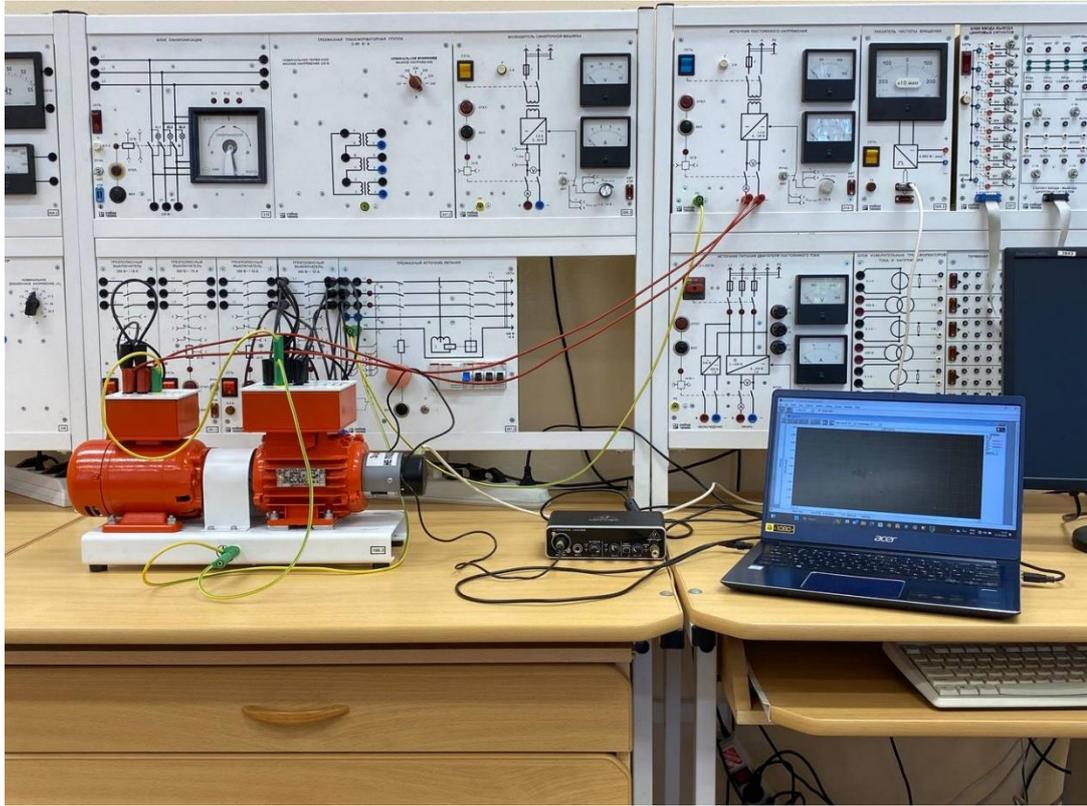


Рисунок 16 – Испытательная установка с поврежденным асинхронным двигателем

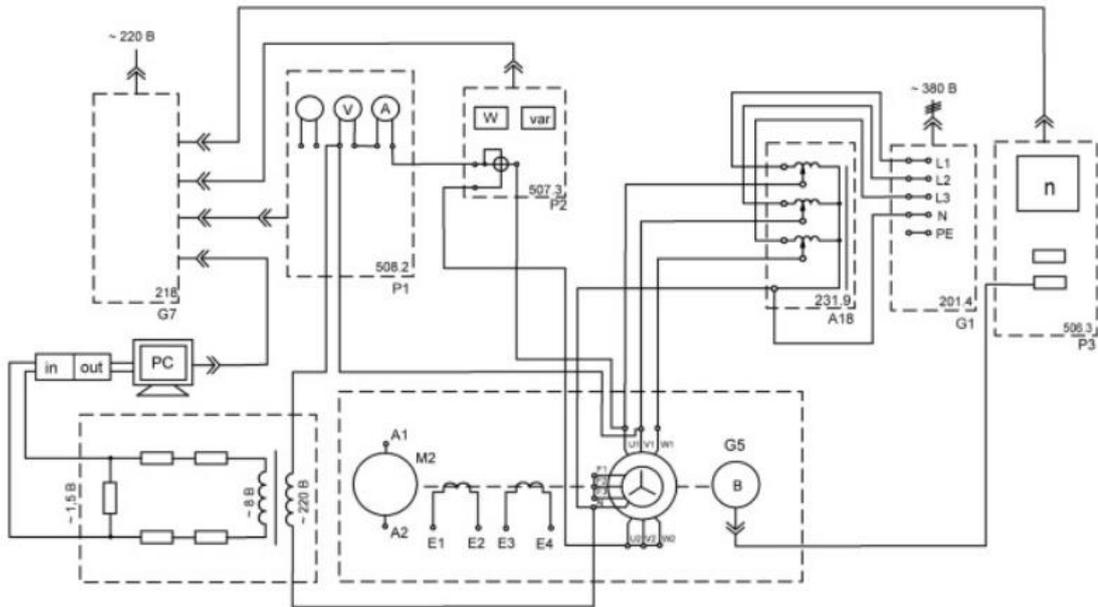


Рисунок 17 – Схема подключения асинхронного электродвигателя

Схема состоит из оборудования, представленного в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень оборудования испытательной установки

| Обозначение | Наименование | Параметры |
|-------------|---|---|
| G1 | трехфазный источник питания | $\sim 3 \times 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$ |
| G5 | преобразователь угловых перемещений | 6 выходных каналов / 2500 импульсов за оборот |
| G7 | однофазный источник питания | $\sim 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$ |
| M1 | машина переменного тока | 100 Вт / $\sim 230 \text{ В} / 1500 \text{ мин}^{-1}$ |
| M1 | машина переменного тока | 100 Вт / $\sim 230 \text{ В} / 1500 \text{ мин}^{-1}$ |
| P1 | блок мультиметров | 3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм |
| P2 | измеритель мощностей | 15; 60; 150; 300; 600 В / 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 А |
| P3 | указатель частоты вращения | -2000...0...2000 мин ⁻¹ |
| A18 | трехфазный регулируемый автотрансформатор | $\sim 3 \times 0 \dots 240 \text{ В} / 2 \text{ А}$ |
| | делитель напряжения | - |
| | внешняя звуковая карта | - |
| PC | персональный компьютер | Прикладное программное обеспечение SpectraLab |

В её состав входил асинхронный электродвигатель, подключенный к измерительным приборам и системе сбора данных. Исследование электрических параметров проводилось с помощью программного пакета Spectruman.

Spectruman представляет собой двухканальный анализатор спектра. При помощи звуковой карты и гальванической развязки он позволяет определить форму электрического сигнала в любой момент времени, а также определить спектр гармоник. Это программное обеспечение обеспечивает высокую точность и надежность измерений, что является ключевым фактором при диагностике состояния электродвигателя.

В качестве гальванической развязки использовался датчик тока SCT-013-000 УНДС, который был подключен к звуковой карте. Звуковая карта, в свою очередь, была подключена к персонализированному компьютеру.



Рисунок 18 – Датчик тока SCT-013-000 YHDC

Датчик тока SCT-013-000 YHDC предназначен для измерения переменного тока и обеспечивает изоляцию электрической цепи от измерительного оборудования, что предотвращает возможное повреждение оборудования.

3.2 Исследуемые асинхронные электродвигатели

Для проведения достоверного исследования токовых характеристик асинхронных электродвигателей, было решено использовать три однотипных двигателя модели АИР56А4У3, каждый из которых имел разные виды неисправностей. Это позволило минимизировать отклонения и несовпадения результатов, полученных в ходе экспериментов. Важно отметить, что для обеспечения точности измерений нагрузка на валу асинхронного двигателя должна быть номинальной. В связи с этим, для создания необходимого момента на валу использовался двигатель постоянного тока, возбуждаемый источником постоянного напряжения [21].

Параметры использованных двигателей представлены в таблице 3. Для проведения полноценного эксперимента по выявлению неисправностей в асинхронных электродвигателях, в их конструкцию были введены специально сформированные дефекты. Основными дефектами были выработка подшипника и биение на валу, созданное дополнительным весом и неправильной развесовкой грузов [22].

Таблица 3 – Характеристики исследуемых электродвигателей

| Параметр | Значение |
|------------------------------------|-------------|
| Мощн. кВт | 0,12 |
| Об/мин.* (синхр) | 1310 (1500) |
| Ток при 380В, А* | 0,44 |
| КПД %* | 57 |
| Коэф. мощн. | 0,72 |
| Ип/In | 4,4 |
| Мп/Мн | 2,2 |
| Мт/Мн | 2,1 |
| Момент Н·м | 0,87 |
| Момент инерц., кг·м ² * | 0,0005 |
| Масса, кг* | 5 |

Для проверки методики оценки технического состояния асинхронного электродвигателя при поврежденном подшипнике использовался шарикоподшипник с внесенным дефектом. В подшипнике было высверлено отверстие и удалено смазочное вещество, что создало дисбаланс. Поврежденный подшипник представлен на рисунке 19.



Рисунок 19 – Подшипник с внесенным дефектом

Третий электродвигатель был полностью исправен, и его токовая характеристика использовалась как эталон для сравнения с результатами, полученными от двух других двигателей. Устройство для создания дисбаланса в асинхронном электродвигателе показано на рисунке 20.

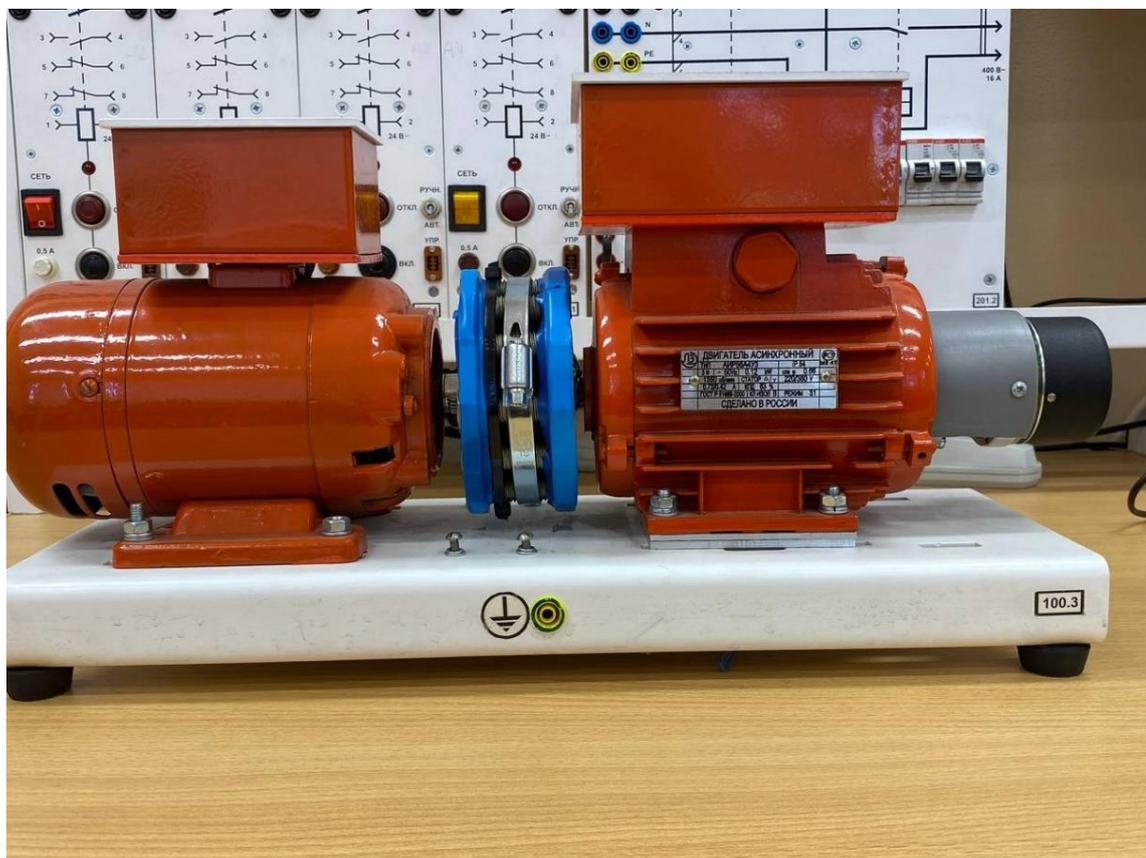


Рисунок 20 – Асинхронный электродвигатель с дисбалансом вала

В ходе эксперимента для записи токовых характеристик асинхронных электродвигателей были смоделированы несколько режимов работы. Двигатель постоянного тока, создававший момент на валу, был нагружен на 50% и 100%, что позволило наглядно продемонстрировать боковые полосы, характерные для конкретного вида неисправностей. В результате были записаны токовые характеристики трех асинхронных двигателей: двух с внесенными изменениями в их конструкцию и одного полностью исправного. Записанные результаты представлены на рисунках 21-30.

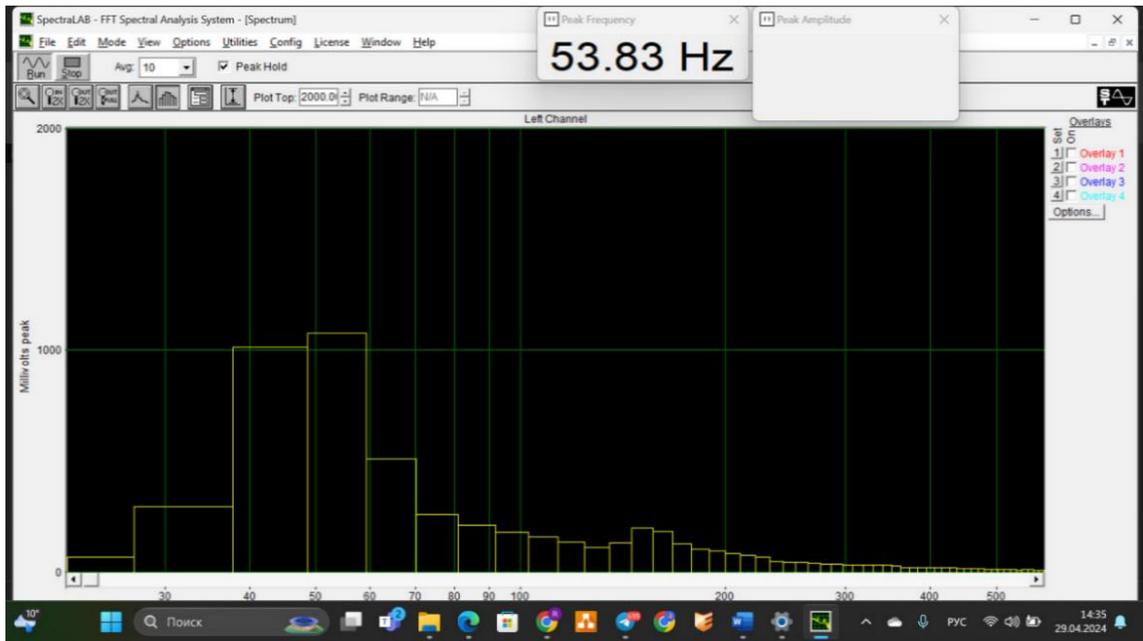


Рисунок 21 – Спектр асинхронного двигателя на холостом ходу

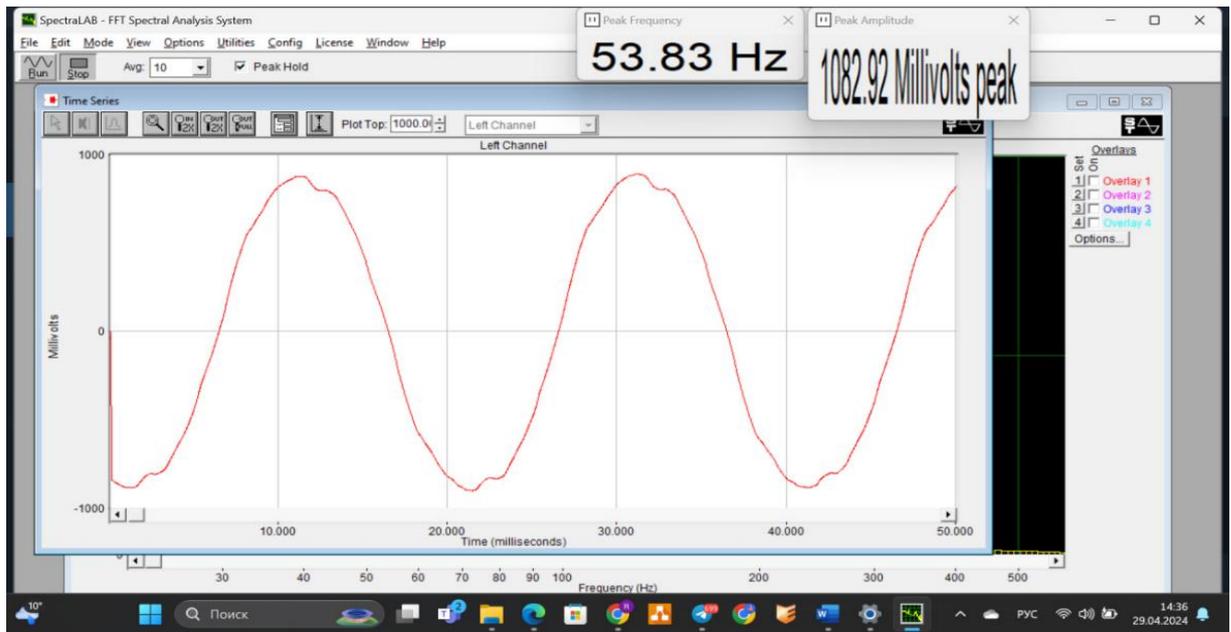


Рисунок 22 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с БПФ на холостом ходу

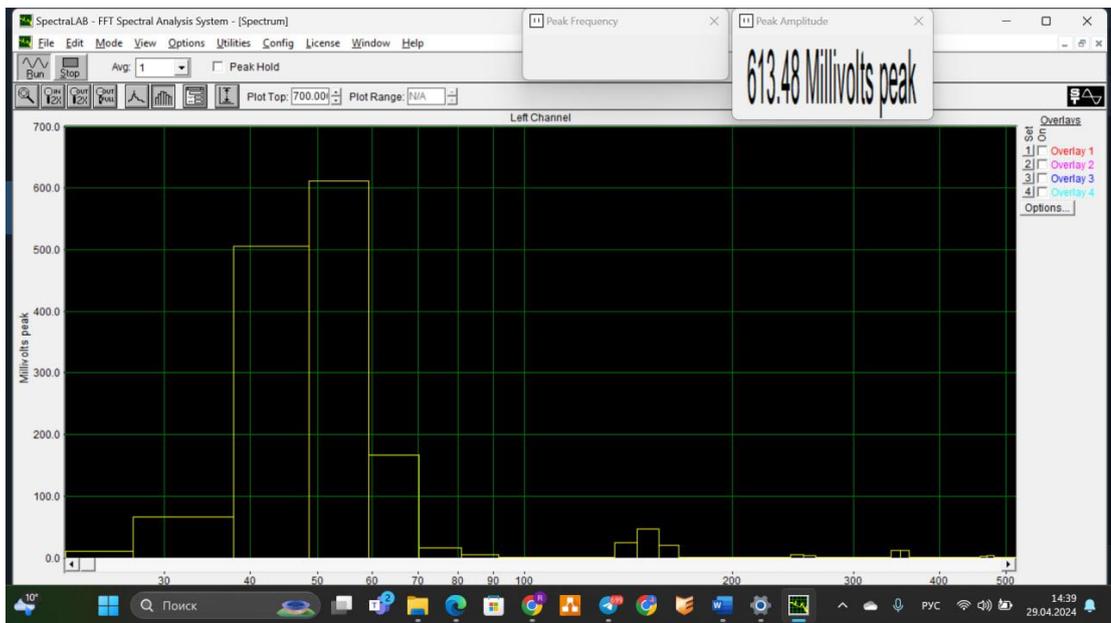


Рисунок 23 – Спектр асинхронного двигателя при 50% нагрузки

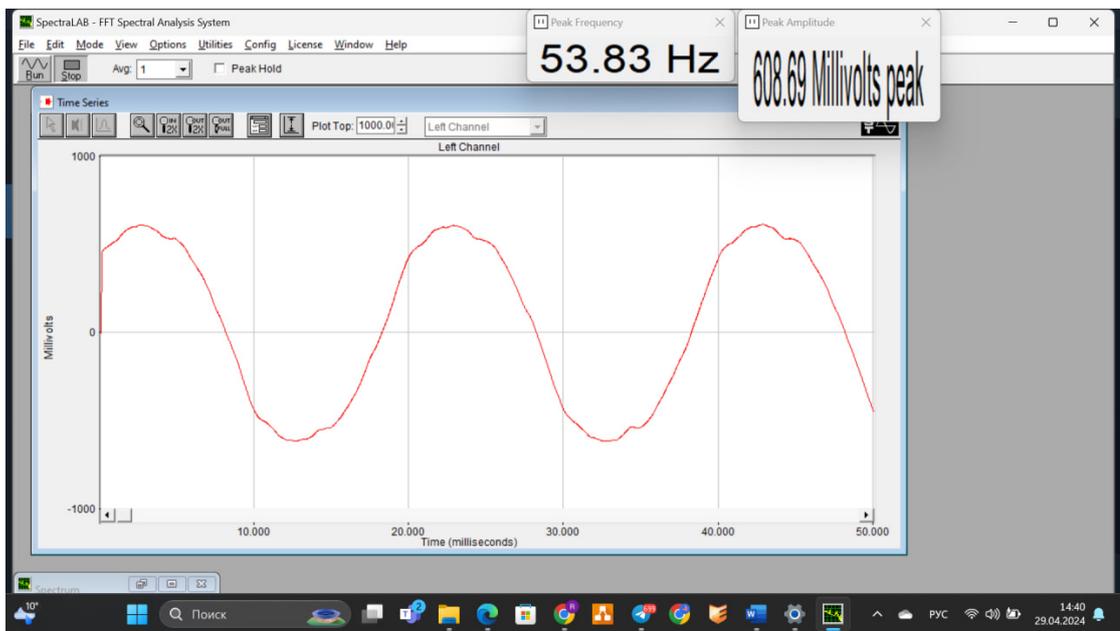


Рисунок 24 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с БПФ при 50% нагрузки на валу

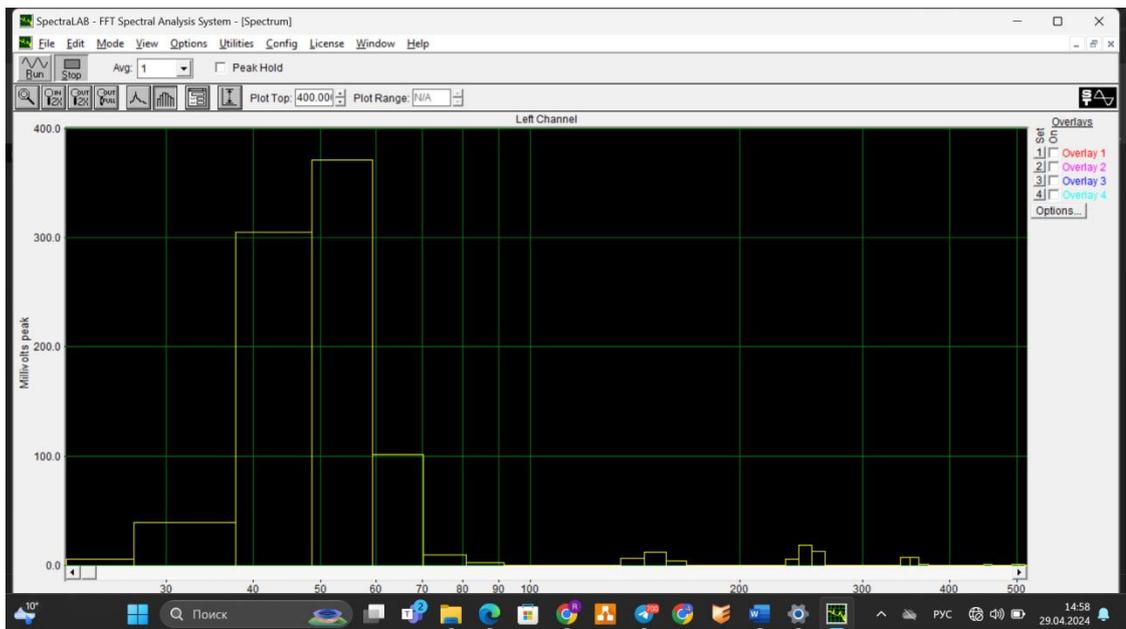


Рисунок 25 – Спектр асинхронного двигателя при 50% нагрузки

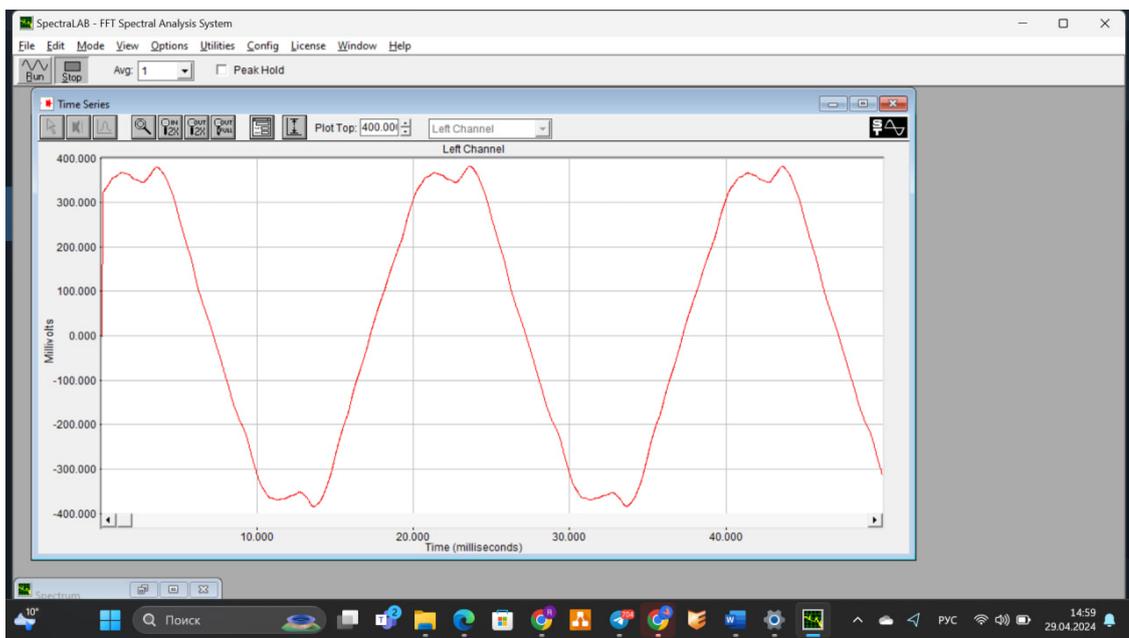


Рисунок 26 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с БПФ при 100% нагрузке на валу

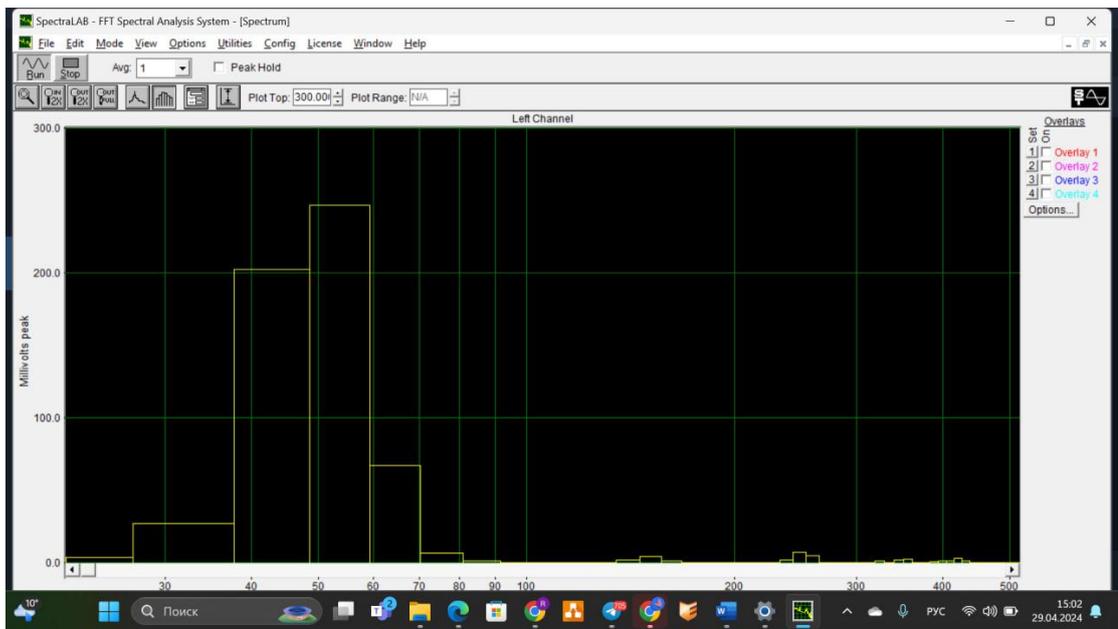


Рисунок 27 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с дисбалансом на валу при 50% нагрузки на валу

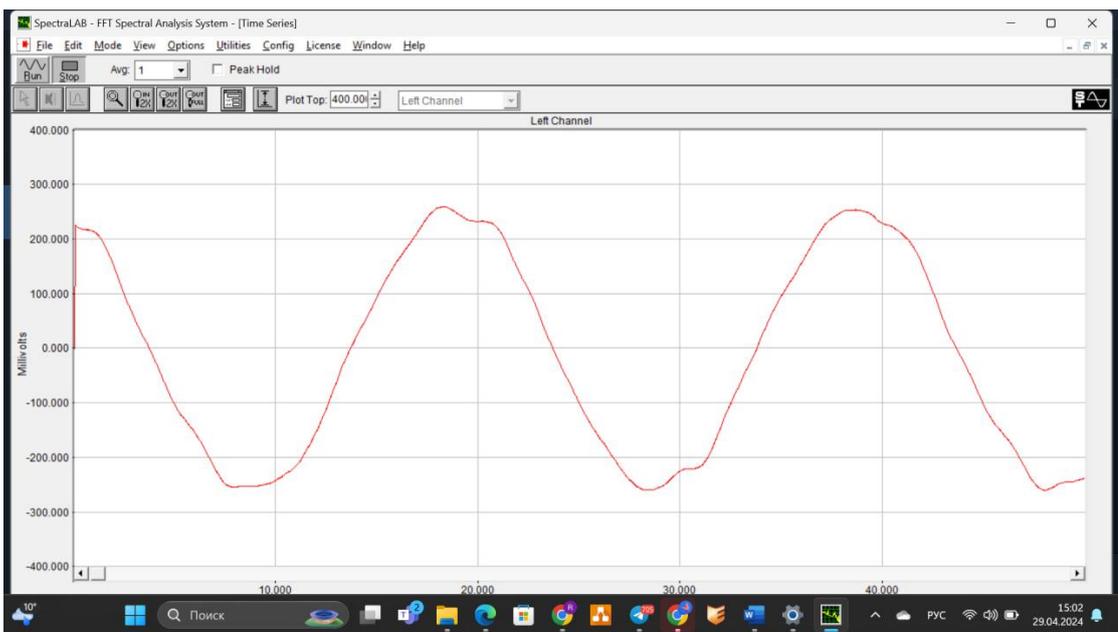


Рисунок 28 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с дисбалансом на валу с БПФ при 50% нагрузки на валу

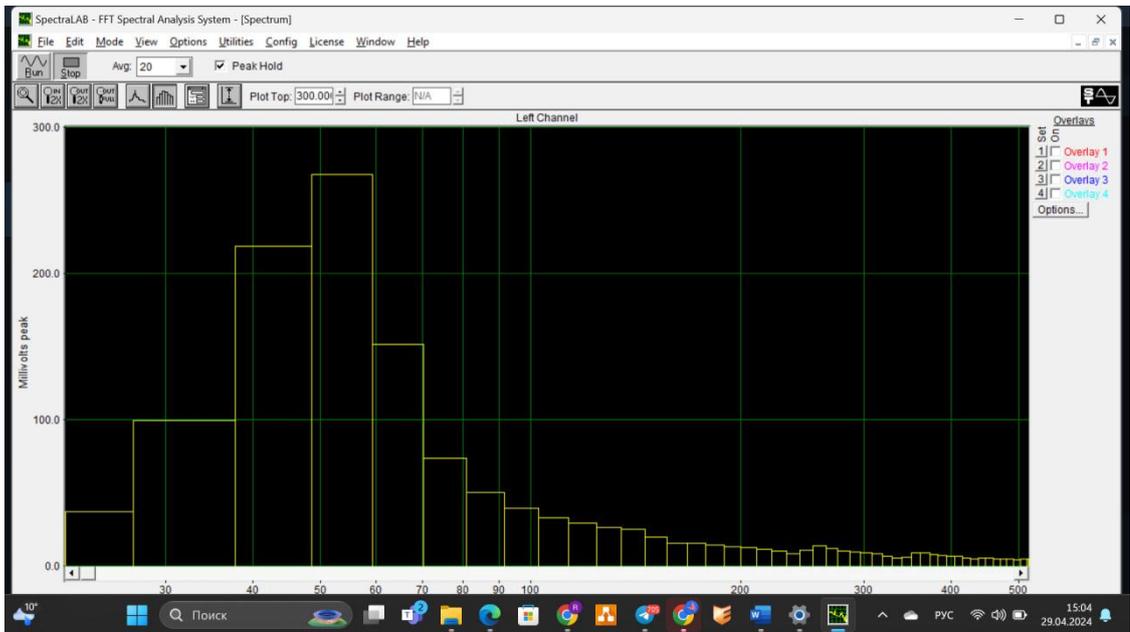


Рисунок 29 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с дисбалансом на валу при 100% нагрузки на валу

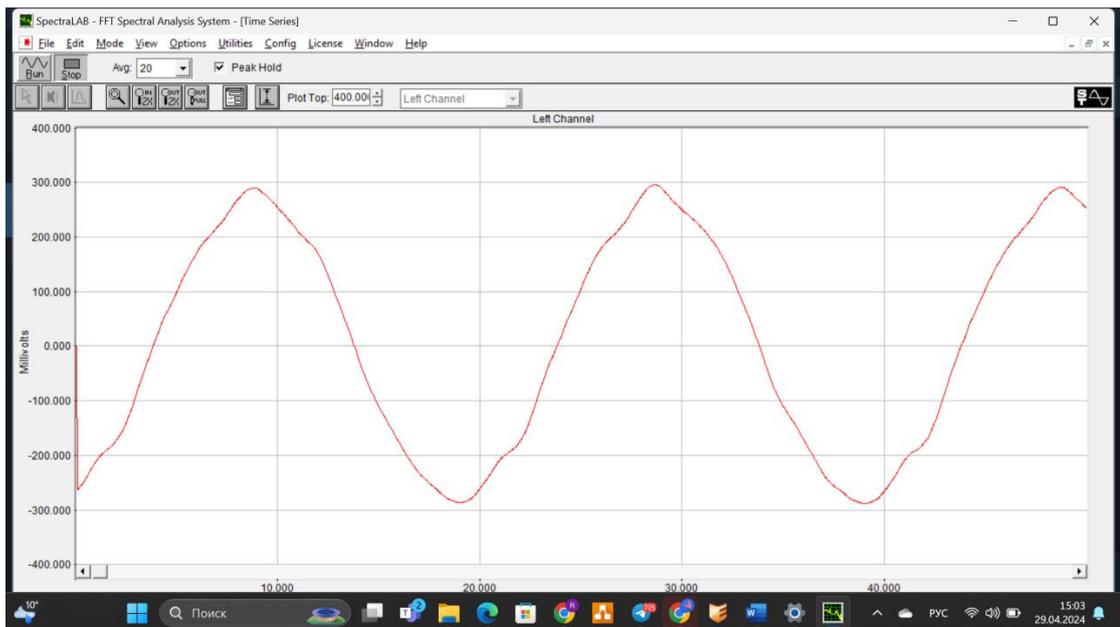


Рисунок 30 – Спектральный анализ асинхронного электродвигателя с дисбалансом на валу с БПФ при 100% нагрузки на валу

3.3 Анализ записанных файлов и выявление неисправностей

При выполнении эксперимента было решено использовать программу Spectralab для записи токовых характеристик асинхронных электродвигателей

в формате «.wav». Это позволило более удобно взаимодействовать с программой Matlab, которая обладает инструментами для анализа сигналов.

В программе Matlab был разработан алгоритм, который выполняет быстрое преобразование Фурье (БПФ) для анализа звукового файла и определения гармонического спектра записанного сигнала. Алгоритм включает в себя несколько модулей:

- модуля загрузки звукового файла:

```
[signal, Fs] = audioread('НАЗВАНИЕ ФАЙЛА.wav');
```

- условия выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) для выявления гармонического спектра анализируемого сигнала. Условия выполнения БПФ заключаются в определении длины сигнала и диапазона частот:

```
n = length(signal);
```

```
f = (-n/2:n/2-1)*(Fs/n);
```

- непосредственно самого модуля быстрого преобразования Фурье со сдвигом нулевой частоты в центр для более удобного восприятия построенных графиков:

```
Y = fft(signal);
```

```
Y = fftshift(Y);
```

- модуля визуализации спектра проанализированного сигнала, который проецируется на осях абсцисс и ординат в виде частоты и амплитуды сигнала:

```
figure;
```

```
plot(f, abs(Y)/n);
```

```
title('Спектр сигнала');
```

```
xlabel('Частота (Гц)');
```

```
ylabel('Амплитуда');
```

В целостном виде программа анализа записанных токовых характеристик имеет вид, представленный на рисунке №

```

% Загрузка звукового файла
[signal, Fs] = audioread ('НАЗВАНИЕ ФАЙЛА.wav');

% Параметры БПФ
n = length(signal); % Длина сигнала
f = (-n/2:n/2-1)*(Fs/n); % Диапазон частот

% Выполнение БПФ
Y = fft(signal);
Y = fftshift(Y); % Сдвиг нулевой частоты в центр

% Визуализация спектра
figure;
plot(f, abs(Y)/n);
title('Спектр сигнала');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплитуда');

```

Рисунок 20 – Фрагмент кода, написанного в программе MATLAB для анализа звуковых файлов

Помимо проверки исследуемых асинхронных электродвигателей на неисправности, описанные выше, был составлен специализированный код, составленный в среде Matlab. Этот код предназначен для выявления и диагностики потенциальных дефектов, которые могут возникнуть в электродвигателях и повлиять на их работу.

В ходе проверки двигателя подвергались диагностике на наличие следующих типов неисправностей:

Дефекты подшипника включают износ или повреждение, которые могут вызывать вибрации, шум и снижение эффективности работы двигателя. Ввиду этого в программе Matlab был разработан алгоритм определения неисправностей подшипника асинхронного электродвигателя, включающий в себя обнаружение дефектов в теле качения, внутренней и внешней дробек. Разработанный алгоритм применим ко всем асинхронным электродвигателям помимо исследуемых в рамках магистерской диссертации, так как позволяет пользователю самостоятельно вводить параметры подшипников, которые используются в асинхронных машинах. Задача первого модуля заключается в выявлении дефектов в теле качения подшипника.

```
% Запрос параметров у пользователя
D_pit = input('Введите диаметр окружности, по которой располагаются
центры тел качения (D_pit): ');
D_ball = input('Введите диаметр шарика (D_ball): ');
f_rm = input('Введите частоту вращения внутреннего кольца (f_rm): ');
beta = input('Введите угол наклона (в градусах) (beta): ');
% Преобразование угла из градусов в радианы
beta_rad = deg2rad(beta);
% Расчет частоты вращения тел качения подшипника
f_sb = (D_pit / D_ball) * f_rm * (1 - (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad)^2);
% Вывод результата
fprintf('Частота вращения тел качения подшипника (f_sb) составляет
%.2f Гц\n', f_sb);
```

Второй модуль выявляет дефекты в области внутренней дорожки подшипника.

```
% Запрос параметров у пользователя
D_pit = input('Введите диаметр окружности, по которой располагаются
центры тел качения (D_pit): ');
D_ball = input('Введите диаметр шарика (D_ball): ');
f_rm = input('Введите частоту вращения внутреннего кольца (f_rm): ');
```

```

beta = input('Введите угол наклона (в градусах) (beta): ');
n = input('Введите количество тел качения (n): ');
% Преобразование угла из градусов в радианы
beta_rad = deg2rad(beta);
% Расчет частоты вращения внутренней дорожки подшипника
f_ro = (n / 2) * f_rm * (1 - (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad));
% Вывод результата
fprintf('Частота вращения внутренней дорожки подшипника (f_ro)
составляет %.2f Гц\n', f_ro);

```

Третий модуль в свою очередь выявляет дефекты связанные с внешней дорожкой подшипника.

```

% Запрос параметров у пользователя
D_pit = input('Введите диаметр окружности, по которой располагаются
центры тел качения (D_pit): ');
D_ball = input('Введите диаметр шарика (D_ball): ');
f_rm = input('Введите частоту вращения внутреннего кольца (f_rm): ');
beta = input('Введите угол наклона (в градусах) (beta): ');
n = input('Введите количество тел качения (n): ');
% Преобразование угла из градусов в радианы
beta_rad = deg2rad(beta);
% Расчет частоты вращения наружной дорожки подшипника
f_n = (n / 2) * f_rm * (1 + (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad));
% Вывод результата
fprintf('Частота вращения наружной дорожки подшипника (f_n)
составляет %.2f Гц\n', f_n);

```

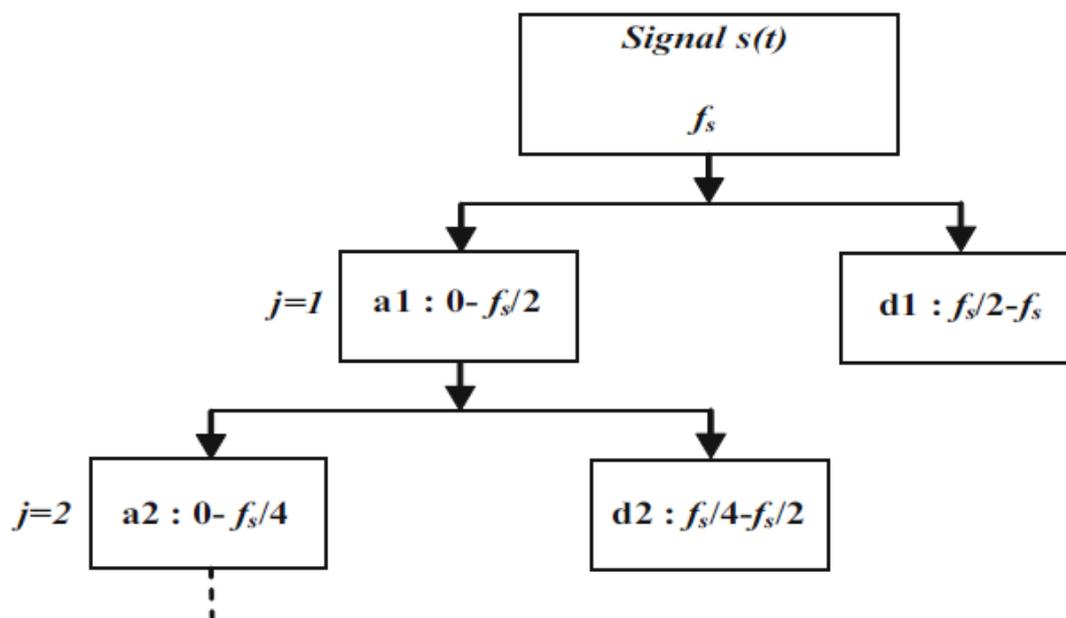


Рисунок 31 – Блок-схема диапазона частот

Биение на валу: Биение возникает из-за неправильного выравнивания вала или его деформации, что также может приводить к вибрациям и дополнительным нагрузкам на двигатель.

Межвитковые короткие замыкания как правило связаны с нарушением целостности изоляции витков обмоток электродвигателя. Возникновение межвитковых замыканий обмотки может привести к локальным перегревам, изменению характеристик магнитного поля и в конечном итоге к отказу двигателя. Для определения наличия межвитковых замыканий был разработана программа в той же программе, что и для выявления дефектов связанных с подшипниками:

```

% Запрос параметров у пользователя
f_1 = input('Введите частоту питания (f_1): ');
n = input('Введите нечетное целое число (n = 1, 3, ...): ');
k = input('Введите нечетное целое число (k = 1, 3, ...): ');
p = input('Введите число пар полюсов (p): ');
s = input('Введите скольжение асинхронного двигателя (s): ');
% Проверка, что n и k являются нечетными числами
  
```

```

if mod(n, 2) == 0
    error('n должно быть нечетным числом.');
```

end

```

if mod(k, 2) == 0
    error('k должно быть нечетным числом.');
```

end

```

% Расчет частоты межвиткового замыкания
f_st_plus = f_1 * (n / (p * (1 - s)) + k);
f_st_minus = f_1 * (n / (p * (1 - s)) - k);
% Вывод результата
fprintf('Частота межвиткового замыкания (f_st) составляет %.2f Гц (при
+k) и %.2f Гц (при -k)\n', f_st_plus, f_st_minus);
```

Для расчета скольжения асинхронного электродвигателя в MATLAB можно использовать следующую формулу:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (11)$$

где S – скольжение,

n_s – синхронная скорость

n_r – скорость ротора

Синхронная скорость n_s рассчитывается по формуле №

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (12)$$

В результате получается унифицированный алгоритм, который способен определить наличие межвитковых замыканий в асинхронном электродвигателе в режиме реального времени.

% Запрос параметров у пользователя для расчета скольжения

```

f = input('Введите частоту питания (f) в Гц: ');
p = input('Введите количество пар полюсов (p): ');
n_r = input('Введите скорость ротора (n_r) в об/мин: ');
% Расчет синхронной скорости
n_s = 120 * f / p;
% Расчет скольжения
s = (n_s - n_r) / n_s;
% Вывод синхронной скорости и скольжения
fprintf('Синхронная скорость (n_s) составляет %.2f об/мин\n', n_s);
fprintf('Скольжение (s) составляет %.4f (%.2f%%)\n', s, s * 100);
% Запрос дополнительных параметров у пользователя для расчета
частоты межвиткового замыкания
f_1 = input('Введите частоту питания (f_1): ');
n = input('Введите нечетное целое число (n = 1, 3, ...): ');
k = input('Введите нечетное целое число (k = 1, 3, ...): ');
% Проверка, что n и k являются нечетными числами
if mod(n, 2) == 0
    error('n должно быть нечетным числом.');
```

Эксцентриситет воздушного зазора. Под этим термином понимается неравномерность воздушного зазора между ротором и статором двигателя, что

вызывает неравномерное магнитное поле и приводит к дополнительным вибрациям и снижению эффективности.

% Входные параметры

f1 = 50; % частота питания обмоток статора (Гц)

nr = 1440; % скорость ротора (об/мин)

p = 4; % количество пар полюсов

Rs = 2; % заданная константа для эксцентриситета воздушного зазора

mu_ws = 0.5; % произвольная постоянная

% Расчёт синхронной скорости

ns = (120 * f1) / p;

% Расчёт коэффициента скольжения

s = (ns - nr) / ns;

% Расчёт эксцентриситета воздушного зазора

term1 = f1 * (Rs * (1 - s) / p);

term2 = f1 * ((1 - s) / p);

fec1 = term1 + mu_ws + term2;

fec2 = term1 + mu_ws - term2;

fec3 = term1 - mu_ws + term2;

fec4 = term1 - mu_ws - term2;

% Вывод результатов

fprintf('Синхронная скорость (n_s): %.2f об/мин\n', ns);

fprintf('Коэффициент скольжения (s): %.4f\n', s);

fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ec1: %.2f Гц\n', fec1);

fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ec2: %.2f Гц\n', fec2);

fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ec3: %.2f Гц\n', fec3);

fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ec4: %.2f Гц\n', fec4);

Наличие дефекта в клетке ротора свидетельствует о повреждении стержней, колец или критическому износу. В электродвигателях, применяемых ранее дефект клетки ротора был достаточно распространен из-за металлов применяемых в конструкции электродвигателей. В современных

электродвигателях общего назначения или применяемых в легкой промышленности данный вид неисправности стал встречаться реже, однако проблема полностью не решена и выявление неисправности клетки ротора остается актуальной.

```
% Входные параметры
f1 = 50; % частота питания обмоток статора (Гц)
nr = 1440; % скорость ротора (об/мин)
p = 4; % количество пар полюсов
% Расчёт синхронной скорости
ns = (120 * f1) / p;
% Расчёт коэффициента скольжения
s = (ns - nr) / ns;
% Расчёт дефекта клетки ротора
fsb1 = (1 + 2 * s) * f1;
fsb2 = (1 - 2 * s) * f1;
% Вывод результатов
fprintf('Синхронная скорость (n_s): %.2f об/мин\n', ns);
fprintf('Коэффициент скольжения (s): %.4f\n', s);
fprintf('Дефект клетки ротора f_sb1 (1+2s) * f1: %.2f Гц\n', fsb1);
fprintf('Дефект клетки ротора f_sb2 (1-2s) * f1: %.2f Гц\n', fsb2);
```

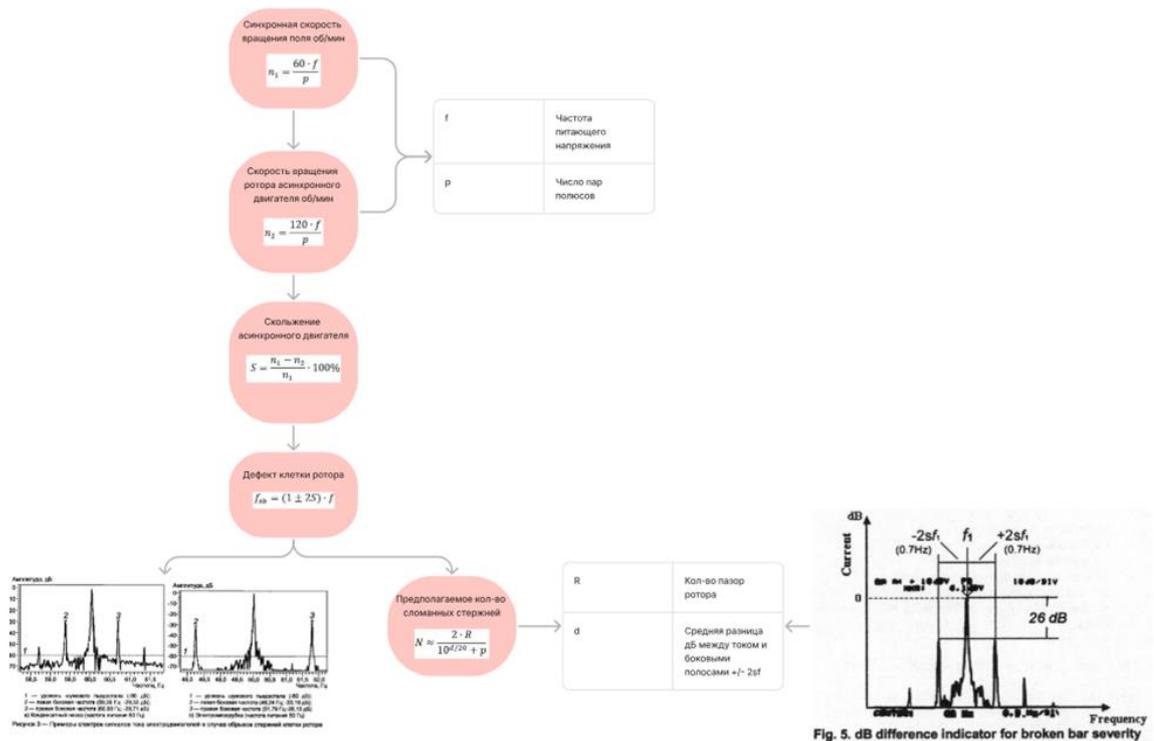


Рисунок 32 – Блок-схема алгоритма определения дефектов клетки ротора

Для каждой из перечисленных неисправностей был разработан отдельный модуль кода в MATLAB, который позволяет проводить диагностику и оценивать состояние исследуемых двигателей.

В ходе проверки методики оценки технического состояния асинхронного электродвигателя при дисбалансе вала и неисправном подшипнике в лабораторных условиях был разработан испытательный стенд. Этот стенд моделировал отдельные узлы системы охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением, что позволило детально изучить поведение двигателя под различными нагрузками и выявить потенциальные неисправности.

Во время преддипломной практики на предприятии и выполнения выпускной квалификационной работы был создан стенд, имитирующий масляную систему охлаждения. Этот стенд включал в себя трехфазный асинхронный двигатель с поврежденным валом, что обеспечивало реалистичные условия для испытаний и диагностики. Основной целью было

изучение влияния неисправностей на работу системы охлаждения и разработка методов их раннего обнаружения.

В процессе испытаний в качестве охлаждающей жидкости использовалась вода вместо трансформаторного масла. Такое решение было принято из-за высокой стоимости трансформаторного масла и возможности проведения экспериментов с различными типами жидкости. Несмотря на это, вода показала себя как эффективный заменитель, позволивший провести все необходимые исследования и получить достоверные результаты.

Стенд, имитирующий работу масляной системы охлаждения, представлен на рисунке 33. Он был разработан с учетом всех необходимых параметров и характеристик, что позволило создать условия, максимально приближенные к реальным эксплуатационным. Это включало в себя контроль температуры, давления и потока охлаждающей жидкости, а также мониторинг состояния двигателя и его компонентов.



Рисунок 33 – Испытательный стенд, имитирующий работу масляной системы охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением

При проведении испытаний было выявлено, что использование звуковой карты является не целесообразным по причине низкой частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя, установленного в карту. С связи с этим

запись токовой характеристики велась через осциллограф марки RIGOL модели DG4102.



Рисунок 34 – Осциллограф используемый в эксперименте

Также для записи токовых характеристик исправных и поврежденных асинхронных электродвигателей, используемых в стендах, был разработан датчик тока, который подключался последовательно к одной из фаз испытуемого двигателя.

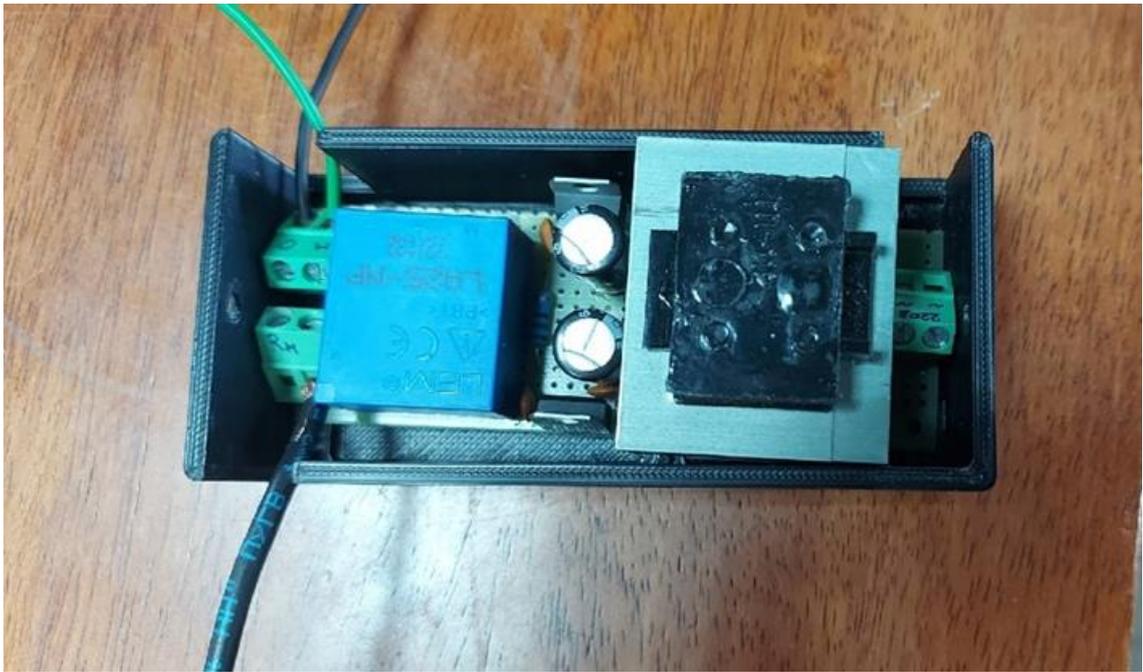


Рисунок 35 – Сконструированный датчик тока

Сконструированный датчик тока состоит из корпуса напечатанном на 3Д принтере, трансформатора, понижающего напряжение питающей сети, набора простых конденсаторов C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, диодного моста, состоящего из D1, D2, D3, D4, датчика тока, клемм и т. д. Все элементы были установлены на плату, приобретенную в магазине радиоэлектроники. Схема разработанного датчика тока представлена на рисунке 36.

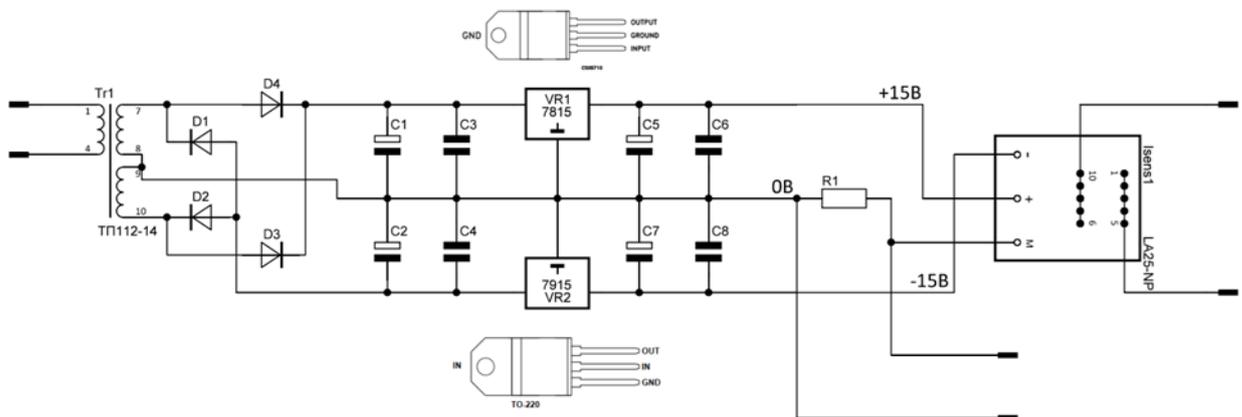


Рисунок 36 - Схема разработанного датчика тока
Система охлаждения силовых трансформаторов напряжением 110 кВ включает не только маслонасосы, но и воздушные вентиляторы [46]-[47]. В связи с этим был создан фрагмент системы принудительного воздушного охлаждения трансформатора, который включает вентилятор, приводимый в действие исследуемым электродвигателем. Также в эту систему входит осциллограф, ранее использовавшийся в качестве записывающего устройства, и измерительный датчик тока.



Рисунок 37 – Имитация работы асинхронного электродвигателя в составе вентилятора охлаждения силового трансформатора



Рисунок 38 – Двигатель используемый в экспериментальной вентиляторной установке

Таблица 4 – Параметры испытуемого электродвигателя

| | |
|---------------|-----------|
| Тип | АДМ2П8006 |
| Частота, Гц | 50 |
| $\cos\varphi$ | 0,72 |
| Об/мин | 930 |
| Напряжение, В | 380 |

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан алгоритм функционирования системы мониторинга системы охлаждения и управления силового трансформатора с принудительным охлаждением который включает в себя наиболее эффективные методики мониторинга данного узла трансформатора применяемые на практике, а также интегрирование полученных результатов после проведения научного изыскания в области обнаружения неисправностей асинхронных электродвигателей выполняющих роль основного привода. Разработанный алгоритм состоит из модуля определения неисправностей асинхронных электродвигателей включающий в себя расчет дефектов подшипников, эксцентриситета воздушного зазора, межвитковых замыканий и дефекта клетки ротора. Алгоритм написан в среде Matlab, но его можно

конвертировать в любой удобный код на языке программирования для внедрения в приборы, непосредственно интегрированные в АСУ-ТП.

% Примерный код для чтения данных с сенсоров

```
function f = measure_frequency()
```

```
    % Здесь добавьте код для измерения частоты питающей сети
```

```
    % Например, обращение к частотомеру
```

```
    % Пример для использования Arduino:
```

```
    % a = arduino('COM4', 'Uno'); % создаем объект Arduino
```

```
    % f = readFrequency(a, 'D2'); % читаем частоту с пина D2
```

```
    % Для демонстрации:
```

```
    f = 50; % Замените на реальное измерение
```

```
end
```

```
function nr = measure_rotor_speed()
```

```
    % Здесь добавьте код для измерения скорости ротора
```

```
    % Например, обращение к тахометру
```

```
    % Пример для использования Arduino:
```

```
    % a = arduino('COM4', 'Uno'); % создаем объект Arduino
```

```
    % nr = readSpeed(a, 'A0'); % читаем скорость с аналогового пина A0
```

```
    % Для демонстрации:
```

```
    nr = 1440; % Замените на реальное измерение
```

```
end
```

```
% Получение данных с сенсоров
```

```
f = measure_frequency();
```

```
nr = measure_rotor_speed();
```

% Запрос дополнительных параметров у пользователя для расчета неисправностей

p = input('Введите количество пар полюсов (p): ');

% Расчёт синхронной скорости

ns = 120 * f / p;

% Расчёт коэффициента скольжения

s = (ns - nr) / ns;

% Вывод синхронной скорости и скольжения

fprintf('Синхронная скорость (n_s) составляет %.2f об/мин\n', ns);

fprintf('Скольжение (s) составляет %.4f (%.2f%%)\n', s, s * 100);

% Расчет дефекта клетки ротора

fsb1 = (1 + 2 * s) * f;

fsb2 = (1 - 2 * s) * f;

fprintf('Дефект клетки ротора f_sb1 (1+2s) * f: %.2f Гц\n', fsb1);

fprintf('Дефект клетки ротора f_sb2 (1-2s) * f: %.2f Гц\n', fsb2);

% Запрос параметров у пользователя для расчета эксцентриситета воздушного зазора

Rs = input('Введите константу для эксцентриситета воздушного зазора (Rs): ');

mu_ws = input('Введите произвольную постоянную (mu_ws): ');

% Расчёт эксцентриситета воздушного зазора

term1 = f * (Rs * (1 - s) / p);

term2 = f * ((1 - s) / p);

fec1 = term1 + mu_ws + term2;

```
fec2 = term1 + mu_ws - term2;
```

```
fec3 = term1 - mu_ws + term2;
```

```
fec4 = term1 - mu_ws - term2;
```

```
fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ес1: %.2f Гц\n', fec1);
```

```
fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ес2: %.2f Гц\n', fec2);
```

```
fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ес3: %.2f Гц\n', fec3);
```

```
fprintf('Эксцентриситет воздушного зазора f_ес4: %.2f Гц\n', fec4);
```

```
% Запрос параметров у пользователя для расчета частоты межвиткового замыкания
```

```
f_1 = input('Введите частоту питания (f_1): ');
```

```
n = input('Введите нечетное целое число (n = 1, 3, ...): ');
```

```
k = input('Введите нечетное целое число (k = 1, 3, ...): ');
```

```
% Проверка, что n и k являются нечетными числами
```

```
if mod(n, 2) == 0
```

```
    error('n должно быть нечетным числом.');
```

```
end
```

```
if mod(k, 2) == 0
```

```
    error('k должно быть нечетным числом.');
```

```
end
```

```
% Расчёт частоты межвиткового замыкания
```

```
f_st_plus = f_1 * (n / (p * (1 - s)) + k);
```

```
f_st_minus = f_1 * (n / (p * (1 - s)) - k);
```

```
fprintf('Частота межвиткового замыкания (f_st) составляет %.2f Гц (при +k) и  
%.2f Гц (при -k)\n', f_st_plus, f_st_minus);
```

```

% Расчеты для тел качения подшипника

D_pit = input('Введите диаметр окружности, по которой располагаются
центры тел качения (D_pit): ');

D_ball = input('Введите диаметр шарика (D_ball): ');

f_rm = input('Введите частоту вращения внутреннего кольца (f_rm): ');

beta = input('Введите угол наклона (в градусах) (beta): ');

n = input('Введите количество тел качения (n): ');

% Преобразование угла из градусов в радианы

beta_rad = deg2rad(beta);

% Расчет частоты вращения тел качения подшипника

f_sb = (D_pit / D_ball) * f_rm * (1 - (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad)^2);

fprintf('Частота вращения тел качения подшипника (f_sb) составляет %.2f
Гц\n', f_sb);

% Расчет частоты вращения внутренней дорожки подшипника

f_ro = (n / 2) * f_rm * (1 - (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad));

fprintf('Частота вращения внутренней дорожки подшипника (f_ro) составляет
%.2f Гц\n', f_ro);

% Расчет частоты вращения наружной дорожки подшипника

f_n = (n / 2) * f_rm * (1 + (D_ball / D_pit) * cos(beta_rad));

fprintf('Частота вращения наружной дорожки подшипника (f_n) составляет
%.2f Гц\n', f_n);

```

Вывод по разделу. В третьем представлена методика оценки технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью анализа их токовых характеристик в режиме реального времени. Для этого была

разработана и собрана испытательная установка, включающая необходимое оборудование и программное обеспечение.

Испытательная установка:

- разработана установка, включающая трехфазный источник питания, преобразователь угловых перемещений, блок мультиметров, измеритель мощности, указатель частоты вращения, автотрансформатор и внешнюю звуковую карту;
- в качестве датчика тока использован SCT-013-000 УНДС, обеспечивающий гальваническую развязку и подключение к звуковой карте для точных измерений.

Исследуемые двигатели:

- для экспериментов использовались три однотипных двигателя модели АИР56А4У3, каждый с разными видами неисправностей (поврежденный подшипник, дисбаланс вала и полностью исправный двигатель);
- нагрузки на валу асинхронного двигателя создавались с помощью двигателя постоянного тока, что позволило смоделировать реальные рабочие условия.

Анализ токовых характеристик:

- запись токовых характеристик проводилась с помощью программы Spectralab, что позволяло получать высокоточные спектры гармоник;
- быстрое преобразование Фурье (БПФ) использовалось для анализа записанных сигналов в MATLAB, что обеспечивало выявление гармонических колебаний, характерных для различных неисправностей.

Диагностика неисправностей:

- разработанные алгоритмы в MATLAB позволили проводить диагностику и оценку состояния двигателей, включая выявление дефектов подшипников, биения на валу, межвитковых коротких

замыканий, эксцентриситета воздушного зазора и дефектов клетки ротора;

- моделирование различных режимов работы двигателей позволило наглядно продемонстрировать боковые полосы, характерные для конкретных видов неисправностей.

Практическое применение:

- испытания проводились на стенде, имитирующем масляную систему охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением, что позволило изучить влияние неисправностей на работу системы и разработать методы их раннего обнаружения;
- запись токовых характеристик велась через осциллограф марки RIGOL модели DG4102, так как использование звуковой карты оказалось нецелесообразным из-за низкой частоты дискретизации.

Заключение

Работа посвящена исследованию температурного режима силовых трансформаторов и диагностике неисправностей асинхронных электродвигателей. В трех главах подробно рассматриваются влияние температуры на техническое состояние трансформаторов, методы мониторинга и управления системой охлаждения, типичные неисправности асинхронных электродвигателей и методы их диагностики, а также применение методики оценки технического состояния электродвигателей в режиме реального времени.

Температурный режим силового трансформатора является критическим фактором, влияющим на его надежность и долговечность.

Температура наиболее нагретой точки трансформатора существенно влияет на скорость старения изоляции обмоток. Регулярное превышение допустимых температур ускоряет деградацию изоляции, снижает электрическую и механическую прочность трансформатора, увеличивает риск аварийных ситуаций и сокращает его срок службы. Важно поддерживать оптимальный температурный режим для увеличения долговечности трансформатора.

Факторы, повышающие температуру:

- повышенные потери в сердечнике и обмотках при высоких нагрузках;
- неправильная циркуляция трансформаторного масла;
- закупорка масляных каналов, снижающая эффективность охлаждения.

Эти факторы требуют тщательного мониторинга и своевременного вмешательства для поддержания оптимального температурного режима.

Современные системы мониторинга включают контроль температуры трансформаторного масла, управление системой охлаждения и мониторинг наиболее нагретой точки. Производители, такие как Dimrus, Пергам

Инжиниринг и Мирономика, предлагают надежные решения для мониторинга и управления охлаждением трансформаторов.

Методы оценки температуры наиболее нагретой точки:

- косвенные методы включают расчет температуры на основе параметров, таких как температура масла, температура окружающей среды, коэффициент нагрузки и удельная теплоемкость масла;
- прямые методы предполагают непосредственное измерение температуры с помощью оптических датчиков, установленных на обмотках трансформатора.

Современные системы мониторинга, интегрированные в SCADA-системы, собирают данные с первичных датчиков и вычисляют температуру наиболее нагретой точки с учетом типа системы охлаждения и коэффициента нагрузки. Эти данные используются для автоматического управления масляными насосами и вентиляторами, поддерживая оптимальный температурный режим.

Во втором разделе рассмотрены типичные неисправности асинхронных электродвигателей и методы их обнаружения. Основные выводы включают:

- дефекты клетки ротора. Диагностика дефектов клетки ротора проводится с помощью сигнатурного анализа тока. Спектральный анализ тока обмотки статора позволяет выявлять характерные боковые полосы, связанные с обрывами стержней и трещинами в контактных кольцах ротора;
- эксцентриситет воздушного зазора. Эксцентриситет воздушного зазора определяется по частотным компонентам в спектре тока. Для диагностики используются частоты прохождения пазов ротора и их боковые частоты. Это позволяет оценивать степень эксцентриситета и предотвращать механические повреждения двигателя;
- межвитковые замыкания в обмотке статора. Межвитковые замыкания в обмотке статора приводят к появлению специфических частотных составляющих в спектре тока. Диагностика

осуществляется путем анализа сигнала тока с использованием преобразования Фурье, что позволяет обнаруживать замыкания на ранних стадиях;

- дефекты подшипников. Дефекты подшипников выявляются по характерным частотам, зависящим от размеров подшипника и места повреждения. Контроль частотных составляющих тока статора позволяет локализовать дефекты подшипников качения, что важно для предотвращения механических отказов и поддержания надежности работы электродвигателя.

В третьем разделе представлена методика оценки технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью анализа их токовых характеристик в режиме реального времени. Основные выводы включают:

- разработана установка, включающая трехфазный источник питания, преобразователь угловых перемещений, блок мультиметров, измеритель мощности, указатель частоты вращения, автотрансформатор и внешнюю звуковую карту. В качестве датчика тока использован SCT-013-000 УНДС, обеспечивающий гальваническую развязку и подключение к звуковой карте для точных измерений.
- для экспериментов использовались три однотипных двигателя модели АИР56А4У3 с разными видами неисправностей (поврежденный подшипник, дисбаланс вала и полностью исправный двигатель). Нагрузки на валу асинхронного двигателя создавались с помощью двигателя постоянного тока, что позволило смоделировать реальные рабочие условия.
- анализ токовых характеристик. Запись токовых характеристик проводилась с помощью программы Spectralab, что позволяло получать высокоточные спектры гармоник. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) использовалось для анализа записанных сигналов в

Matlab, что обеспечивало выявление гармонических колебаний, характерных для различных неисправностей.

- диагностика неисправностей. Разработанные алгоритмы в Matlab позволили проводить диагностику и оценку состояния двигателей, включая выявление дефектов подшипников, биения на валу, межвитковых коротких замыканий, эксцентриситета воздушного зазора и дефектов клетки ротора. Моделирование различных режимов работы двигателей позволило наглядно продемонстрировать боковые полосы, характерные для конкретных видов неисправностей.
- испытания проводились на стенде, имитирующем масляную систему охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением, что позволило изучить влияние неисправностей на работу системы и разработать методы их раннего обнаружения. Запись токовых характеристик велась через осциллограф марки RIGOL модели DG4102, так как использование звуковой карты оказалось нецелесообразным из-за низкой частоты дискретизации.

Список используемой литературы и используемых источников

1. ГОСТ ISO 20958-2015. Дата введения 2016-11-01. МКС 29.160.30 17.160 Межгосударственный стандарт. Контроль состояния и диагностика машин сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors.
2. Гришин Д. Ю. Методы поиска неисправностей в асинхронном двигателе //Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2023. – С. 10-
3. Кретов Д.А., Москалёв Л.Б., Чиндин В.В. Цифровые устройства релейной защиты для интеграции с системами мониторинга аварийных ситуаций электроэнергетических системах. 2019.
4. Кретов Д.А., Москалёв Л.Б. Анализ цифровых устройств релейной защиты и автоматики для контроля параметров режима электроэнергетических систем. 2019
5. Кретов Д.А., Москалёв Л.Б., Чиндин В.В. Система предиктивного анализа состояния трансформаторного оборудования. 2022
6. Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Оценка технического состояния асинхронных электродвигателей с помощью аппарата нечеткой логики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. №1 (77). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-asinhronnyh-elektrodvigatelay-s-pomoschyu-apparata-nechetkoj-logiki> (дата обращения: 26.05.2024).
7. Методы диагностирования технического состояния асинхронного двигателя / А. С. Шатохин, А. Г. Булгаков, Д. А. Пыжов, Ю. П. Гнездилова // Молодежная наука - развитию агропромышленного комплекса: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 03–04 декабря 2020 года. Том Часть 4.

– Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2020. – С. 142-146. – EDN KULMBE.

8. Морозов А.Л., Метод моментов дробного порядка и прибор на его основе для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей [Электронный ресурс] URL: [Диссертация на тему «Метод моментов дробного порядка и прибор на его основе для решения задач контроля и диагностики технического состояния электродвигателей», скачать бесплатно автореферат по специальности ВАК РФ 00.00.00 - Другие специальности \(dissercat.com\)](#) (дата обращения: 15.06.2024).

9. Оптоволоконный монитор FISO Nortech EasyGrid [Электронный ресурс] URL: [Многоканальный оптоволоконный монитор Nortech EasyGrid для контроля состояния трансформаторов \(pergam.ru\)](#) (дата обращения: 15.06.2024).

10. Петько В. Г. и др. Методика определения остаточного ресурса изоляции асинхронного электродвигателя, работающего в ненормальных условиях эксплуатации //Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – №. 2 (88). – С. 154-162.

11. Прудников А.Ю., Боннет В.В., Логинов А.Ю. Метод определения эксцентриситета ротора асинхронного двигателя // Вестник КрасГАУ. 2015. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-opredeleniya-ekstsentrisiteta-rotora-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 15.06.2024).

12. Радимов Николай Владимирович, Труднев Сергей Юрьевич, Марченко Алексей Александрович Диагностика асинхронного электродвигателя для электроприводов тепловых насосов и компрессорных установок методом спектрального анализа потребляемого тока с применением пакета Spectrumab // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostovanie-asinhronnogo-elektrodvigatelya-dlya-elektroprivodov-teplovogo-nasosa-i-kompressornyh-ustanovok-metodom> (дата обращения: 15.06.2024).

13. Результаты моделирования асинхронного двигателя с эксцентриситетом ротора в режиме холостого хода / А. Ю. Прудников, В. В. Боннет, А. Ю. Логинов, Я. В. Боннет // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : Материалы IX Национальной научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 23–24 сентября 2021 года. – Молодёжный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2021. – С. 119-125. – EDN QPVMJ.

14. Рауф И. М., Ахмедов Д. А., Ахмедов А. Д. Диагностирование асинхронного двигателя при межвитковом замыкании в обмотке статора //Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – №. 1. – С. 48-53.

15. Сидельников Леонид Григорьевич, Афанасьев Дмитрий Олегович Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Недропользование. 2013. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-asinhronnyh-dvigatelay-v-protssesse-ekspluatatsii> (дата обращения: 15.06.2024).

16. Система диагностического мониторинга силовых трансформаторов 110 ÷ 330 кВ [Электронный ресурс] URL: <https://dimrus.com/tdmm.html> (дата обращения: 26.05.2024).

17. Система мониторинга магнитного потока [Электронный ресурс] URL: [FluxTracII-R система мониторинга магнитного потока \(bo-energo.ru\)](https://bo-energo.ru) (дата обращения: 26.05.2024).

18. Телегин А. В. и др. Исследование параметров асинхронного электродвигателя при моделировании аварийных режимов //Ответственный редактор. – 2021. – С. 43.

19. Хамидов О. Р., Грищенко А. В., Шрайбер М. А. Разработка интеллектуальных методов оценки технического состояния локомотивного асинхронного электродвигателя на основе экспертных систем // БРНИ. 2020.

№2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-intellektualnyh-metodov-otsenki-tehnicheskogo-sostoyaniya-lokomotivnogo-asinhronnogo-elektrodvigatelya-na-osnove> (дата обращения: 26.05.2024).

20. Харламов Виктор Васильевич, Скляр Андрей Владимирович, Попов Денис Игоревич, Ерошенко Александра Викторовна Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправностей различного типа // ОНВ. 2018. №4 (160). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-asinhronnogo-dvigatelya-s-uchetom-pazovyh-garmonik-v-induktsii-magnitnogo-polya-i-neispravnostey-razlichnogo> (дата обращения: 16.06.2024).

21. Шпрехер Дмитрий Маркович Разработка специального программного обеспечения для диагностирования технического состояния электромеханических систем // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-spetsialnogo-programmnogo-obespecheniya-dlya-diagnostirovaniya-tehnicheskogo-sostoyaniya-elektromehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 15.06.2024).

22. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс] ГОСТ 2582-2013 (ред. От 2015.01.01) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133099> (дата обращения 02.10.2023).

23. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс] ГОСТ 2582-2013 (ред. От 2015.01.01) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133099> (дата обращения 02.10.2023).

24. A. Doolgindachbaporn, G. Callender, P. L. Lewin, E. Simonson and G. Wilson, "Data Driven Transformer Thermal Model for Condition Monitoring," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 4, pp. 3133-3141, Aug. 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3123957.

25. A. S. Murthy, N. Azis, S. Al-Ameri, M. F. M. Yousof, J. Jasni, and M. A. Talib, "Investigation of the effect of winding clamping structure on frequency

response signature of 11 kV distribution transformer," *Energies*, vol. 11, no. 9, pp. 1-13, 2018.

26. Gerlici, J.; Goolak, S.; Gubarevych, O.; Kravchenko, K.; Kamchatna-Stepanova, K.; Toropov, A. Method for Determining the Degree of Damage to the Stator Windings of an Induction Electric Motor with an Asymmetric Power System. *Symmetry* 2022, 14, 1305. <https://doi.org/10.3390/sym14071305>.

27. Grishchenko A. V. et al. Diagnostics of the technical condition of rolling bearings of asynchronous traction motors of locomotives based on data mining // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Т. 91. – С. 593-596.

28. I. E. Kolesnikov, A. V. Korzhov and K. E. Gorshkov, "Digital Program for Diagnosing the Status of a Power Transformer," 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 315-321, doi: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267867.

29. I. Vasilev and A. Hismatullin, "The Theory of Fuzzy Sets as a Means of Assessing the Periods of Service of Asynchronous Electric Motors," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111887.

30. Izzet Önel, Mohamed Benbouzid. Induction Motor Bearing Failure Detection and Diagnosis Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4489987/> (дата обращения 01.12.2023)

31. J.A. Antonino-Daviu; M. Riera-Guasp; J.R. Folch; M.P.M. Palomares. Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1658328> (дата обращения 17.11.2023)

32. J. J. Smit, On-load tap changer diagnosis on high-voltage power transformers using dynamic resistance measurements, Technische Universiteit delft, College voor Promoties, 2011. [Электронный ресурс] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/On-load-Tap-Changer-Diagnosis-on-High->

Voltage-Power-Erbrink/d04e8a171214099a82b3363c02d517be9ef3dd29. (дата обращения 09.10.2023)

33. Jin, L.; Kim, D.; Abu-Siada, A.; Kumar, S. Oil-Immersed Power Transformer Condition Monitoring Methodologies: A Review. *Energies* 2022, 15, 3379. <https://doi.org/10.3390/en15093379>

34. Ma, G., Wang, Y., Qin, W., Zhou, H., Yan, C., Jiang, J. and Ju, Y. (2021), Optical sensors for power transformer monitoring: A review. *High Voltage*, 6: 367-386. <https://doi.org/10.1049/hve2.12021>

35. M. Badar, P. Lu, Q. Wang, T. Boyer, K. P. Chen and P. R. Ohodnicki, "Real-Time Optical Fiber-Based Distributed Temperature Monitoring of Insulation Oil-Immersed Commercial Distribution Power Transformer," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 3013-3019, 1 Feb.1, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3024943.

36. Michał Kunicki, Sebastian Borucki, Dariusz Zmarzły, Jerzy Frymus, Data acquisition system for on-line temperature monitoring in power transformers, *Measurement*, Volume 161, 2020, 107909, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107909>.

37. N. Bessous, S. E. Zouzou, W. Bentrach, S. Sbaa & M. Sahraoui. Diagnosis of bearing Deffects in induction motors using discrete wavelet transform. [Электронный ресурс] URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13198-016-0459-6> (дата обращения 27.11.2023)

38. Nikhil, Dr. Lini Mathew, Aman deep Sharma. Various Indices for Diagnosis of Air-gap Eccentricity Fault in Induction Motor-A Review. [Электронный ресурс] URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/331/1/012032> (дата обращения 20.10.2023)

39. Qiang Li, Ranyang Li, Kaifan Ji, Wei Dai. Kalman Filter and Its Application. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7528889> (дата обращения 29.09.2023)

40. Lekshmi R. Chandran, G.S. Ajith Babu, Manjula G. Nair, K. Ilango, A review on status monitoring techniques of transformer and a case study on loss of

life calculation of distribution transformers, *Materials Today: Proceedings*, Volume 46, Part 10, 2021, Pages 4659-4666, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.290>.

41. L. Wang, W. Zuo, Z. -X. Yang, J. Zhang and Z. Cai, "A Method for Fans' Potential Malfunction Detection of ONAF Transformer Using Top-Oil Temperature Monitoring," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129881-129889, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114301.

42. O. Laayati, M. Bouzi and A. Chebak, "Design of an oil immersed power transformer monitoring and self diagnostic system integrated in Smart Energy Management System," 2021 3rd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Antalya, Turkey, 2021, pp. 240-245, doi: 10.1109/GPECOM52585.2021.9587640.

43. Pai, Shreenivas & Bansal, Neha & Desai, Kama & Doshi, Archana & Moharkar, Devendr & Pathare, Mihir. (2017). Intelligent PLC based transformer cooling control system. 1-6. 10.1109/ICNTE.2017.7947926.

44. Petko V. et al. Permissible voltage asymmetry for asynchronous motor operating in non-nominal operating conditions //Proceedings 19th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"; Latvia University of Life Sciences and Technologies: Jelgava, Latvia. – 2020. – T. 19. – C. 897-905.

45. Thomson, W.T. & Fenger, M.. (2001). Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *Industry Applications Magazine*, IEEE. 7. 26 - 34. 10.1109/2943.930988.

46. Shon, Chae-Hwa & Yi, Sang-Hwa & Lee, Heun-Jin & Kang, Dong-Sik. (2012). Study on the Transfer Functions for Detecting Windings Displacement of Power Transformers with Impulse Method. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 7. 10.5370/JEET.2012.7.6.876.

47. Shiravand V. et al. Prediction of transformer fault in cooling system using combining advanced thermal model and thermography //IET Generation, Transmission & Distribution. – 2021. – T. 15. – №. 13. – C. 1972-1983.

48. V. M. Levin and A. A. Yahya, "Support for Decision-Making to Ensure Reliable Operation of Transformers as Part of a Responsible Power Facility," 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.
49. V. Savchenko, O. Synyavskiy, A. Dudnyk and A. Nesvidomin, "Influence of Voltage Deviation and Asymmetry on Transitional Processes in Asynchronous Electric Drive," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598660.
50. W. A. Khan, M. Ellahi, B. Masood, F. Usman and G. Abbass, "Design of smart cooling system for power transformer," 2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Lahore, Pakistan, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEET1.2018.8338631.