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)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Диагностика ранних неисправностей силовых электродвигателей

Обучающийся Т.Р. Музаферов
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Руководитель д.т.н., профессор, П.А. Николаев
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант к.филол.н., доцент С.Ю.Мамушкина
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

В выпускной квалификационной работе проанализированы неисправности асинхронных трехфазных электрических двигателей с короткозамкнутыми ротором. Объект исследования – асинхронные электрические двигатели и актуальность выбора объекта представлены во введении.

Проанализированы и классифицированы типовые неисправности асинхронных электродвигателей. Определено, что 88% всех неисправностей приходится на группу электрических неисправностей поэтому в рамках выпускной квалификационной работе подробно рассматривается именно данная группа повреждений.

Представлено описание признаков позволяющих выявить дефекты и повреждения асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором при визуальном осмотре. Определено, что большая часть повреждений может быть диагностирована при проведении измерений мгновенных и действующих значений фазного тока, проведении тепло метрических обследований, а также измерений сопротивления изоляции. Представлена методика и схема измерения сопротивлений изоляции, а также данные, по которым выполняется контроль уровня сопротивлений.

Разработана модель для моделирования повреждений асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с использованием блоков библиотеки MATLAB/Simulink, а также модель позволяющая контролировать уровень и наличие электрических повреждений асинхронных электрических двигателей.

Пояснительная записка выполнена на 69 листах формата А4, содержит 2 таблицы и 30 рисунков, отражающих основные результаты.

Abstract

The final qualification work analyzes faults of asynchronous three-phase electric motors with a squirrel-cage rotor. The object of the study - asynchronous electric motors and the relevance of choosing the object are presented in the introduction. Typical faults of asynchronous electric motors are analyzed and classified. It is determined that 88% of all faults fall into the group of electrical faults, therefore, within the framework of the final qualification work, this group of faults is considered in detail. A description of the signs that allow identifying defects and damage to asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor during visual inspection is presented. It is determined that most of the faults can be diagnosed when measuring instantaneous and effective values of phase current, conducting thermal metric surveys, and measuring insulation resistance. A technique and scheme for measuring insulation resistance are presented, as well as data by which resistance levels are monitored. A model has been developed for simulating damage to asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor using MATLAB/Simulink library blocks, as well as a model that allows monitoring the level and presence of electrical damage to asynchronous electric motors.

Содержание

Введение 5
1 Анализ типовых неисправностей асинхронных силовых электродвигателей и методов их обнаружения 10
1.1 Неисправности асинхронных силовых электрических двигателей, вызванные нарушением эксцентриситета 11
1.2 Неисправности асинхронных силовых электрических двигателей, вызванные нарушением целостности стержней ротора 15
1.3 Неисправности асинхронных электродвигателей вызванные повреждениями подшипников 17
1.4 Электрические повреждения асинхронных электродвигателей 19
2 Проведение визуального осмотра для выявления повреждений асинхронных электрических электродвигателей 21
3 Разработка модели трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и возможностью моделирования электрических повреждений 27
3.1 Разработка модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором 27
3.2 Разработка модели с учетом электрических повреждений асинхронного электродвигателя 41
Заключение 63
Список используемой литературы и используемых источников 67

Введение

Силовой электродвигатель (силовой электрический двигатель или силовая электрическая машина) – это вращающаяся электрическая машина, в которой выполняется преобразование электрической энергии в механическую. При этом силовые электрические двигатели имеют различную конструкцию. Различат следующие основные типы силовых электрических двигателей [10], [11]:

- синхронные электрические машины или синхронные электрические двигатели (СД);
- асинхронные электрические машины или асинхронные электрические двигатели (АД);
- электрические машины постоянного тока или двигатели постоянного тока (ДПТ).

Сферы применения вращающихся электрических машин различны, однако к основной сфере применения именно силовых электрических двигателей относится электрический привод. Силовые электрические двигатели применяются в качестве приводов подъёмных механизмов, конвейеров, вентиляторов и компрессоров, установок для бурения, электрического транспорта, морского и речного транспорта, центрифуг и т.д. Главной особенностью именно силового электрического двигателя является создания высокого крутящего момента и его передача, через устройства механической передачи, на приводной механизм.

Возможность создания и поддержание в процессе работы электрическим двигателем высокого крутящего момента определяется числом пар полюсов, большее число пар полюсов силового электрического двигателя определяется больший крутящий момент.

Рассматривая различные типы электрических двигателей, можно отметить, что асинхронные электрические двигатели являются более простыми и надежными, так как пуск таких электрических двигателей может

быть реализован без дополнительных устройств. Рассматривая конструкции асинхронных силовых электрических двигателей, можно выделить [14]:

– асинхронные электрические машины с короткозамкнутым ротором;
– асинхронные электрические машины с фазным ротором.

В отличие от асинхронных силовых электрических двигателей синхронные электрические двигатели требуют дополнительного оборудования для его пуска и работы – системы возбуждения или внешнего приводного двигателя. Особенность работы и пуска синхронного электрического двигателя определяется принципом его работы. Так как в синхронном электрическом двигателе обеспечивается равенство частоты вращения вала и вращающегося магнитного поля статора, то при прямом пуске СД происходит слишком частая смена полюсов вращающегося магнитного вызванная инерцией ротора и поэтому его разгон до синхронной скорости невозможен. Однако синхронные двигатели имеют преимущества, связанные с высоким коэффициентом полезного действия, который может достигать 95%, высокими значениями перегрузочной способности, высокие крутящие моменты. Поэтому применение синхронных двигателей определяется требованиями к приводу в конкретных случаях.

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы рассматриваются силовые электрические двигатели переменного тока, а именно асинхронные силовые электрические двигатели, так как они получили более высокое распространение на предприятиях промышленного производства вызванное:

– высокой надежностью;
– простотой эксплуатации;
– более низкой стоимостью, по сравнению с СД и ДПТ.

Любой из силовых электрических двигателей в процессе своей работы подвергается различным воздействиям, которые по своей природе можно классифицировать как:

– тепловые воздействия;

– электрические воздействия;
– магнитные воздействия;
– механические воздействия.

Все указанные воздействия со временем приводят к изменению свойств материалов и конструктивных деталей и частей электрической машины, что и вызывает повреждения и выход из строя силового электрического электродвигателя.

Вопросами определения и выявления неисправностей вращающихся электрических машин посвящено большое число научных и научно-исследовательских работ. Одной из первых работ в которой описываются неисправности асинхронного электрического двигателя является работа Williamson S. и Mirzoian K. [25].

Среди неисправностей силовых электрических двигателей выделяют три основных группы:

– механические неисправности, например эксцентриситет ротора АД, выход из строя или износ подшипников, нарушение работы муфт и т.д.;
– электрические неисправности, например обрыв проводников в обмотке статора, замыкание междуфазных проводников в обмотке статора, замыкание проводников между витками одной фазы, замыкание проводников обмотки статора на корпус асинхронного электрического двигателя;
– магнитные неисправности, например расслоение магнитопровода статора, замыкания между листами магнитопровода статора.

В настоящее время в практике диагностики и оценки технического состояния в Российской Федерации введены ряд стандартов [18], [21], [19], [20], которые аналогичны международным стандартам. Кроме того, организация «IEEE Power Engineering Society» (Институт инженеров электротехники и электроники. Общество энергетического машиностроения) подготовила методические рекомендации [4] по контролю технического

состояния и определению неисправностей асинхронных электрических двигателей.

Для диагностики и выявления неисправностей асинхронных силовых электрических двигателей без вывода их из работы, согласно указанным стандартам, применяются следующие методы неразрушающего контроля [6]:

- метод мониторинга и анализа вибраций асинхронного силового электрического двигателя;
- метода мониторинга и анализа теплового состояния конструктивных частей асинхронного силового электрического двигателя;
- метод акустической эмиссии;
- метод мониторинга и анализа спектральных характеристики тока статора асинхронного силового электрического двигателя.

Самым распространенным и простым, с точки зрения применяемого оборудования, является метод мониторинга и анализа спектральных характеристики тока статора асинхронного силового электрического двигателя. Однако использование всех указанных методов неразрушающего контроля должно обеспечивать ранее обнаружение дефектов позволяющее вовремя реагировать и предотвращать аварийные ситуации, вызванные выходом из строя асинхронного силового электрического двигателя.

Исходя из этого тема выпускной квалификационной работы, связанная с диагностикой ранних неисправностей силовых электродвигателей, является актуальной.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в разработке компьютерных моделей электрических повреждений асинхронных электрических двигателей с разработкой модели определения неисправностей.

При разработке устройств обеспечивающих диагностику неисправностей асинхронных электрических двигателей применяются микропроцессорные технологии, так как требуется проведение большого числа измерений с высокой частотой дискретизации. При разработке микропроцессорных устройств, в том числе устройств мониторинга силовых

асинхронных электрических двигателей применяются модельно-ориентированный подход (МОП), включающий в себя следующие виды:

- модель в контуре управления (Model-In-the-Loop, MIL);
- программа в контуре управления (Software-In-the-Loop, SIL);
- процессор в контуре управления (Processor-In-the-Loop, PIL);
- аппаратные средства в контуре управления (Hardware-In-the-Loop, HIL).

Применение модельно-ориентированный подход при разработке систем ранней диагностики неисправностей асинхронных электрических двигателей позволяет создать и настроить проектируемую систему правильно относительно конкретного типа асинхронного электрического двигателя. Используя модельно-ориентированный подход, необходимо на первом этапе разработать модель асинхронного электрического двигателя способную моделировать его неисправности. Получение адекватной модели асинхронного силового электродвигателя с возможностью моделирования его неисправностей позволит перейти к следящим этапам разработки системы ранней диагностики неисправностей с высоким уровнем точности.

Задачами выпускной квалификационной работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

- анализ типовых неисправностей асинхронных силовых электродвигателей и методов их обнаружения;
- анализ программных продуктов, применяемых для реализации модельно-ориентированного подхода в проектировании микропроцессорных устройств;
- разработка компьютерной модели асинхронного силового электродвигателя с моделированием повреждений;
- разработка и верификация компьютерного алгоритма выявления неисправностей асинхронного силового электродвигателя.

1 Анализ типовых неисправностей асинхронных силовых электродвигателей и методов их обнаружения

Среди неисправностей асинхронных силовых электрических двигателей выделяют механические, электрические и магнитные неисправности [24].

Статистические оценки неисправностей асинхронных электрических двигателей на основе источников представлены на рисунке 1.

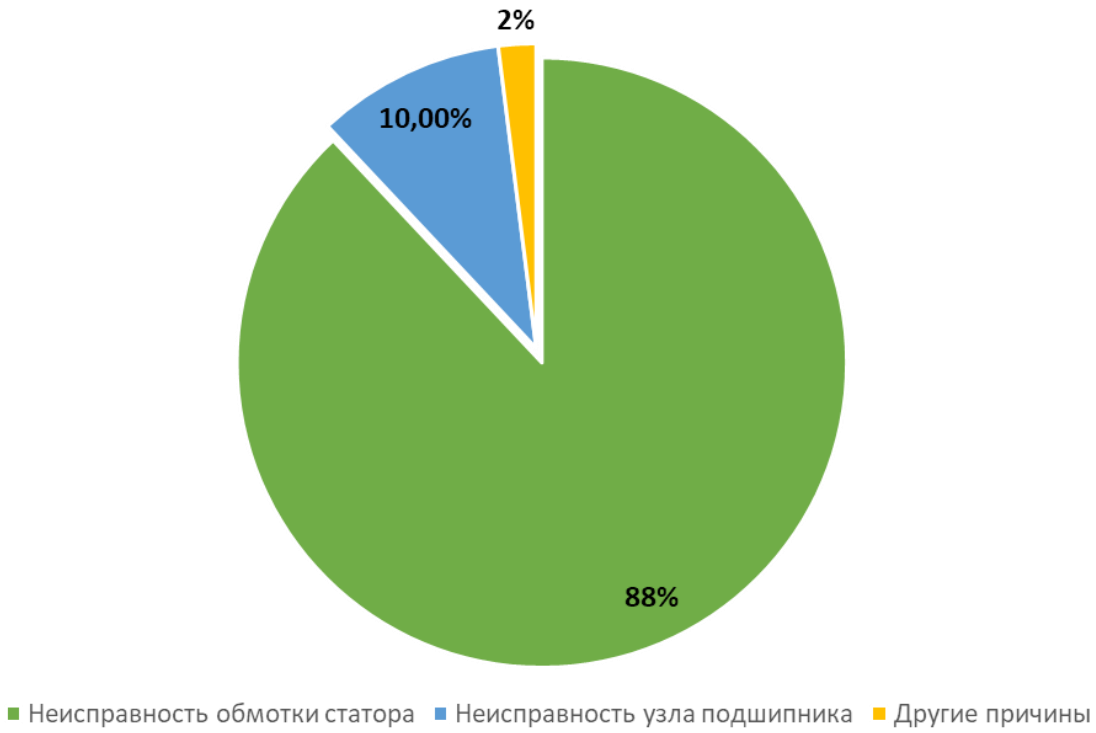


Рисунок 1 - Статистические данные распределения причин повреждений асинхронных силовых электрических двигателей

По данным, представленным на рисунке 1 видно, что наиболее часто выход из строя асинхронного электрического двигателя вызвана неисправностями обмотки статора. При этом неисправность обмотки статора может быть вызвана различными факторами. Анализ источников , позволил построить диаграмму (рисунок 2), отражающую статистическое распределение видов повреждений статора асинхронного электрического двигателя.

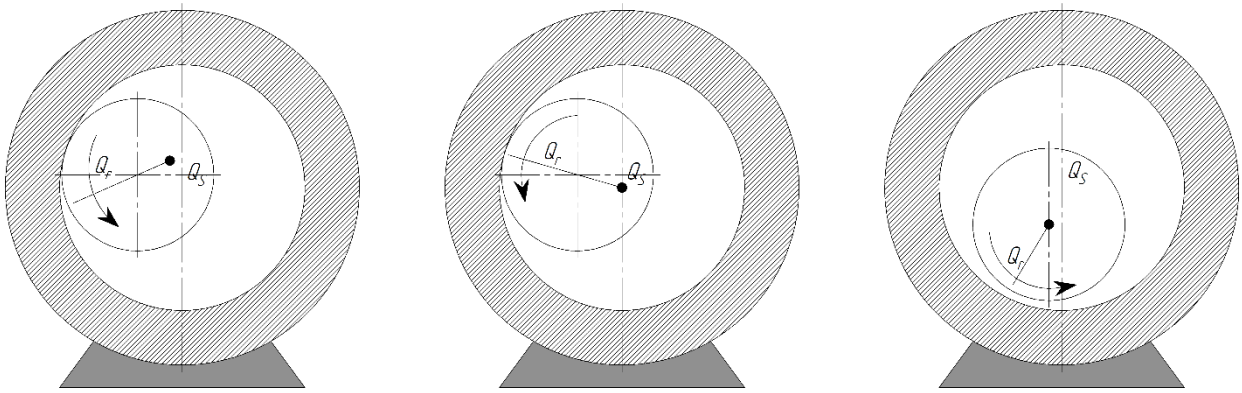
Рисунок 2 - Статистические данные распределения причин повреждений статора асинхронных силовых электрических двигателей

По данным, представленным на рисунке 2 можно сделать вывод о том, что наиболее часто повреждения в обмотках статора вызваны межвитковыми короткими замыканиями.

1.1 Неисправности асинхронных силовых электрических двигателей, вызванные нарушением эксцентриситета

К механическим неисправностям относят в первую очередь нарушение эксцентриситета ротора и выход из строя подшипников [8]. На рисунке 3 показаны упрощенные поперечные сечения асинхронного электрического двигателя с различными типами эксцентриситетов.

Смешанный эксцентриситет (рисунок 3, а) характеризуется смещением оси вращения ротора относительно оси симметрии как самого ротора (Q_r), так и относительно оси симметрии статора (Q_S).



а б в

а – смешанный эксцентриситет ротора, б – динамический эксцентриситет ротора, в – статический эксцентриситет ротора, Q_r – ось симметрии ротора, Q_S – ось симметрии статора

Рисунок 3 - Виды эксцентриситета ротора асинхронного электрического двигателя

Динамический эксцентриситет (рисунок 3, б) характеризуется смещением оси вращения ротора относительно оси его симметрии (Q_r), с совпадением с осью симметрии статора (Q_S).

Статический эксцентриситет (рисунок 3, в) характеризуется совпадением оси вращения ротора с собственной осью симметрии (Q_r), но не совпадением с осью симметрии статора (Q_S).

Эксцентриситет ротора силового асинхронного электрического двигателя характеризуется относительной величиной ε, которая определяется выражением:

$$\varepsilon = \frac{\delta_э - \delta_{min}}{\delta_э} \quad (1)$$

где $\delta_э$ – величина воздушного зазора при наличии эксцентриситета ротора, м;

δ_{min} – минимально допустимая величина воздушного зазора для рассматриваемого асинхронного силового электрического двигателя, м.

При использовании выражения (1) полученное значение эксцентриситета (ε) должно сравниваться с допустимым, т.е. $\varepsilon \in (0, 1)$.

Наличие в работающим асинхронном электрическом двигателе эксцентриситета ротора любого из трех видов приводит:

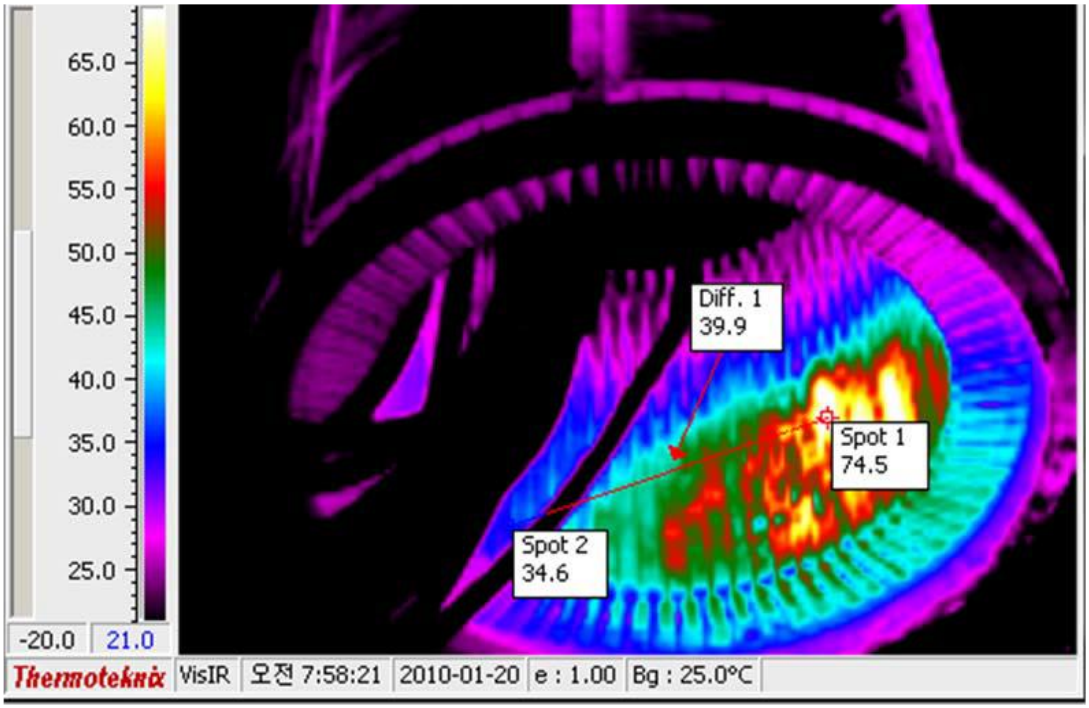
- к одностороннему магнитному притяжению и повышенному износу подшипников ротора (механический тип повреждения асинхронного силового электрического двигателя);
- к местному перегреву магнитопровода статора и пробою изоляции статора (электрический тип повреждения асинхронного силового электрического двигателя);
- выходу из строя подшипникового узла (механический тип повреждения асинхронного силового электрического двигателя).

Все перечисленные повреждения асинхронного силового электрического двигателя, вызванные увеличенным эксцентриситетом ротора, могут быть продиагностированы на ранней стадии следующими методами:

- мониторингом и анализом вибраций;
- мониторингом и анализом теплового состояния;
- мониторингом и анализом спектральных характеристик тока статора.

Метод анализа вибраций и метод анализа спектральных характеристик тока статора являются преимущественными при выявлении эксцентриситета ротора. Метод, связанный с анализом теплового состояния, не позволяет определить возникающее повреждение на ранней стадии, так как постоянное использование тепловизионного контроля (с помощью тепловизора) является затруднительным, равно как и размещение температурных датчиков внутри статора асинхронного силового электрического двигателя.

На рисунке 4 изображены повреждения асинхронного силового электрического двигателя, вызванные наличием эксцентриситета ротора.



а

б

а – пробой изоляции статора, вызванный перегревом магнитопровода, б – последствия соприкосновения ротора и статора асинхронного силового электрического двигателя при превышение допустимой величины эксцентриситета

Рисунок 4 - Последствия превышения допустимой величины эксцентриситета ротора

Проведенный анализ повреждений асинхронного силового электрического двигателя позволил определить преимущественные методы

его выявления, а также типы повреждений, вызываемых в асинхронном электрическом двигателе.

1.2 Неисправности асинхронных силовых электрических двигателей, вызванные нарушением целостности стержней ротора

Одним из самых нагруженных конструктивных элементов асинхронного силового электродвигателя является ротор. В процессе эксплуатации асинхронного силового электрического двигателя ротор подвергается воздействию центробежных сил, тепловому расширению, ударным токовым нагрузкам и электродинамическим усилиям [4], что в итоге приводит к нарушению целостности стержней ротора.

Нарушение целостности стержней ротора асинхронного электрического двигателя может происходить как по всей длине стержня, так и месте контакта стержня с коротко замыкающим кольцом.

При повреждении целостности стержней ротора снижается средний электромагнитный момент и возрастает амплитуда колебаний крутящего момента создаваемого электрическим двигателем. Рост амплитуды колебаний крутящего момента напрямую вызывает колебания в частоте вращения ротора. Также при нарушении целостности стержней ротора возрастает скольжение асинхронного электрического двигателя и его рост зависит от числа стержней с нарушенной целостностью.

Последствия повреждения целостности стержней ротора являются источниками дополнительного роста амплитуды механических колебаний, приводящих к выходу асинхронного электрического двигателя из строя.

На рисунке 5 представлены изображения повреждений ротора асинхронных силовых электрических двигателей [4].

а

б

в

г

а – выход стержня из паза ротора с последующим коротким замыканием обмотки статора асинхронного двигателя типа АДЧР, б – выход стержня из паза ротора асинхронного электродвигателя типа ДАЗО, в – выход стержня из паза ротора асинхронного электрического двигателя типа АНЗ, г – повреждение обмотки статора, вызванное выходом стержня из паза ротора асинхронного электрического двигателя типа АНЗ

Рисунок 5 - Изображения повреждений ротора асинхронного электрического двигателя

Для диагностики повреждений ротора, связанных с нарушением целостности стержней применяются

- мониторинг и анализ вибраций;
- методы акустической эмиссии;
- мониторинг и анализ теплового состояния;

– мониторинг и анализ спектральных характеристик тока и напряжения статора.

При этом следует отметить, что применение метода, связанного с мониторингом и анализом спектральных характеристик тока и напряжения статора, является достаточно перспективным, так как он не требует применения дополнительных дорогостоящих датчиков и приборов в отличие от других методов.

1.3 Неисправности асинхронных электродвигателей вызванные повреждениями подшипников

Неисправности, связанные с повреждениями подшипников, являются распространенными повреждениями асинхронных электродвигателей. Причинами выхода из строя подшипников асинхронных электродвигателей являются:

– загрязнение смазки подшипника;
– превышение допустимой нагрузки на подшипники;
– присутствие подшипниковых токов.

На рисунке 6 показаны типовые повреждения подшипников асинхронных электродвигателей.

При возникновении неисправностей асинхронного электродвигателя возникают повышенные вибрации ротора, а также самого электродвигателя, а также повышенный шум при работе асинхронного электродвигателя. При этом выявление неисправностей, вызванных повреждением подшипника достаточно проблематично. Данный вид повреждений поло диагностируется методами спектрального анализа тока статора.

Наиболее действенным методом выявления данного типа повреждений является применение систем измерения вибраций и шума. Другие методы дают недостаточно точные результаты.

а б в г

а – повреждение внутренней обоймы подшипника; б – повреждение наружной обоймы подшипника; в – повреждение стакана подшипника; г – повреждение шарика подшипника

Рисунок 6 - Изображения повреждений подшипников асинхронного электрического двигателя

Стоит отметить, что повреждения подшипников, согласно проведенному анализу типовых повреждений (рисунок 1), данный тип повреждений стоит на втором месте повреждений асинхронных электродвигателей. Однако электрические повреждения асинхронных электродвигателей являются более распространенными.

1.4 Электрические повреждения асинхронных электродвигателей

К электрическим повреждениям асинхронных электродвигателей относятся следующие виды повреждений:

- короткие замыкания между фазами обмотки статора;
- короткие замыкания между витками обмотки статора;
- кроткое замыкание между фазой обмотки на корпус статора асинхронного электродвигателя.

На рисунке 7 показано изображение электрического повреждения асинхронного электрического двигателя.

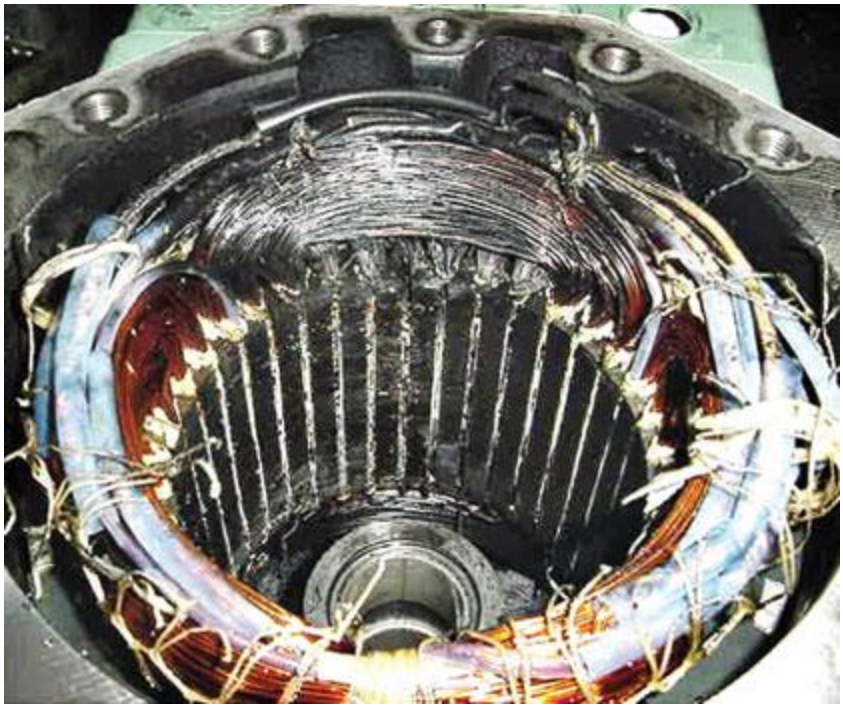


Рисунок 7 - Изображения повреждения, вызванного коротким замыканием

При возникновении электрического повреждения асинхронного электродвигателя двигатель может продолжать работу, при этом рабочие характеристики двигателя ухудшаются [5]. Для выявления повреждений могут быть использованы методы спектрального анализа.

Выводы по разделу.

В первом разделе выпускной квалификационной работы выполнен анализ неисправностей силовых асинхронных электрических двигателей. Среди неисправностей рассмотрены неисправности, вызванные нарушением эксцентриситета ротора, нарушением целостности стержней ротора, повреждениями подшипников; короткими замыканиями в обмотке статора.

Для каждого рассмотренного типа повреждений определены методы являющиеся наиболее перспективными для тих выявления.

Для рассмотренных неисправностей наиболее перспективным методом их диагностики является метод, связанный с мониторингом и анализом спектральных характеристик тока и напряжения статора асинхронного электрического двигателя.

Проведенный анализ повреждений асинхронных электродвигателей позволил выявить, что электрические повреждения асинхронных электродвигателей являются наиболее распространенными типом повреждений и на их долю приходится около 88% от всех повреждений. Исходя из результатов проведенного анализа необходимо рассматривать электрические повреждения и методы их определения.

2 Проведение визуального осмотра для выявления повреждений асинхронных электрических электродвигателей

При проявлении повреждения асинхронного двигателя происходит изменение его характеристик работы. При этом возможно определение типа повреждения по результатам визуального осмотра. Для выявления данных повреждений может применяться таблица неисправностей [15].

При визуальном осмотре и выявлении неисправностей ориентируются на следующие характерные признаки:

- асинхронный электродвигатель не включается;
- наблюдается затрудненный пуск асинхронного электродвигателя;
- при запуске асинхронного электродвигателя наблюдается повышенное гудение;
- при работе асинхронного двигателя наблюдается повышенного гудение;
- при работе асинхронного электродвигателя без нагрузки наблюдается сильный нагрев;
- при работе асинхронного электродвигателя под нагрузкой наблюдается сильный нагрев;
- при работе асинхронного электродвигателя проявляется сильный нагрев частей обмотки статора электродвигателя.

Перечисленные признаки позволяют выделить следующие неисправности:

- перегрузка электродвигателя;
- обрыв фазного питающего провода;
- пониженное питающее напряжение сети;
- пониженная частота питающего напряжения в сети;
- повышенное питающее напряжение в сети;
- повышенная частота напряжения в питающей сети;

– неверная схема подключения асинхронного электродвигателя;
– межвитковое замыкание в статорной обмотке асинхронного электродвигателя;
– междуфазное замыкание в статорной обмотке асинхронного электродвигателя;
– неправильная установка осевых вентиляторов охлаждения асинхронного электродвигателя.

Дополнительно для трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутыми роторами могут диагностироваться дополнительные повреждения по наличию следующих признаков:

– при включении асинхронного электродвигателя не происходит разворот двигателя;
– при включении асинхронного электродвигателя не происходит разворот двигателя, однако после проворота вала двигатель разворачивается. При этом вращение асинхронного электродвигателя сопровождается сильными толчками и повышенным гудением;
– при включении асинхронного электродвигателя без нагрузки двигатель вращается, однако при подключении нагрузки двигатель останавливается;
– при включении асинхронного электродвигателя наблюдается повышенное гудение, при этом скорость вращения ротора низкая, а при измерении токов наблюдается разность в значениях фазных токов, а при подключении двигателя без нагрузки фазные токи превышают номинальные значения;
– при номинальной нагрузке существенно увеличивается нагрев конструктивных частей;
– при проведении измерений сопротивления изоляции асинхронного электродвигателя регистрируются низкие значения;
– при работе асинхронного электродвигателя наблюдается повышенная вибрация, которая сохраняется при отключении от сети;

– высокая вибрация при работе асинхронного электродвигателя, при этом наблюдается высокая разница в значениях фазных токах, а работа двигателя сопровождается быстрым нагревом части статора.

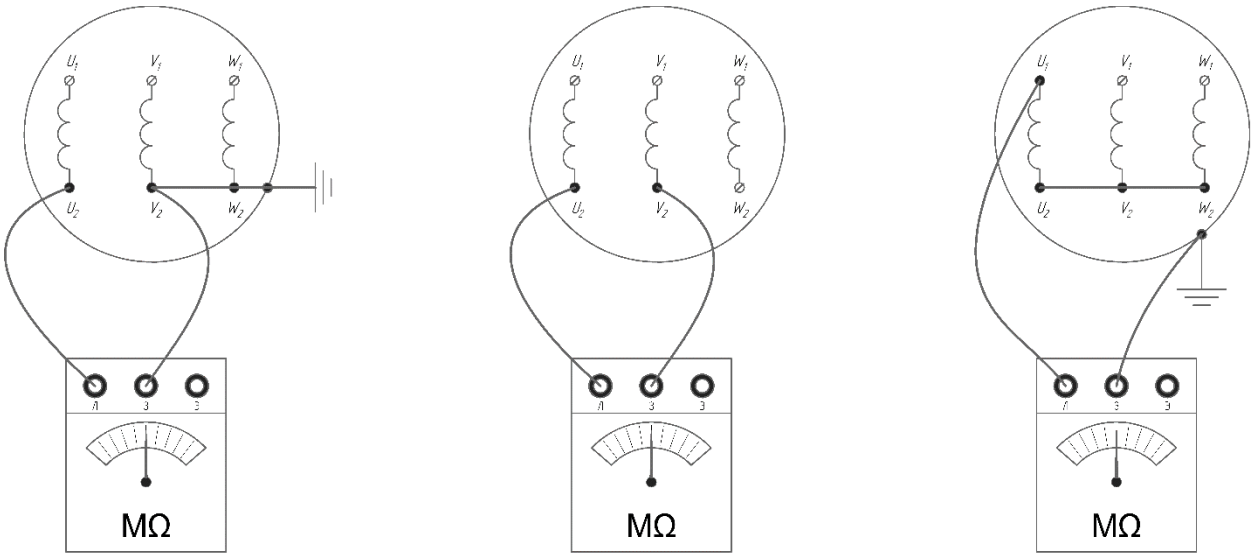
Дополнительные признаки, при визуальном осмотре, позволяют диагностировать следующие повреждения:

– обрыв питающего провода, в том числе из-за перегорания плавкой вставки защитного предохранителя или отключения одной из фаз автоматического выключателя, при отсутствии механической связи в конструкции автоматического выключателя;
– внутренние обрывы в фазной статорной обмотке асинхронного электродвигателя;
– пониженное напряжение в питающей сети;
– неверная сборка схемы работы электродвигателя;
– обрыв стержней ротора;
– витковые замыкания в статорной обмотке;
– загрязнение вентиляционных каналов двигателя и вызванный этим повышенный нагрев;
– старение изоляции асинхронного электродвигателя;
– увлажнение изоляции асинхронного электродвигателя;
– дисбаланс ротора;
– нарушение соосности валов электродвигателей и рабочего механизма;
– короткое замыкание обмотки статора.

Как видно из представленных основных и дополнительных признаков может быть выявлено большое число различных повреждений. При этом часть повреждений определяется с помощью дополнительных измерений, таких как измерение температуры статора, измерение сопротивления изоляции, а также измерение фазных токов.

Для проведения измерений температуры статора асинхронного электрического двигателя, а также для выявления неравномерного нагрева используются тепловизоры. Измерение фазных токов может быть выполнено по средствам подключения измерительных клещей в момент работы асинхронного электродвигателя, а измерение сопротивления изоляции выполняется с помощью мегомметров.

Схема проведения измерений сопротивления изоляции для трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором представлена на рисунке 8.



а б в

а – схема измерения сопротивления фазной обмотки относительно статора и других фазных обмоток; б – схема измерения сопротивления между фазными обмотками; в – схема измерения сопротивления фазной обмотки относительно статора

Рисунок 8 - Схема измерения сопротивления изоляции трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

На рисунке 8 показаны схемы:

– измерения сопротивления изоляции фазной обмотки статора относительно статора и других обмоток (рисунок 8а), измерение сопротивления фазы А, выводы обмоток U_2 относительно корпуса, фазы В и фазы С;

– измерения сопротивления междуфазной изоляции обмотки статора (рисунок 8б), измерение сопротивления между фазами А и В, выводы обмоток $U_2 - V_2$;
– измерения сопротивления изоляции обмотки статора относительно корпуса асинхронного электродвигателя (рисунок 8в).

При проведении измерений сопротивления изоляции могут применяться различные модели мегомметров: как цифровые, так и аналоговые.

При использовании аналоговых мегомметров необходимо выполнять условие – измерение сопротивления в течении минимум 60 с. Данное значение времени позволяет достигнуть установившегося значения сопротивления изоляции (R_{60}). На практике также измерение сопротивления изоляции также может применяться для определения степени увлажнения изоляции. Для этого сопротивление измеряют в течении 15 с (R_{15}). Степень увлажнения определяют по расчетному коэффициенту:

$$К_{абс.} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (2)$$

где R_{60} – значение сопротивления изоляции, измеренное мегомметром в течении 60 с и приведенное к нормальным условиям, МОм;

R_{15} – значение сопротивления изоляции, измеренное мегомметром в течении 15 с и приведенное к нормальным условиям, МОм.

Для увлажненной изоляции расчетный коэффициент (2) $К_{абс.} = 1$. Для сухой изоляции $К_{абс.} = 1{,}3$.

Таблица 1 - Регламентируемые значения сопротивления изоляции

Напряжение асинхронного электродвигателя, кВ	Сопротивление изоляции, приведенное нормальным условиям R_{60}, Ом
0,4	10
3	30
6	60
10	100

Выводы по разделу.

Представлены признаки позволяющие при визуальном осмотре выявить повреждения асинхронных электродвигателей.

Также подробно описаны дополнительные признаки позволяющие выявить повреждения конкретно асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, а также повреждения, выявляемые по дополнительным признакам.

Как видно из перечисленных неисправностей, часть из них относится к проблемам вызванным качеством электрической энергии питающей сети, а часть относится к ошибкам подключения или выбора асинхронных электрических двигателей. При этом визуальный осмотр позволяет выявить наличие электрических повреждений асинхронных электрических двигателей, а именно межвитковые короткие замыкания в статорной обмотке и междуфазные короткие замыкания в статорной обмотке. При выявлении данных неисправностей эксплуатационный персонал должен провести осмотр и измерение сопротивления статорной обмотки асинхронного электрического двигателя.

Определено, что на практике применяется метод измерения сопротивления изоляции позволяющий выявить большую часть повреждений асинхронного электродвигателя. Представлена схема измерения сопротивления изоляции, а также методика определения степени увлажнения изоляции.

3 Разработка модели трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и возможностью моделирования электрических повреждений

Разработана модель трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором позволяющая оценивать характеристики асинхронного электродвигателя и моделировать повреждения, отнесенные к группе электрических, рассмотренные в первом и втором разделах выпускной квалификационной работы. При разработке модели использованы стандартные средства программного комплекса с библиотеками MATLAB/Simulink.

3.1 Разработка модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Для разработки модели выполним расчет параметров согласно методике представленной в [22] для трехфазного асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором серии 4А и паспортными данными согласно [17] представленным в таблице 2.

Таблица 2 - Паспортные данные асинхронного электродвигателя

Наименование параметра	Единица измерения	Обозначение параметра	Значение параметра
Типоразмер	-	-	4А180М2У3
Номинальная мощность	кВт	$P_{\text{ном}}$	30
Паспортная скорость вращения	об/мин	n_0	3000
Номинальный коэффициент полезного действия	%	$\eta_{\text{ном}}$	90,5
Номинальный коэффициент активной мощности	-	$\cos\varphi$	0,9
Номинальная частота питающей сети	Гц	$f_{\text{ном}}$	50
Главное индуктивное сопротивление	о.е.	X_{μ}	3,8
Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме	о.е.	R_1'	0,030
Индуктивное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме	о.е.	X_1'	0,073

Продолжение таблицы 2

Наименование параметра	Единица измерения	Обозначение параметра	Значение параметра
Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме	о.е.	R_2''	0,018
Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме	о.е.	X_2''	0,11
Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора при коротком замыкании асинхронной машины	о.е.	$R_{2п}''$	0,024
Активное сопротивление короткого замыкания	о.е.	$R_{кп}$	0,054
Индуктивное сопротивление короткого замыкания	о.е.	$X_{кп}$	0,13
Кратность пускового момента	%	$m_п$	1,4
Кратность максимального момента	%	$m_М$	1,1
Кратность критического момента	%	$m_К$	2,5
Номинальное скольжение	%	$s_{ном}$	1,8
Критическое скольжение	%	$s_К$	12,5
Кратность пускового тока	-	$i_П$	7,5
Момент инерции	кг·м^2	J	0,085
Номинальное напряжение	В	$U_{ном}$	380

Полная номинальная мощность :

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos\varphi} = \frac{30 \cdot 10^3}{0{,}9} = 33{,}333 \text{ (кВА)} \quad (3)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность, согласно таблице 2, кВт;

$\cos\varphi$ – номинальный коэффициент активной мощности, согласно таблице 2.

Номинальный ток двигателя:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{ном}},$$

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{ном}} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}905} = 55{,}961 \text{ (А)} \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, согласно таблице 2.

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_{\text{s}} = \frac{R_1' \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}},$$
$$R_{\text{s}} = \frac{0{,}030 \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 0{,}118 \text{ (Ом)} \quad (5)$$

где R_1' - активное сопротивление обмотки статора асинхронного электрического двигателя в номинальном режиме, согласно таблице 2, о.е.;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение двигателя, согласно таблице 2, В;

$I_{\text{ном}}$ – ток двигателя в номинальном режиме, определенный в (4), А.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора для номинального режима:

$$R_{\text{r}}' = \frac{R_2'' \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}},$$
$$R_{\text{r}}' = \frac{0{,}018 \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 0{,}071 \text{ (Ом)} \quad (6)$$

где R_2'' - приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме, согласно таблице 2, о.е.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора для режима прямого пуска:

$$R_{\text{r}}' = \frac{R_{2\text{п}}'' \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}}, \quad (7)$$

$$R_{\text{r}}^{'} = \frac{0{,}024 \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 0{,}094 \text{ (Ом)}$$

где $R''_{2\text{п}}$ - приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора при коротком замыкании асинхронной машины, согласно таблице 2, о.е.

Индуктивности рассеяния обмоток статора для установившегося режима:

$$L_{\ell\text{s}} = \frac{X'_1}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}},$$
$$L_{\ell\text{s}} = \frac{0{,}073}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 0{,}00091 \text{ (Гн)} \quad (8)$$

где X'_1 - индуктивное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме, согласно таблице 2, о.е.;

$f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающей сети, согласно таблице 2, Гц.

Индуктивности рассеяния обмоток ротора для установившегося режима:

$$L'_{\ell\text{r}} = \frac{X''_2}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}},$$
$$L'_{\ell\text{r}} = \frac{0{,}11}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 1{,}373 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)} \quad (9)$$

где X''_2 - приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме, согласно таблице 2, о.е.

Индуктивности рассеяния обмоток статора для режима прямого пуска:

$$L_{\ell\text{s}} = L'_{\ell\text{r}} = \frac{X_{\text{кп}}}{4\pi \cdot f_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

$$L_{\ell s} = L'_{\ell r} = \frac{0{,}13}{4\pi \cdot 50} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 8{,}111 \cdot 10^{-4}\ (\text{Гн})$$

где $X_{\text{кп}}$ - индуктивное сопротивление короткого замыкания, согласно таблице 2, о.е.

Индуктивность цепи намагничивания для установившегося режима:

$$L_{\text{m}} = \frac{X_{\mu}}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}},$$
$$L_{\text{m}} = \frac{3{,}8}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 55{,}961} = 0{,}047\ (\text{Гн}) \quad (11)$$

где X_{μ} - главное индуктивное сопротивление, согласно таблице 2, о.е.

Индуктивность цепи намагничивания для режима прямого пуска:

$$L'_{\text{m}} = \text{К}_{\text{m}} \cdot L_{\text{m}} = 0{,}3 \cdot 0{,}047 = 0{,}0141\ (\text{Гн}) \quad (12)$$

где К_{m} – коэффициент связи индуктивности цепи намагничивания для установившегося режима и индуктивности цепи намагничивания режима прямого пуска. Согласно [8] принимается $\text{К}_{\text{m}} = 0{,}3$.

Номинальная частота вращения:

$$n_{\text{н}} = n_0 \left(1 - \frac{s_{\text{ном}}}{100}\right) = 3000 \left(1 - \frac{1{,}8}{100}\right) = 2964\ \left(\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right) \quad (13)$$

где n_0 - паспортная скорость вращения, согласно таблице 2, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$;

$s_{\text{ном}}$ - номинальное скольжение, согласно таблице 2, %.

Коэффициент вязкого трения может быть примерно определён по выражению:

$$F = \frac{К_{мех} \cdot P_{ном}}{\left(2\pi \cdot \frac{n_н}{60}\right)^2} = \frac{0{,}03 \cdot 30000}{\left(2\pi \cdot \frac{2694}{60}\right)^2} = 0{,}003599 \quad (14)$$

где $К_{мех}$ – коэффициент связи номинальной мощности асинхронного электрического двигателя с номинальной мощностью, согласно [8] принимается $К_{мех} = 0{,}03$.

Число пар магнитных полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f_{ном}}{n_0} = 1 \quad (15)$$

где $f_{ном}$ – номинальная частота питающего напряжения, согласно таблице 2, Гц;

n_0 – паспортная частота вращения двигателя, согласно таблице 2, $\frac{об}{мин}$.

Полученные расчетные значения параметров модели асинхронного электрического двигателя представленные в (3) - (15) занесем в блок модели Asynchronous Machine из библиотеке стандартных элементов Simulink.

Так как все параметры рассчитанные по выражениям (3) - (15) получены в именованных единицах, то блок модели асинхронного электродвигателя в MATLAB/Simulink также будем использовать с возможностью ввода параметров в именованных единицах (Asynchronous Machine SI Units) [1].

Общий вид модели с асинхронным электрическим двигателем представлен на рисунке 9.

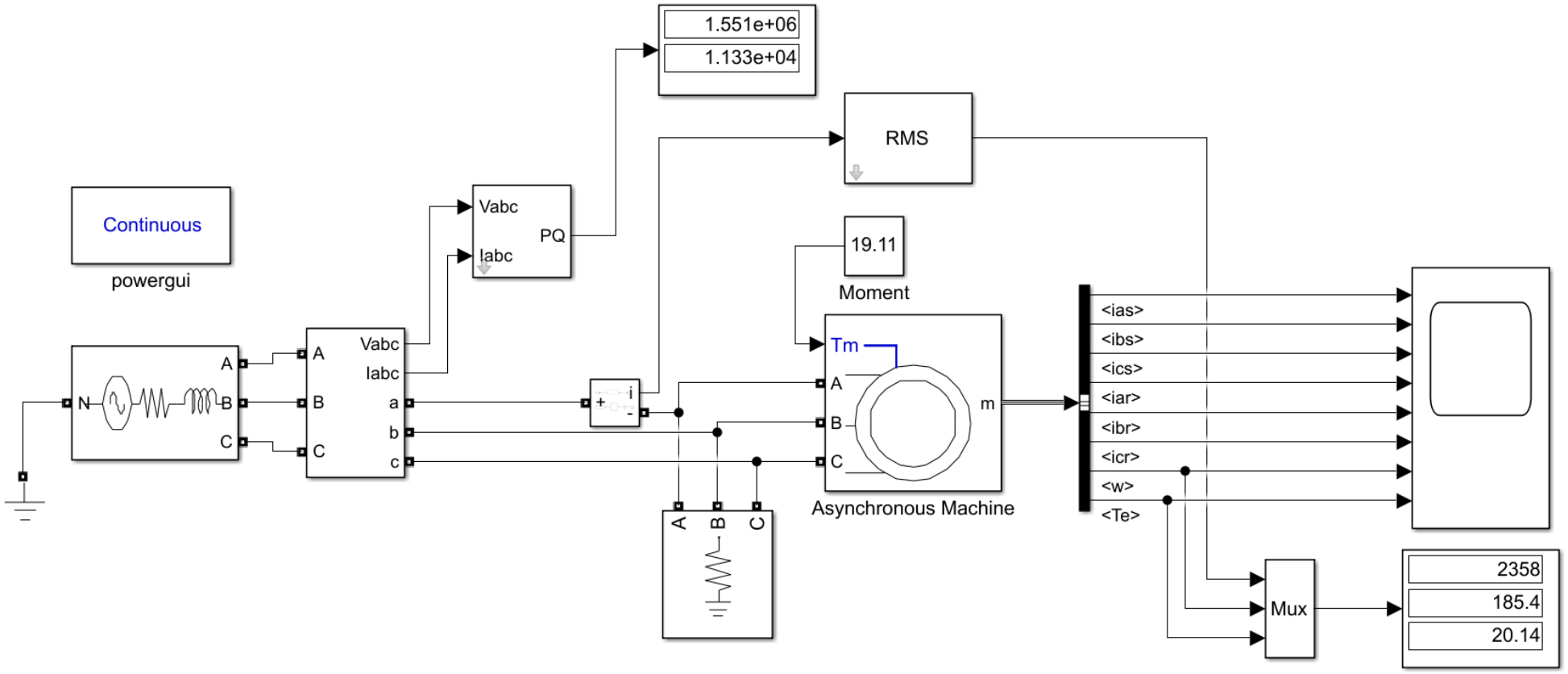


Рисунок 9 - Общая модель асинхронного электродвигателя без учета повреждений

Модель (рисунок 9) состоит из следующих блоков:

- источник питания (Three-Phase Source);
- трехфазный измеритель параметров питающей сети (Three-Phase V-I Measurement);
- измеритель трехфазной активной и реактивной мощностей (3-phase Instantaneous Active & Reactive Power);
- блок измерения действующих значений (RMS);
- блок измерения фазного тока (Current Measurement);
- блок трехфазной нагрузки (Three-Phase Series RLC Load);
- блок модели асинхронного двигателя (Asynchronous Machine SI Units);
- блок для моделирования момента на валу асинхронного двигателя (Constant);
- блок измерения внутренних параметров модели асинхронного двигателя (Bus Selector);
- блок построения осциллограмм (Scope) и отображения данных измерения (Display).

Для верификации разработанной модели асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором, необходимо смоделировать бездефектный режим его работы. Для моделирования режима работы асинхронного электрического двигателя без повреждений необходимо определить номинальный механический момент по выражению:

$$M_{\text{ном}} = \frac{60 \cdot P_{\text{ном}}}{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}} = \frac{60 \cdot 30 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 2964} = 96{,}65 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность асинхронного электрического двигателя, согласно таблице 2, Вт;

$n_{\text{н}}$ – частота вращения ротора асинхронного электрического двигателя в установившемся режиме работы, определено в (13), $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Осциллограммы, характеризующие режим прямого пуска модели асинхронного электрического двигателя с моментом на валу 11,641 Н·м показаны на рисунках 10, 11 и 12.

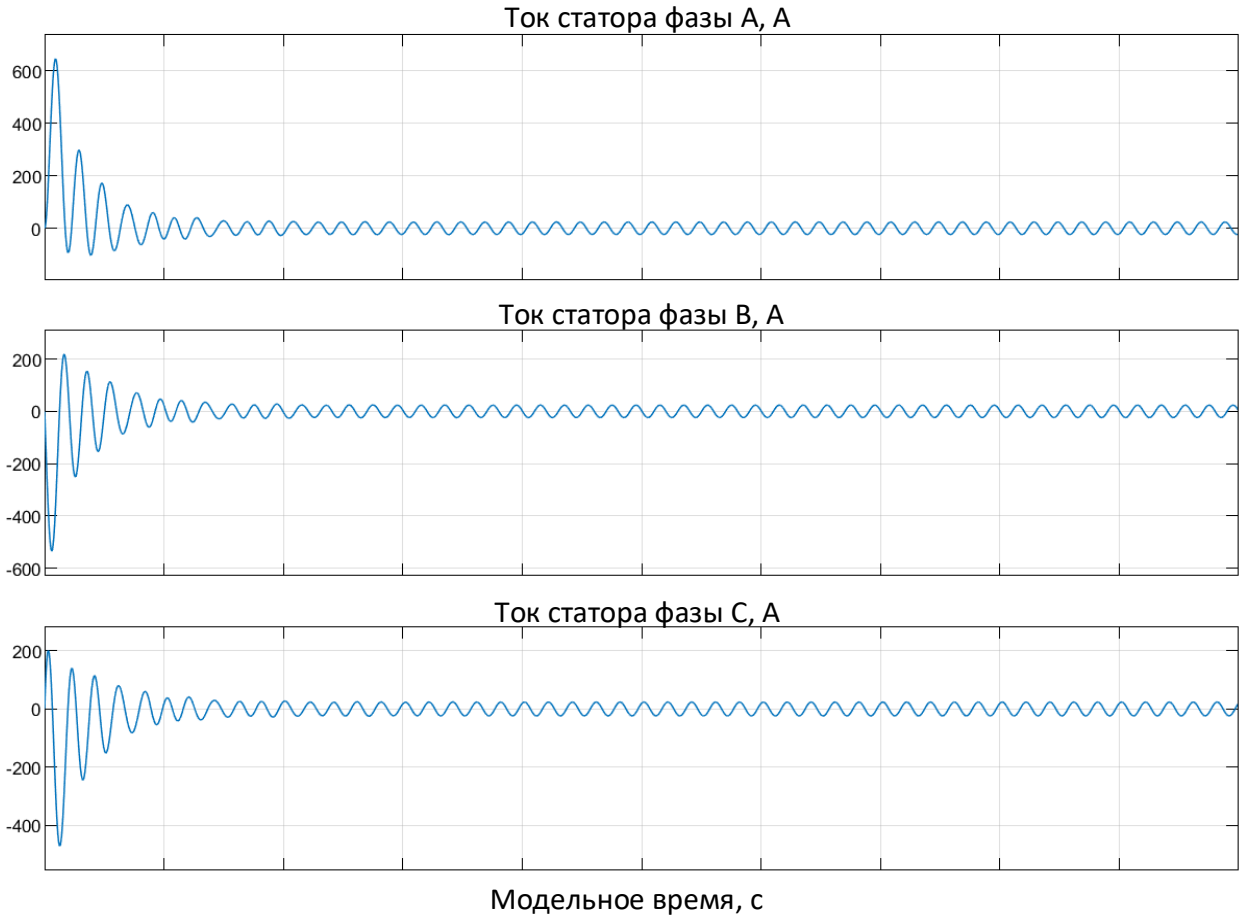


Рисунок 10 - Изменения мгновенных значений фазного тока обмоток статора асинхронного электрического двигателя при прямом пуске с моментом 11,641 Н·м

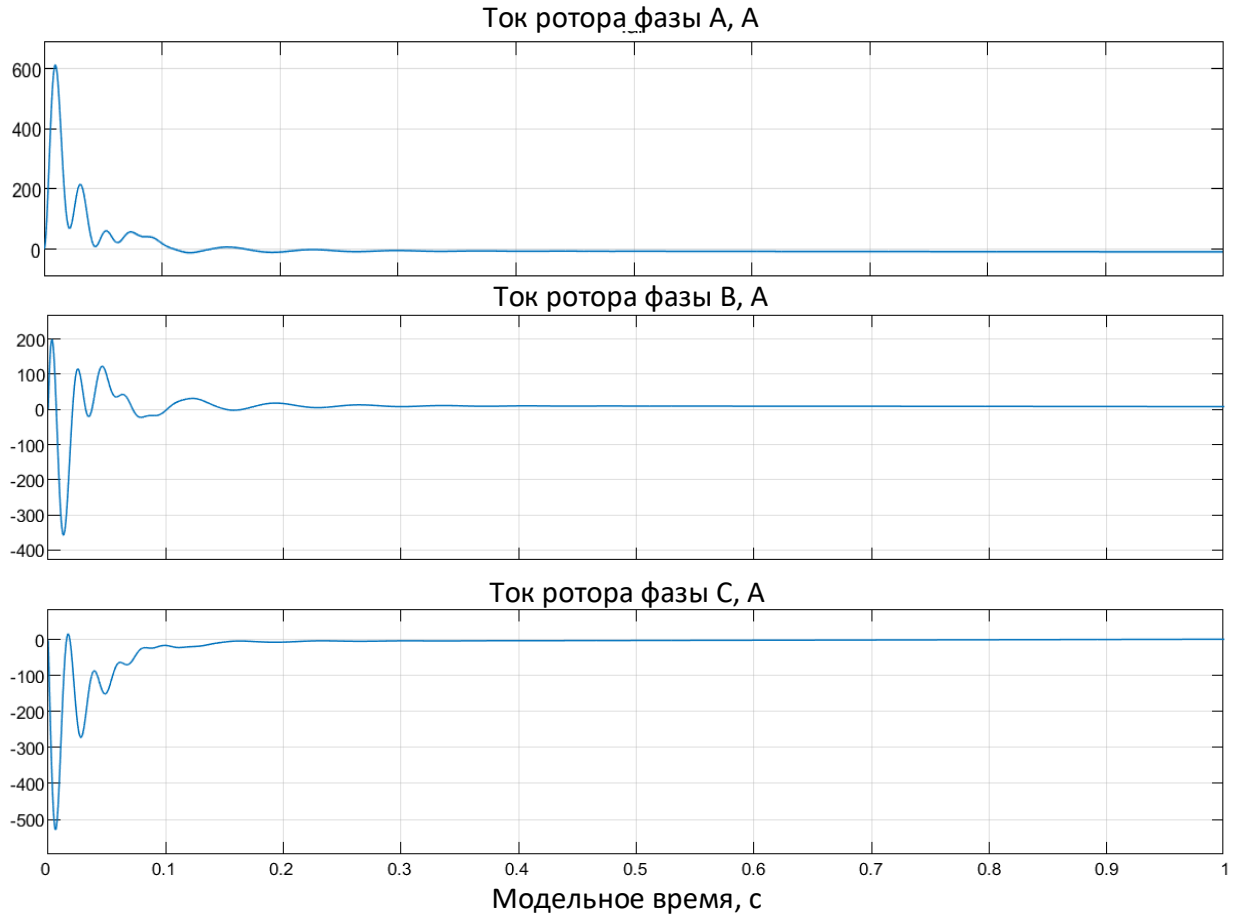


Рисунок 11 - Изменения мгновенных значений фазного тока ротора асинхронного электрического двигателя при прямом пуске с моментом 11,641 Н·м

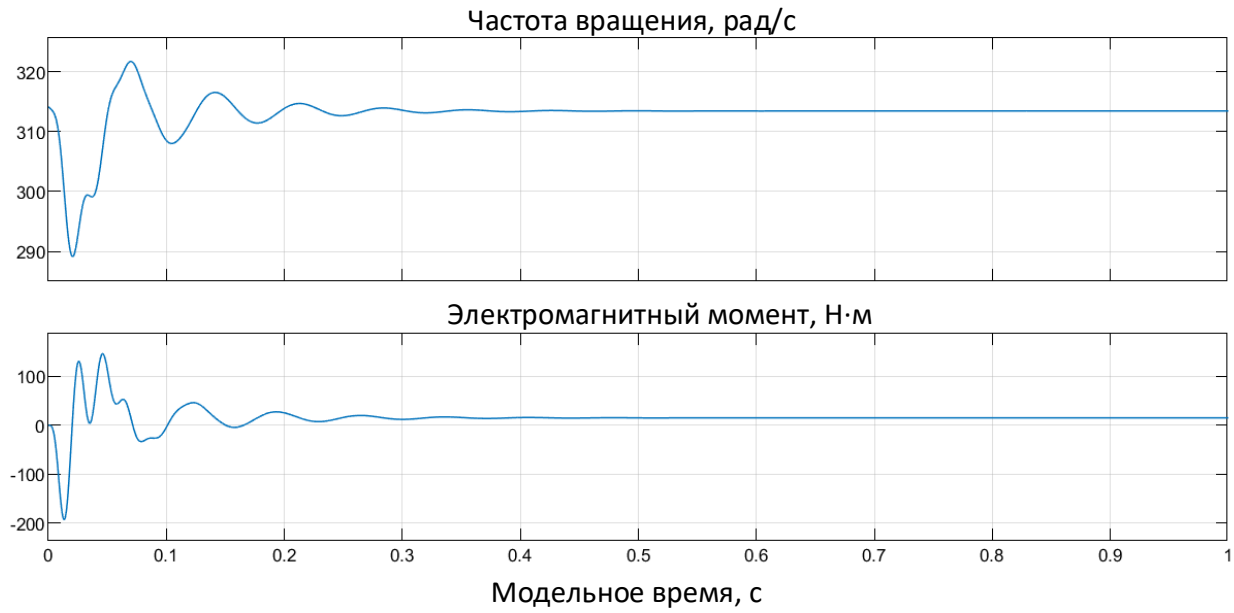


Рисунок 12 - Изменения мгновенных значений частоты вращения и электромагнитного момента асинхронного электрического двигателя при прямом пуске с моментом 11,641 Н·м

Как видно из осциллограмм (рисунки 10, 11 и 12) прямой пуск вызывает переходной процесс как в обмотках статора, так и в обмотках ротора асинхронного электродвигателя. При этом ток статора возрастает, что коррелируется с теоретическими данными о кратности пускового тока. При этом в момент модельного времени 0,3 с асинхронный электрический двигатель входит в установившийся режим работы, т.е. колебания мгновенных значений тока статора и ротора, а также скорости вращения и электромагнитного момента прекращаются.

Схема модели при моделировании работы асинхронного электродвигателя при номинальном моменте на валу показана на рисунке 13.

Как видно из показаний измерительных приборов на рисунке 13, при номинальном моменте на валу асинхронного электродвигателя 96,65 Н·м активная мощность, потребляемая из сети с учетом дополнительной нагрузки $P_{\text{доп}} = 10$ (Вт)10 Вт составляет $P_{\text{изм}} = 32385{,}17$ (Вт), при этом реактивная мощность составляет $Q_{\text{изм}} = 15040{,}55$ (вар). При этом измеренный ток двигателя $I_{\text{изм}} = 51{,}56$ (А), а измеренная скорость вращения асинхронного двигателя $n_{\text{изм}} = 2953 \left(\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right)$. По измеренным значениям активной и реактивной мощностей получим величину полной мощности, потребляемой асинхронным электрическим двигателем из сети:

$$S_{\text{изм}} = \sqrt{P_{\text{изм}}^2 + Q_{\text{изм}}^2},$$

$$S_{\text{изм}} = \sqrt{32385{,}17^2 + 15040{,}55^2} = 35707{,}3855 \text{ (ВА)}$$

При этом коэффициент активной мощности:

$$\cos\varphi_{\text{изм}} = \frac{P_{\text{изм}}}{S_{\text{изм}}} = \frac{32385{,}17}{35707{,}3855} = 0{,}907$$

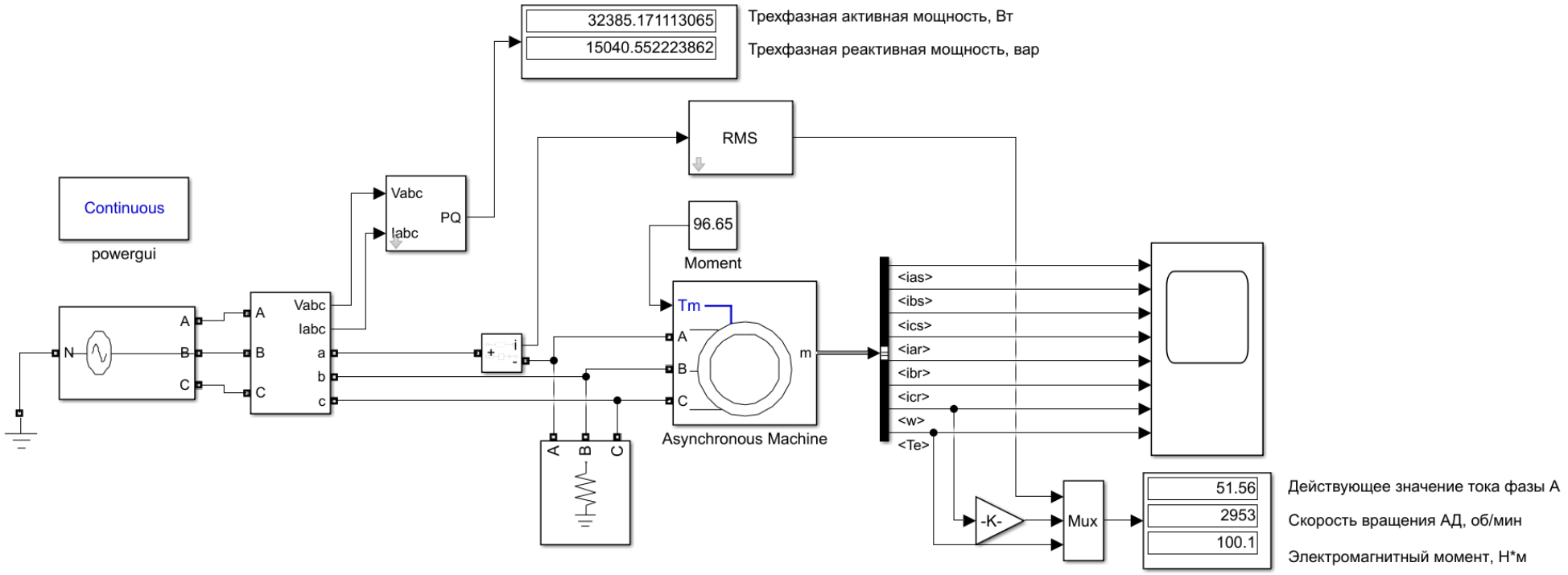


Рисунок 13 - Общая модель асинхронного электродвигателя без учета повреждений при моделировании режима прямого пуска с номинальным моментом на валу 96,65 Н·м

Полученные в результате модельного эксперимента значения согласуются с паспортными значениями (таблица 2) асинхронного электрического двигателя серии 4А с типоразмером 4А180М2У3.

Разработана компьютерная модель трехфазного асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором. Для разработки модели в качестве объекта выбран электрический двигатель серии 4А с типоразмером 4А180М2У3 и номинальной мощностью 30 кВт. Для данного двигателя определены паспортные данные и рассчитаны параметры модели. Компьютерная модель асинхронного электрического двигателя разработана с использованием блоков программного комплекса MATLAB/Simulink [7]. Представлено подробное описание блоков-компонентов модели. Показано, что разработанная компьютерная модель асинхронного электрического двигателя может быть также использована для определения характеристик асинхронного электрического двигателя в различных режимах его работы.

Для контроля точности расчета параметров модели асинхронного электрического двигателя, а также определения моделируемых неисправностей необходимо построить годограф нормального (установившегося) режима работы трехфазного асинхронного двигателя без повреждений.

Для построения годографа необходимо принять допущение, что асинхронный двигатель идеализируется и является симметричной трехфазной активно-индуктивной нагрузкой. С учетом принятого допущения для построения годографа обобщенного вектора тока Парка (Горева) для статора асинхронного двигателя воспользуемся выражениями [16]:

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_{\text{ном}.max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ i_q = \dfrac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_{\text{ном}.max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \dfrac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (16)$$

где $I_{\text{ном}.max}$ – амплитудное значение номинального тока асинхронного электродвигателя, А;

ω – угловая частота, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Для выражения (16) амплитудное значение тока определим как:

$$I_{\text{ном}.max} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}} \quad (17)$$

С учетом номинального тока асинхронного двигателя $I_{\text{ном}} = 55{,}961$ (А) по (17) получим:

$$I_{\text{ном}.max} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}} = \sqrt{2} \cdot 55{,}961 = 79{,}141 \text{ (А)}$$

Для построения годографа обобщенного вектора тока Парка (Горева) воспользуемся интервалом времени $t \in [0{,}01; 0{,}04]$ с шагом $\Delta t = 0{,}00001$ (с). Построенный годограф обобщенного вектора тока Парка (Горева) для асинхронного двигателя с параметрами из таблицы 2 по выражению (16) представлен на рисунке 14, построение выполнено с использованием инструментов пакета Mathcad [12].

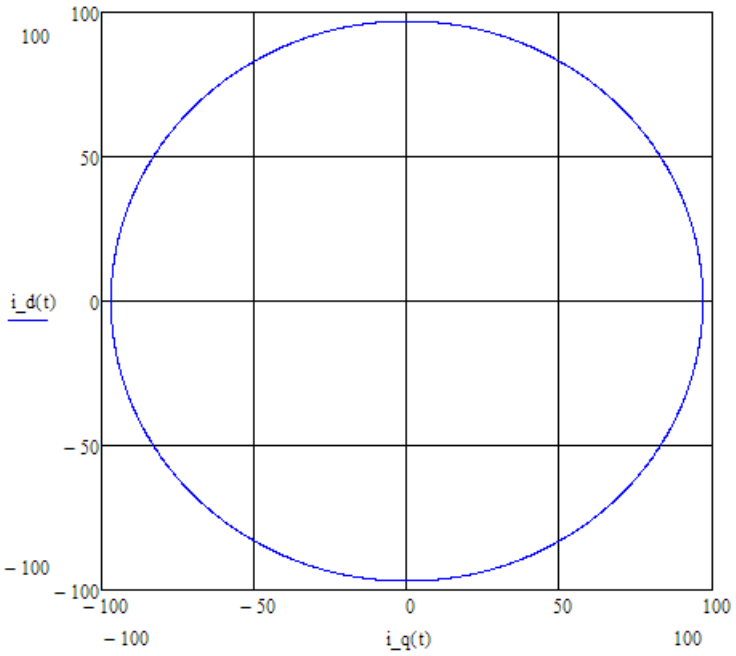


Рисунок 14 - Годограф обобщенного вектора тока Парка (Горева)

Из рисунка 14 видно, что годограф обобщенного вектора тока Парка (Горева) имеет форму круга с центром в точке с координатами $(0{,}0; 0{,}0)$ и радиусом, описанным координатами $(0{,}0; 0{,}0) - (0{,}0; 96{,}927)$, что характеризует нормальное состояние асинхронного двигателя в установившемся (нормальном) режиме работы. При изменении параметров режима работы асинхронного двигателя происходит изменение формы годографа, что позволяет определять возможные причины, в том числе и повреждения асинхронного двигателя.

Для выполнения цели выпускной квалификационной работы разработанную модель асинхронного двигателя необходимо дополнить блоками моделирования внутренних электрических повреждений [2].

3.2 Разработка модели с учетом электрических повреждений асинхронного электродвигателя

При разработке модели асинхронного электродвигателя с учетом электрических повреждений рассмотрены следующие повреждения [15]:

- короткое замыкание между фазными обмотками в статоре асинхронного электрического двигателя;
- повреждение обмотки статора – обрыв обмотки;
- короткое замыкание фазной обмотки статора на корпус статора асинхронного электрического двигателя.

Для оценки и выявления повреждения асинхронного электрического двигателя необходимо использовать результаты моделирования его работы в бездефектном состоянии, а также годограф, характеризующий работу моделируемого асинхронного электрического двигателя в нормальном (установившемся) режиме работы, которые представлены в подразделе 3.1 выпускной квалификационной работы.

Схема модели с учетом повреждений – короткое замыкания в обмотках статора асинхронного двигателя представлена на рисунке 15.

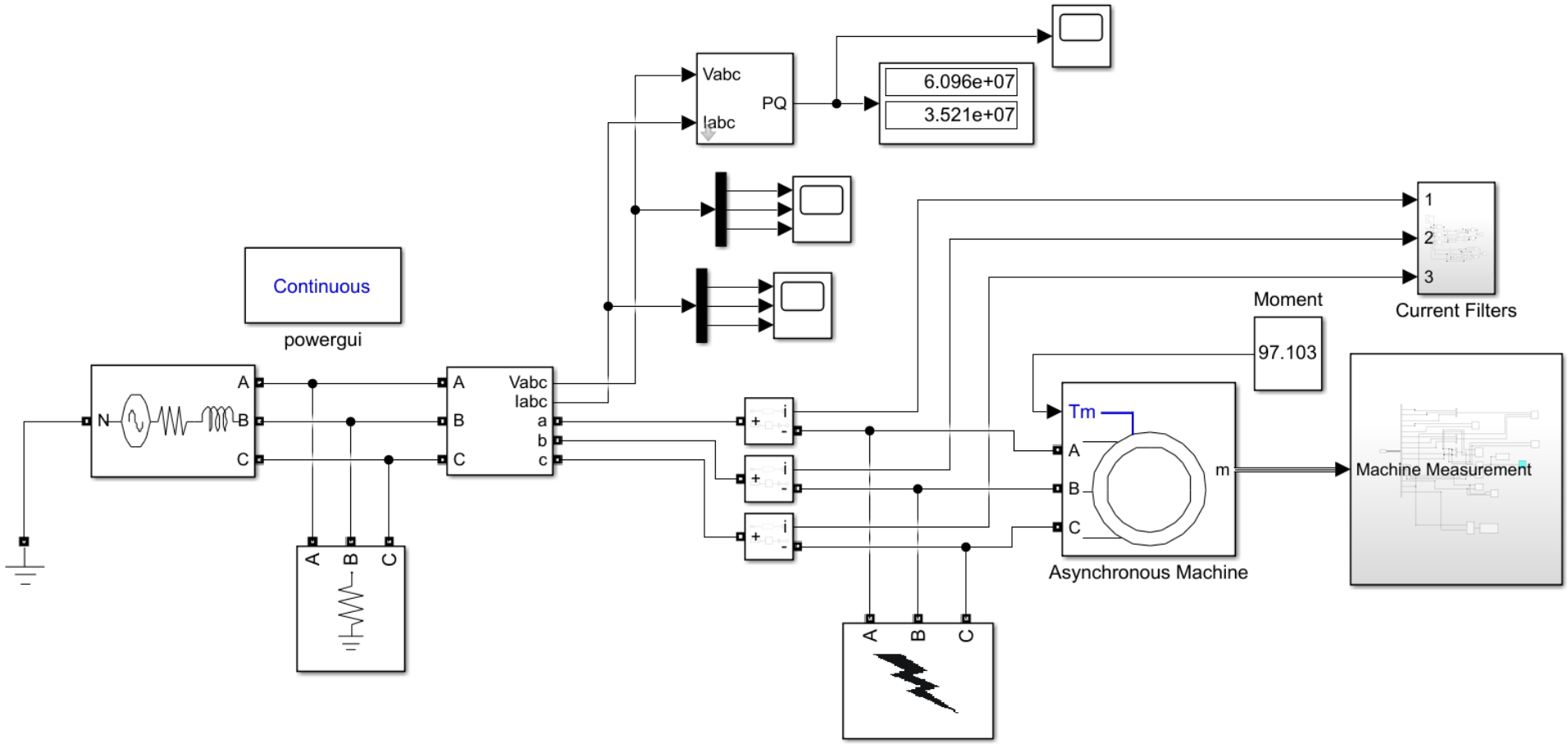


Рисунок 15 - Общая модель асинхронного электродвигателя с учетом повреждений – короткое замыкание обмоток статора

Моделирование повреждения – короткого замыкания обмоток статора асинхронного электрического двигателя выполним для замыканий типа:

- трехфазное короткое замыкание на землю;
- двухфазное короткое замыкание
- двухфазное короткое замыкание на землю
- однофазное короткое замыкание на землю.

Для моделирования повреждений необходимо вывести модель асинхронного электродвигателя в установившийся режим работы. Для определения установившегося режима работы воспользуемся инструментом блока «powergui» - «Load Flow Analyzer». Инструмент «Load Flow Analyzer» позволяет автоматически определить режимные параметры соответствующие установившемуся режиму работы, а именно:

- напряжения источника питания;
- фазовые углы источника питания;
- момент на валу асинхронного электродвигателя;
- скольжение в номинальном режиме работы.

Для разработанной модели асинхронного электрического двигателя с учетом повреждений обмотки статора – коротких замыканий параметры установившегося режима, определенные блоком «Load Flow Analyzer»:

- напряжения источника питания: линейное напряжение 380·1,00017 В;
- угол фазы А источника питания: 0,014674°;
- момент на валу асинхронного электродвигателя: 97,103 Н·м;
- скольжение в номинальном режиме работы: 0,0165837.

Также для подтверждения соответствия моделируемого режима работы асинхронного электрического двигателя установившемуся (нормальному) необходимо построить годограф вектора тока Парка (Горева) [9] для статорных обмоток. Годограф строится без учета переходного процесса возникающего в момент запуска модели и соответственно началу работы асинхронного

двигателя. Согласно результатам моделирования переходный процесс, соответствующий запуску модели и пуску асинхронного электрического двигателя заканчивается в 0,3 с модельного времени. Годограф для момента времени с 0,3 с до 0,6 с соответствующий установившемуся (нормальному) режиму работы представлен на рисунке 16.

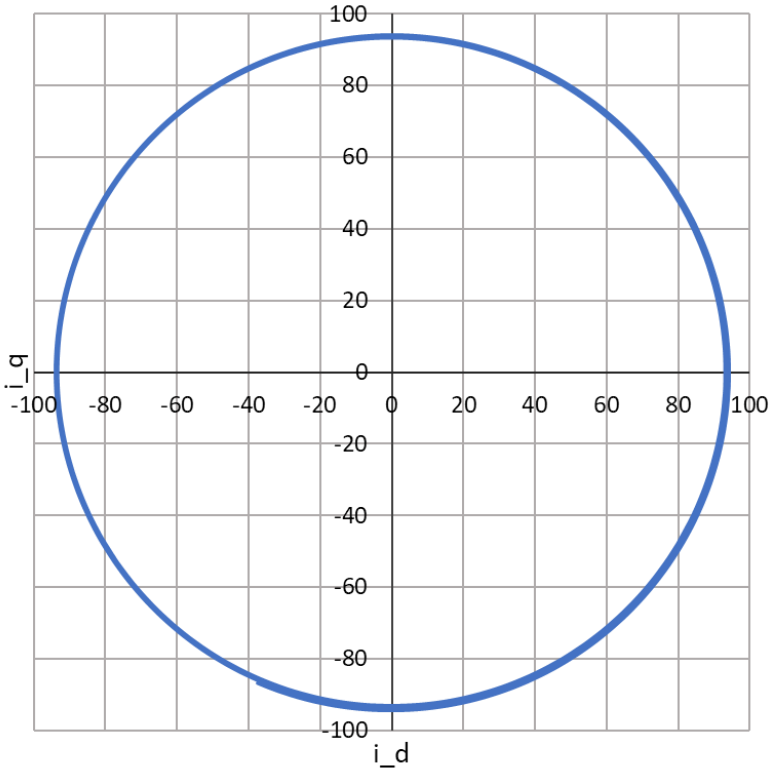


Рисунок 16 - Безаварийная работа модели асинхронного двигателя в установившемся режиме работы

Сравнивая годографы на рисунках 15 и 16 можно установить, что оба годографа имеют одинаковую форму – форму круга. При этом отличается, только диаметр круга так как инструмент «Load Flow Analyzer» определяет номинальный момент исходя из механической мощности асинхронного двигателя, которая задана для моделируемого двигателя на уровне 30 кВт.

При моделировании короткого замыкания используется блок «Three-Phase Fault» позволяющий моделировать различные типа коротких замыканий. Короткое замыкание будет смоделировано после выхода двигателя на установившийся (нормальный) режим работы, т.е. после 0,3 с модельного

времени. Моделирование короткого замыкания происходит в момент модельного времени 0,5 с, а продолжительность короткого замыкания 0,5 с, т.е. с 0,5 с до 1,0 с модельного времени. При этом годограф повреждения будет записан с 0,5 с модельного времени. Дополнительно, контролировать момент появления повреждения необходимо по графику функции тока статора и спектру функции тока статора вида:

$$f(i_d, i_q) = \frac{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}}{\sqrt{2}} \tag{18}$$

где i_d – мгновенные значения тока статора по оси d;

i_q – мгновенные значения тока статора по оси q.

Спектральный анализ функции (18) позволит также диагностировать возникновение повреждений асинхронного электродвигателя. При этом учитывается, что в бездефектном состоянии спектр функции (18) содержит постоянную составляющую ($f = 0$ Гц), в условиях возникновения дефекта в спектре функции (18) будут возникать дополнительные гармонические составляющие, а также изменяться форма годографа вектора Парка (Горева) для тока статора асинхронного электродвигателя от формы круга к форме эллипса или утолщенного круга. Одновременный анализ спектра функции (18) и формы годографа вектора Парка (Горева) тока статора позволяет определять внутренние дефекты асинхронного электродвигателя, в том числе на ранней стадии их развития. При этом необходимо учитывать, что дефекты асинхронного электродвигателя выявляются в режиме работы, т.е. в режиме реального времени [3].

Для определения неисправностей, вызванных короткими замыканиями в обмотке статора асинхронного электродвигателя по частотному спектру [23] функции (18) анализируется наличие и амплитуды характерных частот, соответствующих выражению [13]:

$$f_{\text{кз.статора}} = f_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k\right) \quad (19)$$

где $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота сети, Гц;

n, k – нечетные целые числа;

p – число пар полюсов асинхронного электродвигателя;

s – скольжение асинхронного электродвигателя.

Для моделируемого асинхронного электродвигателя по (19) частоты, соответствующие замыканию в обмотке статора для $n, k \in [1; 7]$: 84,25 (Гц); 88,75 (Гц); 93,25; 97,75 (Гц); 184,25 (Гц); 188,75 (Гц); 193,25 (Гц); 197,75 (Гц); 284,25 (Гц); 288,75 (Гц); 293,25 (Гц); 297,75 (Гц); 384,25 (Гц); 388,75 (Гц); 393,25 (Гц); 397,75 (Гц); 484,25 (Гц); 488,75 (Гц); 493,25 (Гц); 584,25 (Гц); 588,75 (Гц); 684,25 (Гц).

Для анализа спектра функции (18) по результатам полученным по (19) для моделируемого асинхронного электродвигателя воспользуемся инструментом блока «powergui» - «FFT Analysis».

Инструмент «FFT Analysis» позволяет определять спектр сигнала с учетом основной гармоники. Спектр сигнала, может быть, определяется для периодов сигнала, определяемых пользователем. Максимальная частота спектра также должна быть задана пользователем. Для анализа спектра функции (18) в качестве основной гармоники используется гармоника 50 Гц, а максимальная частота согласно расчетам по (19) принимается 1000 Гц, длительность анализа спектра 4 периода.

Выполним моделирование трехфазного короткого замыкания в момент модельного времени 0,5 с. Годограф для момента трехфазного короткого замыкания на землю показан на рисунке 17.

Спектр функции (18) с учетом значений полученных по (19) показан на рисунке 18.

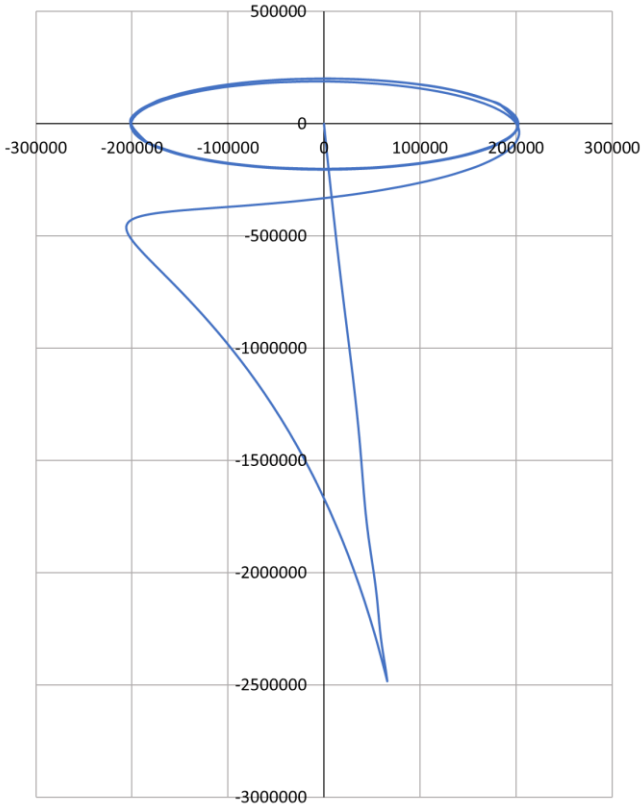


Рисунок 17 – Годограф при трехфазном коротком замыкании на землю в обмотках статора асинхронного электрического двигателя

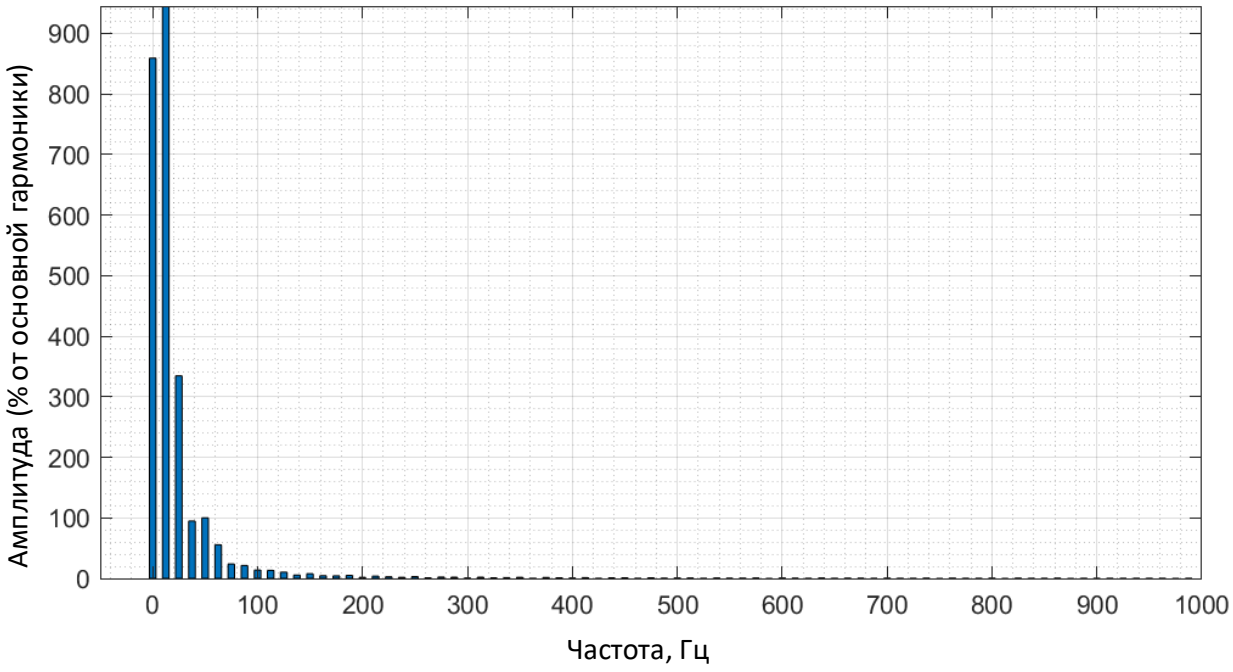


Рисунок 18 - Гармонический спектр в момент трехфазного короткого замыкания на землю в обмотках статора асинхронного электрического двигателя

Годограф на рисунке 17 при возникновении трехфазного короткого замыкания на землю изменят свою форму на форму эллипса, а спектр (рисунок 18) имеет ярко выраженные преобладания гармонических составляющих с частотами:

- 0 Гц – соответствует постоянной компоненте функции (18);
- 12,5 Гц – превышает постоянную компоненту спектра функции (18);
- 25 Гц – на уровне 40% от постоянной компоненты;
- 37,5 Гц – на уровне 11% от постоянной компоненты;
- 50 Гц – на уровне 11,5% от постоянной компоненты;
- 62,5 Гц – на уровне 6,5% от постоянной компоненты.

Все остальные компоненты спектра имеют значения ниже 3% от постоянной компоненты.

Исследуя график спектра функции (18) построенный для одного периода сигнала (рисунок 19) и момента начала короткого замыкания (0,5 с) можно наблюдать высокое значение гармоники с частотой 50 Гц, а также рост гармонических составляющих с частотами 100 Гц и выше.

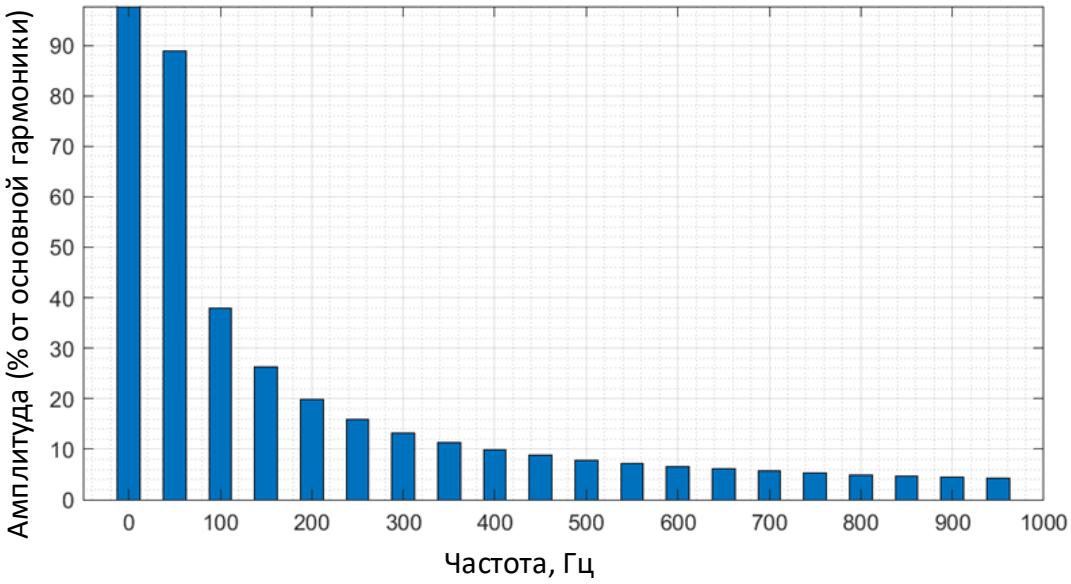


Рисунок 19 - Спектр функции одного периода для трехфазного короткого замыкания для одного периода на землю в момент 0,5 с модельного времени

В целом данная картина спектра (рисунок 19) объясняется симметричностью моделируемого повреждения – трехфазным коротким замыканием на землю. Данный вид повреждения не является ранним и его возникновение вызовет полное повреждение и выход из строя асинхронного электрического двигателя. Применение метода анализа спектра функции (18), а также анализа формы годографа, не является достаточно информативным для симметричных видов повреждений. Однако полученные результаты для трехфазного короткого замыкания могут быть использованы в дальнейшем для выявлений нарушений целостности главной изоляции асинхронных электрических машин с короткозамкнутым ротором, а именно рост сигнала с частотой 50 Гц при одновременном повышении сигнала на частоте 100 Гц.

Выполним моделирование однофазных коротких замыканий на землю и двухфазных коротких замыканий на землю для определения параметров годографов и частотного спектра.

Годограф для однофазного замыкания фазы А обмотки статора асинхронного двигателя на землю представлен на рисунке 20.

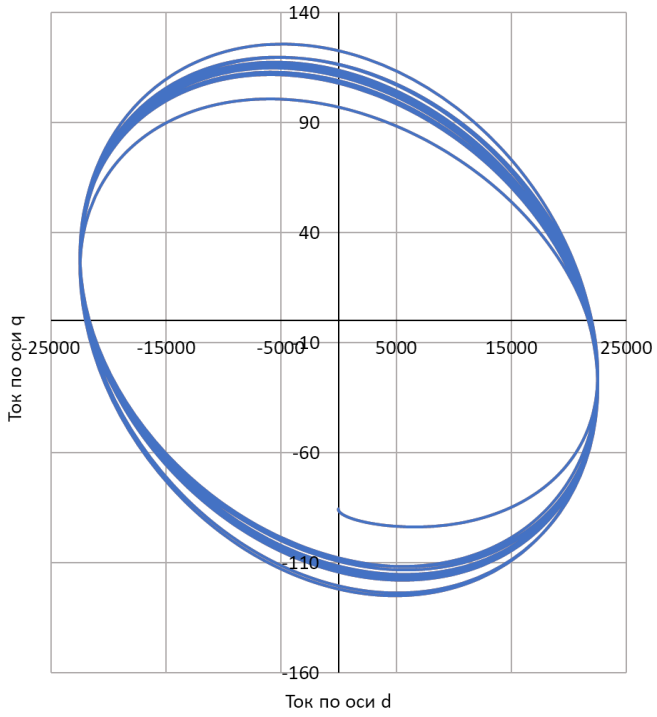
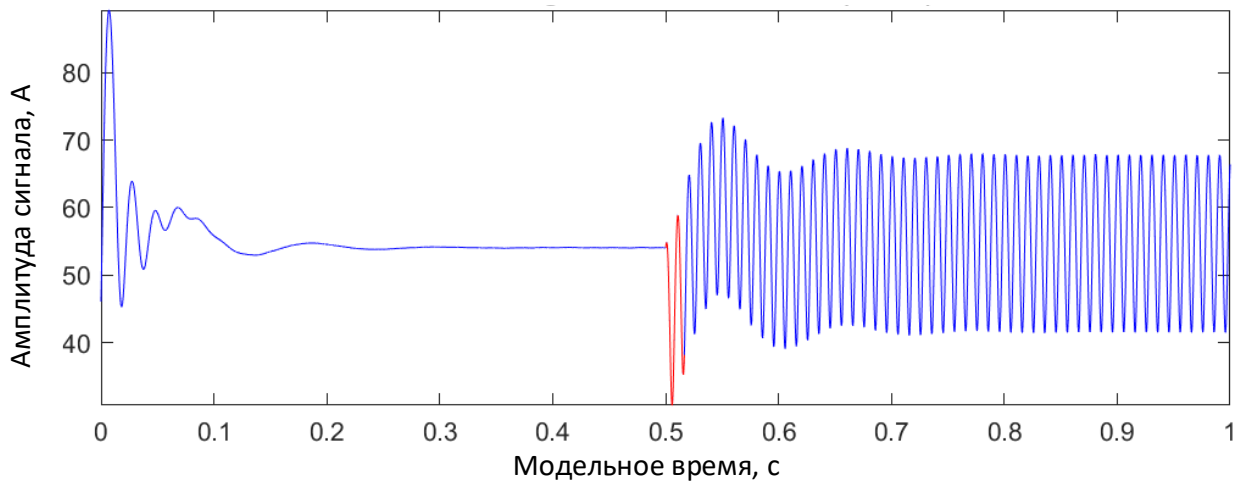
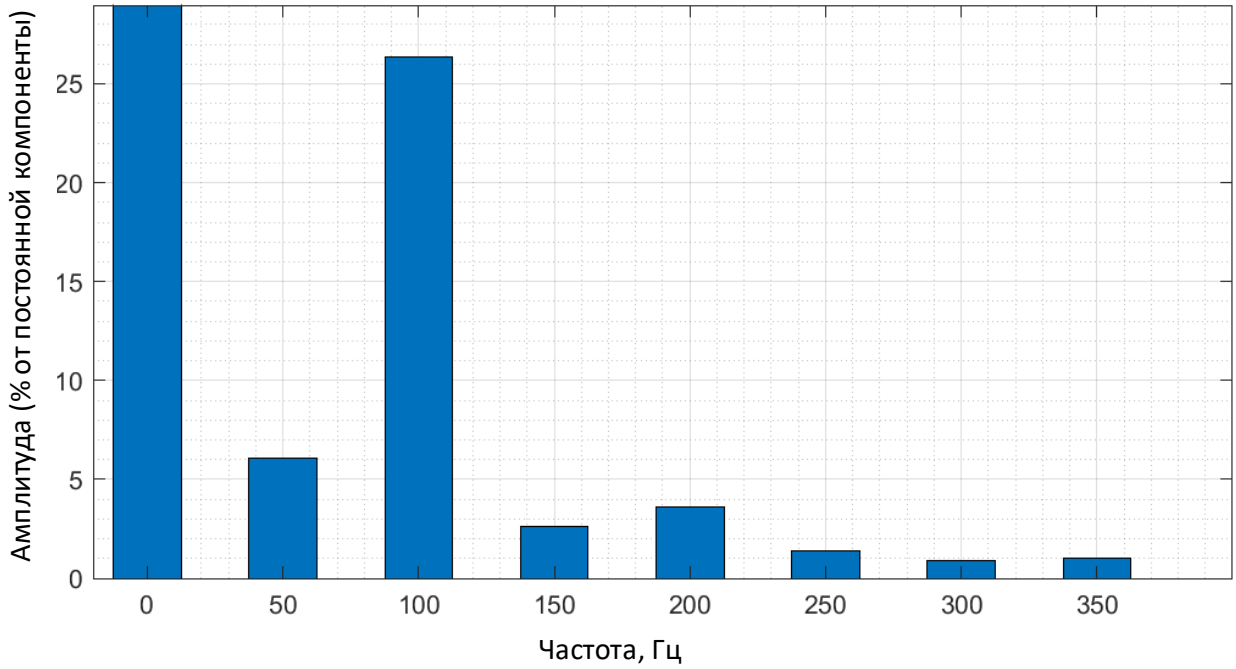


Рисунок 20 – Годограф тока вектора Парка (Горева) при замыкании фазы А на землю

На рисунке 21 показаны форма сигнала функции (18) – рисунок 21а, а также спектр для момента возникновения замыкания фазы А статорной обмотки асинхронного двигателя на землю – рисунок 21б. Момент замыкания фазы А на землю выделен на рисунке 21а красным цветом, для этого времени построен спектр рисунок 21б.



а



б

а – функция тока вектора Парка (Горева) при замыкании фазы А на землю, б – спектр функции тока вектора Парка (Горева) в момент модельного времени 0,5 с

Рисунок 21 – Вид и спектр функции тока вектора Парка (Горева) при замыкании фазы А на землю

При проведении модельного эксперимента с поочередным замыканием фаз B и C на замелю спектр тока вектора Парка (Горева), а также форма сигнала функции (18) имели схожие формы и частотные компоненты, поэтому результаты не приводятся в ВКР.

Результаты моделировании двухфазного короткого замыкания на землю представленные годографом показанным на рисунке 22.

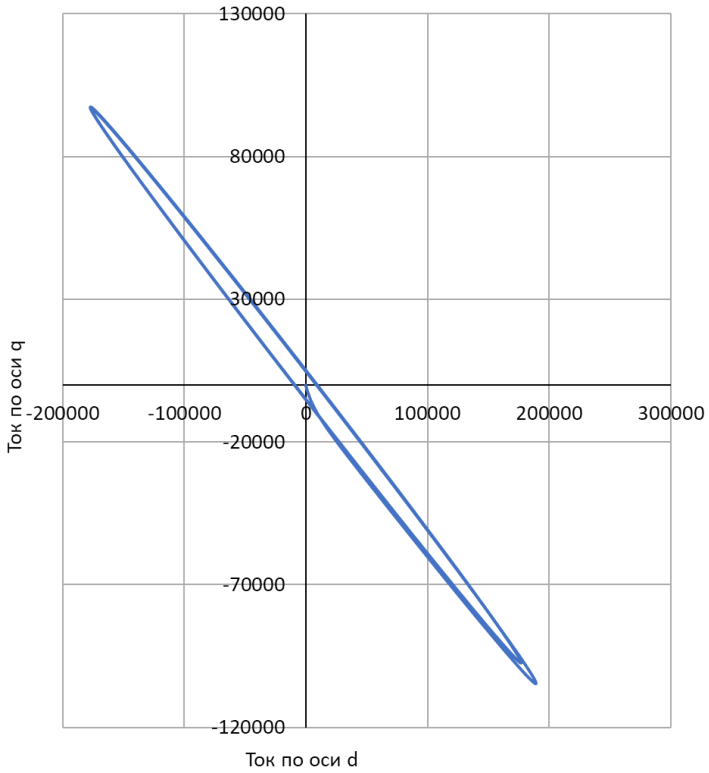
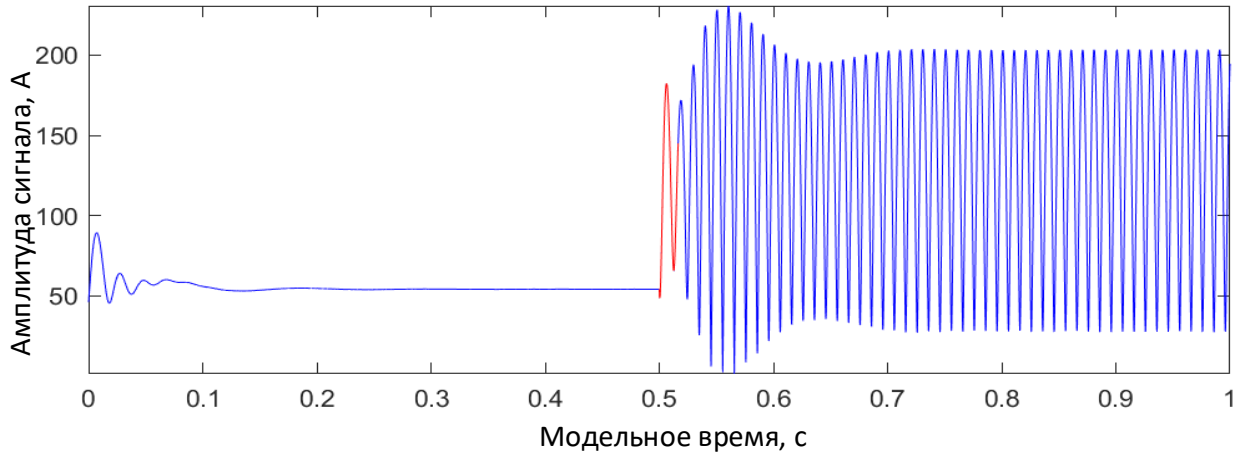


Рисунок 22 – Годограф тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз A и B на землю

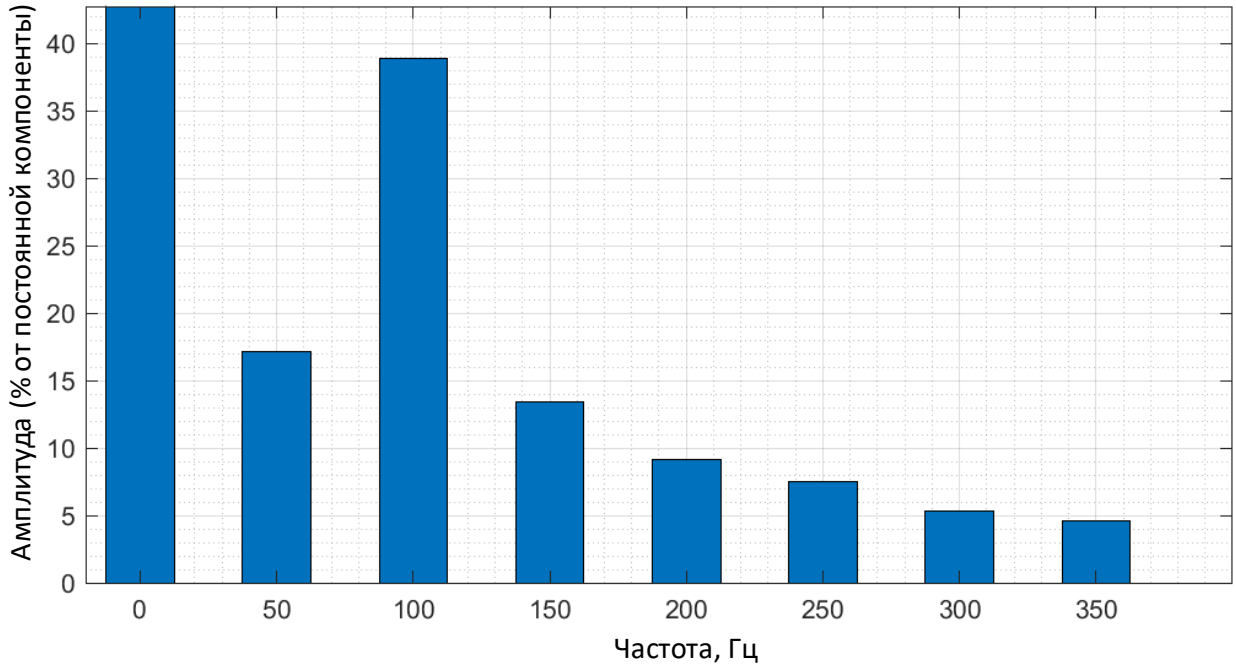
Годограф тока вектора Парка (Горева) имеет ярко выраженную эллипсоидность, центр эллипса также располагается в центре координат, однако главная ось эллипса расположена под углом, т.е. эллипс наклонен относительной осей координат, что является ярким признаком наличия двухфазного короткого замыкания на землю – высокая не симметрия по фазным токам.

Для моделируемого короткого замыкания (фазы A и B на землю) график сигнала функции (18) имеет вид, представленный на рисунке 23а. Спектр

сигнала в момент времени возникновения короткого замыкания (0,5 с) показан на рисунке 23б.



а



б

а – функция тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз А и В на землю, б – спектр функции тока вектора Парка (Горева) в момент модельного времени 0,5 с

Рисунок 23 – Вид и спектр функции тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз А и В на землю

Как видно из графика спектра (рисунок 23б) гармоники с частотами 50 Гц и 100 Гц имеют более высокую амплитуду в сравнении с однофазным коротким замыканием (рисунок 21б). При этом наблюдается также

равномерный рост уровня гармонических составляющих выше 100 Гц, а именно: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц и 350 Гц.

Выполним моделирование двухфазного короткого замыкания, между фазами А и В в обмотке статора асинхронного электрического двигателя. Годограф двухфазного короткого замыкания представлен на рисунке .

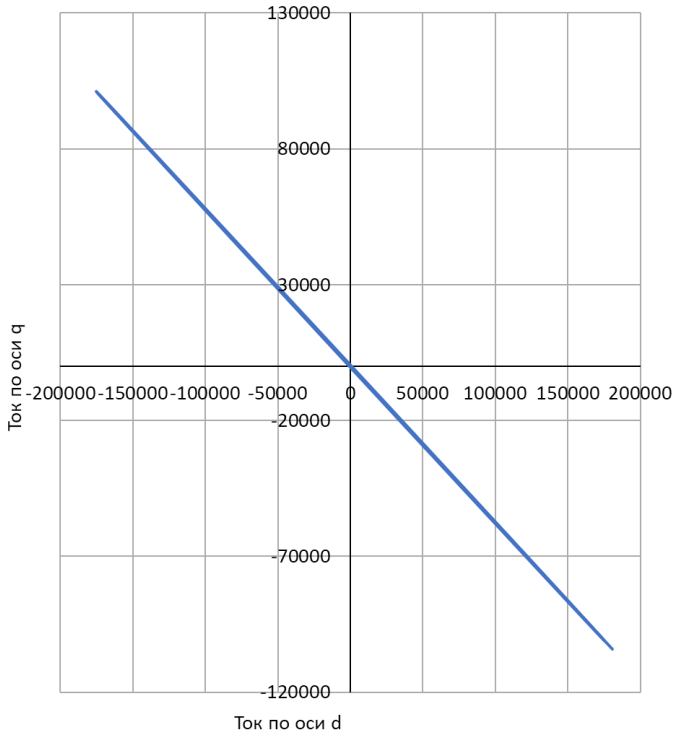
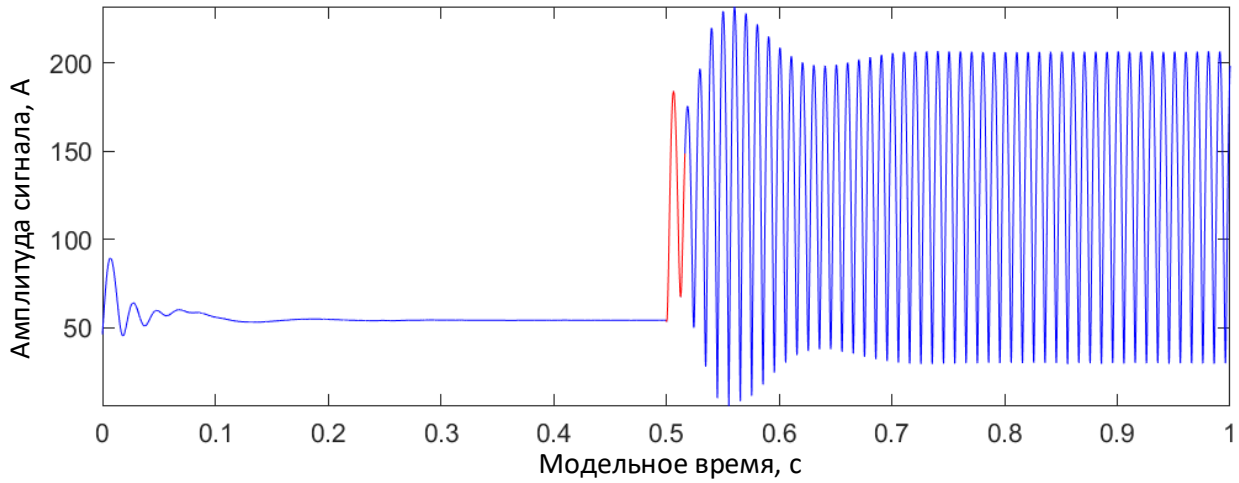


Рисунок 24 – Годограф тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз А и В

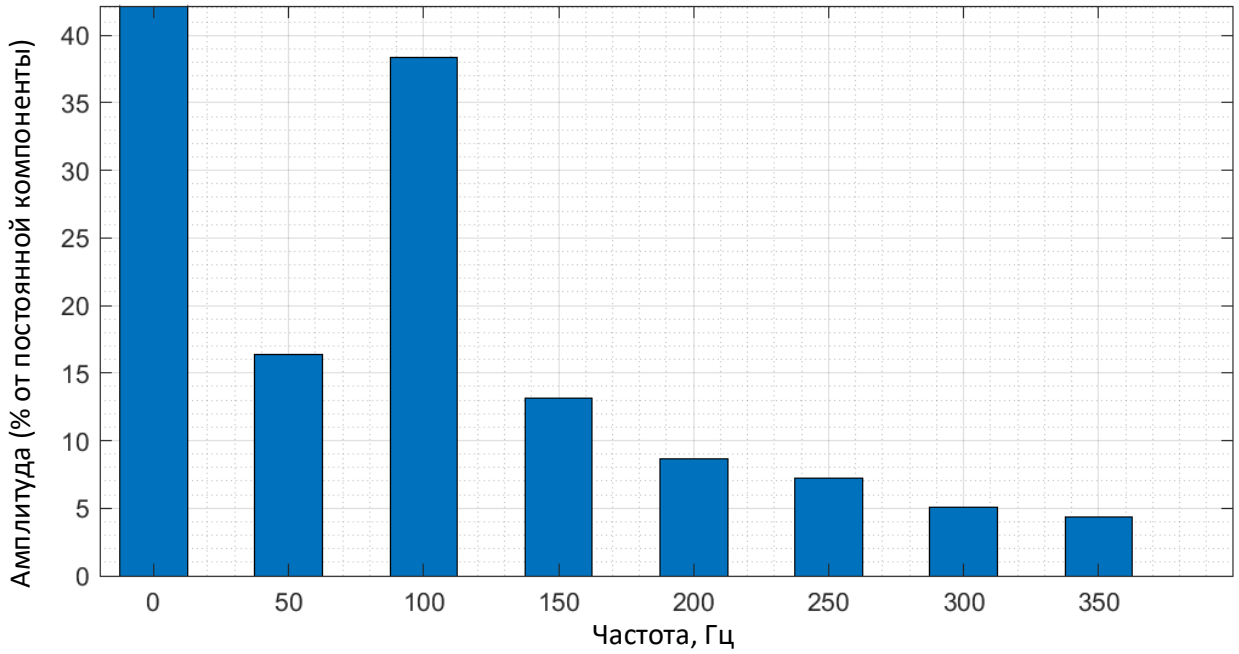
Как видно из представленного годографа, в отличие от годографа двухфазного короткого замыкания на землю (рисунок 22), годограф двухфазного короткого замыкания сужается и в масштабе именованных единиц тока вектора Парка (Горева) превращается в линию.

Анализируя вид сигнала функции (18) представленный на рисунке 25а и спектр функции в момент времени возникновения короткого замыкания (0,5 с) представленный на рисунке 25б можно увидеть, что они аналогичны результатам для двухфазного короткого замыкания на землю (рисунок 23). Исходя из этого сходства можно утверждать, что для идентификации типа повреждения, а именно двухфазного короткого замыкания и двухфазного

короткого замыкания на землю. Необходимо комплексно рассматривать как форму годографа вектора тока Парка (Горева), так и спектральный состав функции (18).



а



б

а – функция тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз А и В, б – спектр функции тока вектора Парка (Горева) в момент модельного времени 0,5 с

Рисунок 25 – Вид и спектр функции тока вектора Парка (Горева) при замыкании фаз А и В

Модель для исследования повреждений, вызванных обрывом обмотки статора показана на рисунке 26.

Для моделирования обрыва фазных обмоток используется блок «Three-Phase Breaker». Данный блок является трехфазным выключателем, позволяющим моделировать как отключение всех трех фаз, так и нескольких на выбор пользователя. При этом отключение может быть смоделировано по заданному времени или по сигналу. Для разработанной модели асинхронного электрического двигателя моделировать обрыв фазного провода статорной обмотки будем в момент времени 0,5 с, также как для модели с коротким замыканием, так как к моменту времени 0,5 с модель асинхронного электрического двигателя выходит на установившийся (нормальный) режим работы.

Обрыв статорных обмоток, также как и короткие замыкания в обмотках, является серьезным электрическим повреждениями, возникновение которых, может привести к выходу асинхронного электрического двигателя из строя и остановке.

При обрыве в обмотке статора по одной фазе асинхронный двигатель может продолжать работу, однако период работы асинхронного двигателя с таким повреждением может быть не продолжительным, поэтому необходимо вовремя выявлять подобное повреждение.

Обрыв двух статорных фазных обмоток также приведет к остановке асинхронного электрического двигателя.

При моделировании неисправности – обрыв обмотки будет смоделирован обрыв одной из фазных обмоток, а также обрыв двух фазных обмоток так как обрыв трех фазных обмоток статора приведет к полной остановке асинхронного электрического двигателя, при этом годограф и спектр функции (18) не будут отображать никаких данных так как фазные токи будут равны 0. Данный момент будет отражен, также и при моделировании обрыва двух фазных обмоток асинхронного электрического двигателя.

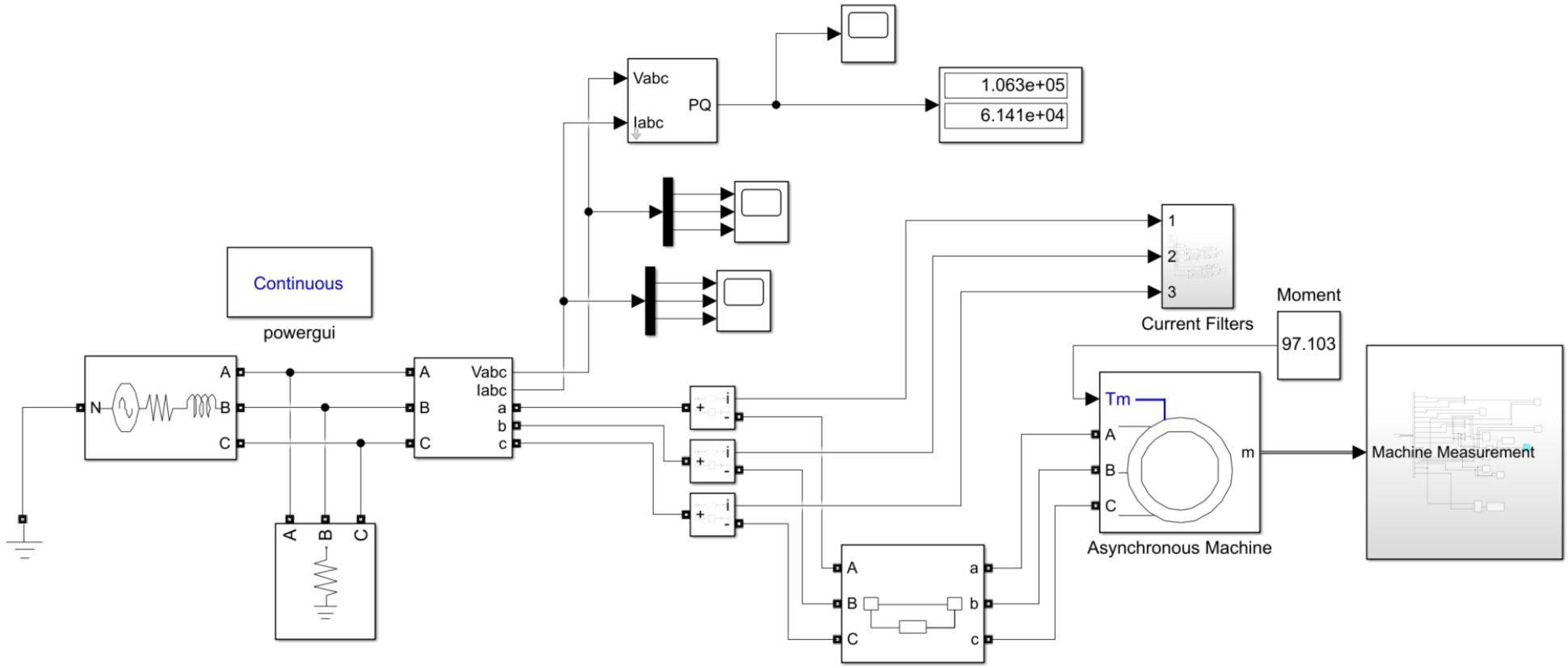


Рисунок 26 - Общая модель асинхронного электродвигателя с учетом повреждений – обрыв обмоток статора

При моделировании обрыва фазы А годограф приобретает вид, представленный на рисунке 27.

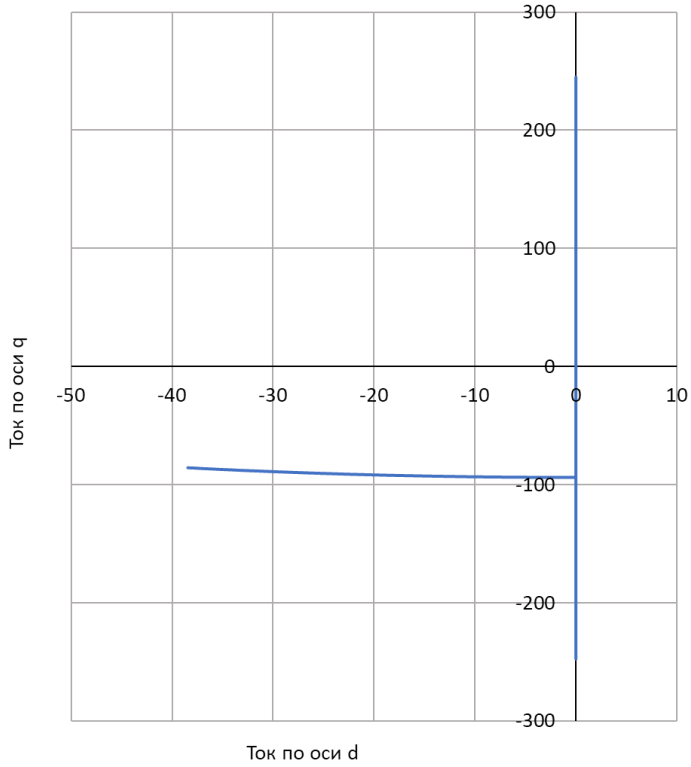
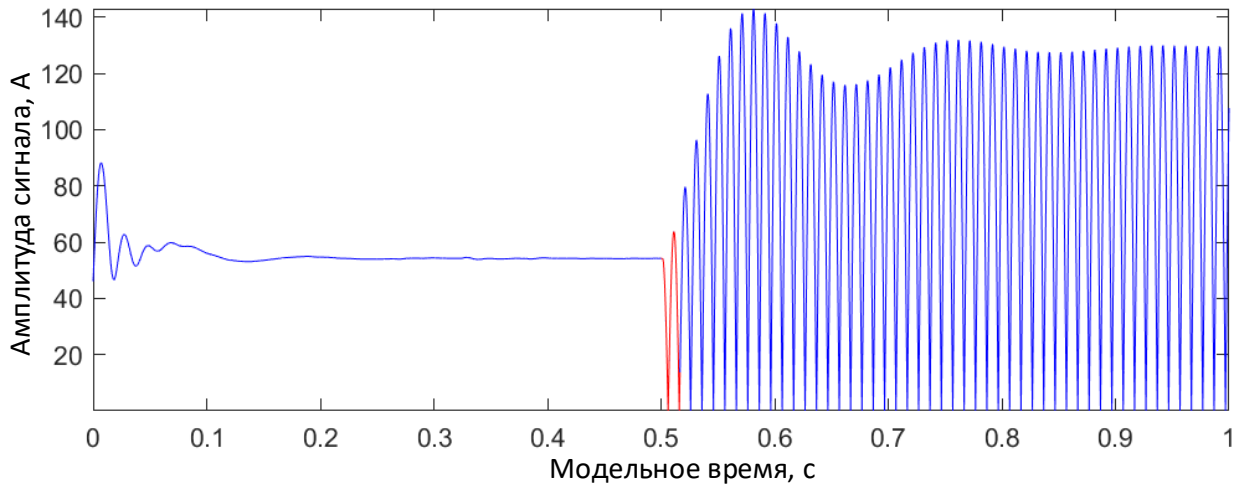


Рисунок 27 – Годограф тока вектора Парка (Горева) при обрыве фазы А

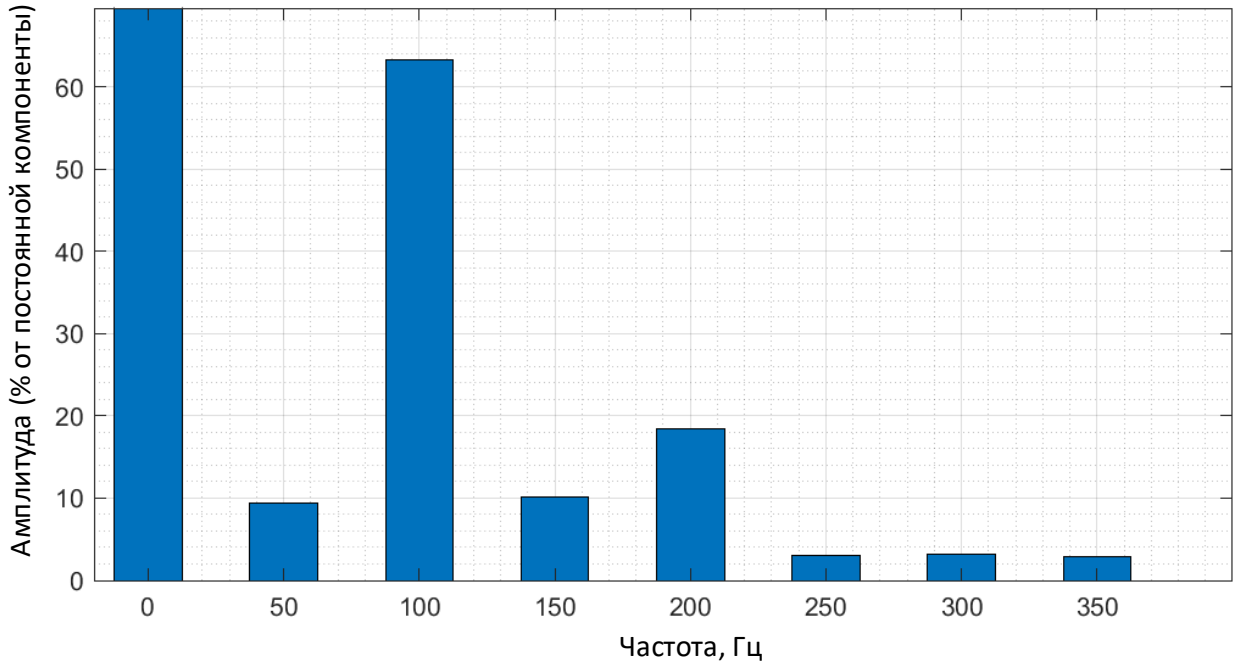
Как видно, при обрыве одной фазы статорной обмотки годограф из эллиптической формы вырождается в кривую. При этом асинхронный электродвигатель останавливается. Как видно, годограф является не информативным инструментом при определении повреждения типа обрыв фазы статорной обмотки.

Сигнал функции (18) при обрыве одной фазы представлен на рисунке 28а. При этом спектр функции (18) в момент времени 0,5 с показан на рисунке 28б.

Как видно при возникновении обрыва одной из фаз статорной обмотки происходит снижение амплитуды частоты 50 Гц и наблюдается рост гармонических составляющих с частотами 100 Гц и 200 Гц. Низкое значение частоты 50 Гц в спектре с одновременным ростом частот 100 Гц и 200 Гц является характерным признаком обрыва фазной обмотки.



а



б

а – функция тока вектора Парка (Горева) при обрыве фазы А; б – спектр функции тока вектора Парка (Горева) в момент модельного времени 0,5 с

Рисунок 28 – Вид и спектр функции тока вектора Парка (Горева) при обрыве фазы А

Выполним моделирование обрыва двух фазных обмоток – обмотки фазы А и обмотки фазы В в статоре асинхронного электродвигателя.

На рисунке 29 представлен годограф тока вектора Парка (Горева) при обрыве двух фазных обмоток статора асинхронного электрического двигателя.

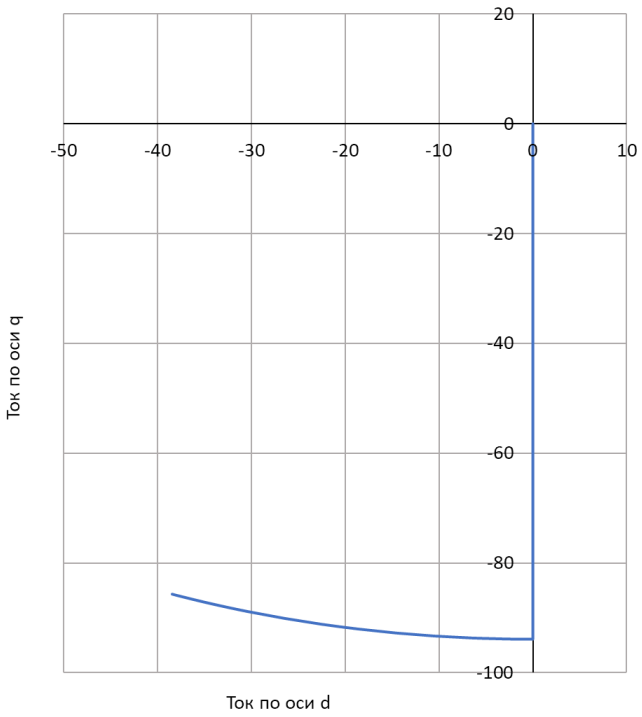


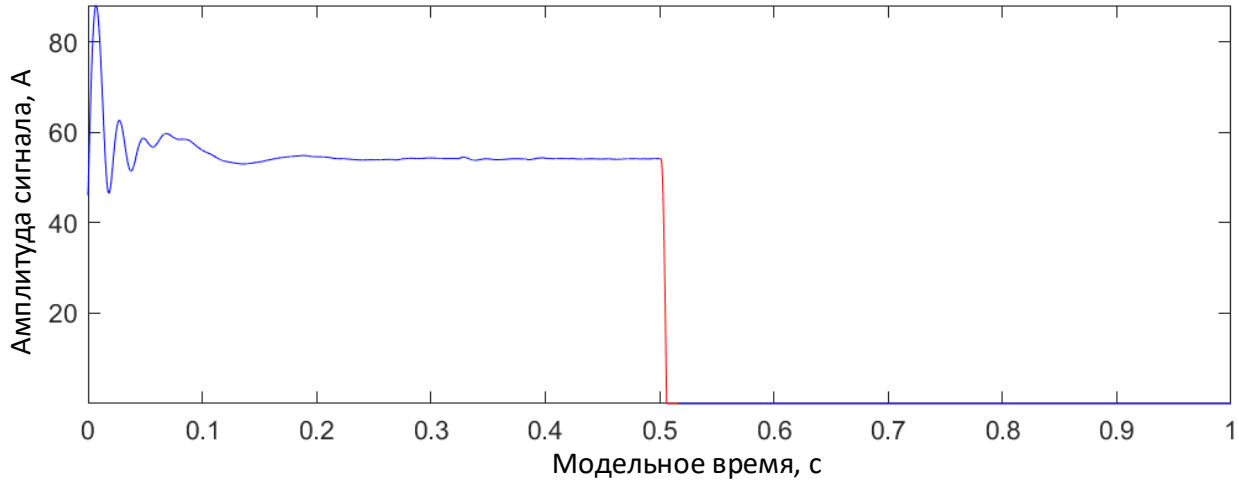
Рисунок 29 – Годограф тока вектора Парка (Горева) при обрыве фаз А и В

При возникновении обрыва двух фаз в статорной обмотке форма и характер изменения годографа аналогичен обрыву одной фазной статорной обмотки. То есть годограф вырождается из эллиптической формы в криволинейную форму, что говорит об остановке асинхронного электрического двигателя. Так как двигатель моделируется с номинальным моментом, то при обрыве одной и двух фазных обмоток статора происходит его остановка. Однако при меньшей загрузке асинхронного двигателя он может продолжить свою работу. Однако данный вопрос не исследуется в рамках выполнения выпускной квалификационной работы.

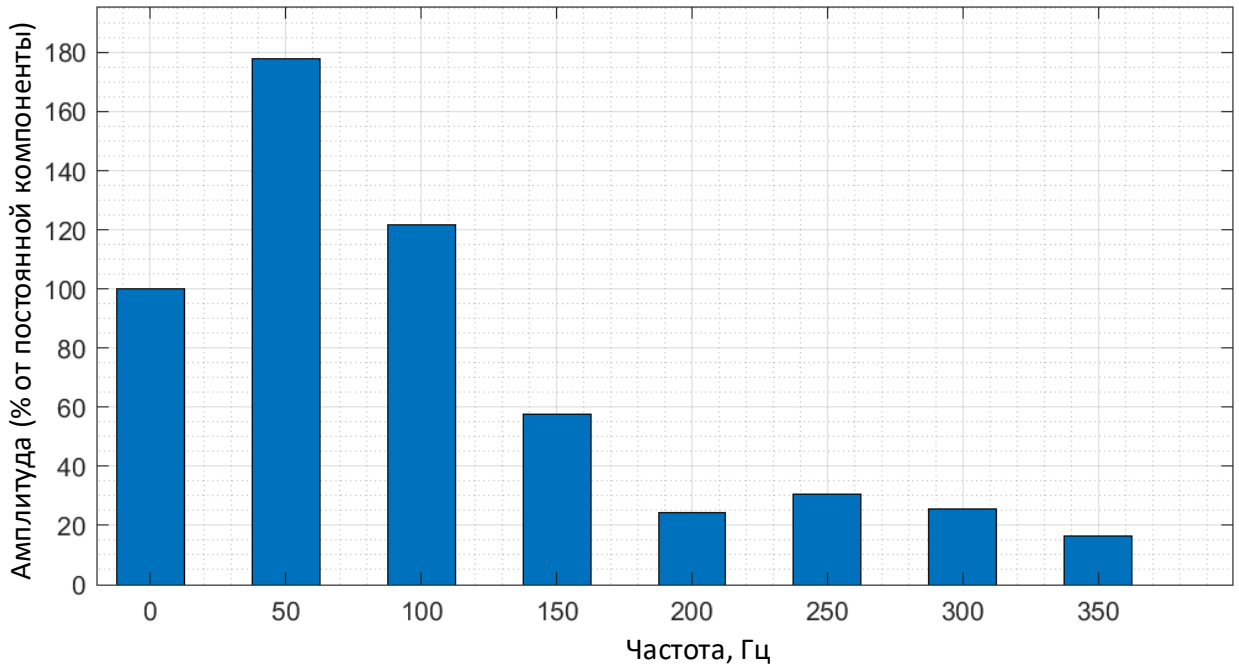
При моделировании обрыва двух фазных статорных обмоток асинхронного двигателя вид функции (18), а также спектр функции для момента времени момента обрыва двух фаз представлены на рисунке 30.

Как видим из графика функции (18) (рисунок 30а) значение функции становится равным 0, а в спектре (рисунок 30б) резко снижается уровень постоянной составляющей с ростом гармоник 50 Гц, 100 Гц и 250 Гц.

Стоит отметить, что при обрыве двух фазных обмоток скорость вращения двигателя значительно снижается чем и обусловлено снижение постоянной составляющей.



а



б

а – функция тока вектора Парка (Горева) при обрыве фаз А и В; б – спектр функции тока вектора Парка (Горева) в момент модельного времени 0,5 с

Рисунок 30 – Вид и спектр функции тока вектора Парка (Горева) при обрыве фаз А и В

Выводы по разделу.

Для моделирования коротких замыканий и обрывов статорной обмоток разработаны модели в среде MATLAB/Simulink.

При моделировании трехфазного короткого замыкания получены результаты объясняются симметричностью моделируемого повреждения. Данный вид повреждения не является ранним и его возникновение вызовет полное повреждение и выход из строя асинхронного электрического двигателя. Применение метода анализа спектра функции (18), а также анализа формы годографа, не является достаточно информативным для симметричных видов повреждений. Однако полученные результаты для трехфазного короткого замыкания могут быть использованы в дальнейшем для выявлений нарушений целостности главной изоляции асинхронных электрических машин с короткозамкнутым ротором, а именно рост сигнала с частотой 50 Гц при одновременном повышении сигнала на частоте 100 Гц.

При моделировании однофазного короткого замыкание в спектре функции (18) наблюдается повышение гармонических составляющих с частотой 100 Гц и 250 Гц, а также снижение гармоники с частотой 50 Гц.

При моделировании двухфазного короткого замыкания на землю в спектре функции (18) преобладают гармоники с частотами 50 Гц и 100 Гц, они имеют более высокую амплитуду в сравнении с однофазным коротким замыканием. При этом наблюдается также равномерный рост уровня гармонических составляющих выше 100 Гц, а именно: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц и 350 Гц.

При моделировании двухфазного короткого замыкания годограф сужается и в масштабе именованных единиц тока вектора Парка (Горева) превращается в линию. При этом спектр функции (18) схож со спектром двухфазного короткого замыкания на землю. При выявлении данного повреждения необходимо контролировать как форму годографа тока вектора Парка (Горева), так и спектр функции (18).

При моделировании обрыва обмотки по фазе А происходит снижение амплитуды частоты 50 Гц и наблюдается рост гармонических составляющих с частотами 100 Гц и 200 Гц. Низкое значение частоты 50 Гц в спектре с одновременным ростом частот 100 Гц и 200 Гц является характерным признаком обрыва фазной обмотки.

При моделировании обрыва двух фазных обмоток значение функции (18) приближается к 0, а в спектре снижается уровень постоянной составляющей с ростом гармоник 50 Гц, 100 Гц и 250 Гц.

Для идентификации обрывов обмоток годограф тока вектора Парка (Горева) является малоинформативным, так как вырождается в кривую и может использоваться только совместно с анализом частотного спектра функции (18).

Заключение

Во введении рассмотрены особенности различных типов электрических двигателей. Для выполнения выпускной квалификационной работы принято рассматривать в качестве объекта асинхронный Электрический двигатель, так как данный тип электрических двигателей является наиболее распространенным в промышленном производстве.

В первом разделе выпускной квалификационной работы выполнен анализ неисправностей силовых асинхронных электрических двигателей. Среди неисправностей рассмотрены неисправности, вызванные нарушением эксцентриситета ротора, а также нарушением целостности стержней ротора.

Метод анализа вибраций и метод анализа спектральных характеристик тока статора являются преимущественными при выявлении эксцентриситета ротора. Метод, связанный с анализом теплового состояния, не позволяет определить возникающее повреждение на ранней стадии, так как постоянное использование тепловизионного контроля является затруднительным, равно как и размещение температурных датчиков внутри статора асинхронного силового электрического двигателя. Применение метода, связанного с мониторингом и анализом спектральных характеристик тока и напряжения статора, является достаточно перспективным для определения повреждений, вызываемых нарушением целостности стрежней ротора, так как данный метод не требует применения дополнительных дорогостоящих датчиков и приборов в отличие от других методов. Таким образом для рассмотренных неисправностей наиболее перспективным методом их диагностики является метод, связанный с мониторингом и анализом спектральных характеристик тока и напряжения статора асинхронного электрического двигателя.

Во втором разделе представлены признаки, позволяющие при визуальном осмотре асинхронного электрического двигателя диагностировать вероятные повреждения.

Подробно описаны дополнительные признаки позволяющие выявить повреждения конкретно асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, а также повреждения, выявляемые по дополнительным признакам.

Проведенный анализ повреждений, выявляемых при визуальном осмотре асинхронного электрического двигателя, показал, что часть повреждений относится к проблемам вызванным качеством электрической энергии питающей сети, другая часть относится к ошибкам подключения или выбора асинхронных электрических двигателей. При этом показано, что проведение визуального осмотра позволяет выявить наличие электрических повреждений асинхронных электрических двигателей, а именно межвитковые короткие замыкания в статорной обмотке и междуфазные короткие замыкания в статорной обмотке. При выявлении данных неисправностей эксплуатационный персонал должен провести осмотр и измерение сопротивления статорной обмотки асинхронного электрического двигателя.

Определено, что на практике применяется метод измерения сопротивления изоляции позволяющий выявить большую часть повреждений асинхронного электродвигателя. Представлена схема измерения сопротивления изоляции, а также методика определения степени увлажнения изоляции.

В третьем разделе разработана компьютерная модель трехфазного асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором. Для разработки модели в качестве объекта выбран электрический двигатель серии 4А с типоразмером 4А180М2У3 и номинальной мощностью 30 кВт. Для данного двигателя определены паспортные данные и рассчитаны параметры модели. Компьютерная модель асинхронного электрического двигателя разработана с использованием блоков программного комплекса MATLAB/Simulink. Представлено подробное описание блоков-компонентов модели. Показано, что разработанная компьютерная модель асинхронного электрического двигателя может быть также использована для определения

характеристик асинхронного электрического двигателя в различных режимах работы.

В качестве электрических повреждений смоделированы:

- трехфазное короткое замыкание в обмотках статора на землю;
- двухфазное короткое замыкание на землю;
- двухфазное короткое замыкание;
- однофазное короткое замыкание;
- обрыв фазы А статорной обмотки;
- обрыв фаз А и В статорной обмотке.

Для моделирования коротких замыканий и обрывов статорной обмоток разработаны модели в среде MATLAB/Simulink.

При моделировании трехфазного короткого замыкания получены результаты объясняются симметричностью моделируемого повреждения. Данный вид повреждения не является ранним и его возникновение вызовет полное повреждение и выход из строя асинхронного электрического двигателя. Применение метода анализа спектра функции (18), а также анализа формы годографа, не является достаточно информативным для симметричных видов повреждений. Однако полученные результаты для трехфазного короткого замыкания могут быть использованы в дальнейшем для выявлений нарушений целостности главной изоляции асинхронных электрических машин с короткозамкнутым ротором, а именно рост сигнала с частотой 50 Гц при одновременном повышении сигнала на частоте 100 Гц.

При моделировании однофазного короткого замыкание в спектре функции (18) наблюдается повышение гармонических составляющих с частотой 100 Гц и 250 Гц, а также снижение гармоники с частотой 50 Гц.

При моделировании двухфазного короткого замыкания на землю в спектре функции (18) преобладают гармоники с частотами 50 Гц и 100 Гц, они имеют более высокую амплитуду в сравнении с однофазным коротким замыканием. При этом наблюдается также равномерный рост уровня

гармонических составляющих выше 100 Гц, а именно: 150 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 300 Гц и 350 Гц.

При моделировании двухфазного короткого замыкания годограф сужается и в масштабе именованных единиц тока вектора Парка (Горева) превращается в линию. При этом спектр функции (18) схож со спектром двухфазного короткого замыкания на землю. При выявлении данного повреждения необходимо контролировать как форму годографа тока вектора Парка (Горева), так и спектр функции (18).

При моделировании обрыва обмотки по фазе А происходит снижение амплитуды частоты 50 Гц и наблюдается рост гармонических составляющих с частотами 100 Гц и 200 Гц. Низкое значение частоты 50 Гц в спектре с одновременным ростом частот 100 Гц и 200 Гц является характерным признаком обрыва фазной обмотки.

При моделировании обрыва двух фазных обмоток значение функции (18) приближается к 0, а в спектре снижается уровень постоянной составляющей с ростом гармоник 50 Гц, 100 Гц и 250 Гц.

Для идентификации обрывов обмоток годограф тока вектора Парка (Горева) является малоинформативным, так как вырождается в кривую и может использоваться только совместно с анализом частотного спектра функции (18).

В результате выполнения выпускной квалификационной работы разработаны модели для исследования повреждений в обмотках асинхронного электрического двигателя, а также рассмотрены методы определения внутренних повреждений в режиме реального времени. По результатам моделирования получены характерные признаки повреждений, которые позволят идентифицировать начало повреждения и его уровень.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Баннов Д.М. Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного электродвигателя // Электротехнические комплексы и системы, Т. 3, № 4, 2021. С. 5-23.
2. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 115 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008. 350 с.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 С.
5. Вычислительная система MathCAD. Учебное пособие. Ч 1. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. 43 с.
6. Дайнеко В.А., Юрковец Ж.Г. Методы диагностики асинхронных электродвигателей в рабочих режимах и перспективы их применения // Агропанорама, Т. 4, 2021. С. 22-25.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1. М.: Издательство МЭИ, 2004. 656 с.
8. Колесников В.В. Моделирование характеристик и дефектов трехфазных асинхронных машин. СПб.: Изд-во Лань, 2017. 144 с.
9. Королев Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И. Наблюдатель состояния подшипников асинхронного двигателя по компонентам векторов Парка тока и напряжения // Мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования, Т. 2, № 55, 2022. С. 62-70.
10. Кравчик Э.А., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

11. Межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 20958-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного электрического двигателя. М.: Стандартинформ, 2019.

12. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 13374-1 - 2011 Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. М.: Стандартинформ, 2012.

13. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 13379-1 - 2015 Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. М.: Стандартинформ, 2019.

14. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 18436-3-2011 Контроль состояния и диагностика машин. Требования к квалификации и оценке персонала. М.: Стандартинформ, 2012.

15. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink // Academy, Т. 2, № 2, 2015. С. 1-4.

16. Петухов В.В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники, Т. 1, № 49, 2008. С. 50-52.

17. Синельников А.М., Боннет В.В. Анализ методов диагностики неисправностей электрических машин // Вестник Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, Т. 30, 2008. С. 111-114.

18. Терехин В.Б., Дементьев Ю.Н. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. М.: Издательство Юрайт, 2025. 306 с.

19. Ansari A.A., Deshpande D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink // International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, No. 5, 2010. pp. 1260-1267.

20. Azizi H., Sekki D., Kihal M., Chebout M., Kihal M., Moulai H. Study and diagnostic of electrical faults in asynchronous machines // Studies in engineering and exact sciences, No. 5, 2024. pp. 10.54021/seesv5n2-608.

21. De Angelo C.H., Bossio G.R., Giaccone S.J., Valla M.I., Solsona J.A., García G.O. Online model-based stator-fault detection and identification in induction motors // IEEE Trans. Ind. Electron., No. 56, 2009. pp. 4671–4680.

22. IEEE PES. IEEE 1415-2006 IEEE Guide for Induction Machinery. Maintenance Testing and Failure. Analysis. New York: IEEE Publ., 2007. 12 pp.

23. Sakhara S., Saad S., Nacib L. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model // International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 8, 2017. pp. 308-317.

24. Venugopal G., Udayakumar A.K., Balashanmugham A., Houran M.A., Alsaif F., Elavarasan R.M., Raju K., Alsharif M.H. Fault Identification and Classification of Asynchronous Motor Drive Using Optimization Approach with Improved Reliability // Energies , Vol. 16, No. 6, 2023. pp. https://doi.org/10.3390/en16062660.

25. Williamson S., Mirzoian K. Analysis of Cage Induction Motors with Stator Winding Faults // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1985. Vol. PAS-104. No. 1838-1842.