

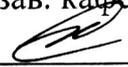
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет Энергетический
Кафедра Энергетики
Направление подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Направленность (профиль) образовательной программы: Электроэнергетиче-
ские системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

« 09 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Организация режимов пуска и самозапуска механизмов собственных
нужд Благовещенской ТЭЦ

Исполнитель
студент группы 6420м


(подпись, дата)

В.С. Гусенков

Руководитель
доцент, канд. техн. наук


(подпись, дата)

А.Н. Козлов

Руководитель
магистерской программы

 09.06.18
(подпись, дата)

Н.В. Савина

Нормоконтроль
доцент, канд. техн. наук


(подпись, дата)

А.Н. Козлов

Рецензент


(подпись, дата)

С.В. Лашков

Благовещенск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

« 21 » 03 2018г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Гусенкова Василия Сергеевича Тема выпускной квалификационной работы Организация режимов пуска и самозапуска механизмов собственных нужд Благовещенской ТЭЦ

(утверждено приказом от 27.10.2017 № 2650 уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 02.06.2018
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: исходные данные были взяты во время работы и прохождения практики на предприятии ЖКХ «Ресурс».
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Понятия и состав механизмов собственных нужд ТЭС; Схемы электроснабжения собственных нужд ТЭС; Контроль состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных электродвигателей; Математическое моделирование и исследование электромагнитных процессов в воздушном зазоре двигателя при обрывах стержней
5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.):
1 лист «Принципиальная схема ТЭС»; 2 лист «Классификация методов и устройств контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей АД»
6. Дата выдачи задания 01.05.2018
Руководитель выпускной квалификационной работы: Козлов Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): _____
(подпись студента)



РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 71 с., 24 рисунка, 3 таблицы, 58 источников.

АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ОБМОТКА РОТОРА, ТОК СТАТОРА, ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

В работе приводится анализ пуска и самозапуска механизмов собственных нужд ТЭС, поиск новых диагностических признаков обрыва стержней и создание новых методов и устройств оперативного контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных электродвигателях.

Цель работы – Создание методов и программных средств контроля, позволяющих определить состояние короткозамкнутых обмоток ротора в ходе нормальной работы высоковольтных электродвигателях, после чего дать заключение о возможности дальнейшей эксплуатации машины.

Полученные результаты могут быть использованы при эксплуатации реальных машин на предприятиях.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений	5
Введение	6
1. Основные понятия и состав механизмов собственных нужд ТЭС	8
1.1 Состав механизмов собственных нужд ТЭС	10
1.2 Принципиальная технологическая схема ТЭС	13
1.3 основные механизмы собственных нужд ТЭС	18
2. Схемы электроснабжения собственных нужд ТЭС	21
3. Контроль состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных электродвигателей	32
3.1. Анализ повреждаемости короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных электродвигателей	32
3.2. Контроль состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей	34
3.1.1. Классификация способов и устройств контроля	34
3.1.2. Анализ способов и устройств ремонтного контроля	36
3.1.3. Анализ способов и устройств оперативного тестового контроля	37
3.1.4. Анализ принципов и устройств функционального оперативного контроля	40
4. Математическое моделирование и исследование электромагнитных процессов в воздушном зазоре двигателя при обрывах стержней	47
4.1. Анализ короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни	56
4.2. Спектр временных гармоник диагностического сигнала, генерируемого фиктивной обмоткой ротора	57
4.3. Диапазон частот диагностического сигнала, в котором достаточно информации о состоянии каждого стержня	61
Заключение	64
Библиографический список	66

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СН – собственные нужды

КЭС - конденсационная электростанция;

ГЭС - гидроэлектростанция

АЭС - атомная электростанция

ОР - обмотка ротора

РОР – реальная обмотка ротора

ФОР – фиктивная обмотка ротора

ИОР – исправная обмотка ротора

АД - асинхронный двигатель

ТСН – трансформатор собственных нужд

ПРТСН – пускорезервный трансформатор собственных нужд

РУ – распределительное устройство

ГРУ – главное распределительное устройство

ЛН – линейная нагрузка

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ДС – диагностический сигнал

ВВЕДЕНИЕ

Работа электростанции зависит от надежности механизмов собственных нужд. Отказ электродвигателей и вспомогательного оборудования на станциях может быть одной из таких причин.

На ТЭЦ для переработки угля широко применяются дробилки молотковые мельницы и. Высоковольтные короткозамкнутые асинхронные двигатели (АД) наиболее часто используются в данных механизмах, данные двигатели работают с тяжелыми условиями пуска и имеют высокие значения интенсивности отказов. Наиболее слабым узлом таких электродвигателей это, «беличья клетка», так же короткозамкнутая обмотка ротора (ОР).

В практике зачастую характерны эксплуатационные повреждения «беличьих клеток», они заключаются в обрывах стержней, которых более 80 % от общего числа поломок асинхронных двигателей.

Так же и при нормальных условиях пуска случаются обрывы стержней «беличьей клетки».

Контроль состояния короткозамкнутых ОР мощных АД является актуальной задачей.

На сегодняшний момент выявление повреждений короткозамкнутой обмотки ротора производится при ремонте двигателя. Однако редкая профилактика (тех обслуживание) не позволяет своевременно определить возникшие неисправности в обмотке ротора, что часто приводит к работе электродвигателя с оборванными стержнями. При обрыве стержней повышается вибрация элементов АД, что может повредить подшипник.

Применяющиеся на производстве методы оперативного контроля текущего состояния обмоток ротора при нормальной эксплуатации АД не нашли широкого применения. Это можно объяснить тем, что существующие методы контроля устарели и имеют недостаточную чувствительность к обрыву одного стержня, а также не способны определить возможность дальнейшей эксплуатации двигателя

переводя его из работоспособного исправного в работоспособное неисправное состояние и из последнего в срочный ремонт.

Глубокое внедрение микропроцессорных устройств на электростанциях дает много возможностей разработать либо усовершенствовать методы и устройства контроля состояния обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей.

Исходя из выше сказанного практический и теоретический интерес позволит разработать метод оперативного контроля состояния короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей с применением микропроцессорной обработки сигнала.

Цель магистерской диссертации: состоит в ознакомлении с существующими способами организации режимов пуска и самозапуска механизмов собственных нужд ТЭЦ, а также поиск новых диагностических признаков обрывов стержней и поиск (разработка) новых методов и устройств оперативного контроля состояния короткозамкнутых ОР высоковольтных АД.

Задачи, рассматриваемые в диссертации:

- обзор литературы по устройству механизмов пуска и самозапуска;
- поиск места отказа или неисправности;
- прогнозирование технического состояния оборудования;
- обработка данных, измерений;
- разработка новых методов диагностирования неисправности

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СОСТАВ МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Система собственных нужд потребляет мощность и энергию, вырабатываемую на электростанции, объем которых зависит от типа электростанции, вида топлива которое используется, мощности установленных турбин и других условия. В табл. 1 приведенной ниже показаны обобщенные данные по максимальным нагрузкам системы собственных нужд электростанции. [3]

Таблица 1. Нагрузки системы собственных нужд

Тип станции	Особенности станции	Нагрузка с.н., %
АЭС	Вода	5-8
	Газ	5-14
ГЭС	Большой мощности	0,5-1
	Малой и средней мощности	2-3
КЭС	На пылеугольном топливе	6-8
	На газе с мазутом	3-5
ТЭЦ	На пылеугольном топливе	8-14
	На газе с мазутом	5-7

Стабильная и безопасная работа электростанции и ее обслуживания возможны при соблюдении условий надежной работы системы собственных нужд. Основное требование — это надежность, которая будет удовлетворять система собственных нужд, особенно при эксплуатации тепловых и ядерных электростанций. В ПУЭ потребители системы собственных нужд электростанций отнесены к 1-й категории и их электроснабжение должно обеспечиваться от двух независимых источников питания. Перерыв электроснабжения возможен только лишь на время действия автоматики. Группа приемников перерыв питания которых повышает риск с опасностью для жизни персонала или с повреждением/останов основного силового оборудования. К особо ответственным потребителям подключены не менее трех независимых источников питания - рабочего и двух резервных.

Механизмы собственных нужд должны быть экономичны, это значит что надежность оборудования должна обеспечиваться при минимальных денежных затратах и расходе электроэнергии. В системе собственных нужд расход электроэнергии входит в основные экономические показатели электростанции.

Надежность электроснабжения станции может быть обеспечена при выполнении условий:

- быстродействующая релейная защиты, значительно уменьшает опасность снижения напряжения у механизмов собственных нужд при КЗ во внешней сети вызывая торможения двигателей и замедления работы механизма собственных нужд;
- автоматическом регулировании возбуждения генератора, может обеспечить быстрое восстановление нормального напряжения на шинах собственных нужд после отключения;
- применение приводов рабочих машин асинхронных электродвигателей с короткозамкнутыми роторами, легко маневрирующих при снижении частоты вращения кратковременно;
- построении схемы электроснабжения системы собственных нужд, секционирование с присоединением группы электроприемников относящихся к каждому агрегату (блоку, котлу), к отдельной секции РУ с отдельным рабочим трансформатором. КЗ в сети собственных нужд вызывают понижение напряжения только у определенных электроприемников.

Ответственные потребители собственных нужд, которые требуют повышенной надежности, предусматривают дополнительные источники энергии ограниченной мощности, питающие группы электроприемников при полном исчезновении напряжения. Данными источниками могут быть:

- агрегаты с автоматическим пуском, в виде дизеля(ДЭС) или газовой турбины с генератором;
- вспомогательные генераторы, установленные на валу главных агрегатов;
- аккумуляторные батареи со статическими преобразователями.

Дизеля (ДЭС) и аккумуляторные батареи и вспомогательные генераторы требуют для пуска и набора нагрузки несколько минут. Наиболее часто они применяются на ТЭЦ, КЭС и АЭС для приемников энергии, допускающих такой перерыв в подаче энергии.

1.1 Механизмы собственных нужд ТЭЦ, КЭС и ТЭС

Механизмами собственных нужд являются машины, обслуживающие машинное и котельное отделения, расход которых показан в табл. 2.

Таблица 2. Расход механизмов системы собственных нужд

Тип станции	Топливо и способ его сжигания	Группы механизмов						
		Хранение и подготовка топлива	Топливо-приготовление	Тяга и дутье	Питание котлов	Циркуляционные насосы	Сетевые насосы	Прочие нагрузки
КЭС	Уголь в виде пыли	1,5	30	19,5	14	22	-	19
	Торф	3	1	42	17	23	-	14
	Газ, мазут	0,5	-	17	38	41	-	3,5
ТЭЦ	Уголь в виде пыли	1	28	21	9,5	20	8,5	12
	Слоевое сжигание угля	1,5	2	31,5	13	16,5	26,5	9

Всех потребителей собственных нужд относят к 1ой категории надежности питания и требуют подключение питания от двух независимых источников. Собственные нужды электростанции можно разделить на две основные группы:

Ответственные группы: это механизмы собственных нужд, остановка которых приведет к аварийному отключению агрегатов станции без которых ее работа не возможна. Прекращение питания второстепенных потребителей собственных нужд не приведет к аварийному останову оборудования, и станция будет способно продолжать работу до оперативного устранения поломки. Однако для поддержания технологического цикла производства

электроэнергии, электроснабжение должно быть восстановлено как можно быстрее.

К ответственным потребителям можно дымососы, пылеугольные мельницы, дутьевые вентиляторы, питатели пыли. [3]

К *второстепенным* смывные насосы системы гидрозолоудаления, а также электрофильтры.

При отсутствии электроснабжения дымососов, дутьевых вентиляторов и питателей пыли приведет к остановке парового котла. Одной из главных особенности технологического цикла станции являются питательные насосы, подающие воду в паровые котлы. Запас мощности электропривода насосов высокого давления достигает 48 % от общей мощности потребителей, т. е. пару мегаватт. Остановка насосов приведет к незамедлительному отключению паровых котлов защитами. Такую остановку нельзя производить на прямоточных котлах блочных электростанций.

Остановка циркуляционных насосов и конденсатных насосов приведет к срыву вакуума турбин и к их моментальной остановке турбины защитной автоматикой.

Наиболее ответственные потребители собственных нужд, отказ которых приведет к повреждению агрегатов, относят маслонасос смазки турбогенератора и вала генератора. При непредвиденном выключении резервных масляных насосов во время аварии на станции с потерей питания собственных нужд приведет к отсутствию маслоснабжения подшипников турбины и генератора и дальнейшей их поломки. Для предотвращения этого питание маслонасосов турбин вала генератора резервируют аккумуляторными батареями.

На ТЭС имеются многочисленные механизмы общестанционного назначения, необходимые для работы станции. Сюда относятся потребители топливоприготовления и топливоподачи: дробилки, мельницы для размола угля, мельничные вентиляторы, конвейеры и транспортеры топливоподачи и бункеров пылезавода, краны-перегрузатели на складе угля,

вагонопрокидыватели. Кратковременная остановка этих механизмов обычно не приводит к расстройству технологического цикла производства электрической и тепловой энергии, и поэтому эти механизмы можно отнести к неответственным. Действительно, в бункерах всегда имеется запас сырого угля, и поэтому останов транспортеров или угледробильных устройств не приводит к прекращению подачи топлива в топочные камеры. Допускается останов и барабанных шаровых мельниц, так как при их использовании на электростанциях обычно имеются промежуточные бункеры с запасом угольной пыли, рассчитанным примерно на два часа работы котла с номинальной производительностью. В случае применения молотковых мельниц промежуточных бункеров обычно не предусматривают, но на каждый котел устанавливают не менее трех мельниц. При останове одной из них оставшиеся обеспечивают не менее 90 % производительности. [3]

К общестанционным механизмам относятся насосы химводоочистки и хозяйственного водоснабжения. Большинство из них можно отнести к неответственным потребителям, так как кратковременная остановка насосов химводоочистки не должна привести к аварийному режиму в снабжении водой котельных агрегатов. Исключением являются насосы подачи химически очищенной воды в турбинное отделение, так как при нарушении баланса между их производительностью и расходом питательной воды возможна аварийная ситуация на станции.

К электроприемникам общестанционного назначения относятся также резервные возбуждители, насосы кислотной промывки, противопожарные насосы (эти потребители при нормальных условиях эксплуатации агрегатов не работают), вентиляционные устройства, компрессоры воздушных магистралей, крановое хозяйство, часть электрического освещения, мастерские, зарядные устройства аккумуляторных батарей, потребители открытого распределительного устройства и объединенного вспомогательного корпуса. Большинство этих потребителей можно классифицировать как неответственные. Ответственными являются некоторые из вспомогательных

механизмов электрической части станции: двигатель-генераторы питателей пыли и двигатели охлаждения мощных трансформаторов, осуществляющие обдув маслоохладителей и принудительную циркуляцию масла. При работе генератора на резервном возбуждатель последний также относится к ответственным механизмам собственных нужд. [3]

1.2 Принципиальная технологическая схема ТЭС

Тепловые электрические станции представляют собой комплекс сооружений и оборудования для преобразования в электрическую энергию (или электрическую и тепловую) первичной химической энергии топлива. В зависимости от вида отпускаемой энергии тепловые электростанции подразделяют на КЭС - конденсационные электрические станции (в российской энергетике такие станции чаще называют ГРЭС - государственные районные электростанции) и ТЭЦ - теплоэлектроцентрали

Тепловыми являются также газотурбинные, парогазовые, геотермальные и атомные (АЭС) электростанции.

Транспортировка твердого и жидкого топлива в России осуществляют в основном по железным дорогам. Стоимость перевозки угля на 1000 км достигает в некоторых случаях 30 % стоимости добычи [5].

Природный горючий газ транспортируют по газопроводам. Стоимость его транспортировки также значительна, если учитывать затраты на строительство дальних газопроводов и газоперекачивающих станций, а также расходование последними значительной доли поступающего топлива на собственные нужды (до 10 %).

Согласно энергетической стратегии России на период до 2020 года намечается устойчивый рост электропотребления на 2 - 3 % в год, в зависимости от вариантов развития экономики. В результате производство электроэнергии достигнет к концу рассматриваемого периода в пониженном варианте 1240 млрд. кВт ч в год и в высоком - 1620 млрд. кВт-ч. Суммарная потребность электростанций России в условном топливе возрастет от уровня 2000 г. (около 280 млн. тонн) примерно до 360 млн. тонн в 2010 г. и 460 млн.

тонн в 2020 г. при росте доли угля в нем до 41 %. С учетом высокого роста выработки электроэнергии на тепловых электростанциях (на 82 % к 2020г.) и непростой ситуации в топливдобывающих отраслях обеспечение электростанций топливом и его экономия становятся в предстоящие период одной из сложнейших проблем в энергетике [5].

Производство электроэнергии в России обеспечивается сейчас в основном широким использованием газа. Количество твердого топлива, сжигаемого на ТЭС, с 1990 года почти не изменилось, хотя доля его в производстве электроэнергии постепенно снижалась. На перспективу в России прогнозируется рост потребления твердого топлива на электростанциях к 2020г. (в млн. т. условного топлива) примерно в два раза по сравнению с 2000 г. рис. 1.

Доля в общей поставке угля предприятиями основных угледобывающих регионов в энергетику России в 2004 г. составляла: Кузбасс – 55 %; Восточно - Сибирский регион – 24.4 %; Дальневосточный – 12 %; Печерский бассейн – 4,5%; остальные регионы – 4,1 %.

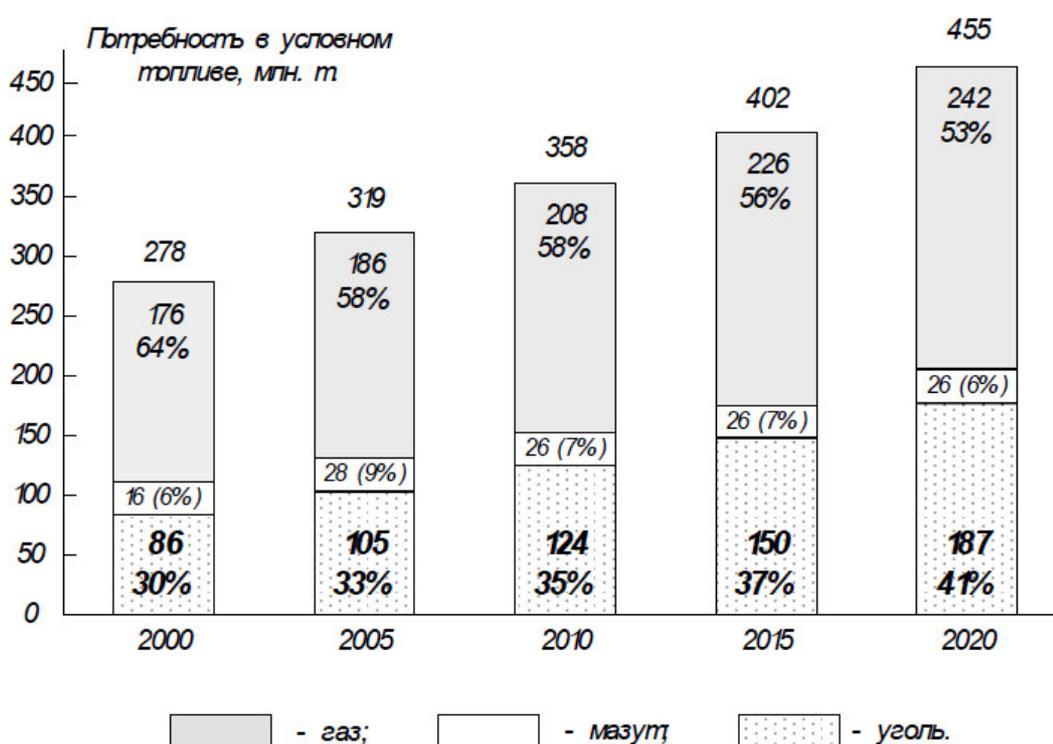


Рисунок 1 – Потребность в топливе электростанций России

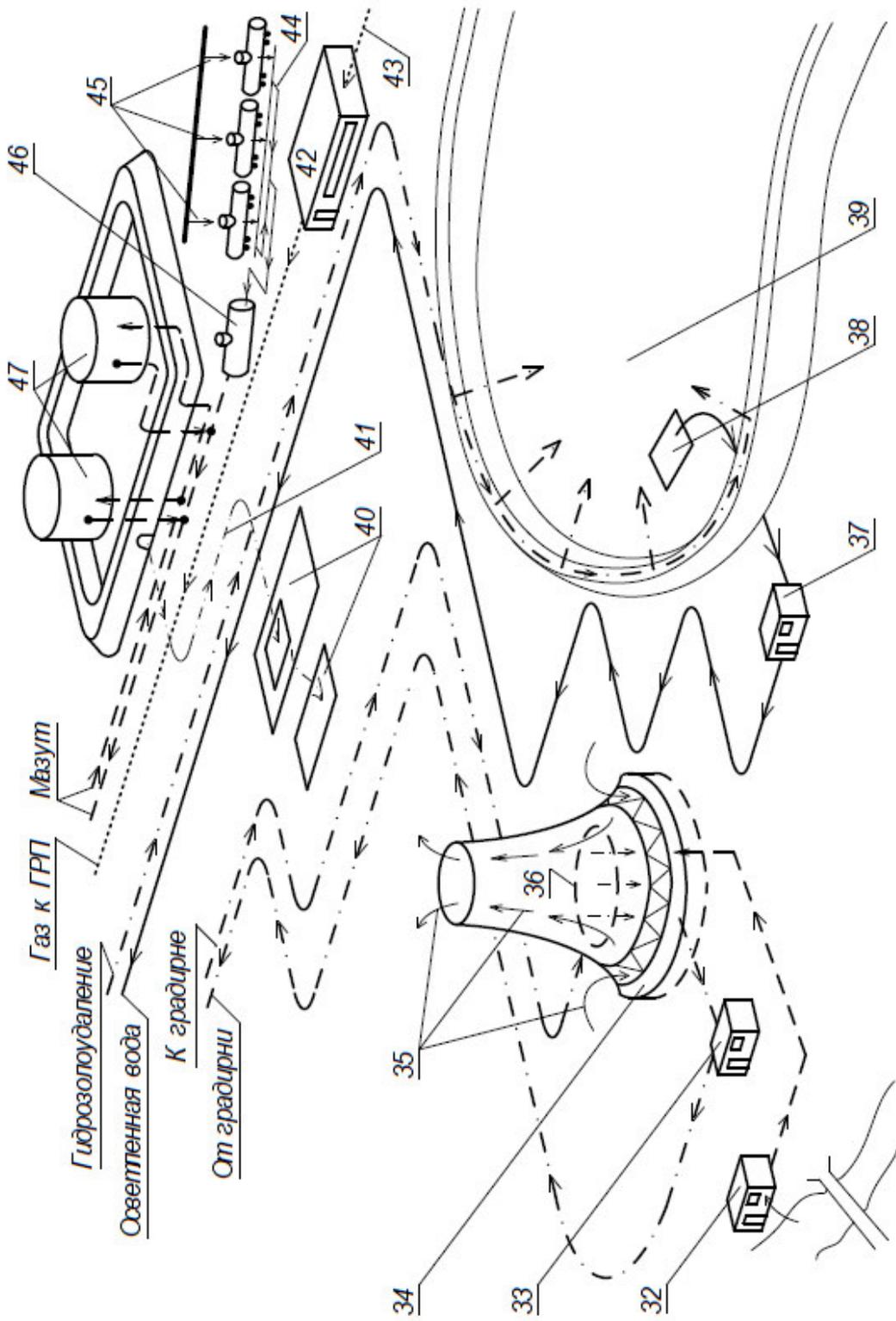


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема тепловой электростанции (продолжение)

- | | |
|--|--|
| 1 – Химводоочистка; | 27 – Береговая насосная циркуляционного водоснабжения; |
| 2 – Объединенный вспомогательный корпус; | 28 – Перепад; |
| 3 – Турбогенератор; | 29 – Открытый канал циркуляционного водоснабжения; |
| 4 – Паровая турбина; | 30 – Пар и горячая (сетевая) вода потребителям тепла; |
| 5 – Турбинный цех; | 31 – Возврат конденсата от потребителей тепла; |
| 6 – Блочный щит управления (БЩУ); | 32 – Насосная подпитки циркуляционной системы; |
| 7 – Деаэратор; | 33 – Циркуляционная насосная; |
| 8 – Сепаратор; | 34 – Градирня; |
| 9 – Надбункерные конвейеры; | 35 – Охлаждающий воздух; |
| 10 – Циклон; | 36 – Сроительное устройство; |
| 11 – Угольный бункер; | 37 – Насосная осветненной воды; |
| 12 – Надбункерная галерея; | 38 – Колодец осветненной воды; |
| 13 – Главный корпус; | 39 – Золошлакоотвал; |
| 14 – Котел (парогенератор); | 40 – Устройство для очистки замазученных вод; |
| 15 – Котельный цех; | 41 – Отвод замазученных вод от мест перекачки и хранения мазута; |
| 16 – Наклонный конвейер; | 42 – Газораспределительная станция (ГРС); |
| 17 – Дымовая труба; | 43 – Газопровод; |
| 18 – Кран-перегрузатель угля; | 44 – Мазутослив; |
| 19 – Дробильный корпус; | 45 – Подача пара для разогрева и слива мазута; |
| 20 – Оклад угля; | 46 – Приемный резервуар для мазута; |
| 21 – Вагонопрокидыватель; | 47 – Оклад мазута. |
| 22 – Золоуловитель; | |
| 23 – Мазутная насосная; | |
| 24 – Газораспределительный пункт (ГРП); | |
| 25 – Углеразмельная мельница; | |
| 26 – Циркуляционные водоводы; | |

Рисунок 2.3 – Объяснения к обозначениям

1.3 Основные механизмы собственных нужд ТЭС

Механизмы с.н. ТЭС по выполняемым функциям и в соответствии с их местом в технологической схеме можно разделить на несколько основных групп. Для того, чтобы более детально разобраться в структуре с.н.. рассмотрим технологическую схему газовоздушного тракта и золошлакоудаления ТЭС (рис. 3).

Газовоздушный тракт служит для подачи воздуха в котел и отвода дымовых газов. Из воздухозабора (1 - рис. 3) воздух, необходимый для горения топлива, дутьевым вентилятором 2 через воздухоподогреватель 3 подается к горелкам котла 4. Газообразные продукты сгорания и легкие частицы золы 5 из котла через экономайзер 6, воздухоподогреватель 3, золоуловитель 7 и установку очистки от серы 8, оборудованную насосом 19 и воздуходувкой 20, отсасывающим дымососом 9 и выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу 10.

Зола и шлак от ТЭС удаляются, как правило, гидравлическим способом.

Крупные фракции золы, образовавшиеся после сгорания топлива, вытекают в виде жидкого шлака через летку пода топки 21; зола, удаленная из отходящих газов электрофильтром 7, собирается в бункер летучей (сухой) золы 22. На некоторых ТЭС сухая зола реализуется строительным предприятиям региона и используется как присадка к цементу при производстве строительных конструкций. Если состав золы не позволяет это делать, то с помощью смывных устройств, оборудованных смывными и шламовыми насосами 11, шлак и летучая зола попадают в каналы гидрозолоудаления.

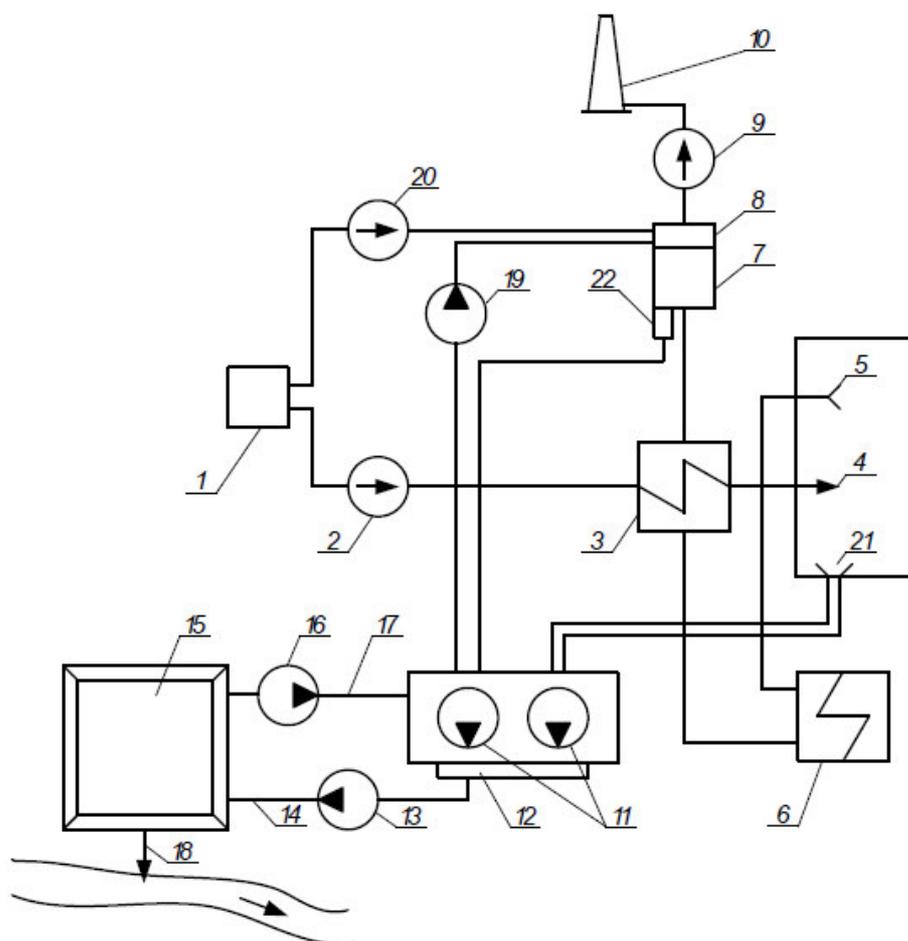


Рисунок 3 – Схема газозвушного тракта и золошлакоудаления

1 – воздухозабор; 2 – дутьевой вентилятор; 3 – воздухоподогреватель; 4 – горелки котла; 5 – газообразные продукты сгорания топлива; 6 – экономайзер; 7 – золоуловитель; 8 – установка очистки от серы; 9 – дымосос; 10 – дымовая труба; 11 – смывные и шламовые насосы; 12 – металлоуловитель и шлакодробилка; 13 – багерный насос; 14 – пульпопровод; 15 – золоотвал; 16 – насос осветленной воды; 17 – водопровод осветленной воды; 18 – аварийный сброс воды; 19 – водяной насос установки очистки серы; 20 – воздуходувка; 21 – летка в нижней части топки; 22 – бункер сухой золы

Пройдя через металлоуловитель и шлакодробилку 12, гидрошлаковая смесь (пульпа) багерным насосом 13 по пульпопроводу 14 подается на золоотвал 15. После отстоя вода насосами осветленной воды 16 возвращается по водопроводу 17 на станцию для повторного использования. Подпитка системы гидрозолоудаления осуществляется от общей системы технического водоснабжения. Золоотвал оборудован аварийным сбросом воды в водоем.

В топливном хозяйстве тепловых электрических станций, работающих на твердом топливе, основными механизмами являются мельницы, дробилки, ленточные конвейеры, компрессоры и вентиляторы для пневмотранспорта пыли, а также пульпонасосы - при гидротранспорте угля. В мазутном хозяйстве преобладают нефтеперекачивающие насосы. Основу тягодугьевой установки любой ТЭС' составляют дымососы и дутьевые вентиляторы, а пароводяного тракта - насосы различного назначения и мощности. Большое количество насосов используется в системах водоснабжения, гидрозолоудаления и на разных участках технологического обеспечения основного оборудования и вспомогательных установок (в системе смазки турбины и генератора, в маслосистеме уплотнений вала турбогенераторов, системе подачи дистиллята в обмотки генераторов с водяным охлаждением и т.д.). Из других характерных механизмов следует отметить приводные устройства задвижек, подъемно-транспортную технику-, воздушно-компрессорное хозяйство и др.

Механизмы, входящие в одну группу (например, насосы), отличаются по мощности. частоте вращения. расположению вала (горизонтальное, вертикальное), условиям окружающей среды, режиму работы и степени ответственности в технологическом процессе. Степень ответственности определяется последствиями, которые могут возникнуть при остановке агрегата.

2. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Схемы электроснабжения установок с.н. ТЭС должны проектироваться и эксплуатироваться таким образом, чтобы в различных режимах, в том числе и в аварийных, обеспечивался определенный уровень надежности работы электростанции. Кроме того, должна быть обеспечена сохранность основного оборудования (котлов, турбин, генераторов и др.) при аварийном останове. Для обеспечения этих условий принимаются специальные меры. Шины РУ 6,3 кВ собственных нужд ТЭС секционируются, причем электроснабжение каждой секции осуществляется не менее чем от двух питающих элементов. Ответственные механизмы, прекращение работы которых вызывает останов котлов или турбин, выполняются парными: один находится в работе, другой - в так называемом «горячем» резерве, т.е. может быть включен в работу автоматически в случае отказа первого. Питание электродвигателей таких механизмов осуществляется, как правило, от разных секций 6.3 кВ с.н. Некоторые механизмы оборудуются двухскоростными электродвигателями. Кроме того, электрические схемы с.н. должны обеспечивать само запуск электродвигателей в аварийных режимах, а для приводов механизмов, обеспечивающих сохранность основного оборудования (маслонасосы смазки и уплотнения вала турбин, генераторов и т.п.), - наличие питания от независимого источника (дизель-генератора или аккумуляторной батареи) в режиме полного исчезновения переменного тока на ТЭС.

Необходимая надежность работы с.н. ТЭС обеспечивается также наличием на всех элементах электрической сети устройств релейной защиты (РЗ), отключающих с минимально возможным временем защищаемые элементы при возникновении в них повреждений. Это предотвращает длительное понижение напряжения во всей сети собственных нужд, которое может приводить к затормаживанию неповрежденных электродвигателей и нарушению работы технологического оборудования электростанции. Той же цели служат устройства АВР, восстанавливающие питание на секциях с.н. при ошибочном или самопроизвольном отключении рабочего ввода или

отключение его из-за повреждения.

На электростанциях с блочной схемой в тепловой и электрической частях на каждом блоке выполняются две секции собственных нужд 6.3 кВ, что позволяет при соответствующем распределении нагрузок между ними сохранить блок в работе при повреждении одной секции. В качестве рабочих питающих элементов применяются специальные трансформаторы собственных нужд (ТСН). В зависимости от вида топлива, на котором работает ТЭС, наличия или отсутствия генераторных выключателей, а также от мощности энергоблока мощность рабочих ТСН изменяется от 10 до 63 МВА. Рабочие ТСН присоединяются ответвлением к токопроводу между блочным трансформатором и генератором или между блочным трансформатором и генераторным выключателем. На ответвлении к ТСН выключатель не устанавливается. Для повышения надежности все рабочие ТСН присоединяются с помощью закрытых комплектных пофазных токопроводов, что значительно снижает вероятность возникновения между фазных КЗ.

Каждый рабочий ТСН $T_{\text{раб}}$ питает две секции с.н. 6.3 кВ $BA1$ и $BB1$, причем у ТСН мощностью 10 и 16 МВА обе секции присоединяются к обмотке низшего напряжения (НН) 6.3 кВ через отдельные выключатели $Q_{\text{раб}}$, называемые выключателями вводов рабочего питания (рис. 4), а у ТСН мощностью 25-63 МВА, которые выполняются с расщепленной обмоткой НН. Вводы рабочего питания секций с.н. 6.3 кВ электрически не связаны (рис. 4). Использование ТСН с расщепленными обмотками значительно повышает надежность работы собственных нужд энергоблока, т.к. при КЗ на секции, питающейся от одной обмотки 6,3 кВ, напряжение на другой секции, питающейся от второй расщепленной обмотки, снижается не более чем на 3-7%, что практически исключает «опрокидывание» электродвигателей, питающихся от этой секции. Это объясняется тем, что параметры схемы замещения трансформатора, обмотка низшего напряжения которого расщеплена на n цепей, равны:

$$x_B = x_{BH} \left(1 - \frac{k_p}{2 \cdot n} \right),$$

$$x_{H1} = \dots x_{Hn} = x_{BH} \frac{k_p}{2},$$

где $k_p = X_{HH}/X_{BH}$ - коэффициент расщепления;

X_{BH} - сопротивление между выводами обмоток ВН и НН1 (НН2);

X_{HH} - сопротивление между выводами НН1 и НН2 расщепленной обмотки.

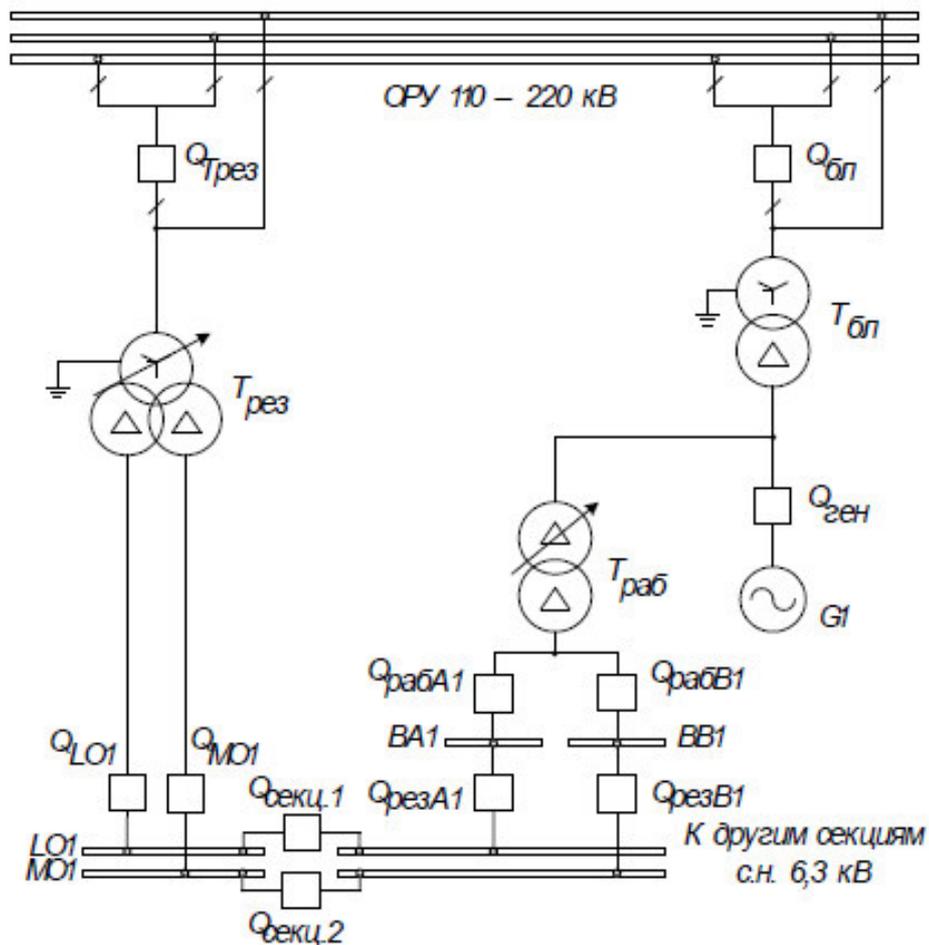


Рисунок 4 - Схема питания секций 6,3 кВ собственных нужд энергоблоков мощностью 60 – 200 МВт

Трансформаторы с расщепленной обмоткой, выпускаемые в России, имеют $n=2$ и $k_p=3.5$ (ГОСТ 11677-85). Тогда при трехфазном металлическом коротком замыкании на шинах $BB1$ (рис. 5) напряжение на шинах $BA1$ равно:

Обмотка высшего напряжения (ВН) РТСН подключается, как правило, к сети, работающей с заземленной нейтралью (ОРУ 110 – 330 кВ электростанции или ВЛ 110 – 220 кВ). Для предотвращения повреждения электродвигателей от перенапряжений, возникающих при удаленных однофазных КЗ в сети 110 – 330 кВ, нейтраль обмотки ВН РТСН также заземляется. Иногда встречаются схемы подключения РТСН к третичной обмотке автотрансформатора связи АТ; в этом случае РТСН, как и рабочие ТСН, выполняется со схемой соединения обмоток $\Delta / \Delta / \Delta - 0$ (рис. 6).

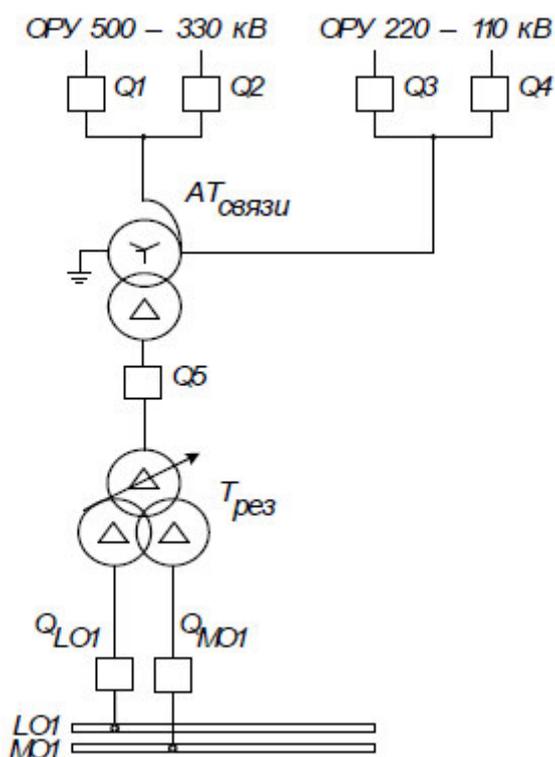


Рисунок 6 - Схема подключения резервного ТСН к автотрансформатору связи ТЭС.

Если в цепи генераторов энергоблоков установлен генераторный выключатель $Q_{ген}$ (рис. 4, 5), то пуск энергоблока и разворот электродвигателей механизмов с.н., а также останов блока производится от резервный ТСН. В этом случае резервный ТСН предназначен только для замены рабочего ТСН одного блока в случае его неисправности и мощность рабочего ТСН выбирается равной мощности самого мощного рабочего трансформатора собственных нужд. Если в цепи генераторов энергоблоков выключатель не

устанавливается, то пуск и останов энергоблоков производится от резервного ТСН, который в этом случае называется пускорезервным трансформатором собственных нужд – ПРТСН.

Для ПРТСН наиболее тяжелым режимом является режим пуска одного блока, в то время, когда другой блок переведен на резервное питание от этого ПРТСН. Следовательно, мощность ПРТСН выбирается следующей по шкале ГОСТ 11677-85 по сравнению с мощностью рабочего ТСН.

На электростанциях с блочными агрегатами при одном или двух блоках устанавливается один РТСН (ПРТСН), а при числе блоков три и более - два РТСН (ПРТСН), подсоединенных со стороны высшего напряжения к разным источникам питания. В этом случае магистрали резервного питания 6,3 кВ *ЛО1* и *МО1* секционируются выключателями $Q_{\text{секц.}}$ через два-три блока. При наличии генераторных выключателей каждая магистраль резервного питания секционируется на две части.

Секции 6,3 кВ собственных нужд блочных электростанций монтируются из серийно выпускаемых электротехнической промышленностью ячеек (шкафов) комплектных распределительных устройств (КРУ) 6,3 кВ. Каждая ячейка КРУ состоит из так называемого «высоковольтного» («первичного», силового) отсека с оборудованием ВН – выключателями, разъединителями, кабелями, шинами, трансформаторами напряжения и тока, и «релейного» отсека с оборудованием вторичных цепей, переключателями, шинками управления и сигнализации. Такое выполнение секций 6,3 кВ значительно упрощает и удешевляет монтаж и наладку устройств собственных нужд 6,3 кВ. В то же время установка в разных отсеках одной ячейки КРУ оборудования высокого напряжения и низковольтных устройств релейной защиты и управления не исключает выгорания цепей вторичной коммутации при дуговых коротких замыканиях в отсеке высокого напряжения КРУ. Это должно учитываться при проектировании схем релейной защиты в сети 6,3 кВ с.н., особенно при обеспечении дальнего резервирования.

В ряде случаев для питания общестанционных с.н. (топливоподача, химводоочистка и др.) на блочных электростанциях предусматриваются дополнительные секции 6,3 кВ удаленных нагрузок (рис. 7). Рабочее питание этих секций осуществляется от блочных секций с.н. 6,3 кВ *BA1* при помощи кабельных линий с двумя выключателями. Резервное питание секций удаленных нагрузок осуществляется либо от магистрали резервного питания 6,3 кВ электростанции через один выключатель, либо от другой блочной секции 6,3 кВ также с помощью кабельной линии с двумя выключателями.

Сеть с.н. 6,3 кВ на блочных электростанциях может работать с изолированной или с заземленной через резистор высокого напряжения нейтралью [1], причем заземление нейтрали сети 6,3 кВ собственных нужд блока всегда производится только в одной точке сети.

Если генератор энергоблока работает на напряжении 6,3 кВ, то рабочее питание секций с.н. 6,3 кВ осуществляется от реактированной линии, подключенной ответвлением к блоку (рис. 8). При этом не допускается применение сдвоенных реакторов, которые являются динамически нестойкими к воздействиям тока двойного замыкания на землю на разных секциях. Резервное питание в этом случае выполняется от двухобмоточного РТСН.

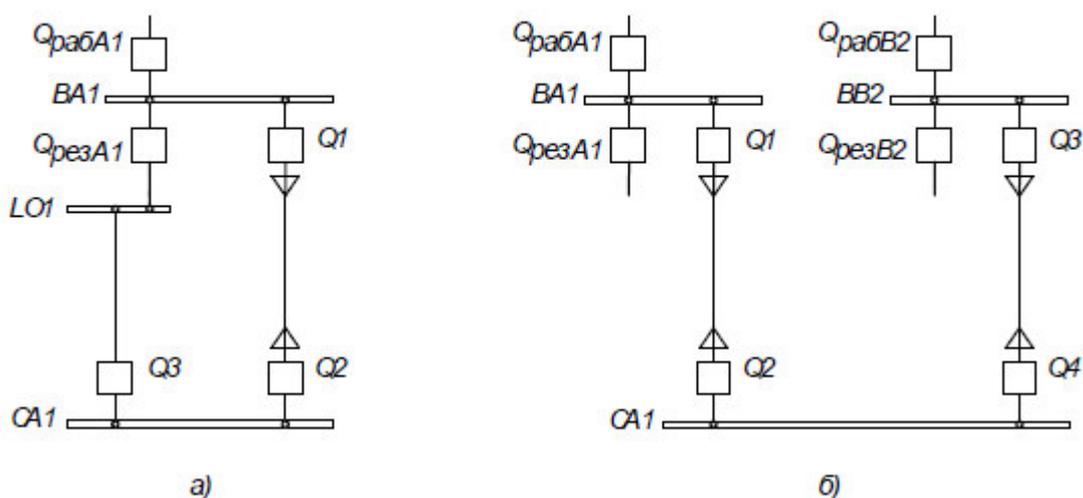


Рисунок 7 - Схема питания секций 6,3 кВ удаленных нагрузок:
а – с резервированием от магистрали резервного питания 6,3 кВ;
б – с резервированием от другой блочной секции с.н. 6,3 кВ

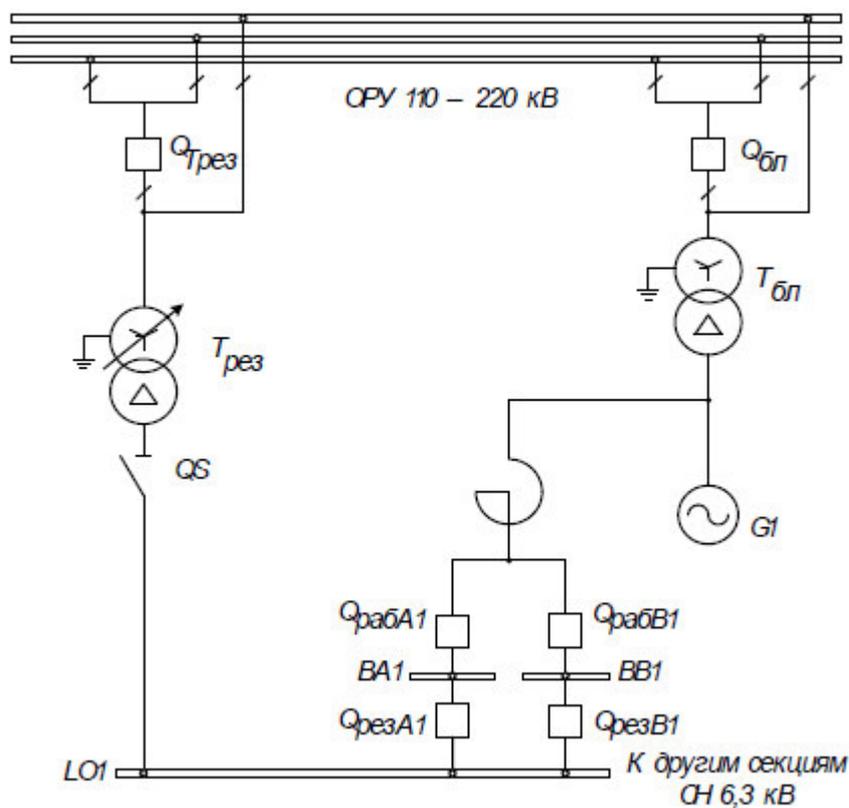


Рисунок 8 - Схема питания секций с.н. 6,3 кВ блоков с генераторным напряжением 6,3 кВ

На электростанциях с поперечными связями в тепловой части, например на ТЭЦ, схема сети с.н. 6,3 кВ имеет свои особенности. На таких электростанциях, где возможно любое сочетание работающих котлов и турбин, рабочее и резервное электроснабжение собственных нужд осуществляется от сборных шин главного распределительного устройства (ГРУ), к которому подключены генераторы G (рис. 9). Необходимая надежность питания с.н. обеспечивается при этом благодаря тому, что к ГРУ присоединены не только генераторы, но и трансформаторы T , связывающие ГРУ с РУ высшего напряжения ТЭЦ, что обеспечивает возможность питания с.н. как от генераторов станции, так и от энергосистемы.

В качестве питающих элементов с.н. при номинальном напряжении генераторов 6,3 кВ применяются реактированные линии (рис. 9), а при напряжении 10,5 кВ вместо реакторов включаются трансформаторы 10,5/6,3 кВ. Количество секций РУСН 6,3 кВ, как правило, соответствует числу котлов

на ТЭЦ. С целью облегчения самозапуска иногда выделяют на отдельные секции электродвигатели крупных питательных насосов (ПЭН), сетевых насосов (СЭН) и др.

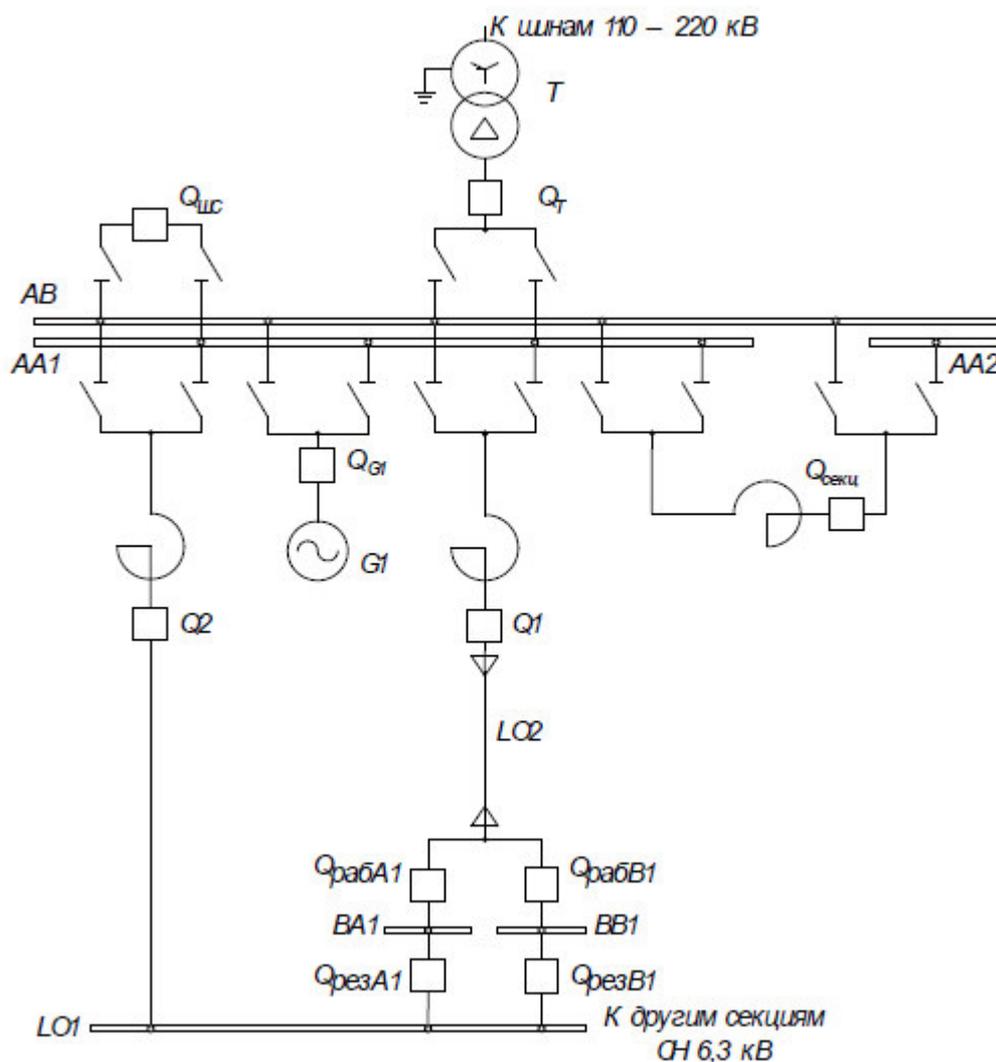


Рисунок 9 - Схема питания секций с.н. 6,3 кВ на ТЭЦ с ГРУ 6,3 кВ

ГРУ ТЭЦ напряжением 6,3 кВ имеет две системы шин: рабочую *AA*, секционированную на *AA1* и *AA2*, и резервную *AB*. Для обеспечения надежности питания с.н. принята работа сборных шин ГРУ по схеме с фиксированным присоединением элементов к обеим системам шин. При этом генератор *G*, рабочая реактированная линия с.н. *LO2* и часть реактированных линий, питающих потребителей, включены на систему шин *AA1* (рис. 9). Резервная реактированная линия с.н. *LO1* и трансформатор связи *T* включены на систему шин *AB*. Обе системы шин находятся под напряжением с

включенными шиносоединительным выключателем $Q_{ШС}$ и секционным выключателем $Q_{секц.}$. В случае КЗ на секции $AA1$ ГРУ защитой данной секции шин отключаются генератор G и выключатели $Q_{секц.}$ и $Q_{ШС}$, отделяя тем самым систему шин AB от поврежденной системы $AA1$. Благодаря этому резервная реактированная линия $LO1$ продолжает получать питание от трансформатора связи T и обеспечивает питание нагрузки секций $BA1$ и $BA2$ с.н. взамен рабочей реактированной линии, которая также отключается при срабатывании защиты поврежденной секции шин. Аналогичная схема выполняется и для ГРУ напряжением 10,5 кВ, при этом рабочий ТСН присоединяется к системе шин AA , а резервный ТСН – к системе шин AB .

Рабочие реактированные линии или трансформаторы выбираются с номинальным током, равным расчетному току нагрузки потребителей с.н. или превышающем его. Реактивное сопротивление питающих элементов с.н. выбирается таким, чтобы реактор, с одной стороны, ограничивал ток КЗ на шинах 6,3 кВ РУСН до величины, позволяющей применять относительно дешевую аппаратуру (например, ячейки КРУ с выключателями типа ВМП-10), а с другой – обеспечивал на шинах 6,3 кВ РУСН нормальное эксплуатационное напряжение. Кроме того, при пуске и самозапуске должно обеспечиваться требуемое остаточное напряжение для успешного разворота электродвигателей.

На электростанциях с поперечными связями в тепловой части резервный источник питания с.н. может быть использован для растопки котельного агрегата с одновременной заменой рабочего источника питания. Поэтому мощность резервного источника питания с.н. 6,3 кВ принимается равной полуторакратной мощности рабочего источника, что в сочетании с защитой минимального напряжения обеспечивает разворот электродвигателей с.н. В соответствии с действующими нормами технологического проектирования при числе рабочих реактированных линий (рабочих ТСН), равном шести и менее, предусматривается одна резервная линия или один резервный ТСН. При количестве рабочих линий или ТСН, равном семи и более, применяются два резервных питающих элемента, а шины резервного питания секционируются на

две секции выключателем. Этот выключатель управляется дистанционно и при необходимости отключается защитами.

3. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ КОРОТКОЗАМНУТЫХ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Анализ повреждаемости короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных электродвигателей

Согласно [1], общее число вынужденных остановов блоков из-за отказов вспомогательного оборудования на ТЭС составляет 27,4%. При этом отключения распределились так: из-за ошибок персонала - 19%, из-за отказов трансформаторов - 33%, высоковольтные электродвигателей - 24 % и кабельных линий - 24 % случаев. Из приведенных данных видно, что доля отключений блоков, вызванных отказами электродвигателей, основную часть которых составляют АД, имеет достаточно большую величину.

Наиболее характерные и часто встречающиеся в практике эксплуатации повреждения «беличьих клеток» заключаются в обрывах стержней. Они составляют более 80 % от общего числа повреждений ОР [4].

Обрыв стержня приводит к следующим неблагоприятным последствиям:

- 1) увеличиваются механические и тепловые нагрузки на соседние с оборванным стержнем, увеличивается вероятность их обрыва при пусках;
- 2) повышается вибрация деталей двигателя из-за неравномерности магнитного поля в зазоре;
- 3) увеличиваются осевые усилия на подшипники со стороны вала ротора из-за протекания по стали ротора больших поперечных токов при наличии контакта оборванного стержня с ротором при пусках [5].

Интенсивности отказов ОР по данным, приведенным в [3], и по данным, полученным при исследовании работы высоковольтных АД на ряде пылеугольных ТЭС средней мощности, показаны соответственно в таблице 1.1.

Таблица 3. Удельная повреждаемость электродвигателей 6 кВ мельниц и дробилок

Тип АД	Вид рабочей машины	Интенсивность отказов ОР (1/год)
ДАЗО-15-49-8	Мельница	0,09
ДАЗО-15-49-8	Дробилка	0,6
ДАМСО-157-8	Мельница	0,1

АНЗ 4-65-45-10	Дробилка	0,583
АНЗ 2-17-57-12	Дробилка	0,333
ДАЗО-15-69-10	Дробилка	0,9

Согласно статистике, обрывы стержней встречались [8, 9] и встречаются [10] не только на АД с тяжелыми условиями пуска, но и на других высоковольтных АД. Интенсивности отказов для таких машин показаны в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4. Удельная повреждаемость системы с.н. по узлам. [8, 9]
4)

Механизм	Интенсивность отказов ОР (1/год)
Питательный насос	0,037
Циркуляционный насос	0,056
Мельничный вентилятор	0,075
Дымосос	0,030

Таблица 5. Удельная повреждаемость системы с.н. по узлам. [10]

Тип двигателя	Механизм	Интенсивность отказов ОР(1/год)
AP-500	Бустерный питательный насос	0,00387
A-112-4	Насос пускового эжектора	0,0129
ДАЗО-13-50-4	Мельничный вентилятор	0,0038

Анализ литературных данных свидетельствует о высокой повреждаемости короткозамкнутых АД собственных нужд электростанций. Одним из слабых узлов в них, особенно у машин с тяжелыми условиями пуска, является ОР, в которой среди повреждений наиболее часто встречаются нарушение контакта в местах пайки стержня с короткозамкнутыми кольцами, образование трещин и разрывов стержней. Высокая повреждаемость этого узла говорит о недостаточной

эффективности штатных методов контроля и диагностики и требует разработки специальных методов и технических средств контроля.

Так как конструкция ОР оказывает существенное влияние на требования, предъявляемые к принципам и устройствам контроля ее состояния, то необходимо изучить данный вопрос.

3.2. Контроль состояния короткозамкнутых обмоток роторов высоковольтных асинхронных электродвигателей

3.1.1. Классификация способов и устройств контроля

Классификация способов контроля состояния «беличьей клетки» крупных АД представлена на рис. 10.

Существующие способы и устройства для контроля состояния стержней короткозамкнутой ОР согласно [11] с учетом терминов, предложенных в [18-20] можно разделить на три группы. К первой группе относятся способы ремонтного контроля, применяемые на вынутом из двигателя роторе [16, 17, 21-26]; ко второй — способы оперативного тестового контроля, при котором на АД подается тестовое воздействие. Тестовые воздействия формируются либо режимами объекта [4, 27-32] либо самой системой контроля [11, 34, 35, 42, 43]; к третьей - способы оперативного функционального контроля, в котором контроль осуществляется во время нормальной работы машины [3, 33-39, 41, 44-48].

3.1.2. Анализ способов и устройств ремонтного контроля

1. Способы первой группы (применяемые на вынутом из двигателя роторе) можно разбить на четыре типа:

1.1. Визуальный контроль, где диагностическим признаком обрыва стержня являются видимые трещины, разрывы, следы побежалости на стержнях и в пазах, где они заложены [16, 17];

1.2. Акустический контроль, в котором диагностическим параметром является тон звука от удара по части стержня, выходящей из ротора, а диагностическим признаком - разница в тонах звука исправного и неисправного стержней [16, 17];

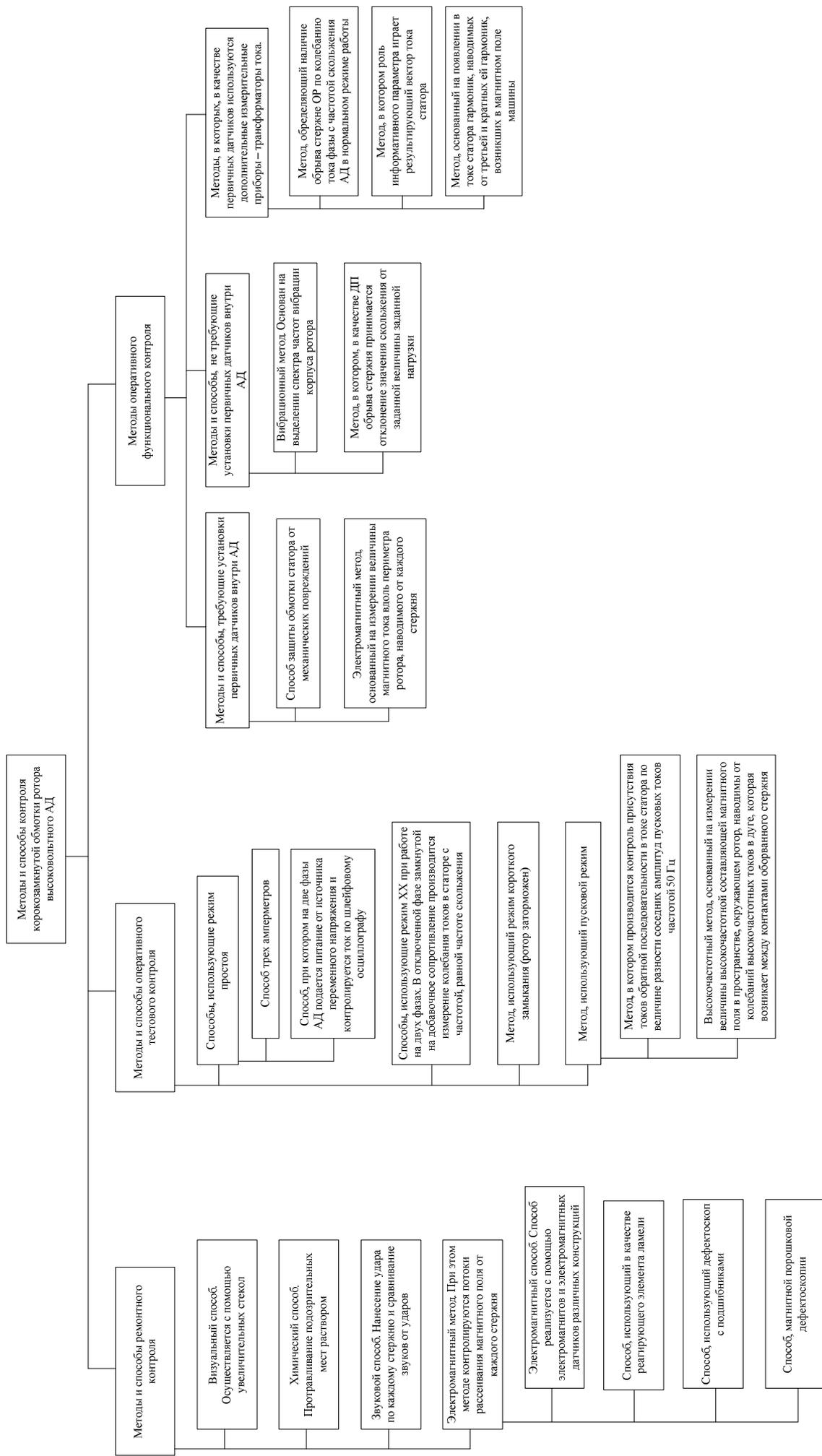


Рис 10. Классификация методов и устройств контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей

1.3. Контроль состояния стержней ротора микроомметром [21]. Здесь диагностический параметр - это сопротивление исследуемого стержня, а диагностический признак - резкое увеличение сопротивления у поврежденного стержня;

1.4. Способы, в которых диагностическим параметром является величина магнитного потока рассеяния, наводимого током рассматриваемого стержня [4, 16, 17, 22-26]. Роль диагностического признака играет резкое уменьшение величины магнитного потока над поврежденным стержнем по сравнению с магнитными потоками над исправными стержнями.

Способы последней группы в качестве датчиков магнитного поля могут использовать:

- тонкий лист белой бумаги покрытой тонким слоем стальных опилок [4]. Способ называют магнитной порошковой дефектоскопией;
- электромагнитные (индуктивные) датчики с подковообразными магнитами [4, 16, 17, 22-26];
- стальные пластины-ламели [4, 16];
- дефектоскоп с вращающимся подшипником [4, 16].

Наибольшее применение нашли способы, в которых используются индуктивные датчики с подковообразными магнитами.

Способы ремонтного диагностирования относятся к дифференциальным, но не пригодны для контроля в рабочем режиме.

3.1.3. Анализ способов и устройств оперативного тестового контроля

Принципы второй группы (способы оперативного тестового контроля) используют как искусственно созданные тестовые режимы [4, 27-32], так и режим пуска [11, 34, 35, 42, 43].

Рассмотрим сначала способы, в которых применяется искусственно созданные тестовые режимы. Известны четыре разновидности данных способов.

а) В первом из них на две фазы двигателя подается питание от источника переменного напряжения и контролируется ток шлейфовым осциллографом. Если

нет оборванных стержней, то график будет прямой линией. Когда один или больше стержней оборваны, то токовый след будет иметь в этих местах пики [27].

б). Второй способ [28] является развитием способа [27]. После пуска двигателя на холостом ходу отключается одна из фаз обмотки статора от сети, две оставшиеся замыкаются на добавочное сопротивление, и производится измерение колебания тока статора с частотой, равной частоте скольжения сети.

в) Третий вариант известен под названием «способ трех амперметров» [4, 29]. В три фазы обмотки ротора включают амперметры: ротор затормаживают, а в статор подают напряжение, равное 1/4-1/5 номинального. Затем ротор медленно проворачивают и определяют максимальное и минимальное значения тока статора по установленным амперметрам. При исправном роторе ток в статоре во всех положениях ротора будет одинаковым, а при обрыве или плохом контакте будет изменяться в зависимости от положения ротора. Критерием годности ротора является отношение:

$$\frac{I_{max}-I_{min}}{I_{max}+I_{min}} \cdot 100\%$$

Ротор считается годным, если это соотношение не превышает 3 %. Все три принципа не пригодны для проведения контроля на машине в режиме функционирования, поэтому они в дальнейшем не рассматриваются.

г) Новый интересный подход к определению состояния ОР изложен в [30]. В нем контроль предложено осуществлять по внешнему электромагнитному полю машины, существование которого подтверждается многими опытными данными [31, 32]. Способ заключается в следующем. Контроль производится в режиме короткого замыкания машины (ротор неподвижен) при пониженном напряжении. На корпусе машины устанавливается контрольно-измерительная магнитная система с многополюсными намагничивающими и двухполюсными измерительными обмотками, измеряющая магнитный диполь внешнего электромагнитного поля АД, который является диагностическим параметром обрыва стержня. У

симметричной обмотки ротора магнитный диполь практически равен нулю, а при возникновении обрыва его величина становится значительной, что является диагностическим признаком повреждения «беличьей клетки».

Достоинства метода:

- способен обнаружить один оборванный стержень, так как диагностический признак вызван токами фиктивной ОР, которые появляются только при поврежденных стержнях;
- не требует установки датчиков внутри машины;
- пригоден для определения состояния пусковой ОР.

Недостатки метода:

- не имеет критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное;
- не пригоден для контроля состояния ОР двухполюсных машин, собственное магнитное поле которых имеет дипольный характер;
- имеет сложную контрольно-измерительную систему, которая не позволяет найти применение данного способа в оперативной диагностике высоковольтных АД.

д). Принцип, в котором производится контроль величины высокочастотной составляющей электромагнитного поля вокруг обмотки ротора, наводимой от колебаний высокочастотных (10 кГц и более) токов в дуге, возникающей между контактами оборванного стержня [11].

На базе данного метода разработано устройство [34, 35], в котором используется электромагнитный датчик, установленный внутри машины вблизи лобовой части обмотки статора. В обмотке датчика при обрыве стержня наводится высокочастотная ЭДС, амплитуда которой промодулирована низкочастотным сигналом с удвоенной частотой тока в роторе.

Достоинства принципа:

- измерение может проводиться как в переходном режиме (пуск, самозапуск), так и в стационарном нормальном режиме. Чувствительность способа выше при пуске;

- способен обнаружить один оборванный стержень;
- пригоден для контроля состояния пусковой ОР при пуске;

Недостатки метода:

- достоверность контроля низкая, так как высокочастотные колебания, генерируемые сетью и попадающие через обмотку статора в датчик, могут повлиять на работу устройства;

- возможность проведения контроля только в кратковременном пусковом переходном режиме, хотя контроль не требует проведения специальных мероприятий (например, отключение одной из фаз, заклинивание вала ротора), мешающих функционированию приводного механизма, который вращает АД;

- требует установки датчика внутри АД.

е) Способ, в котором ДП является амплитуда пульсаций фазного тока статора в пусковом режиме, где величина пускового тока зависит только от параметров АД и в 5-7 раз превышает его номинальный ток [42].

На его базе разработано устройство «ВОРС» [43], которое позволяет четко определить один оборванный стержень при общем количестве стержней ОР менее 80 и два обрыва при большем количестве стержней.

Достоинства способа:

- перспективен для АД с двойной «беличьей клеткой», у которых контроль состояния пусковых ОР в нормальном режиме затруднителен.

- достоверность диагностирования выше по сравнению с контролем в нормальном режиме АД, так как броски пульсаций в пусковом режиме выражены более четко, и влияние нагрузки на них становится менее заметным.

Недостатки способа:

- возможность проведения контроля только в кратковременном пусковом переходном режиме, хотя контроль не требует проведения специальных мероприятий (например, отключение одной из фаз, заклинивание вала ротора), мешающих функционированию приводного механизма, который вращает АД;

- нельзя определить состояние обмотки ротора для двигателей с про-

должительностью пуска менее 2,5 секунд, которое требуется для отстройки от апериодической составляющей пускового тока;

- не имеет критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное.

3.1.4. Анализ принципов и устройств функционального оперативного контроля

Принципам функционального оперативного контроля в настоящее время уделяется большое внимания. Проведем их анализ с учетом упомянутых выше критериев.

По способу установки первичных датчиков эта группа принципов подразделяется на следующие типы:

а) Принципы, требующие установки первичных датчиков внутри двигателя.

б) Принципы, не требующие установки первичных датчиков внутри АД, которые в свою очередь можно разбить еще на два типа:

б.1). Принципы, в которых специальные датчики устанавливаются снаружи АД;

б.2) Принципы, использующие в качестве первичных датчиков трансформаторы тока, установленные в фазах электрической машины.

Из способов первого типа можно выделить следующие:

а.1) Способ, основанный на измерении величины магнитного потока вдоль периметра ротора, наводимого от каждого стержня [3].

Единственным локальным ДП состояния стержней ОР является величина магнитного поля от каждого стержня ротора. Обрыв проводника приводит к резкому уменьшению магнитного поля над ним. Разница между амплитудой магнитного потока около исправного и поврежденного стержней является ДП их повреждения. Контролируя величину магнитного поля по периметру ротора на работающем двигателе, можно определить поврежденные стержни и их расположение на роторе друг относительно друга.

На основе данного подхода разработано устройство, которое использует два входных сигнала: от электромагнитного датчика, установленного вблизи лобовой части обмотки статора машины, и датчика оборотов, расположенного снаружи АД [33].

Недостатки метода:

- требует установки датчика внутри АД;
- достоверность контроля невысокая, так как возможно неправильное определение числа и места расположения оборванных стержней.

- способ, рассматривая в совокупности весь спектр пространственно-временных гармоник электромагнитного поля в воздушном зазоре, не учитывает влияние формы датчика и его места установки относительно центра ротора на изменение амплитуд фаз данных гармоник, в результате чего форма сигнала, наводимого в датчике неверно отражает картину токораспределения по стержням ОР;

- фильтры, используемые в устройстве, значительно искажают фазы и амплитуды гармоник, что также приводит к искажению картины токораспределения по стержням ОР;

- помехозащищенность сигнала слабая, так как в качестве диагностического параметра выбрано магнитное поле от реальной, а не от фиктивной ОР (см. главу 2).

Достоинства принципа контроля:

- является дифференциальным;
- способен обнаружить один оборванный стержень;
- имеет критерий перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное равный 5 % дефектных проводников от общего числа стержней ОР;

- измерения производятся в стационарном рабочем режиме.

а.2). Способ, где роль диагностического признака играет изменение формы выступающего из бочки ротора конца оборванного стержня [3].

При пуске АД, выступающий из бочки ротора конец оборванного стержня под воздействием центробежных сил, действующих на него, отгибается в сторону лобовой части обмотки статора. При выходе части стержня из паза возможно повреждение оборванным концом обмотки статора. Чтобы предотвратить данное явление, в воздушное пространство между выступающими из бочки стержнями и лобовой частью обмотки статора устанавливаются датчики. Датчик отключает АД, когда отогнутый стержень начинает задевать его.

На базе данного метода разработано устройство защиты статора от механических повреждений [36].

Достоинства:

- измерения производятся в стационарном режиме;
- вероятность повреждения обмотки статора концом оборванного стержня близка к нулю.

Недостатки:

- достоверность контроля состояния ОР очень низкая, так как оборванный стержень может не изменить своей формы (не отогнется к обмотке статора), а значит, устройство не сработает;
- требует установки датчика внутри АД;
- не пригоден для контроля состояния ОР, стержни которых не способны повредить обмотку статора.

К способам, в которых специальные датчики устанавливаются снаружи АД, относятся следующие;

б.1.1) Принцип контроля, основанный на выделении определенного спектра частот вибрации корпуса и ротора [37, 38].

Образующаяся несимметрия магнитного поля ротора при обрыве стержня вызывает вибрацию ротора и корпуса двигателя. Вибрация корпуса и ротора зависит не только от состояния ОР, но и от износа подшипников и вибрации приводного механизма. Выделить полезную часть параметра вибрации, связанную с повреждением ротора можно с применением коррелометра или обработки спектра вибрации на ЭВМ.

Достоинства способа:

- не требует установки датчика внутри АД;
- измерения производятся в стационарном режиме.

Недостатки способа:

- низкая достоверность контроля, так как уровень ДП обрыва на выделяемой полосе частот может оказаться меньше уровня помех;
- не имеет критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное.

б.1.2) Способ, в котором в качестве ДП принято отклонение скольжения от заданной величины при данной нагрузке на валу машины [39].

При обрыве стержня увеличивается активное сопротивление двигателя, что приводит к уменьшению КПД обмотки ротора. Так как КПД ротора равно $\eta = 1 - s$, где s — скольжение АД, то при этом скольжение увеличивается.

На основе этого способа разработано устройство, в котором датчик скольжения устанавливается на валу ротора [39].

Достоинства метода:

- не требует установки датчика внутри АД;
- имеет критерий перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное, равный согласно [40] скольжения в 20 % от номинальной величины при номинальных параметрах;
- измерения производятся в стационарном режиме.

Недостатки принципа контроля:

- достоверность контроля состояния низкая и обусловлена высокой методологической погрешностью, так как частота вращения и скольжение зависят не только от активного сопротивления ротора, но и от нагрузки на валу двигателя, напряжения питающей сети.

В принципах и устройствах третьего типа, в которых в качестве датчиков используются трансформаторы тока, установленные в фазах обмотки статора АД, диагностическим параметром является амплитуда пульсаций определенных токов, а диагностическим признаком - ее резкое увеличение при

повреждении стержня. Пульсации возникают из-за появления токов обратной последовательности в обмотке ротора [6, 7].

Все они не требуют установки датчика внутри машины, что является их общим достоинством, но не имеют критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное.

б.2.1) Наиболее простым является принцип контроля по амплитуде пульсаций с частотой скольжения ротора фазного тока обмотки статора [41].

Достоинства:

- не требует установки датчика внутри АД;
- измерения производятся в стационарном режиме.

Недостатки:

- достоверность контроля состояния низкая на АД с переменной нагрузкой, (нагрузка сама может вызвать пульсаций с частотой скольжения ротора фазного тока обмотки статора) и на АД с двойной «беличьей клеткой», так как при обрывах стержней пусковой обмотки величина токов обратной последовательности в нормальном режиме незначительна.

б.2.2) Метод, в котором роль диагностического параметра играет амплитуда пульсаций результирующего вектора тока статора [44].

В нормальном режиме работы модуль результирующего вектора тока статора - величина постоянная. При обрывах стержней она начинает колебаться, при этом амплитуда колебания имеет большее значение, чем у способа №1, но меньшее, чем у способа оперативного тестового контроля в пусковом режиме, основанный на появлении в токе статора токов обратной последовательности.

В соответствии с изложенным разработано устройство контроля исправности стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД, в котором величина потребляемого тока контролируется путём сравнения с током неповрежденного АД [45].

Достоинства способа:

- измерения производятся в стационарном режиме;
- достоверность диагностирования выше, чем у способа №1, но ниже,

чем у способа №2.

Недостатки способа:

- не имеет критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное.

б.2.3) Способ, в котором диагностическим параметром служит амплитуда пульсаций третьих гармоник фазного тока статора, а диагностическим признаком - её резкое возрастание при обрывах стержней [46, 47, 97].

Метод основан на сильном влиянии рассматриваемого повреждения на пульсацию третьей гармоники в фазном токе статора. Как показали эксперименты амплитуда пульсаций третьих гармоник в несколько раз выше, чем амплитуда пульсаций первой гармоники или полного тока статора. К тому же величина амплитуда пульсаций третьих гармоник почти не зависит от нагрузки.

На базе данного принципа контроля разработано устройство [48].

Достоинства способа:

- измерения производятся в стационарном режиме;
- достоверность диагностирования выше, чем у способов №1 и №3, но ниже, чем у способа №2.

Недостатки способа:

- не применим к контролю пусковой обмотки для АД с двойной «беличьей клеткой»;
- не имеет критерия перехода ОР из работоспособного исправного состояния в неработоспособное.

Из приведенных выше методов в настоящее время на станциях нашли применение в процессе работы АД два метода [49]:

- способ оперативного тестового контроля в пусковом режиме, основанный на появлении в токе статора токов обратной последовательности.
- принцип оперативного функционального контроля по амплитуде пульсаций с частотой скольжения ротора фазного тока обмотки статора.

Их диагностические признаки не имеют критериев перехода ОР из работоспособного исправного в неработоспособное состояние и являются

интегральными. К тому же более чувствительный первый метод пригоден для использования только в пусковых режимах машины.

Проведенный анализ методов оперативного контроля показал, что точно определить наличие одного стержня могут только два метода: электромагнитный дифференциальный, применяемый в рабочем стационарном режиме и электрический в пусковом режиме машины. Остальные методы имеют низкую чувствительность к обрыву стержня. Переход в неработоспособное состояние для ОР первой группы могут зафиксировать два метода: электромагнитный дифференциальным, т. е. способным определить состояние каждого стержня, и метод с применением датчика скольжения, в котором переходом в неработоспособное состояние служит превышение отклонения скольжения от заданного значения при заданной нагрузке более чем на 20 %.

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОБРЫВАХ СТЕРЖНЕЙ

Магнитное поле от любой короткозамкнутой обмотки, уложенной в зубчатый ротор, можно представить в виде суммы двух полей. Первое наводится от той же ОР, но расположенной на гладком роторе. Второе генерируется ОР, идентичной предыдущим, но расположенной на полом роторе, который имеет на поверхности зубцы из электротехнической стали. Нас будет интересовать ОР, расположенная на гладком роторе.

Пусть она имеет ротор радиусом R_p и стержни прямоугольного сечения шириной b , а расстояние между ними в свету равно a . Заменяем стержни бесконечно тонкими полосами той же ширины. Тогда угловая ширина полосы будет равна

$$\Delta\alpha_1 = \frac{b}{R_p},$$

а угловое расстояние между полосами в свету

$$\Delta\alpha_2 = \frac{b}{R_p}$$

Тогда математическую модель зависимости линейной нагрузки (ЛН) ОР с исправными стержнями (исправной ОР) от угла, измеряемого в системе координат, связанной с ротором (назовем его углом ротора), в момент времени $t = t_0$ в нормальном режиме работы АД можно представить следующим образом:

$$AS_{\text{ИОР}}(\alpha_p, t_0) = \begin{cases} J_{p \max} \cdot \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0), \\ \text{при } k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1, \\ 0, \text{ при } k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \leq \alpha_p \leq (k + 1) \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \end{cases},$$

где $J_{p \max}$ — амплитуда линейной плотности тока в стержнях;

p - число пар полюсов;

f_c — частота тока в сети;

s - скольжение;

$k = 0, 1, 2, \dots, Z_p$;

Z_p - число стержней ротора.

Обрыв стержня клетки ротора вне зависимости от полюсности машины приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока, согласно [30, 55, 56], можно представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне. Из сказанного следует, что любую реальную ОР (РОР) с поврежденными стержнями можно заменить двумя обмотками. Одна из них является ИОР. Другая является фиктивной ОР (ФОР), в которой по оборванным стержням протекают рассмотренные выше фиктивные токи, которые далее замыкаются по исправным стержням.

Тогда при обрыве стержня с номером τ_1 математическая модель зависимости ЛН РОР от угла ротора в момент времени t_0 без учета влияния обрыва на перераспределение тока в проводниках ИОР (что является допустимым при малом количестве поврежденных стержней) будет иметь следующий вид:

$$AS_{РОР}(\alpha_p, t_0) = AS_{ИОР}(\alpha_p, t_0) + AS_{ФОР}(\alpha_p, t_0),$$

где $AS_{ФОР}(\alpha_p, t_0)$ - зависимость ЛН ФОР от угла ротора в момент времени t_0 . Она идентична зависимости $AS_{ФОР(\tau_1)}(\alpha_p, t_0)$, в которой индекс « τ_1 » показывает, что здесь учитывается только токораспределение по ФОР от одного оборванного стержня с номером τ_1 .

$$AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0) = \begin{cases} q - J_{p \max} \cdot \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0), \\ \text{при } \tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \\ 0, \text{ при } k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \leq \alpha_p \leq (k + 1) \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \\ J_{p(\tau_1)} = \frac{J_{p \max}}{\Delta\alpha_1 \cdot (Z_p - 1)} \cdot \int_{\tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)}^{\tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1} \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0) d\alpha_p, \\ \text{при } c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1. \end{cases}$$

где $c = 0, 1, 2, \dots, Z_p$ и $c \neq \tau_l$.

При обрыве двух стержней с номерами τ_1 и τ_2 принимается, что математическая модель сигнала $AS_{\text{ИОР}}(\alpha_p, t_0)$ в уравнении не изменяет своего вида, а $AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0)$ описывается формулой:

$$AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0) = AS_{\text{ФОР}(\tau_1)}(\alpha_p, t_0) + AS_{\text{ФОР}(\tau_{12})}(\alpha_p, t_0),$$

где $AS_{\text{ФОР}(\tau_1)}(\alpha_p, t_0)$ - зависимость ЛН ФОР от угла ротора, которая содержит две составляющие:

-первая показывает токораспределение от оборванного стержня с номером τ_2 по ФОР, из которой исключен стержень с номером τ_1 .

-вторая составляющая учитывает присутствие в токе стержня с номером τ_2 до его обрыва тока, обусловленного повреждением проводника с номером τ_1 .

Вторую составляющую обозначим как $J_{p(\tau_1)}$. Тогда:

$$AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0) = \begin{cases} 1) -J_{p \max} \cdot \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0) \pm J_{p(t_1)}, \\ \quad \text{при } \tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq \tau_{12} \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \\ 2) 0, \text{ при } k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \leq \alpha_p \leq (k+1) \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \\ 3) J_{p(\tau_1)} = \frac{J_{p \max}}{\Delta\alpha_1 \cdot (Z_p - 1)}. \\ \cdot \left[\begin{array}{l} \int_{\tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)}^{\tau_1 \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1} \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0) d\alpha_p \pm J_{p(t_1)}, \\ \text{при } c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1. \end{array} \right] \end{cases}$$

где $c = 0, 1, 2, \dots, Z_p$ и $c \neq \tau_1, \tau_2$;

- знак «+» в уравнениях и системе ставится, когда слагаемые уравнения одного знака, а «-» - когда разного.

Общая модель зависимости $AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0)$ при обрыве ε числа стержней с номерами от τ_1 до τ_ε с учетом сказанного выше описывается следующей системой уравнений:

$$AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p, t_0) = \sum_{i=1}^{\varepsilon} AS_{\text{ФОР}(\tau_i)}(\alpha_p, t_0),$$

где

$$AS_{\text{ФОР}(\tau_i)}(\alpha_p, t_0) = \begin{cases} 1) -J_{p \max} \cdot \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{i-1} (\pm I_{p(\tau_j)}), \\ \quad \text{при } \tau_i \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq \tau_i \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \\ 2) 0, \text{ при } k \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1 \leq \alpha_p \leq (k+1) \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \\ 3) J_{p(\tau_i)} = \frac{J_{p \max}}{\Delta\alpha_1 \cdot (Z_p - 1)}. \\ \cdot \left[\begin{array}{l} \int_{\tau_i \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2)}^{\tau_i \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1} \sin(p \cdot \alpha_p + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t_0) d\alpha_p \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{i-1} (\pm I_{p(\tau_j)}), \\ \text{при } c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \leq \alpha_p \leq c \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) + \Delta\alpha_1. \end{array} \right] \end{cases}$$

где:

$-c = 0, 1, 2, \dots, Z_p$ и $c \neq \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\varepsilon$;

$-i = 2, 3, \dots, \varepsilon$;

-условия растановки знаков «+» и «-» в уравнениях и системе аналогичны условиям в математической модели сигнала $AS_{\text{ФОР}}(\tau_2)(\alpha_p, t_0)$.

На основе рассмотренных математических моделей проанализирован алгоритм и программа расчета токораспределений в ИОР, ФОР и РОР. На рис. 11 - 15 приведены графики распределения ЛН ИОР, ФОР и РОР по их стержням, смоделированные в математическом пакете программ «MatLAB». Вместо углов ротора по оси абсцисс отложены номера стержней n . Из рис. 12 и 13 видно, что зависимости $AS_{\text{ФОР}}(\alpha_p)$ и $AS_{\text{РОР}}(\alpha_p)$ можно принять в качестве диагностических сигналов (ДС).

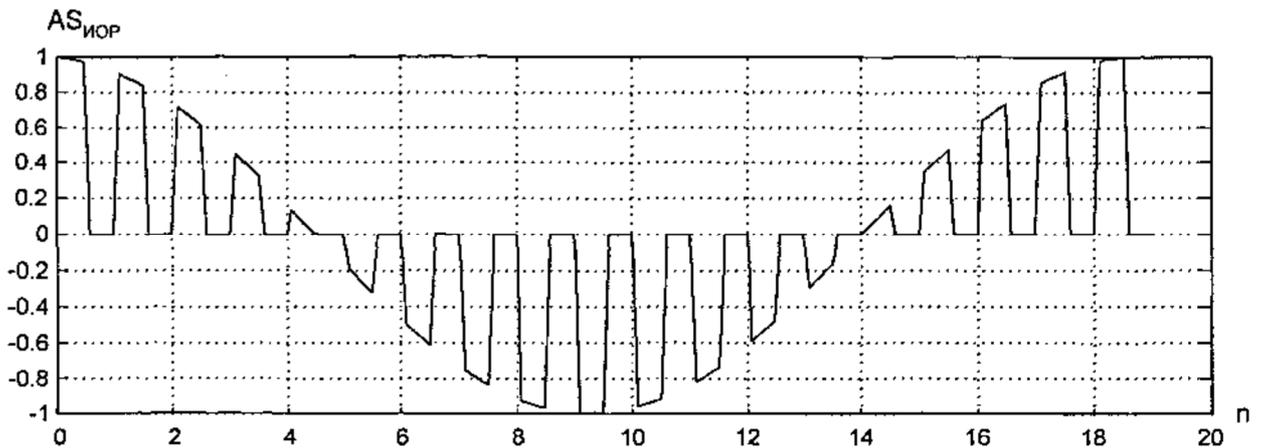


Рис 11. Зависимость $AS_{\text{ИОР}}(n)$ ($Z_p=19, p=1$)

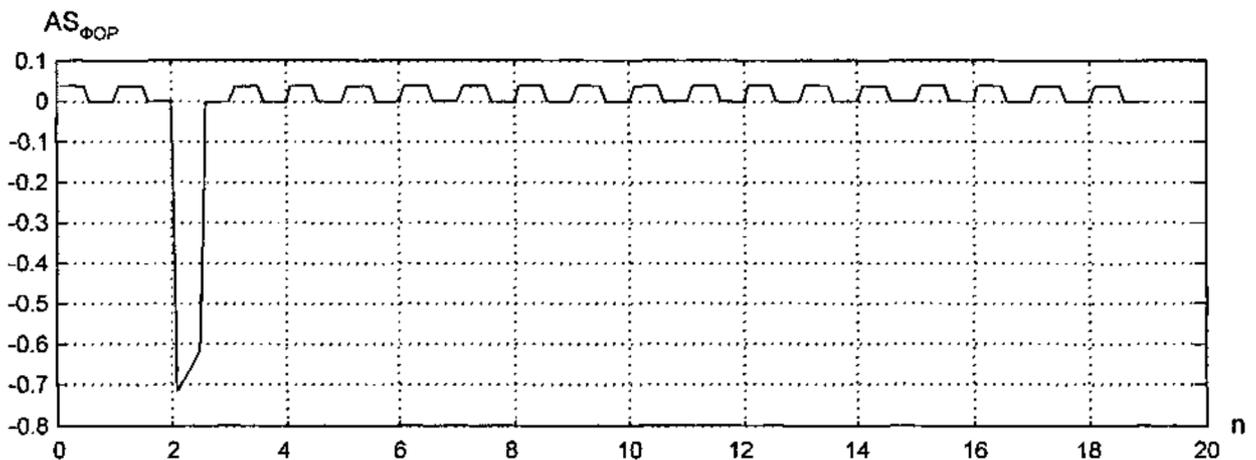


Рис 12. Зависимость $AS_{\text{ФОР}}(n)$ при обрыве одного стержня ($Z_p=19, p=1$)

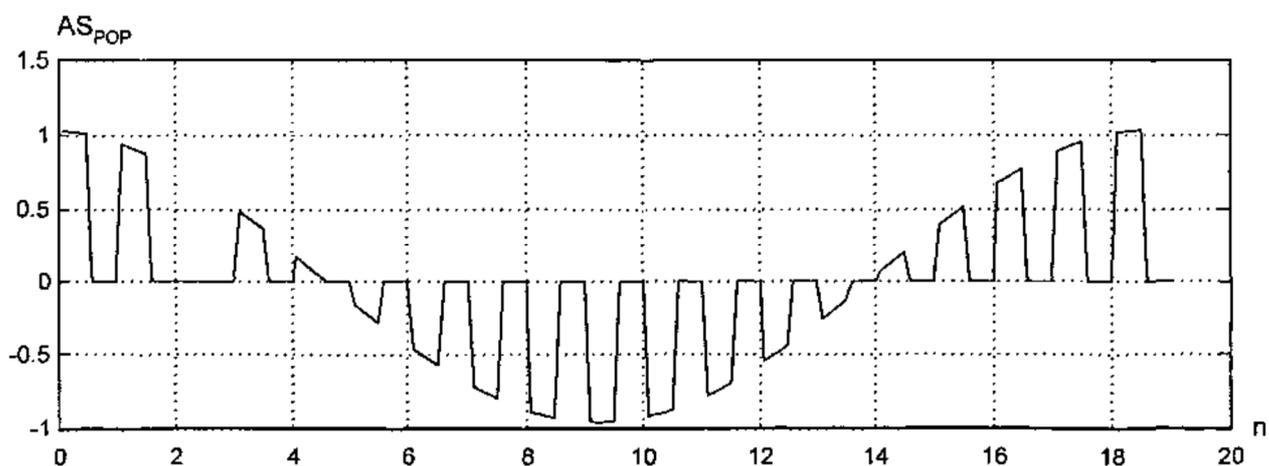


Рис 13. Зависимость $AS_{POP}(n)$ при обрыве одного стержня ($Zp=19, p=1$)

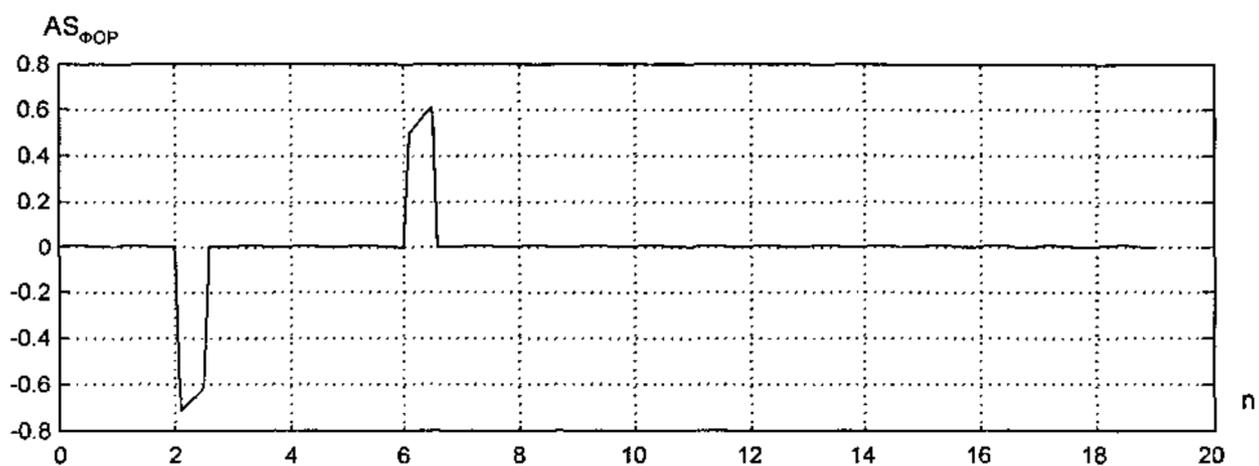


Рис 14. Зависимость $AS_{FOP}(n)$ при обрыве двух стержней ($Zp=19, p=1$)

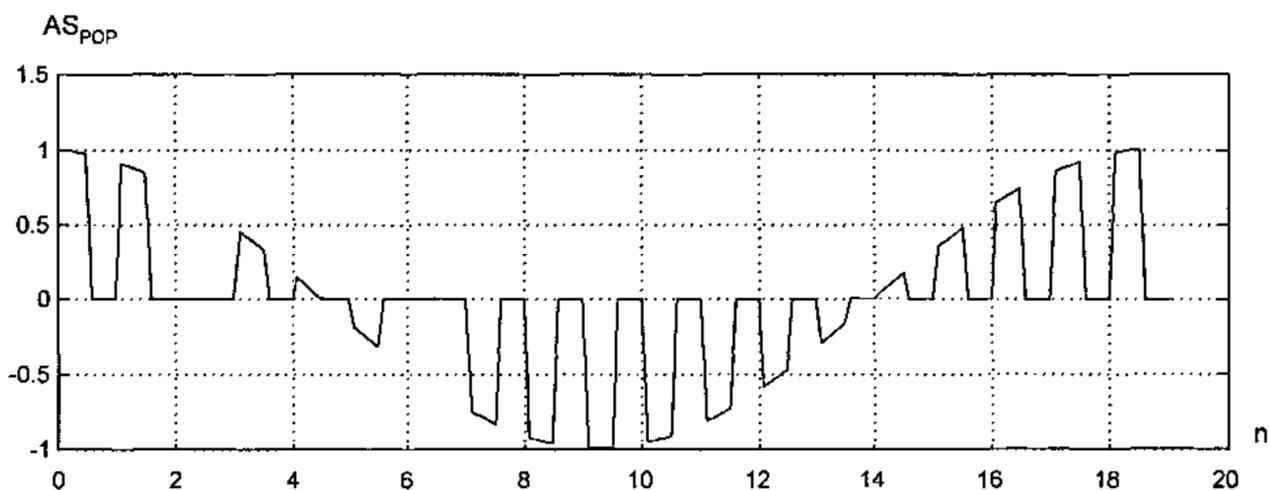


Рис 15. Зависимость $AS_{POP}(n)$ при обрыве двух стержней ($Zp=19, p=1$)

При вращении ротора его ЛН в точке, расположенной на поверхности ротора неподвижно относительно статора, изменяется во времени за счет как его вращения, так и периодического изменения тока в стержнях. Согласно [6] связь ЛН ОР с

тангенциальной и радиальной составляющими магнитной индукции у поверхности ротора выглядит таким образом:

$$K_1 \cdot B_\alpha(t) = K_2 \frac{\partial B_p(t)}{\partial t} = AS(t),$$

где K_1 и K_2 - постоянные коэффициенты, не влияющие на форму сигналов $B_\alpha(t)$ и $\frac{\partial B_p(t)}{\partial t}$. При этом, $K_1 = \frac{1}{\mu_0}$ а $K_2 = \frac{1}{\mu_0 \cdot R_p}$, где μ_0 - абсолютная магнитная постоянная воздуха.

Так как между $B_\alpha(t)$ и $B_p(t)$ имеется определенная связь, то в дальнейшем рассматривается только одна из них, а именно $B_\alpha(t)$.

Согласно изложенному выше математическая модель зависимости тангенциальной составляющей магнитного поля воздушного зазора от времени за один оборот ротора получается из модели сигнала $AS(\alpha_p, t_0)$. путем замены в формулах следующих величин: α_p на $\frac{\omega_p}{p}$, $\Delta\alpha_1$ на $\frac{\omega_p}{p} \cdot t_1$, $\Delta\alpha_2$ на $\frac{\omega_p}{p} \cdot t_2$ и $AS(\alpha_p, t_0)$ на $B_\alpha(t)$. При этом Δt_1 - время прохождения стержнем рассматриваемой точки, Δt_2 - время прохождения зубцом рассматриваемой точки, ω_p - электрическая угловая скорость вращения ротора, которая равна $\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot n_p$, где n_p - частота вращения ротора.

В общем виде число оборотов равно 1. Математическое описание магнитного поля от ОР в воздушном зазоре имеет вид:

$$B_{\alpha \text{ ПОР}}(t) = B_{\alpha \text{ ИОР}}(t) + B_{\alpha \text{ ФОР}}(t),$$

где

$$1) B_{\alpha \text{ ИОР}}(t)$$

$$= \begin{cases} J_{p \text{ max}} \cdot \sin(\omega_p \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t), \\ \text{при } k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] \leq t \leq k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] + \Delta t_1, \\ 0, \text{ при } k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] + \Delta t_1 \leq t \leq k_2 \cdot [(k_1 + 1) \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] \end{cases}$$

Где $k_1=0,1,2,\dots,Z_p$;
 $K_2=1,2,\dots,l$.

$$2) B_{\alpha \text{ ФОР}}(t) = \sum_{i=1}^{\varepsilon} B_{\alpha \text{ ФОР}(\tau_i)}(t),$$

где

$$B_{\alpha \text{ ФОР}}(t) = K_2 \left\{ \begin{array}{l} 1) - J_{p \max} \cdot \sin(\omega_p \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq 1}}^{i-1} (\pm I_{p(\tau_j, k_2)}), \\ \text{при } k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] \leq t \leq k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] + \Delta t_1, \\ 2) 0, \text{ при } k_2 \cdot [k_1 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] + \Delta t_1 \leq t \leq k_2 \cdot [(k_1 + 1) \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] \\ 3) J_{p(\tau_1, k_2)} = \frac{J_{p \max}}{\Delta \alpha_1 \cdot (Z_p - i)} \cdot \\ \cdot \left[\int_{k_2[\tau_i \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)]}^{k_2[\tau_i \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) + \Delta \alpha_1]} \sin(\omega_p \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot s \cdot t) dt + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq 1}}^{i-1} (\pm J_{p(\tau_j, k_2)}) \right], \\ \text{при } k_2 \cdot [c \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2)] \leq t \leq k_2 \cdot [c \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) + \Delta t_1] \end{array} \right.$$

где а) $k_1=0,1,2,\dots,Z_p$;
б) $K_2=1,2,\dots,l$;
в) $c=0,1,2,\dots,Z_p$ и $c \neq \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\varepsilon}$
г) $i=1, 2, \dots, \varepsilon$.

На основе рассмотренных выше математических моделей разработан алгоритм и программа расчета тангенциальной составляющей магнитной индукции у поверхности гладкого ротора от токов РОР, ФОР и ИОР.

Графики сигналов $V_{\alpha\Phi OP}(t)$ и $V_{\alpha PO P}(t)$, которые были смоделированы в математическом пакете MatLAB для ОР, имеющей один и два оборванных стержня при скольжении $S = 0.05$, приведены на рис. 16 - 19.

На рисунках номер пика соответствует номеру стержня, от тока которого наводится данный пик.

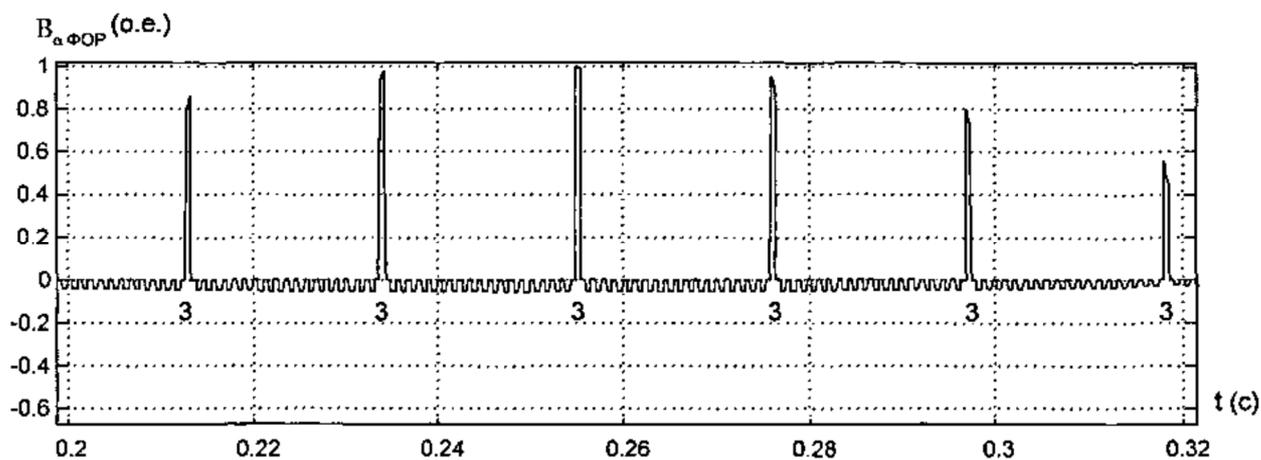


Рис 16. Зависимость $V_{\alpha\Phi OP}(t)$ при обрыве одного стержня ($Zp=19, p=1$)

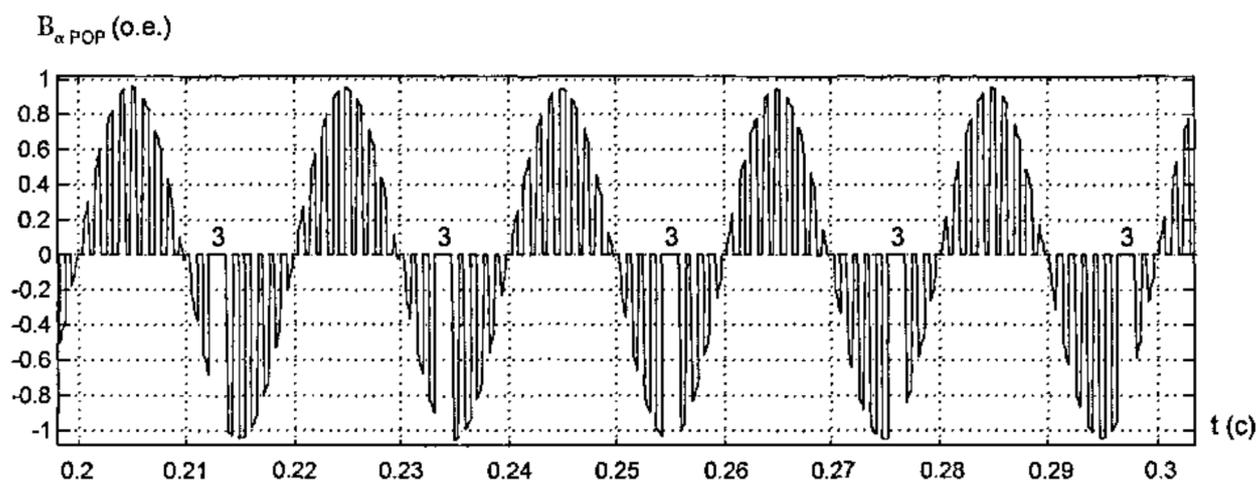


Рис 17. Зависимость $V_{\alpha PO P}(t)$ при обрыве одного стержня ($Zp=19, p=1$)

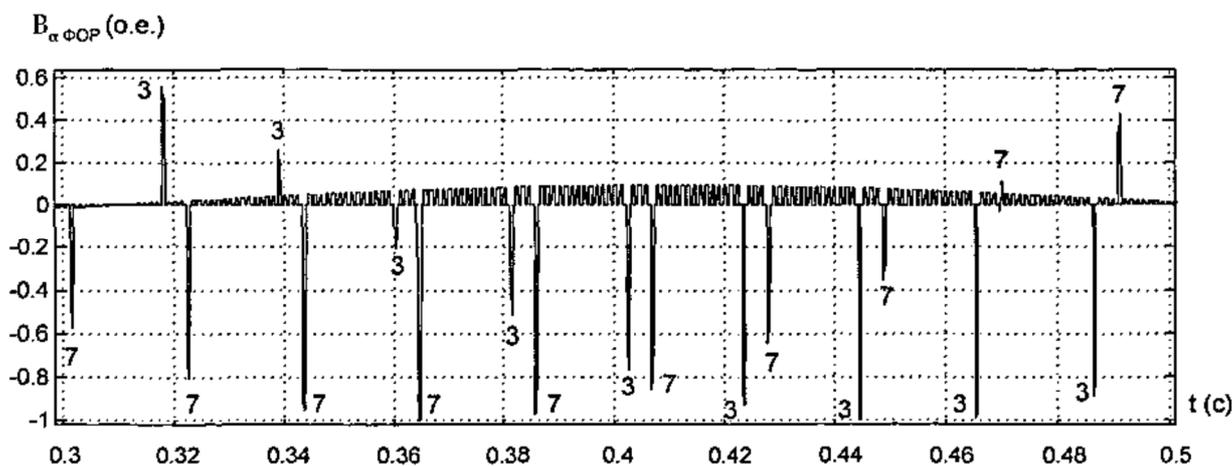


Рис 18. Зависимость $V_{\alpha\text{ФОР}}(t)$ при обрыве двух стержней ($Z_p=19, p=1$)

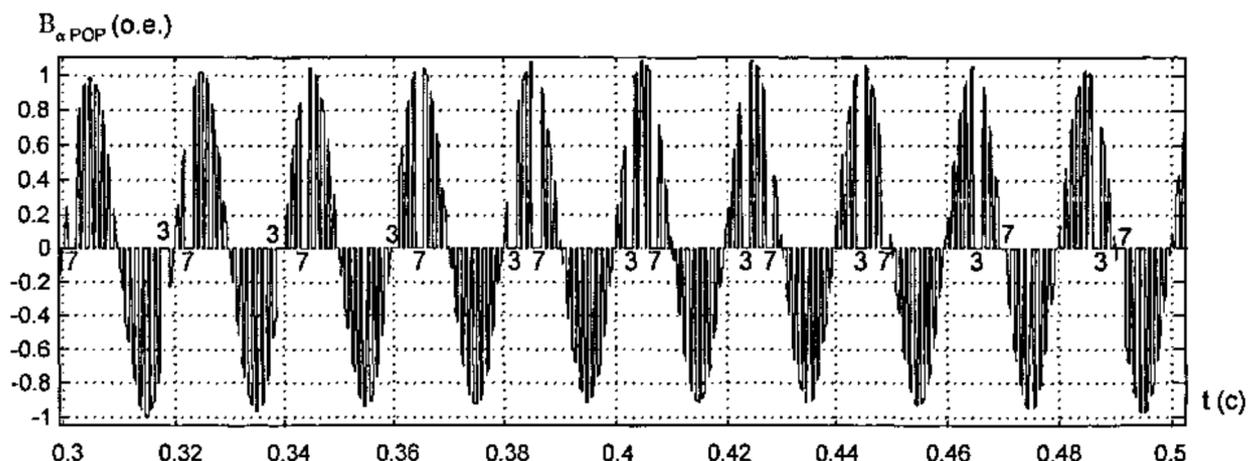


Рис 19. Зависимость $V_{\alpha\text{РОР}}(t)$ при обрыве двух стержней ($Z_p=19, p=1$)

4.1. Анализ короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни

Анализ графиков, полученных для обмоток, имеющих различное число и расположение оборванных стержней, которым задавались различные величины скольжения, показал [55, 56]:

- в результате обрыва стержня картина зависимостей $V_{\alpha\text{РОР}}(t)$ и $V_{\alpha\text{ФОР}}(t)$ изменяется, при чем это изменение тем больше, чем больше величина ЛН ротора в рассматриваемом стержне при его исправном состоянии;

- при обрыве нескольких стержней $V_{\alpha\text{РОР}}(t)$ будет иметь провалы в местах расположения поврежденных проводников (рис. 17 и 19), а $V_{\alpha\text{ФОР}}(t)$ будет иметь пикообразные всплески (рис. 16 и 18);

- отсутствовать ток в стержне может только по двум причинам. Первой причиной является обрыв стержня, а второй - нахождение рассматриваемого стержня в пространстве с координатой a'_p , при которой ЛН в стержне в момент времени t_0 близка к нулю. Поэтому о состоянии этих стержней в указанный момент времени ничего сказать нельзя;

- определение состояния каждого стержня при продолжительности контроля, равном Δt_k , осуществимо при соблюдении двух условий:

1) $\Delta t_k \geq \frac{1}{4 \cdot s \cdot f_e}$, так как в противном случае не для всех стержней успеют

настать моменты времени, при которых токи в указанных проводниках при условии, что они целы, достигнут значений, близких к номинальному току ротора. Именно в эти моменты времени определение состояния соответствующих стержней становится наиболее достоверным.

2) $s \neq \frac{k}{2 \cdot p}$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, так как в противном случае стержни с токами,

близкими к нулю, будут их иметь в любой момент времени. Анализ рисунков показывает, что в качестве диагностического признака обрыва стержня можно взять либо провал пика в зависимости $B_{aPOP}(t)$ в месте расположения поврежденного проводника (при этом в качестве источника ЛН ротора принимается РОР), либо появление пика в зависимости $B_{aФОР}(t)$ в том же месте (здесь в качестве источника ЛН ротора принимается ФОР).

Информацию о состоянии стержней несет зависимость $B_{aФОР}(t)$, а зависимость $B_{aPOP}(t)$ является суммой данного сигнала и зависимости $B_{aИОР}(t)$, которое никак не отражает состояние проводников ОР.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

- ДС, определяющим состояние каждого стержня и его расположение по отношению к другим стержням, является зависимость вида $B_{aФОР}(t)$ или $\frac{\partial B_{aФОР}(t)}{\partial t}$, снятая на отрезке времени, величина которого больше или равна четверти периода скольжения;

- источником ДС является ФОР;

- диагностическим признаком обрыва является появление пика в зависимости $B_{aФОР}(t)$ в месте расположения поврежденного проводника.

4.2. Спектр временных гармоник диагностического сигнала, генерируемого фиктивной обмоткой ротора

На рис. 20 - 23 представлены энергетические спектры – $W_{ФОР}(f)$ ДС при обрыве одного и двух стержней, которые показаны на рис. 16 и 18. Здесь же указаны параметры, которые определяют состав частот спектра:

$\Delta f^{(\nu)}$ - разница между частотами ν -го порядка, обусловленные влиянием колебаний с частотой скольжения токов по оборванным стержням в ФОР;

$\Delta f^{(\nu, \nu+1)}$ - разница между частотами ν -го и $\nu + 1$ порядка.

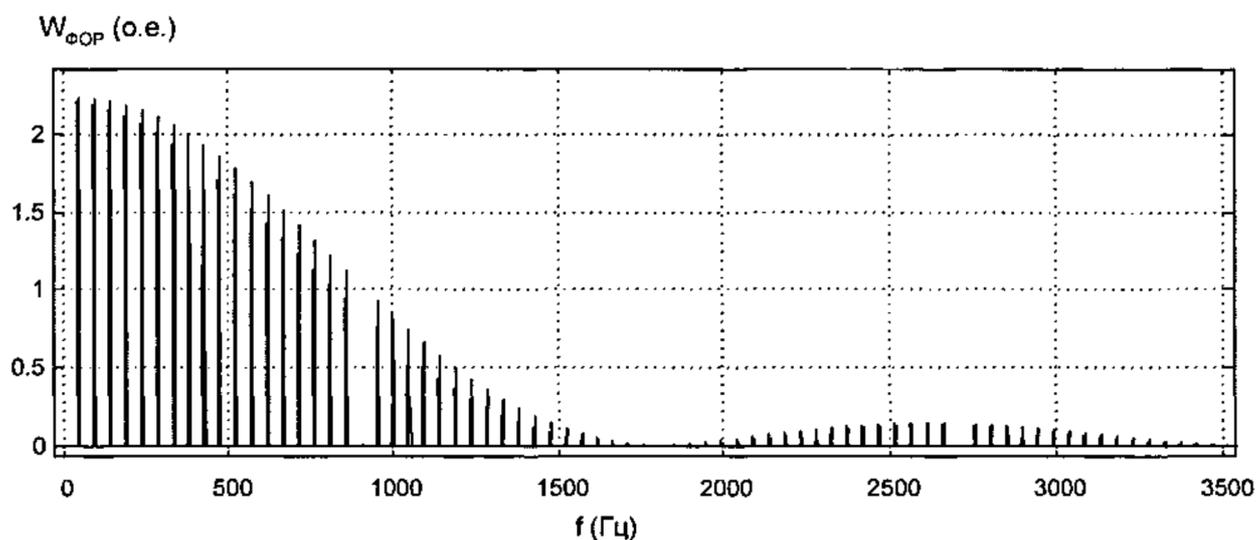


Рис 20. Энергетический спектр ДС при обрыве одного стержня на отрезке частот от 0 до 3500 Гц.

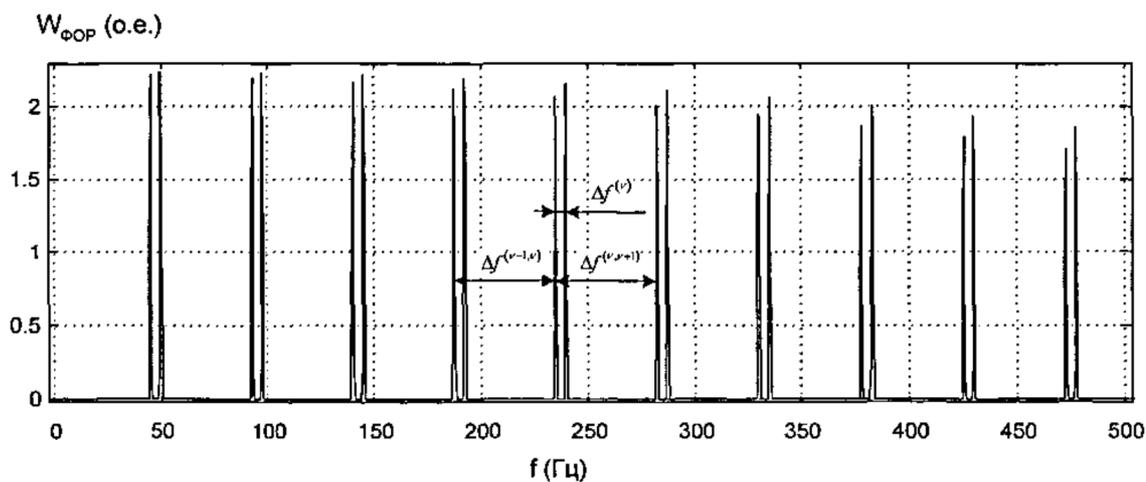


Рис 21.. Энергетический спектр ДС при обрыве одного стержня №3 па отрезке частот от 0 до 500 Гц.

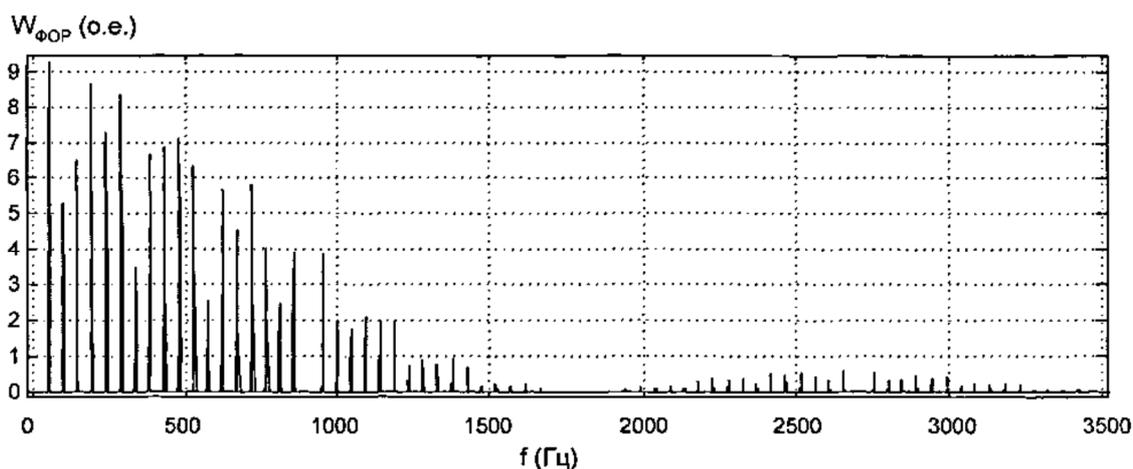


Рис 22. Энергетический спектр ДС при обрыве двух стержней на отрезке $W_{\text{ФОР}}$ (о.е.)

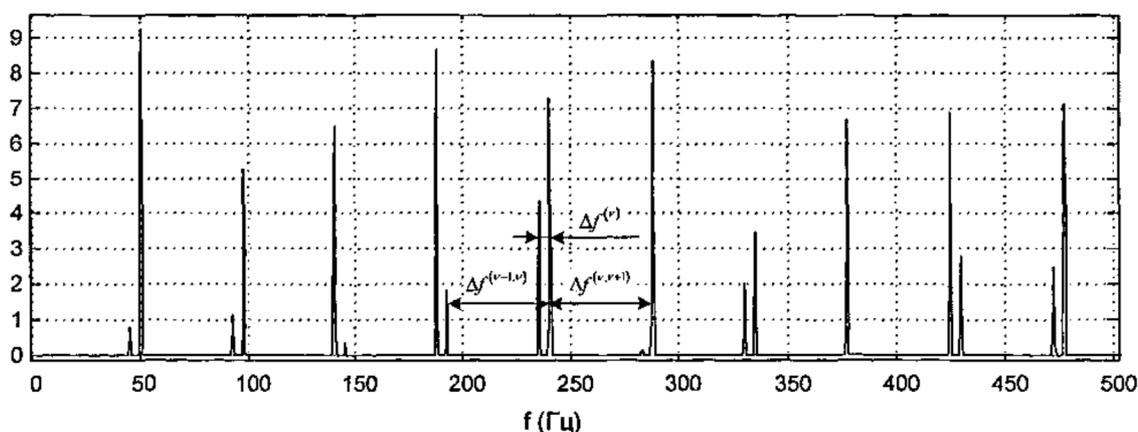


Рис 23. Энергетический спектр ДС при обрыве двух стержней на отрезке частот от 0 до 500 Гц.

При анализе энергетического спектра магнитного поля от ФОР произведено исследование степени влияния следующих параметров на параметры $\Delta f^{(v)}$ и $\Delta f^{(v, v+1)}$: p - числа пар полюсов; Z - числа стержней; $\frac{b_n}{t_s}$ - отношения ширины паза b_n , к ширине зубцового деления t_s ; s - скольжения; $Z_{об}$ - числа оборванных стержней; номеров оборванных стержней.

Степень влияния определялась путём изменения величин одного из параметров при постоянных значениях, оставшихся четырёх. Диапазон изменения параметров приведены ниже и обусловлены их предельными величинами на реальных объектах:

$$20 < Z_p < 180 \text{ с шагом } 20;$$

$1 < p < 8$ с шагом 1;

$0,01 < s < 0,1$ с шагом 0,01;

$0,1 < \frac{b_n}{t_s} < 0,9$ с шагом 0,1;

$1 < Z_{об} < 0,2Z_p$ с шагом 1 и с последовательным изменением номеров оборванных стержней.

Анализ полученных данных показал:

- общая формула, определяющая величины частот энергетического спектра магнитного поля от ФОР при любом числе оборванных стержней и расположении их по отношению друг к другу, имеет вид:

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right),$$

где - $v = 1,2,3,\dots$, - порядок пространственной гармоники, генерируемой ФОР

- каждому порядку гармоник энергетического спектра ДС, генерируемого токами ФОР, принадлежат две гармоники, значения которых отличаются на величину $\Delta f^{(v)}$. Этот параметр прямо пропорционален скольжению. От других величин он не зависит. Зависимость $\Delta f^{(v)}(s)$ выглядит следующим образом:

$$\Delta f^{(v)} = 2 \cdot f_c \cdot s,$$

где - f_c - частота сети в герцах;

- разница между частотами соседних порядков $\Delta f^{(v, v+1)}$ определяется двумя параметрами: скольжением и числом пар полюсов. Зависимость $\Delta f^{(v, v+1)}(p)$ выглядит следующим образом:

$$\Delta f^{(v, v+1)} = \frac{f_c}{p};$$

- изменение параметра Z_p не приводит к появлению новых составляющих в энергетическом спектре ДС;

- при $\frac{b_n}{t_z} = 0,5$ энергетический спектр ДС теряет гармоники порядка $u = k \frac{Z_p}{p}$. При других значениях параметра $\frac{b_n}{t_z}$ энергетический спектр ДС полностью описывается формулой;

- основная доля энергии сигнала ФОР находится в низкочастотной области спектра. Увеличение скольжения, числа пар полюсов и отношения ширины паза к ширине зубцового деления сдвигают энергетический спектр ДС в область низких частот. Увеличение числа стержней в ОР приводит к обратному эффекту.

На основании этого можно сделать вывод, что при обрыве стержня короткозамкнутой ОР происходят следующие явления:

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре АД, которые описываются формулой;

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник в токе статора, которые также описываются формулой.

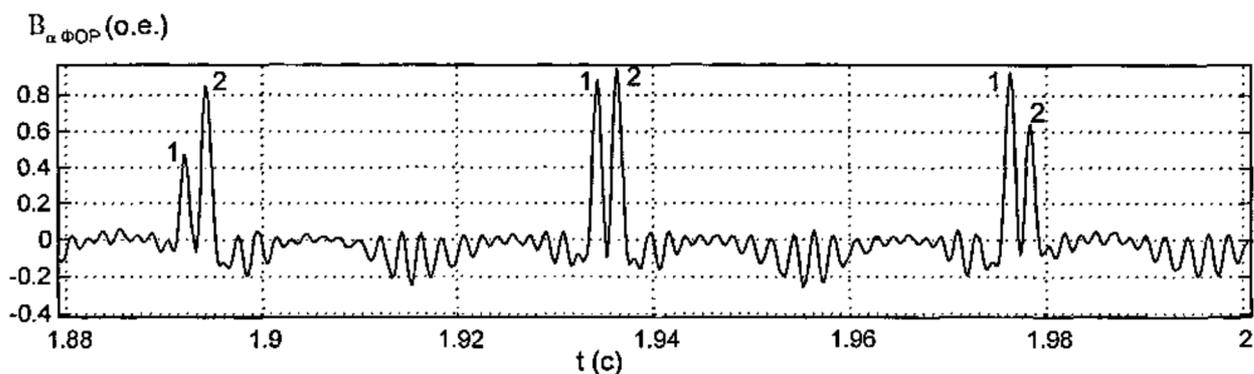
Данные явления могут быть использованы в качестве диагностических признаков наличия в ОР оборванных стержней.

4.3. Диапазон частот диагностического сигнала, в котором достаточно информации о состоянии каждого стержня

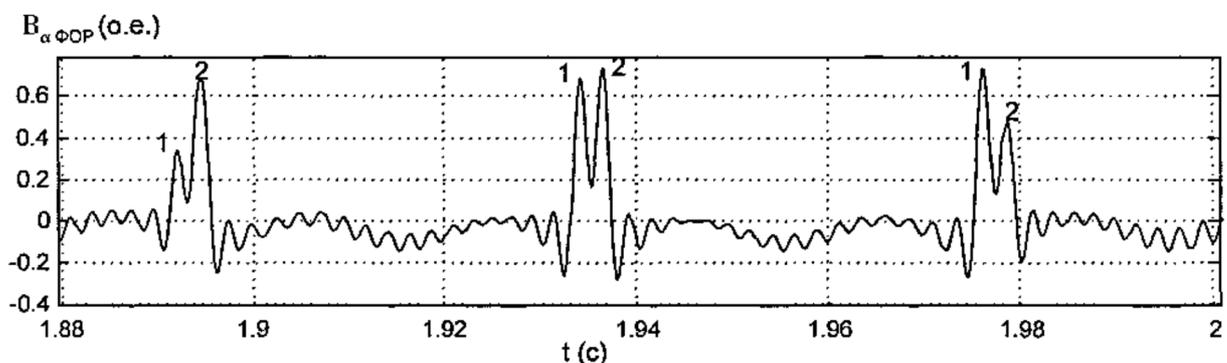
Для отстройки от высокочастотных помех, а также для определения максимального значения частоты дискретизации АЦП, который предполагается использовать при цифровой обработке сигналов, необходимо определить в ДС диапазон частот, в котором заложена достаточная информация о состоянии каждого стержня. Диапазон имеет границы от 0 до частоты (частоты среза ($f_{\text{среза}}$)), которая является границей между низкочастотным спектром, оказывающим ощутимое влияние на форму ДС, и высокочастотным спектром, почти не влияющим на форму последнего. Для определения частоты среза

рассмотрен вариант повреждения ОР, при котором оборванными стержнями являлись два соседних проводника. В этом случае, рассматриваемый диапазон имеет максимальное значение.

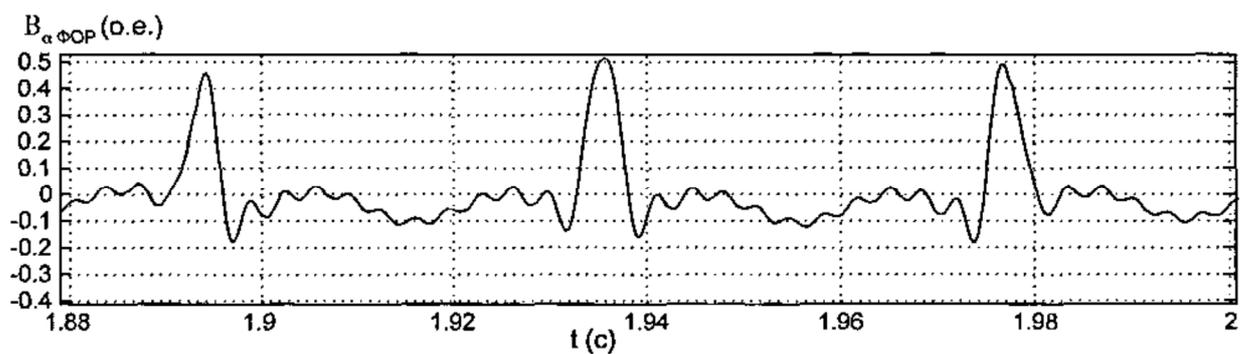
Влияние величины частоты среза на форму ДС показано на рис. 24. Здесь приведены ДС одной и той же ОР, имеющей два соседних оборванных стержня при общем количестве стержней $Z_p = 20$ и числе пар полюсов $p = 2$, из которых удалены высокочастотные малоинформативные составляющие сигналов, а также частота 50 Гц и зубцовые гармонические ротора (генерируют сигналы-помехи). При этом высокочастотная составляющая у первого ДС удалялась, начиная с частоты 300 Гц, у второго - начиная с частоты 450 Гц, а у третьего - начиная с частоты 600 Гц. Из рисунков видно, что уменьшение частоты среза приводит к слиянию двух соседних пиков, обусловленных обрывом соответствующего стержня, в один пик и, тем самым, невозможности точного определения количества и мест расположения поврежденных проводников ОР.



а) $f_{\text{срез}} = 600 \text{ Гц}$



б) $f_{\text{срез}} = 450 \text{ Гц}$



$$в) f_{\text{срез}} = 300 \text{ Гц}$$

Рис 24. Форма ДС ОР при обрыве двух соседних стержней и при различных частотах среза $f_{\text{срез}}$

Частоты среза для всех возможных сочетаний числа пар полюсов и количества зубцов на роторе для существующих высоковольтных АД приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные для определения частоты среза

Число пар полюсов, p	2		3				4				5					
Количество зубцов на роторе, Z_p	50	70	58	84	106	108	132	70	84	56	106	108	126	132	72	84
Макс. значение частоты среза, $f_{\text{срез}}$	1450	1950	1100	1550	2100	2000	2500	1000	1200	1200	1500	1500	1800	1900	850	1000

Продолжение таблицы 3

Число пар полюсов, p	5					6					8			12		
Количество зубцов на роторе, Z_p	106	108	110	126	132	98	106	110	120	124	132	116	120	132	180	108

Макс, значение частоты среза, J срез	1250	1250	1300	1500	1550	950	1000	1150	1150	1200	1350	850	900	950	1300	1300
--------------------------------------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	------	------

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации была проанализирована математическая модель токораспределения и магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора в воздушном зазоре, имеющей оборванные стержни.

Предложены критерии перехода обмотки ротора из работоспособного состояния в неработоспособное, которые позволяют в ходе оперативного функционального контроля сделать заключение о возможности дальнейшей эксплуатации высоковольтных асинхронных двигателей

1) Результаты моделирования позволили сделать следующие выводы:

- ДС, определяющим состояние каждого стержня и его расположение по отношению к другим стержням, является зависимость вида $B_{aФОР}(t)$, снятая на отрезке времени, величина которого больше или равна четверти периода скольжения;

- источником полезного сигнала является ФОР;

- диагностическим признаком обрыва является появление пика в зависимости $B_{aФОР}(t)$ в месте расположения поврежденного проводника;

1) Исследована степень влияния параметров как самого АД, так и режима его работы на форму ДС и его СПМ, что позволило получить общую формулу, определяющую величины частот гармоник, входящих в данный сигнал.

$$f^{(v\pm)}_{\text{фор}} = f_c \cdot \left(\frac{1-s}{p} \cdot v \pm s \right), v = 1, 2, 3, \dots$$

3. Предложены новые диагностические признаки для контроля состояния ОР АД, которыми являются:

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре АД, которые описываются формулой;

- резкое увеличение амплитуд временных гармоник в токе статора, которые также описываются формулой

4. Определены диапазоны частот ДС для мощных АД, в котором заложена достаточная информация о состоянии каждого стержня. Установлено, что диапазон имеет границы от 0 до частоты среза ($f_{\text{срез}}$), значение которой для различных типов ОР высоковольтных АД представлены в таблице.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.Г. Ротачева К59 Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций: учебное пособие / Изд. 3-е, испр. – Благовещенск, Изд-во АмГУ, 2017. – 315 с.
2. Рассказчиков А.В. Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Диссертация на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. — ЛПИ, 1982.-195 с.
3. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Няшкова и др.; Под ред. А.А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980. - 928с, ил.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. - 3-е издание, перераб. - Л.: Энергия, 1978-832 с. ил.
6. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Причины повреждения электродвигателей в пусковых режимах на блочных тепловых электростанциях. // Электрические станции. - 1974.- № -1.
7. Данилова СП., Соколов Р.И., Шулежко Е.А. Надежность высоковольтных электродвигателей блочных тепловых электростанций. // Электрические станции,- 1976. - № - 4.
8. Иноземцев Е.К. Ремонт высоковольтных электродвигателей (часть 1). - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001, - 104 с: ил. - [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 5 (29)].
9. Ковязин Л.В. Разработка принципов и устройств высокочастотного контроля электротехнического оборудования электростанций: дис. На соиск. учен. степ. канд. тех. наук. - Иваново, 1993.
12. Справочник. Асинхронные двигатели. - Москва, 1992.

13. Митрофанов С.В. Математическая модель трехфазной асинхронной машины с несимметричной короткозамкнутой клеткой ротора: Автореферат диссертации на соиск. учен. степ. канд. тех. наук Екатеринбург, 1999.

14. Назарычев А.Н. Математическая модель надежности и стратегия ремонтов мощных электродвигателей. // Энергетика: экономика, технологии, экология. - 2001. - № 2.

15. Назарычев А.Н. Расчет и анализ надежности высоковольтных электродвигателей электростанций с учетом влияния режимов и условий эксплуатации. // Энергетика: экономика, технологии, экология. — 2001. - №1.

16. Уманцев Р.Б. Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток крупных электродвигателей. - М.: Энергия, 1976. — 80 с.

17. Сахновский Н.Л. Испытание и проверка электрического оборудования. М.: Энергия, 1975.

18. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - Введ. 1990-01-07. - М.: Изд-во стандартов, 1990. — 37 с.

19. Савельев В.А. Оценка технического состояния и диагностирования объектов энергетики. Термины и определения // Вестник ИГЭУ. Вып. 2 /Иван, энерг. ун-т. - Иваново, 2003.

20. Аракелян В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования. // Электротехника, № 5, 2002.

21. Горбунов В.И. Метод контроля паек стержней короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных электродвигателей. // Электрические станции. - 1970.-№- 1.

22. 266323 СССР, МКИ Н02К 15/00. Дефектоскоп для контроля беличьей клетки роторов электродвигателей / Зайцев А.И., Обрусник В.П., Табинский М.П.

23. Никиян Н.Г., Саликов М.П. Способ и установка для диагностики короткозамкнутых клеток электрических машин. // Электрические станции, 1999, № 3.

24.Сахновский Н.Л., Юрчакевич Е.Р. Проверка исправности стержней роторов асинхронных короткозамкнутых электродвигателей // Электрические станции. - 1961. —№12.

25. Staniszewski Janusz, Silikowski Jan. Sposobi uklad do selekcy aluminiowyck odlewou klater wirinikow silnikow asynchronicznyck [Politechnika Gdanska]. Пат. ПНР, кл. (G 01 R 27/00, H 02 к 11/00), № 92356, заявл. 10.07.74; № 172631, опубл. 31.12.77.

26.Skwarna Jan, Urbanski Janusz, Lasocki Wieslaw. Urzadzenie do badama klatki wirnika maszyny asynchronicznej, wstanie statycznym [Wyzsza Szkola Jnzynierska] Пат.ПНР, Кл. (G 01R 31/00), № 97523, заявл. 24.06.75., № 181564; опубл. 30.06.78.

27.Monior R.R. Test for open rotor bars is simple // Pover. - № - 936.- № - IX.- VoU07.-№-19.

28.А. С. 843111 СССР. Способ контроля электрической и магнитной несимметрии ротора асинхронного двигателя. / Сохгикян К.О. — Заявл. 1.08.79 № 2806919; опубл. 30.06.81, МКИН02 к 15/00.

29. Бабенко Д.А., Тепленко СИ., Чибишев Л.Д. В помощь электрику-обмотчику асинхронных электродвигателей, издание 2-е, переработанное и дополненное, М. — Л., издательство «Энергия», 1965, 256 с. с черт.

30. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя // Электротехника, 1998. № 2. с. 13-15.

31.Волохов С.А., Добродеев П.Н. Влияние диагностического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле электрических машин. //Техническая электродинамика. 1997. № 3. с. 18-21.

32.Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Влияние магнитной несимметрии статора на внешнее магнитное поле электрических машин. // Техническая электродинамика. 1997. № 4. с. 8-12.

33.А. С. 917136 (СССР). Устройство для обнаружения повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Авт. изобрет.

Рассказчиков А.В., Савельев В.А., Чижов А.А., Жилиев В.Т. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1982, №12.

34. Ковязин Л.В. Принцип контроля исправности стержней ротора асинхронного электродвигателя и устройство для его реализации. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (6-е издание Бенардосовские чтения). — Иваново; ИЭИ, 1992, - с. 25.

35. А. С. 1610443, МКИ G01 R 31/02. Устройство для контроля целостности стержней короткозамкнутой обмотки ротора электродвигателя. / Ковязин Л.В., Савельев В.А. Опубл. 30.11.90. Бюл. 44.

36. Заявка на изобретение. Устройство защиты двигателя от механических повреждений ротора. / Рассказчиков А.В., Савельев В.А., Чижов А.А., Жилиев В.Т.-заявл. 03.04.81 (21) № 3270944/18-21 G 01 P 31/00.

37. Гуревич Э.И., Мамиконянц Л.Г. Некоторые задачи диагностики теплового состояния электрических машин. — Электричество, 1979, № 10

38. Синицын Б.С. Автоматические корреляторы и их применение. Новосибирск, Редакционно-издательский отдел СО АН СССР. 1964. - 268с.

39. Gagdon V.C., Hopgood D.J. Faltering pulse can reveal ailing motor. // *Elect. Rev. (Gr. Brit.)* - 1975. - 205. - 14.

40. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. - Введ. 1981-01-01, —М.,Изд-во стандартов, 1976, — 43 с.

41. А. С. 1262425. СССР МИК СТ01R 31/02. Устройство для обнаружения повреждения стержней короткозамкнутого ротора асинхронного электродвигателя. // Рассказчиков А.В., Савельев В.А., Колобов А.Б., Сауцкий А.И.

42. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей. // *Электрических станции*, 1984. -№2.

43. А. С. 800906 (СССР). Способ определения повреждения стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Брюханов Г.А., Князев С.А. Оpubл. в Б. И., 1981, №4.

44. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. — Изв. вузов. Энергетика, 1990, № 10.

45. А. с. 1304176 СССР. Способ контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя и устройство для его осуществления / В.Ф. Сивокобыленко, В.С. Гармаш // Б. И. — 1988. — № 17.

46. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А., Мирзоева СМ. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора асинхронных электродвигателей без их отключения. // Электротехника, № 10, 1998.

47. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправностей стержней ротора асинхронных электродвигателей. // Электрические станции. — 1984, №8.

48. А. С. 1121633 СССР. Способ контроля обрыва стержней ротора асинхронных электродвигателей М.А. Гашимов, Н.А. Аскеров /Изобретения. 1984. № 40.

49. Объемы и нормы испытаний электрооборудования РД 34.45-51.300-97, изд.6-е,-М.:Изд-во НЦ ЭНАС, 1998.

50. Собственные нужды тепловых электростанций. / Э.М. Аббасова, Ю.М. Голоднов, В.А. Зильберман, А.Г. Мурзаков; Под ред. Ю.М. Голоднова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.- 272 с. ил.

51. Ю.Ф. Лазарев. MatLAB 5.x. - К.: Издательская группа BHV. 2000. - 384с.

52. Дьяконов В., Круглое В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. - СПб.: Питер, 2001. — 480 с: ил.

53. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. - СПб.: Питер, 2002. - 608 с: ил.

54. Ковязин Л.В., Рассказчиков А.В., Скоробогатов А.А. Анализ существующих методов контроля состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в условиях эксплуатации // Состояние и перспективы

развития электротехнологии. X Бенардосовские чтения: тез. докл. Международной науч.-техн. конф. Т. 2. - Иваново: ИГЭУ, 2001. с. 88

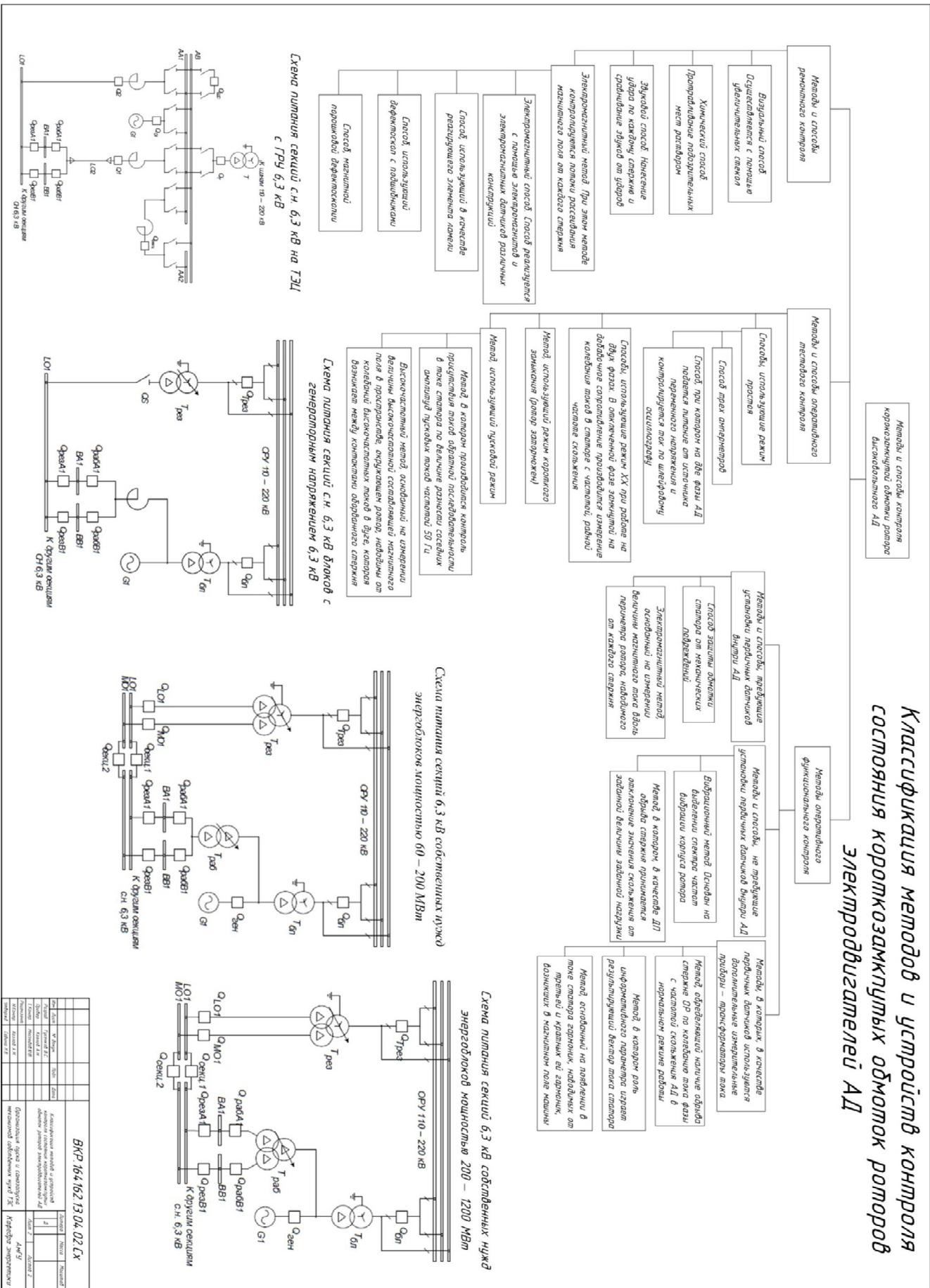
55.Савельев В.А., Назарычев А.Н., Скоробогатов А.А. Анализ токораспределения и магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни // Вестник УГТУ, № 12(42), 2004.

56.Скоробогатов А.А. Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ; вып. 7, - М.: Энергоатомиздат, 2004.

57.Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ. Под ред. З.Г. Каганова. ~М.: «Энергия», 1981.-352 с, ил

58.Савельев В.А. Проблемы пути повышения надежности электротехнического оборудования // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / Иван, энерг. ун-т. -Иваново, 1992.

Классификация методов и устройств контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей АД



Методы и способы контроля короткозамкнутой обмотки ротора электродвигателя АД

Методы и способы оптимизации метода контроля

Методы оптимизации функционального контроля

Методы и способы речевого контроля

Визуальный способ
осуществляется с помощью
увеличительных стекол

Химический способ
Протравливающие подложечных
мест роторов

Звуковой способ
Начесывание
удара по каждой стержню и
сравнительно эдакой от удара

Электронный способ
Контролируется ток
магнитного поля от каждого стержня

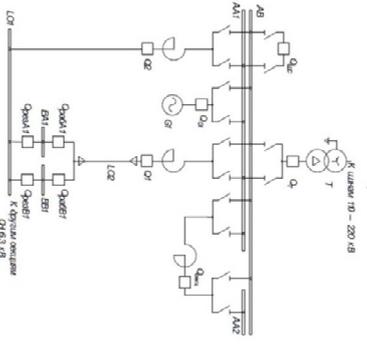
Электронный способ
Способ выявления
с помощью электромеханических
элементов различных
конструкций

Способ, использующий в качестве
различительного значения длины

Способ, использующий
длина стержней с разницей
параметры двигателя

Способ, использующий
параметры двигателя

Схема питания секций с н. 6,3 кВ на ТЭЦ
с ГРУ 6,3 кВ



Способы, использующие режимы
протравки

Способ, при котором на две фазы АД
подается ток от источника
перемещения напряжения и
контролируется ток по шифрованию
осциллограмм

Способы, использующие режим ХХ при работе на
двух фазах. В отключенной фазе замкнутой на
добытое сопротивление производится измерение
каждой фазой в статоре с частотой, равной
частоте скольжения

Метод, использующий режим короткого
замыкания (рабочий замкнутый)

Метод, использующий пусковой режим

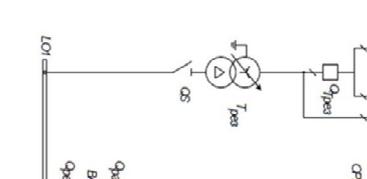
Метод, в котором производится контроль
присутствия тока обмотки последовательно
в том статора по величине разности соседних
амплитуд пусковых токов частотой 50 Гц

Высокочастотный метод основанный на измерении
вращающегося момента с помощью индукционной
платы в протравке, окруженном датчиком, который от
коэффициента высокочастотных токов в фазе, которая
вращается между контактами обмотки статора

Способ, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Схема питания секций с н. 6,3 кВ в локомотиве с
генераторным напряжением 6,3 кВ



Методы и способы, преобладающие
устойчивости первичных датчиков
выбору АД

Способ защиты обмотки
статора от некачественных
лабелек

Электронный способ
основанный на измерении
вращающегося момента с
помощью датчика, который от
коэффициента высокочастотных токов в фазе,
которая вращается между контактами обмотки статора

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

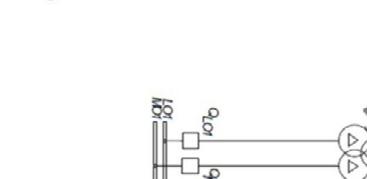
Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Схема питания секций 6,3 кВ собственных нужд
энергодомов мощностью 60 – 200 МВт



Методы и способы, не преобладающие
устойчивости первичных датчиков
выбору АД

Вращающийся метод. Основан на
измерении скорости вращения
выбора кордуса ротора

Метод, в котором, в качестве ДП
образы стержней производится
оптическое измерение скольжения от
заданной величины заданной частоты

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

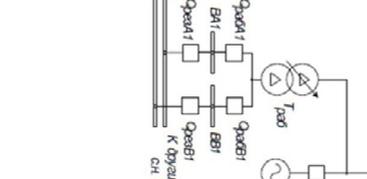
Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Схема питания секций 6,3 кВ собственных нужд
энергодомов мощностью 200 – 1200 МВт



Методы, в которых, в качестве
первичных датчиков используются
разномощные измерительные
приборы - трансформаторы тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

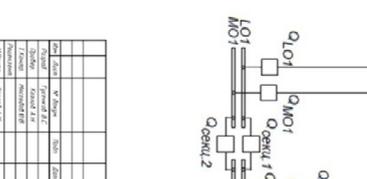
Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Метод, основанный на применении в
качестве первичных датчиков измерительных
приборов - трансформаторов тока

Схема питания секций 6,3 кВ собственных нужд
энергодомов мощностью 200 – 1200 МВт



ВКР 164.162.13.04.02.СХ	
Исполнитель	Инженер
Проверенный	Инженер
Утвержденный	Инженер
Дата	2000 г.
Лист	1 из 1
Область применения	Область применения
Ссылки	Ссылки
Примечания	Примечания