

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Автоматизированные системы обработки информации и управления»

Магистерская диссертация

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ**

6M070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение»

Исполнитель \_\_\_\_\_ С.К. Тукманов  
(подпись, дата)

Научный руководитель  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ В.В. Наумов  
(подпись, дата)

Нормоконтролер  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ Р.А. Шагиева  
(подпись, дата)

Допущен к защите:

Зав.кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и  
управления»  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ Р.А. Шагиева  
(подпись, дата)

Павлодар, 2013



## СОДЕРЖАНИЕ

	Глоссарий	3
	Список сокращений	5
	ВВЕДЕНИЕ	6
1	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ В ПРОИЗВОДСТВЕ	11
1.1	Особенности эксплуатации электродвигателей на предприятиях	11
1.2	Причины возникновения аварий электродвигателей в производстве	16
1.3	Сравнительный анализ методов диагностики электродвигателей	21
1.4	Выводы	24
	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ	
2	ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ	26
2.1	Информативность внешнего магнитного поля	26
2.2	Состояние параметров внешнего магнитного поля двигателя при дефектах	31
2.3	Математическая модель проявления дефектов	40
2.4	Программируемые устройства логического управления	49
2.5	Программируемые контроллеры в промышленном производстве	59
2.6	Программное обеспечение программируемых контроллеров	63
2.7	Выводы	70
3	ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ	71
3.1	Модель дефектообразования в обмотке электродвигателя	71
3.2	Приборы и инструменты для проведения эксперимента	74
3.3	Закономерности проявления гармоник спектра	85
3.4	Выводы	91
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	94

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Автоматизированные системы обработки информации и управления»

Магистерская диссертация

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ**

6M070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение»

Исполнитель \_\_\_\_\_ С.К. Тукманов  
(подпись, дата)

Научный руководитель  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ В.В. Наумов  
(подпись, дата)

Нормоконтролер  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ Р.А. Шагиева  
(подпись, дата)

Допущен к защите:

Зав.кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и  
управления»  
Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ Р.А. Шагиева  
(подпись, дата)

Павлодар, 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Автоматизированные системы обработки информации и управления»

РЕФЕРАТ

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ**

6M070400 «Вычислительная техника и программное обеспечение»

Исполнитель \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

С.К. Тукманов

Павлодар, 2013

## Глоссарий.

Асинхронный двигатель – устройство в котором вращающаяся часть машины – ротор – всегда вращается со скоростью, не равной скорости магнитного потока, т.е. не синхронно с ним.

Аналоговый сигнал – это сигнал, выражающий непрерывно изменяющуюся величину.

Дискретизация – ступенчатое представление сигнала.

Изоляция – элемент конструкции оборудования, препятствующий прохождению через него электрического тока, например, для защиты человека.

Магнитное поле — силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения магнитная составляющая электромагнитного поля

Механические аварии – аварии вызванные деформацией или поломкой вала ротора, ослаблением крепления сердечника статора и др.

Программируемый логический контроллер - представляют собой микропроцессорное устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления.

Преобразование Фурье - является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал (или же некоторую модель этого сигнала) с его представлением в частотной области.

Ротор – вращающаяся часть двигателя, состоит из сердечника, обмотки и контактного кольца.

Реверсный режим – состояние при котором двигатель вращается в другую сторону.

Статор – неподвижная часть двигателя состоит из внешнего стального корпуса, в который запрессован стальной сердечник статора.

Спектральный анализ - один из методов обработки сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала.

Термомеханические нагрузки – нагрузки, которые возникают в результате периодического нагревания и охлаждения конструктивных элементов асинхронного двигателя.

Электрический двигатель – является технической системой, служащей для преобразования электрической энергии в механическую, для осуществления технологических процессов в быту, медицине, промышленности, сельском хозяйстве и др.

Электродинамические силы – при протекании тока по проводнику, помещенному в магнитное поле, возникает электродинамическая сила

Энергетические показатели двигателя – мощность, частота вращения, напряжение, сила тока, к.п.д. вращающий момент.

Электрические аварии – связаны с питающим напряжением, током, пробоем изоляции.

## Список сокращений.

АД – асинхронный двигатель

ЭД – электрический двигатель

ППР – планово-предупредительные работы

ВМП – внешнее магнитное поле

ГОСТ - государственный стандарт

ССБТ - строительство, электробезопасность, общие требования

К.п.д.- коэффициент полезного действия

ВТ – вихревые токи

ЭП – электрический привод

ЭДС – электродвижущая сила

МДС – магнитодвижущая сила

Н.с. – намагничивающая сила

КО – код операции

АО – адрес операнда

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

МЭК – международная электротехническая комиссия

ПЛК – программируемый логический контроллер

ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика

СУ - система управления

ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный

ТТ – трансформаторы тока

## ВВЕДЕНИЕ

На производственных предприятиях для электропривода технологических механизмов широко используются асинхронные электродвигатели. Простота управления ими способствует расширению сферы их применения для привода различных механизмов во всех случаях, когда нет технологических ограничений. Благодаря - этому асинхронные электроприводы составляют около 95% общего количества электроприводов. Асинхронные двигатели занимают главенствующее положение в современной промышленности, благодаря простоте и технологичности конструкции, высоким энергетическим показателям и эксплуатационной надежности. Наибольшее распространение получили асинхронные электродвигатели общего назначения мощностью от 0,75 до 7,5 кВт, составляющие более половины всего парка электрических машин. Поэтому вопросы повышения надежности и долговечности АД, как наиболее ответственного звена в комплексе технологического оборудования, являются наиболее важными.

Долговременная и надежная работа электрооборудования на производстве, в большинстве случаев определяет эффективность всех производственных циклов. Одну из важнейших ролей при этом играют электрические двигатели. Это вызвано тем, что выход электродвигателей из строя приводит к нарушению взаимосвязанных технологических циклов, полной или частичной остановке производственного оборудования и механизмов. В итоге наносимый предприятию ущерб связан не только с ремонтом и заменой вышедших из строя электродвигателей, но с браком и недовыпуском продукции.

Задача повышения эффективности производства не может быть успешно решена без повышения надежности работы электрооборудования, и в частности асинхронных электродвигателей, как наиболее распространенных электрических устройств.

Электрические двигатели являются примером сложной системы, на безотказность работы которой влияет множество факторов, ремонт электродвигателей и их частей является трудоемким процессом, требующим значительного объема ручного труда. Поэтому выявление причины выхода из строя и оптимизация технологии их восстановления (ремонта) является весьма актуальной задачей.

Состояние электрических машин характеризуется определенной совокупностью значений параметров. Если хотя бы один из параметров выходит за допустимые пределы, обеспечивающие её нормальное функционирование, происходит отказ.

Причинами отказов являются дефекты. Физическая природа и характер процессов, вызывающих или сопровождающих появление дефектов, весьма разнообразны.

Снижению надежности и долговечности электродвигателей способствуют тяжёлые режимы работы и неблагоприятные условия эксплуатации. Высокая влажность, большие перепады и непостоянство температуры, наличие агрессивных газов являются негативными факторами микроклимата

производственных помещений. Недогрузка электродвигателей по мощности, сезонность их использования, а также зачастую низкое качество электроэнергии осложняют эксплуатацию АД.

Принципиально все факторы, неблагоприятно влияющие на состояние электродвигателей, можно разделить на две группы: внешние, обусловленные воздействием окружающей среды и условия работы АД, и внутренние, определяемые воздействием человека в процессе изготовления и эксплуатации. Внутренние факторы определяют старение и износ оборудования. Под устареванием подразумевают естественный процесс постепенного изменения физических и химических свойств материалов. Износ обусловлен, в основном, трением, а также действием электрического тока и напряжения.

Внешние факторы можно разделить на три группы: климатические, механические, электрические. К климатическим факторам относятся: температура, влажность, примеси в воздухе. Действие температуры выражается в изменении размеров узлов электродвигателя, особенно опасны в этом отношении резкие периодические изменения температуры. При термическом воздействии в полимерной изоляции происходят физические и химические изменения. При этом возникают термомеханические напряжения, которые приводят к частичному или полному разрушению материала, имеющему меньшую прочность, например: полимерных составляющих изоляции обмоток - это имеет место при кратковременном и повторно-кратковременном режимах, которые отличаются динамическими воздействиями и перегревом обмотки [1].

Воздействие механических (вибрации) и термомеханических нагрузок обуславливает механическое старение узлов электродвигателей.

Термомеханические нагрузки возникают в результате периодического нагревания и охлаждения конструктивных элементов АД. Наличие механических нагрузок способствуют электродинамические силы, возникающие в машине, неуравновешенность вращающихся частей, электромагнитные вихревые поля, центробежные усилия, удары и толчки со стороны привода или приводного механизма. Этим усилиям присущ знакопеременный циклический характер. Во вращающихся электрических машинах вибрация особенно пагубно воздействует на подшипники, что приводит к деформации трущихся частей и, в конечном итоге, к их заклиниванию. Ослабление винтовых, заклепочных соединений, разрушение сварочных швов, мест паяк, отвинчивание винтов и гаек, деформации и поломка деталей могут иметь место при механических воздействиях. Существенное влияние на процесс разрушения изоляции электрических машин оказывают переходные процессы, которые вызывают увеличение амплитуд вибраций в десятки раз, поскольку имеет место квадратичная зависимость электродинамических сил от тока.

Среди электрических факторов, воздействующих на электродвигатель при эксплуатации в производстве, следует выделить низкое качество электрической энергии. Также необходимо учитывать воздействия коммутаций, обуславливающих наличие значительных электрических нагрузок на изоляцию,

кратность коммутационных перенапряжений, возникающих при включениях, отключениях и реверсировании низковольтных ЭД, по отношению к номинальному напряжению достигает от шести до десяти. Такие кратковременные импульсные перенапряжения представляют серьезную опасность, особенно для увлажнённой и загрязнённой изоляции, так как могут вызвать её электрической пробой.

Эти факторы отрицательно воздействуют на все элементы электрической машины, но в первую очередь - на изоляцию обмотки статора, являющуюся наиболее слабым узлом конструкции АД. По статистике (собранный и проанализированной многими авторами именно обмотки статора являются причиной выхода из строя двигателей в 75 - 85% случаев. На повреждения подшипникового узла приходится 5 - 6%, повреждения в роторе - 5-8% от общего числа отказов элементов конструкции АД. Реже встречаются дефекты корпуса и магните провода машины.

В общем случае повышение надёжности электродвигателей возможно за счёт увеличения среднего времени наработки между отказами, а также сокращения времени между профилактическими осмотрами. В основе существующих способов обеспечения надёжности работы электродвигателей во время его эксплуатации, лежит система планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая предусматривает:

- периодическое выполнение технических уходов и ремонтов электрооборудования после определенного числа часов работы;
- установление последовательности профилактического и ремонтного воздействия и интервалов времени между ними;
- выполнение профилактических и ремонтных работ, обеспечивающих нормальное работоспособное состояние электрооборудования.

Основным недостатком существующей системы ППР является отсутствие дифференцированного подхода при проведении технического обслуживания и ремонтов в зависимости от состояния узлов электродвигателей и условий их эксплуатации. Следствием этого является отсутствие оптимального разграничения объемов выполняемых работ в зависимости от состояния АД, а также неопределённость в вопросе применения технологий восстановления изоляции для различного электрического оборудования в зависимости от условий его эксплуатации. Даже учитывая многогранность системы ППР, она не всегда способна учесть все индивидуальные особенности эксплуатации и состояние АД. В связи с этим, частота ремонтных обследований может быть как завышена, так и занижена, что в результате приводит к увеличению общих затрат на эксплуатацию парка АД.

Анализируя вышеперечисленное, можно говорить о необходимости сделать систему ППР более гибкой. Для достижения этой цели разумно сочетать различные методы диагностики с системой ППР.

Раннее выявление неисправностей в электрических машинах в условиях их работы является одним из путей уменьшения аварийных простоев и нарушений сложных технологических и производственных процессов в разнообразных электроэнергетических и электротехнических комплексах, в которых эти

машины выполняют особо ответственную роль.

Существующие способы и средства диагностического контроля и предупреждения, в том числе устройства релейной защиты, для данной цели оказываются малоэффективными. Они, в основном, реагируют на изменения главных режимных параметров и энергетических показателей машины, которые являются сравнительно малочувствительными к неисправностям, особенно на начальных стадиях их возникновения. Для определения повреждений на стадии их возникновения требуются дополнительные целенаправленные усилия по их диагностированию на основе специальной диагностирующей информации с помощью наиболее чувствительных и информативных параметров или признаков.

В данной работе рассматривается метод выявления неисправностей в АД на ранней стадии их возникновения, основанный на анализе внешнего магнитного поля (ВМП) данного двигателя.

Оценка технического состояния энергетического оборудования, в частности электрических машин, представляет собой важную задачу, решение которой позволяет обнаружить на ранней стадии зарождающиеся дефекты и, тем самым, предотвратить аварийные ситуации, способные привести к серьезным негативным последствиям. В отличие от системы планово-предупредительных работ, включающей в себя периодический контроль и профилактику, более целесообразным является обслуживание оборудования по его фактическому состоянию.

Для этого необходима полная диагностика объекта, причем желательно обнаруживать все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа, чтобы подготовиться к ремонту.

Для организации такого обслуживания требуются методы и средства диагностирования, позволяющие оценить состояние объекта контроля на текущий момент и спрогнозировать его состояние на ближайшее будущее.

Создание систем эксплуатации АД, широко используемых на предприятиях промышленности и агропромышленного комплекса, представляет собой многогранную задачу, которая может быть решена только при реализации комплексного подхода, включающего в себя, наряду с другими эксплуатационными мероприятиями, применение средств диагностики и контроля АД, внедрение современных защитных устройств и математическое прогнозирование технического состояния на основе адекватной модели, учитывающей изменение основных характеристик оборудования под воздействием эксплуатационных факторов [2].

Основным элементом комплексных систем является собственно метод диагностики, вокруг которого выстраиваются методики оценки состояния электромашин. Важной задачей является поиск новых параметров оценки с целью выявления наиболее информативных, либо таких параметров, на основе которых возможно создание несложного и недорогого метода диагностики, что зависит от потребностей конкретных предприятий.

В данной работе диагностическим параметром выступает внешнее магнитное поле (ВМП) машины.

Целью настоящей диссертационной работы является: исследование метода диагностики электродвигателей, используемых в производстве, на основе зависимости гармонического состава внешнего магнитного поля от степени развития дефектов.

Объект исследования. Процессы изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов.

Предмет исследования: Закономерности возникновения гармоник в спектре внешнего магнитного поля двигателя при развитии дефектов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- исследовать принципы диагностирования ЭД на основе анализа параметров его внешнего магнитного поля;
- выявить причины возникновения дефектов и их влияние на внешнее магнитное поле двигателя;
- исследовать устройство и функционирование программируемого логического контроллера
- исследовать метод диагностики дефектов ЭД на основе анализа его ВМП;

Научная новизна обусловлена следующим:

- проведен сравнительный анализ существующих методов диагностики двигателей;
- исследована методика системы, позволяющая интерпретировать результаты диагностики электродвигателя при выявлении в нем дефектов с применением математической модели.

## **1. Электрические двигатели в производстве**

### **1.1 Особенности эксплуатации электродвигателей на предприятиях**

Целью любого производства, является поддержание непрерывного процесса. Основной причиной приостановки процесса является выход из строя производственного оборудования (привязываясь к данной работе, речь будем вестись об асинхронных двигателях).

На современном этапе развития промышленного производства привод с асинхронными двигателями остается наиболее массовым типом привода и основным потребителем электроэнергии, направляемой для преобразования в механическую работу.

Выпуск асинхронных двигателей мощностью 0,75 - 300 кВт в странах СНГ составляет более 10 млн. шт. в год. Подобная массовость определяется не только ростом потребностей в асинхронных двигателях для оснащения новых машин и послеаварийную замену. В отраслях и установках с особо тяжелыми условиями работы электромеханического оборудования коэффициенты замены аварийных электродвигателей доходят до двух.

Из всех существующих типов электрических двигателей наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором различных серий, так как они наиболее просты и относительно надежны в эксплуатации, выпускаются в массовом количестве, к ним относятся электродвигатели промышленных серий (А, АО, А2, АО2, 4А, 5А, 6А, РА), модификации электродвигателей серии 4А (4АМ, АИР), а так же специальные электродвигатели для сельскохозяйственного производства серий АО2, СХ, Д, 4А...С. Количество электродвигателей новых серий 4А - 6А естественно постоянно растет вместе с обновлением технологического оборудования. Номинальная мощность электродвигателей колеблется от 0,4 до 50 кВт и более. Процентное распределение вышеперечисленных серий электродвигателей и их модификаций среди общего количества двигателей на различных предприятиях сложилось по разному. Это зависит от многих факторов, главным образом от того, в какое время наиболее интенсивно развивалась электрификация процессов производства в данном предприятии.

В настоящее время наблюдается относительное снижение производственного уровня промышленных и сельскохозяйственных производителей, т.е. имеем низкий уровень обеспеченности электрооборудованием. Это объясняется кризисными явлениями в нашей экономике: структурная перестройка отраслей, переходный период становления рыночной экономики, децентрализация снабжения предприятий и хозяйств, новые формы и механизмы хозяйствования, недостаточность дотаций, моральное и физическое старение технологического оборудования, выход из строя устаревшего оборудования и невозможность замены на новое из-за недостаточного финансирования. Обновление, парка электрических машин идет

крайне медленно, новые серии электродвигателей (5А, 6А, РА) в эксплуатацию практически не поступают. В основном используются электродвигатели серии 4А, как новые, так и капитально отремонтированные 2-3 раза.

В целом по стране было установлено свыше 7,5 млн. электродвигателей. Распределение электродвигателей следующее : около 2,0 - 2,5 млн. - серии А и АО; 3,0 — 3,5 млн. - серии А2 и А02; 1,0 – 1,5 млн. - серий 4А и 4АМ, АQ2...СХ, 4А...С, Да...С, Д, АИР и других специальных серий электродвигателей.

По данным обследований предприятий в период 1994 - 2007 годов использовалось 40% электродвигателей первой и второй серий, около 50% серии 4А около 10% - электродвигателей других серий.

Условия работы электродвигателей на промышленных предприятиях и предприятиях аграрно-промышленного комплекса характеризуются, как тяжелые в результате воздействия ряда факторов, например, повышенной влажности, наличия в воздухе помещений агрессивных газов, повышенной частоты возникновения технологических аварий, скачков напряжения, резких перепадов температур, недостаточного уровня оснащения двигателей защитными устройствами и технического обслуживания.

Исследования условий эксплуатации двигателей в промышленном производстве и аграрно-промышленном комплексе выявили ряд факторов, оказывающих влияние на их надежность. Основные из них будут перечислены ниже [3].

Специфичность окружающей среды на примере сельского хозяйства обусловлена:

- загазованностью стойловых животноводческих помещений аммиаком, углекислым газом, сероводородом (агрессивность среды в основном определяется содержанием аммиака и углекислого газа, последний в соединении с парами воды образует слабую неустойчивую угольную кислоту, которая усиливает коррозию металлов, содержание сероводорода обычно мало);
- резкими перепадами температуры в течение суток и низкими температурами зимой, повышенной влажностью при работе двигателей на открытом воздухе (навозоборочные транспортеры, установки водоснабжения и др.);
- повышенной влажностью воздуха при работе двигателей в кормокухнях, помещениях первичной обработки молока и др. (вода и дезинфицирующие растворы: щелочи, хлорная смесь, кальцинированная сода и др.);
- запыленность в установках для обработки зерна и кормовых трав.

Резкие перепады температур, высокая влажность, агрессивная среда отрицательно сказываются на коррозионной стойкости двигателей и особенно на электрической прочности изоляции. Высокая запыленность окружающей среды ухудшает охлаждение двигателя, так как забиваются вентиляционные отверстия в кожухе и межреберные каналы корпуса. Особенно неблагоприятно сочетание запыленности с высокой влажностью.

Продолжительность работы двигателей в течение года определяет степень их использования в условиях производства. Исследования, проведенные в некоторых областях, показали, что по годовой наработке двигатели

целесообразно разделить на три группы - 500, 1500, 3000 ч соответственно. Годовая наработка должна определять периодичность и объем технического обслуживания.

Характер загрузки по мощности определяется режимом работы двигателя, который зависит от механизма, с которым он сочленен. Двигатели вентиляторов, калориферов, сушилок, транспортных средств, обработки зерна работают с постоянной нагрузкой. Двигатели мельниц, дробилок, измельчителей имеют резкопеременный характер нагрузки с систематическими и случайными перегрузками.

Для большинства электрических машин перегрузки обусловлены несоответствием параметров пускозащитной аппаратуры параметрам двигателя, недопустимыми колебаниями напряжения сети и низким уровнем технического обслуживания. Перегрузки возможны и за счет конструктивных недоработок установок, например, из-за отсутствия дозирующих устройств.

Возможность перегрузок приводит к тому, что установки комплектуются двигателями большей номинальной мощности. Например, на навоз уборочных транспортерах, работающих в неблагоприятных условиях пуска, особенно в зимний период при замерзании навоза, зачастую используются двигатели большей номинальной мощности, хотя с экономической точки зрения, целесообразнее использовать двигатели с защитой от перегрузок при пуске или двигатели с повышенным пусковым моментом.

В некоторых случаях допускается даже перегрузка двигателей по мощности. Это объясняется тем, что основным фактором, определяющим его мощность, является рабочая температура изоляции. Она зависит от режима работы двигателя и температуры окружающей среды. Поэтому двигатели, работающие в кратковременном режиме или при пониженных температурах, имеют некоторый запас по времени нагрева изоляции и могут работать с перегрузкой по мощности на 20-30 %. Это относится к двигателям, работающим в зимнее время на открытом воздухе (пилорамы, сортировщики и т. д.), сочлененным с механизмами кратковременного режима работы.

Широкий диапазон колебаний питающего напряжения в сети оказывает неблагоприятное воздействие при эксплуатации двигателей. Сети в настоящее время проектируются с отклонениями напряжения у потребителей в пределах +7,5% или -10%, однако, как показали измерения, среднее суточное значение питающего напряжения составляет 340 В, но в течении суток может изменяться от 320 до 400 В. Расчеты показывают, что при соотношении между сопротивлениями сети и двигателя, равном 0,2, кратность максимального момента асинхронного двигателя снижается примерно на 35 %, что чрезвычайно неблагоприятно для механизмов с тяжелыми условиями пуска или требующих высоких максимальных моментов. С целью повышения эксплуатационной надежности двигателей в подобных случаях возможно использование модификаций двигателей с повышенным пусковым моментом или повышенным скольжением и особенно важно правильно выбрать защиту в зависимости от возможных появлений аварийных ситуаций [4].

Низкий уровень технического обслуживания, так же является

неблагоприятным фактором. Он обусловлен недостаточной квалификацией обслуживающего персонала, территориальной разбросанностью объектов обслуживания, недостаточным оснащением запасными частями, неравномерностью загрузки электриков, неблагоприятными климатическими условиями, ограничивающими своевременность обслуживания.

Причиной низкой надежности двигателя может быть и неудачная конструкция приводимого механизма. Были случаи, когда расположение двигателя в механизме заведомо предполагало неблагоприятные условия его работы, и тем самым заранее планировалась его низкая эксплуатационная надёжность. Так, в измельчителе кормов ИКМ-5 фланцевый щит двигателя является сборником воды, выделяющейся из продуктов обработки, которая беспрепятственно проникает в подшипниковый узел и на обмотку. Поэтому срок службы двигателя в данном механизме не превышает шести месяцев.

Было выявлено так же, что ряд предприятий сельскохозяйственного машиностроения для животноводства и кормопроизводства производит окраску двигателей совместно с механизмами, применяя при этом несовместимые по растворителям эмали, а так же эмали горячей сушки, что снижает коррозионную стойкость двигателей.

Представленный анализ отражает влияние различных факторов на надежность. Чтобы выявить другие возможные резервы повышения эффективности использования двигателей, представляется целесообразным исследовать структуру их применения. Знание структуры применения необходимо проектировщикам двигателей, чтобы при разработке новых серий или модернизации существующих точнее учитывать конкретные требования, предъявляемые к двигателям. Кроме того, структура применения является важнейшим элементом для правильного определения потребностей в электродвигателях, планирования их выпуска и распределения.

Для полного описания применения двигателей необходимо характеризовать его следующими основными признаками:

- типоразмер;
- режим работы, годовая наработка, число пусков в час;
- функциональное назначение (наименование механизма и функция двигателя);
- обрабатываемый предмет;
- отрасль применения;
- главный разрушающий фактор;
- коэффициент загрузки по мощности;
- годовая потребность в двигателях.

Проблема повышения эффективности использования и эксплуатационной надежности электродвигателей может быть решена наиболее полно, если применить к ней комплексный подход, т. е. связать структуру применения и условия разработки и эксплуатации двигателей со структурой выпуска, двигателей. При этом необходимо при планировании выпуска двигателей учитывать потребности в определенных типоразмерах и исполнениях.

Результаты анализа статистики отказов и повреждаемости асинхронных

двигателей:

В среднем выходят из строя до 20 - 35% установленных асинхронных двигателей.

Отказы электродвигателей: эксплуатационные 50%; технологические 35%; конструкционные 15%.

Отказы элементов конструкции асинхронных двигателей: повреждение обмоток 85 - 95%; повреждение подшипникового узла 5 - 8%; прочие отказы 1-4%.

Отказы по характеру повреждения обмоток асинхронных двигателей средней мощности; межвитковые замыкания 93%; пробой межфазной изоляции 5%; повреждение и пробой корпусной изоляции 2%.

Причины эксплуатационных отказов изоляции обмоток статора асинхронных двигателей: аварийные режимы 70%; старение изоляции 30%.

Аварийные режимы: обрывы фазы 40 - 50%; заклинивание рабочей машины 20 - 25%; длительные перегрузки 10 - 15%; пробой изоляции при ее увлажнении 15 - 20%.

Средний срок службы электродвигателей например в аграрно-промышленном комплексе не превышает 3 лет и составляет по разным оценкам 1,3-2,7года. Учитывая особенность работы сельскохозяйственных электроприводов; сезонность эксплуатации их использование не более 2000 часов в год, срок службы электродвигателей в сельском хозяйстве составляет не более третьей части от расчетного ресурса современных электрических машин (20000 часов).

Средний срок службы электродвигателей на различных технологических процессах составляет: водоснабжения 2,3 - 2,5 лет; уборки помещений 1,8 года; вентиляции 1,9 - 2,7 года; зерноочистки 3,1 года.

По современным данным, в подавляющем большинстве случаев отказы асинхронных двигателей мощностью свыше 5 кВт происходят из-за повреждения обмоток статора, и распределяется следующим образом: межвитковые замыкания — 93%; пробой межфазной изоляции - 5%; пробой фазовой изоляции - 2%. На подшипниковый узел приходится 5 - 8% отказов и небольшой процент связан с такими причинами, как распайка выводных концов, скручивания валов, разрыв стержней ротора и другие.

Анализ данных о повреждениях обмоток статоров показываем, что до 70% отказов электродвигателей происходит в результате создания аварийных режимов при эксплуатации, т.е. случайных концентраций нагрузки, предвидеть которые практически невозможно, а оставшиеся 30% составляют износные отказы, обусловленные старением изоляции и износом узлов.

Характер основных отказов из-за аварийных режимов электродвигателей следующий: обрыв фазы - 40-50%; заклинивание рабочей машины - 20-25%; длительные перегрузки - 10-15%; пробой изоляции при ее увлажнении - 35-20%.

Известно так же что в 80 % отказов нарушения происходят в изоляции обмотки статора; в 7% отказов - в железе статора и ротора; 8% отказов вызвано прогибам вала ротора; 5% - износ и повреждение подшипников. Из

приведенных выше данных следует вывод, что одним из основных видов отказа электродвигателя является выход из строя обмотки статора, причем, значительную долю составляют износные отказы из-за старения изоляции под воздействием влаги, агрессивных сред, тепловых и механических нагрузок [5].

## 1.2 Причины возникновения аварий электродвигателей в производстве

Аварии ЭД подразделяются на два основных типа: механические и электрические.

Механические аварии это: деформация или поломка вала ротора, ослабление крепления сердечника статора к станине, ослабление опрессовки сердечника ротора, выплавление баббита в подшипниках скольжения, разрушение сепаратора, кольца или шарика в подшипниках качения, поломка крыльчатки, отложение пыли и грязи в подвижных элементах и так далее.

Причинами большинства механических аварий являются:

- радиальные вибрации из-за асимметрии питающей сети (перекос фаз);
- механические перегрузки на валу электродвигателя;
- брак комплектующих элементов или брак, допущенный при сборке.

До 10% всех аварий АД имеют механическое происхождение. При этом 8% приходится на долю аварий, связанных с асимметрией фаз и только 2% на аварии, связанные с механическими перегрузками.

Оценка вероятностей возникновения механических аварий отсутствует, большая их часть, носит скрытый характер и выявляется только после соответствующих испытаний или разборки двигателя, однако, постоянный контроль сетевого напряжения и нагрузки на валу АД позволяет, в большинстве случаев, свести эту вероятность к минимуму.

Электрические аварии АД, в свою очередь, подразделяются на три типа:

- сетевые аварии (аварии по напряжению), связанные с авариями в питающей электросети;
- токовые аварии, связанные с обрывом проводников в обмотках статора ротора, или кабеля, межвитковым и междуфазным замыканием обмоток, нарушением контактов и разрушении соединений, выполненных пайкой или сваркой;
- аварии, приводящие к пробое изоляции в результате нагрева, вызванного протеканием токов перегрузки или короткого замыкания;
- аварии, связанные со снижением сопротивления изоляции вследствие ее старения, разрушения или увлажнения.

Сетевые аварии. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения определяет ГОСТ 12.1.013-78 ССБТ., который указывает допустимые отклонения от номинальных значений напряжений, частоты, нелинейных искажений и других показателей. На практике фактические значения показателей качества электрической энергии отличаются от нормированных. Номинальное эффективное значение напряжения при несинусоидальности формы обеспечивается за счет завышения амплитуды, к чему чувствительны современные устройства вторичного

питания.

Для продолжительной безаварийной работы электродвигателей необходимо выполнение требований нормативных документов, предъявляемых к качеству подводимой к ним электроэнергии. Для данной группы потребителей наиболее существенным является отклонение следующих параметров качества электроэнергии:

- отклонение частоты; понижение частоты в системе приводит к уменьшению скорости вращения всех включенных в работу электродвигателей, при этом снижается производительность соединенных с ними механизмов, что ухудшает экономические показатели их работы. Пониженное значение частоты влияет на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью, за счет увеличения тока намагничивания, дополнительному нагреву сердечников и к ускоренному старению изоляции.

При повышении частоты в системе (и случае сброса нагрузки) возможно повреждение оборудования:

- отклонения напряжения; при снижении напряжения на зажимах электродвигателя на 15 % от  $U_{ном}$ . его электромагнитный момент снижается до 72 % от номинального и снижается коэффициент запаса устойчивости. При длительной работе двигателя при 0,9  $U_{ном}$  срок его службы сокращается примерно вдвое. При провалах напряжения двигатель может остановиться. Повышение напряжения на зажимах электродвигателя приводит к повышению потребляемой им реактивной мощности;

- колебания амплитуды напряжения и его фазы вызывают повышенную вибрацию двигателей, механических конструкций и трубопроводов; при размахах изменении напряжения с частотой 1Гц, в 2 раза превышающих допустимые значения, срок службы трубопроводов вследствие пульсации насоса снижается на 5-7 %;

- несимметрия напряжения; при несимметрии в трехфазных сетях возникают переменные магнитные поля вращающиеся в направлении проти воположном вращению ротора с удвоенной синхронной скоростью, возникает тормозной электромагнитный момент и дополнительный нагрев активных частей машин (роторов) за счет токов двойной частоты. Срок службы асинхронного двигателя сокращается на 11 %;

- несинусоидальность напряжения; высшие гармоники образуют составляющие прямой (1, 4, 7 и т.д.), обратной (2, 5, 9 и т.д.) и нулевой последовательности (кратные трем). Токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали в электрических машинах, что приводит к дополнительному нагреву сердечников и ускоренному старению изоляции.

Рекомендации по устранению:

- снижение систематической несимметрии на вводных кабелях зданий путем рационального распределения однофазных нагрузок между фазами: сопротивления нагрузок должны быть примерно равны;

- снижение несинусоидальности питающего напряжения путем выделения нелинейных нагрузок на отдельную систему шин и использования

фильтрующих устройств.

Из-за аварий на питающих подстанциях, коротких замыканий в распределительных сетях, коммутационных и грозовых перенапряжений, неравномерности распределения нагрузки по фазам, фактические значения ряда показателей зачастую являются больше допустимых, что ведет к аварийным режимам работы ЭД. По статистическим данным до 80% аварий электродвигателей, напрямую или косвенно, связаны именно с авариями сетевого напряжения.

Следует отметить, что существует еще несколько типов сетевых аварий, которые происходят наиболее часто, но напрямую ГОСТом не регламентируются, так как являются крайними случаями проявления несимметричных режимов работы ЭД [6]. Это обрыв одной из фаз, нарушение последовательности фаз и «слипание» фаз.

Обрыв фаз, как правило, связан с обрывом жилы питающего кабеля, сгоревшим предохранителем или отключением автомата в одной из линий или обрывом самой линии. При соединении обмоток двигателя звездой, напряжение в двух фазах делится поровну и составляет половину линейного  $U_{\phi} = U_{л}/2$ , в третьей отсутствует. Такие режимы приводят к повышенному энергопотреблению из сети, перегреву обмоток статора. Поле из вращающегося превратится в пульсирующее, ток в оборванной фазе будет отсутствовать, в двух других увеличится на 50 %. В некоторых типах двигателей в случае, если обрыв произошел во время работы двигателя, на оборванной фазе генерируется напряжение «рекуперации», близкое по фазе и амплитуде сетевому, двигатель переходит в тормозной режим работы и если его не отключить, сгорает в течение нескольких минут.

Аварийный режим «слипания» фаз происходит в случае обрыва одной из питающих фаз и замыкании её со стороны двигателя на другую фазу. При этом одно и то же фазное напряжение подается на две фазы двигателя, на третьей остается в норме. При незначительной амплитудной несимметрии, наблюдается значительная фазная несимметрия приводящая к появлению значительных напряжений обратной последовательности, вызывающих перегрев двигателя и выход его из строя.

Нарушение закрепленной ГОСТом последовательности фаз А-В-С (В-С-А, С-А-В), на любую другую обуславливает реверсивный режим работы - вращение двигателя в другую сторону, что часто недопустимо по условиям технологического процесса т.к. вызывает вращение приводного механизма в другую сторону и может привести, помимо аварии самого двигателя, к тяжелым, порой катастрофическим последствиям.

Постоянный контроль наличия и качества сетевого напряжения, включая гармонический анализ, вычисление действующих или средних значений напряжения, до включения двигателя, контроль за его состоянием во время работы АД, в том числе за изменениями параметров фазных напряжений, вызванных режимами работы самого двигателя, позволяют зачастую избежать причин возникновения аварийных режимов, предотвратить появление режимов короткого замыкания и токового перегруза.

Токовые аварии.

Напряжение на зажимах АД и фазные токи, протекающие по его обмоткам тесно взаимосвязаны и любые, даже небольшие, изменения сетевого напряжения вызывают значительные изменения фазных токов. Для эффективной защиты АД необходимо измерять фазные токи как можно точнее. Согласно последним исследованиям, длительная работа двигателя с токовым перегрузом всего лишь на 5 % номинального, сокращает срок его службы в 10 раз. В связи с сильной несинусоидальностью кривой тока, особенно во время пусков, в ней присутствует большое количество гармоник «высшего порядка» оказывающих существенное влияние на величину действующего значения тока. Поэтому, если принимать решение о работе АД не по вычисленным действующим значениям тока, а по неким усредненным сигналам или, еще хуже, по пиковым значениям, что может принести к ложным выводам о наличии или отсутствии токового перегруза.

Токовые перегрузки делятся на симметричные и несимметричные.

Симметричные перегрузки характеризуются увеличением тока, что вызывает перегрев - дополнительное превышение температуры элементов конструкции.

Основными причинами возникновения симметричных перегрузок по току являются:

- нарушение технологического процесса;
- неисправность приводимого механизма;
- понижение напряжения питающей сети;
- пуск или самозапуск электродвигателей при нагруженном приводном механизме, если электродвигатель на такой режим не рассчитан.

Дополнительный нагрев при перегрузке вызывает опасные деформации обмоток, появление трещин и изоляции, сокращается расчетный срок эксплуатации двигателя.

Несимметричные перегрузки вызываются неполнофазным режимом и появлением напряжения обратной последовательности в питающем напряжении. Причинами возникновения неполнофазных режимов служат обрыв фазного провода в сети, обрывы в обмотке статора, нарушение в коробке выводов.

Стандартом на качество электроэнергии установлено допустимое значение напряжения обратной последовательности в продолжительном режиме. Для асинхронных двигателей оно составляет примерно 2 – 4,5 %. Поле обратной последовательности вызывает усиленный разогрев на поверхности неявнополюсного ротора и вибрацию элементов ротора и статора.

Во всех случаях внутренних аварий электродвигателя наблюдается значительная асимметрия фазных токов, превышающая в несколько раз асимметрию напряжений. Поэтому постоянный контроль токов, соотношение токового перекаса с перекасом напряжений, позволяют принимать достаточно достоверные выводы о наличии таких аварий и оперативно отключать двигатель.

Аварии, вызванные снижением сопротивления изоляции. Изоляция

обмотки электрической машины является одним из наиболее важных ее элементов [7]. Материалы, идущие на изготовление изоляции, не должны проводить ток и разрушаться под действием напряжения, которое может возникнуть между изолируемыми друг от друга частями машины, кроме того, материалы должны обладать определенной теплостойкостью.

Стабильность свойств изоляции при длительном воздействии высокой температуры определяет надежность и срок службы электрических машин. Большое значение имеет правильный выбор изоляции.

С течением времени свойства изоляции ухудшаются. Она высыхает, становится хрупкой, ломкой и теряет механическую и электрическую прочность. Этот процесс называется старением. Процесс старения изоляции ускоряется при ее нагревании. При небольшом нагреве свойства изоляции ухудшаются медленно, но если температура превысит определенный уровень, этот процесс резко ускоряется. Уровень длительно допустимой температуры определяет нагревостойкостью изоляции.

В современных двигателях применяются следующие классы изоляции, допустимая температура нагрева которых составляет: Y - 90°C, A - 105°C, E - 120°C, B - 130°C, F - 155°C, H - 180°C, C - более 180°C. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и существенному сокращению срока его службы. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды - температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. Электродвигатель допускается эксплуатировать, если сопротивление его изоляции на корпус не менее 0,5 МОм. Вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если сопротивление изоляции в два раза меньше допустимого. При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии АД, как пробой обмотки статора на корпус (короткое замыкание на корпус): опасной не только для самого электродвигателя, но и для обслуживающего его персонала. По сети начинают протекать токи короткого замыкания в 10 - 100 раз превышающие номинальные, а на корпус электроустановки может быть вынесено высокое напряжение, опасное для жизни человека.

Не менее важным являться непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т.к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения АД, могут внезапно измениться под воздействием электрического напряжения и температуры. Для этого используется измерение тока утечки на (землю) с помощью дифференциального трансформатора тока, реагирующего на появление дифференциального (разностного) тока выше некоторой уставки, заданной пользователем. Из вышесказанного следует, важнейшим условием эффективного функционирования любого промышленного и сельскохозяйственного предприятия является безотказность работы установленного там технологического электрооборудования. Это может быть достигнуто с помощью постоянного контроля его технических характеристик

различными средствами диагностики.

### **1.3 Сравнительный анализ методов диагностики электрических двигателей**

Оценка технического состояния энергетического оборудования, в частности электрических машин, представляет собой важную задачу, решение которой позволяет обнаружить на ранней стадии зарождающиеся дефекты и, тем самым, предотвратить аварийные ситуации, способные привести к серьезным негативным последствиям. В отличие от системы планово - предупредительных работ, включающей в себя периодический контроль и профилактику, более целесообразным является обслуживание оборудования по его фактическому состоянию. Это означает, что ремонтные работы производятся только тогда, когда в этом возникает реальная необходимость. Это позволяет:

- сократить время, объем ремонта и количество запасных частей;
- уменьшить число внезапных отказов;
- сократить упущенную прибыль из-за простоев.

Для этого необходима полная диагностика объекта, причем желательно обнаруживать все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа, чтобы подготовиться к ремонту.

Для организации такого обслуживания требуются методы и средства диагностирования, позволяющие оценить состояние объекта контроля на текущий момент и спрогнозировать его состояние на ближайшее будущее.

Для оценки состояния электрической машины в целом используются методы, которые чаще всего основаны на измерении следующих величин;

- к.п.д. двигателя;
- частоты вращения вала;
- вибрации машины;
- характеристик электромагнитного поля машины.

В настоящее время ведутся работы в двух перспективных направлениях в области технического мониторинга и диагностики. Это вибродиагностика и спектральный анализ магнитного поля в зазоре электрической машины.

**Вибродиагностика.**

Проведенные исследования по изучению влияния различных видов дефектов на функционирование машин показали, что комплексной диагностической информацией обладает сигнал вибрации, а многие другие виды сигналов практически дублируют ту или иную информацию, содержащуюся в сигнале вибрации. Дефекты начинают развиваться задолго до возникновения аварийных ситуаций, и практически сразу же начинают влиять на возбуждаемые этими узлами вибрацию и шум. Основной проблемой при обнаружении вызываемых ими изменениями в сигнале вибрации являются разделение их с теми изменениями, которые происходят из-за флуктуации нагрузки, частоты вращения, температуры узлов и других параметров машины

и внешних условий.

Большинство современных методов вибрационной диагностики базируется на анализе вибраций работающих машин и оборудования. Эти методы составляют основу функциональной (рабочей) диагностики, несмотря на то, что режимы работы оборудования могут быть самыми разными - от установившихся (номинальных или специальных) до переходных, в том числе пусковых, импульсных и т.п. В функциональной диагностике машин и оборудования по вибрации используется информация, содержащаяся в характеристиках колебательных сил и свойствах колебательной системы.

Основным способом получения диагностической информации становится спектральный анализ вибрации, измеряемой в разных точках и направлениях. Спектральный анализ низкочастотной вибрации машин и оборудования является одним из основных направлений функциональной диагностики, позволяющих обнаруживать до половины возможных дефектов машин роторного типа задолго до возникновения аварийной ситуации.

Основной недостаток этого метода заключается в невозможности контроля состояния изоляции обмотки электрической машины, а аварии из-за повреждения изоляции составляют значительную часть из общего числа аварий.

Анализ магнитного поля.

В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля [8].

В установившемся режиме основной источник высших временных гармоник - несинусоидальность напряжения на выводах машины. Вторым источником временных гармоник в воздушном зазоре - вал - механический выход машины. Высшие гармоники могут появиться в воздушном зазоре и с теплового вывода. Наибольшие амплитуды высших гармоник имеет место при тепловых ударах. Значительное влияние на состав пространственных гармоник оказывают эксцентриситет расточки статора и ротора, конусность и эллипсность ротора, несоосность статора и ротора, дефекты обмоток статора и ротора. Анализ магнитного поля в воздушном зазоре и исследование гармонического состава напряжения и токов асинхронного двигателя позволяет сделать заключение о его техническом состоянии.

Рассмотренные методы позволяют получить большое количество информации о контролируемом объекте, но имеют недостатки. Их наличие может привести к невозможности обнаружения дефекта, который повлечет за собой аварию электрической машины. Для компенсации недостатков различных методов анализа технического состояния двигателя необходимо использование системы комплексного мониторинга, математический аппарат которой, совмещает несколько взаимодополняющих методов [9].

После проведения комплекса мероприятий по диагностике и последующего прогнозирования остаточного ресурса электродвигателей, появляется возможность определения интенсивностей выходов из строя электродвигателей не на основе статистики отказов, которая может оказаться неточной, отсутствующей или сильно отличающейся от будущей статистики расчетного периода, а на основе объективного прогноза их состояния.

Построенные планы ремонтных мероприятий при данном подходе имеют большую точность и адекватность.

Для уменьшения параметров потока отказов необходимо при проведении технических обслуживаний, наряду с мероприятиями предусмотренными инструкцией по эксплуатации асинхронных двигателей, устанавливать фактическое техническое состояние их элементов, то есть определять не превышают ли параметры элементов электродвигателей своих допустимых значений и выявлять наличие в элементах скрытых дефектов.

Определить фактическое техническое состояние элементов электродвигателей позволяют методы и средства технической диагностики. Значение фактического технического состояния элементов электродвигателей позволяет производить замену элементов, предотказное состояние которых установлено, и устранять причины возможных в последующей эксплуатации неисправностей, увеличивая таким образом, вероятность безотказной работы электродвигателей.

Идея анализа параметров асинхронного двигателя с целью выявления наличия в их элементах скрытых дефектов в процессе эксплуатации базируется на положении, что во время эксплуатации в элементе электродвигателя происходят процессы, чувствительные к некоторой совокупности неблагоприятных условий, которые со временем ухудшают характеристики элементов электродвигателей и приводят к его отказу. При этом всякие нарушения во время эксплуатации электродвигателей проявляются в виде некоторых комплексов симптомов. Здесь термин «симптом» относится к той информации о процессах, происходящих в элементах электродвигателей во время эксплуатации, которая может быть получена от измерительных устройств (температур влажности, степени старения изоляции, загрузки, скольжения, величины тока и напряжения, вибрации и т.д.).

Известно три основных метода диагностики неисправностей в непрерывном процессе:

1) статистический метод, основанный на известных вероятностных соотношениях между неисправностью и её симптомами и на оценке функции правдоподобия методами Байесовского анализа;

2) детерминистический метод, основанный на анализе элементов объекта диагностики и выявлении тех точек элементов, в которых необходимо проверять наличие симптомов неисправностей;

3) распознавание последовательностей симптомов - метод, основанный на сравнении реальной последовательности симптомов с эталонами, которые хранятся в запоминающем устройстве.

Показатели действительного состояния объекта и его работоспособности в некоторый момент времени дают возможность получать информацию о функционировании объекта в прошлом и позволяют говорить о поведении

объекта в предстоящий период эксплуатации.

Эффективность диагностики и предотвращение отказов существенно возрастают, когда при сохраняющемся содержании контрольно-

измерительных операций появляется возможность осуществить прогноз изменения состояния объекта.

Информативность диагностических параметров, как и параметров назначения и надежности объектов, которые связаны с измеряемыми физическими величинами функциональными зависимостями, зависит от состояния конкретных элементов диагностируемого объекта.

В работе отмечена возможность и целесообразность замены проведения прямых измерений косвенными, результат которых получают после прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью [10].

Подавляющее большинство разрабатываемых в настоящее время методов диагностики и прогнозирования технического состояния электродвигателей основаны на косвенных измерениях.

Особый интерес с практической точки зрения представляют вопросы достоверности результатов оценки технического состояния электродвигателей. Как правило, обеспечить высокую степень достоверности получаемой диагностической информации позволяет использование методов измерений, которые требуют для своего проведения некоторых идеализированных условий.

Такие методы физически реализуются только при отключении электродвигателя от сети и создании определенного возмущающего воздействия с последующим анализом полученных результатов.

Каждый такой метод надёжно выявляет лишь определённые дефекты и не может являться единственным методом диагностики.

Большой интерес представляет использование методов оценки состояния электродвигателя при его работе под нагрузкой.

Среди направлений, в которых удалось достичь определённых успехов, следует выделить следующие:

- контроль состояния обмоток статора с помощью анализа посланных на обмотку импульсов различных видов;
- вибрационный контроль;
- контроль параметров магнитного поля.

Из всех перечисленных методов остановимся на методе основанном на анализе ВМП ЭД, т.к. именно в нем объединены плюсы всех других методов, а именно:

- для диагностирования нет необходимости выводить двигатель из эксплуатации;
- двигатель диагностируется под нагрузкой;
- в равной степени достоверности диагностируются все основные узлы ЭД;
- простота в эксплуатации;
- относительная дешевизна.

#### **1.4 Выводы**

Эффективное планирование ремонтов электрооборудования во многом

определяет надежность технологического процесса предприятия и позволяет заблаговременно определить необходимые объемы финансовых вложений для успешного проведения ремонтной компании. При анализе ситуации, сложившейся в промышленном производстве и аграрном комплексе, было выявлено, что показатели надежности, установленного в данных секторах производства электрооборудования являются неудовлетворительными. Планирование отсутствует, а ремонты происходят на 85% по факту выхода из строя электродвигателя, что влечет за собой значительные убытки от простоя оборудования. Наряду с вышесказанным стоит отметить значительный рост разработок новых методов диагностики. Основными причинами слабого практического применения современных методов является отсутствие на предприятиях специалистов, способных правильно интерпретировать результаты диагностики, сложность и высокая стоимость диагностической аппаратуры. Наиболее рациональным путем решения обозначенной проблемы является исследование метода, позволяющего наиболее точно и всесторонне оцепить фактическое состояние электродвигателя, при наименьших затратах.

## **2. Теоритические основы диагностики. Программируемые контроллеры**

## 2.1 Информативность внешнего магнитного поля

ВМП ЭД - это суммарное магнитное поле, создаваемое различными частями двигателя и экраном.

Переменное ВМП. Основными первичными источниками переменного ВМП асинхронных двигателей являются обтекаемые током обмотки статора и ротора. В пределах магнитопровода обмотками создается рабочий магнитный поток, который, как известно из теории электрических машин, приближенно можно считать не зависящим от тока нагрузки. Поэтому целесообразно принять, что первичное ВМП в основном образуется за счет отвлечения части магнитного потока от ярма статора, которая незначительно зависит от тока нагрузки, и за счет потока рассеяния лобовых частей обмоток статора и ротора, пропорционального току нагрузки.

У короткозамкнутых электродвигателей поток рассеяния от лобовые частей обмотки ротора незначителен, хотя, как, показывают исследования, это оказывает некоторое влияние на ВМП. Основным источником вторичную ВМП является обтекаемая вихревыми токами корпусная оболочка. Таким образом, на основной частоте питающей сети ВМП создается за счет отвлечения части магнитного потока с поверхности сердечника, обтекаемыми током обмотками статора и ротора, а также вихревыми токами (ВТ), индуцированными в корпусных и других деталях.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования переменное ВМП проявляет себя в достаточно широком диапазоне частот.

На частотах, кратных основной (преимущественно первые нечетные гармоники), переменное ВМП создается вследствие нелинейности характеристик ферромагнитных материалов и наличия высших гармоник в питающем напряжении.

На зубцовых гармониках появление ВМП обусловлено прежде всего пульсациями рабочего магнитного потока.

На частоте скольжения ( $f_2 = f \cdot s$ ) переменное ВМП может быть обусловлено несимметричным растеканием токов по ротору и некоторыми другими причинами.

В спектре ВМП асинхронного двигателя возможно присутствие и других временных гармоник, обусловленных, например, статическим и динамическим эксцентриситетом ротора, влиянием анизотропии свойств стали ротора [11]. Предметом исследования в настоящей работе является переменное ВМП на частоте питающей сети, имеющее наиболее высокую интенсивность в сравнении с полями других частот.

Остаточное ВМП. Это постоянное поле создается неподвижными ферромагнитными деталями и узлами с остаточной намагниченностью. Оно может существовать и при включенном, и в выключенном состоянии АД. Из-за остаточной намагниченности вращающихся частей может возникнуть и переменная составляющая ВМП соответствующей частоты.

Индукцированное ВМП. Это неизменная во времени часть ВМП возникает

от того, что намагничиваясь в магнитном поле Земли, ферромагнитные части АД вызывают его локальные изменения. При разработке математической модели переменного ВМП в расчетной модели АД нужно учитывать основные первичные источники элементов экрана: сердечник, лобовые части обмоток, корпусная оболочка, наружный центральный и торцевые ферромагнитные пояса и др.

Магнитопровод намагничивается преимущественно основным магнитным потоком, который приближенно можно считать не зависящим от тока нагрузки машины. Поэтому, пренебрегая намагничивающим действием потоков рассеяния, можно считать, что составляющая ВМП, которая образуется за счет отклонения части рабочего магнитного потока с цилиндрической и торцевой поверхности сердечника, также не зависит от тока нагрузки. Значения напряженности магнитного поля на различных участках поверхности сердечника считаются известными из результатов расчета магнитной цепи АД.

Магнитный поток рассеяния лобовых частей прямо пропорционален току этих обмоток. У короткозамкнутых электродвигателей поток рассеяния от лобовых частей обмоток ротора незначителен, хотя, как показывают исследования, он оказывает некоторое влияние на ВМП. Если лобовые части окружены ферромагнитным экраном, то создаваемый в торцевой зоне магнитный поток замыкается через его стенки.

В этом случае рассеяние во внешнее пространство происходит вследствие возникновения магнитного напряжения между точками наружной поверхности экрана.

Потоками рассеяния первичных источников, рассмотренными выше, в электроприводном корпусе индуктируются вихревые токи, создающие свое собственное ВМП. Оно оказывает значительное компенсирующее действие на ВМП первичных источников, прежде всего на поле рассеяния ярма статора.

Таким образом, корпусная оболочка является основным электромагнитным экраном.

Ферромагнитные экраны и экранирующие (регулирующие) элементы.

Они являются элементами магнитной цепи для потоков рассеяния первичных источников и поля вихревых токов. Как намагниченные тела их можно считать источниками ВМП. Торцевые пояса являются магнитными экранами, замыкая на себя основную часть потока рассеяния лобовых частей обмоток. Через наружный пояс замыкается часть рабочего магнитного потока АД и часть потока, создаваемого протекающими по корпусной оболочке вихревыми токами.

В электрических машинах общепромышленного исполнения ВМП выводных проводников и межкатушечных соединений может быть весьма значительным. У асинхронных двигателей соединения и выводы обмоток обычно сбиблированы, поэтому их вклад во внешнее поле относительно невелик. Кроме того, поле этих источников экранируется торцевыми экранами, подшипниковыми шинами и корпусом. Получение аналитических выражений для расчета их ВМП с учетом экранирующего

эффекта практически невозможно ввиду сложной геометрии, несимметричного положения относительно экранов и ферромагнитных частей. При оценке этого ВМП иногда используют весьма приближенные эмпирические формулы. Для маломагнитных двигателей поле соединений и выводов при выполнении рекомендаций по укладке при расчете может не учитываться. Самое большое влияние на ВМП АД оказывают обмотки и магнитопровод двигателя (активное ядро машины).

Интенсивность ВМП данных частей АД как источника можно оценить по уровню их магнитного момента. Магнитный момент для оценки выбран потому, что он является параметром источника магнитного поля; характеризующим его ВМП на "далеких" (превышающих в несколько раз габаритные размеры источника) расстояниях. Стандарт СЭВ 1052-78 "Метрология. Единицы физических величин" определяет два вида магнитных моментов:

- амперовский магнитный момент, являющийся магнитной характеристикой катушек с током:

$$M = IS, \quad (2.1)$$

где  $I$  - ток в контуре, А;

$S$  - вектор площади контура,  $m^2$  ;

- кулоновский магнитный момент, являющийся характеристикой намагниченного ферромагнетика,

$$M = \Phi l / \mu_0, \quad (2.2)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток, Вб;

$l$  - длина магнитопровода в направлении плотности магнитного потока, м;

-  $\mu_0$  магнитная постоянная.

Как известно из теории электрических машин, вращающееся магнитное поле электрической машины можно разложить на два пульсирующих во взаимно перпендикулярных направления поля [12]. Активное ядро машины переменного тока обладает вращающимся ВМП, которое является результатом взаимодействия двух пульсирующих в главной плоскости машины полей:

$$\begin{aligned} M_{Mx} &= 0 \\ M_{My} &= M_M \cos(\omega t + \varphi_M), \\ M_{My} &= M_M \sin(\omega t + \varphi_M) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для простоты рассмотрим ВМП по одной оси. Текущее значение магнитной индукции в зазоре машины

$$B_{\varphi} = F_{\varphi} \cdot \lambda_{\varphi} \quad (2.4)$$

где  $F_{\varphi}$  - текущее значение магнитодвижущей силы,  
 $\lambda_{\varphi}$  - текущее значение магнитной проводимости элемента воздушного зазора. Считаем, что ротор расположен симметрично относительно статора, тогда

$$\lambda_{\varphi} = \lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_{\mu} k_{\delta} \delta_0} ; \quad (2.5)$$

где  $k_{\delta}$  - коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера);  
 $k_{\mu}$  - коэффициент, учитывающий насыщение зубцовой зоны.

Основная гармоника намагничивающей силы в машине переменного тока

$$F_{\lambda} = F_0 \cos(\omega t + p\varphi), \quad (2.6)$$

где  $\omega$  - частота вращения магнитного поля статора,

Появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины. Учитывая то обстоятельство, что индукция внешнего магнитного поля с удалением от источника спадает по закону  $R = 1/R^{n+2}$  где  $n$  - порядок магнитного мультиполя, на уровне основного внешнего магнитного поля машины порядка  $p$  можно пренебречь гармониками порядка  $(p+k)$  в связи с их более быстрым спаданием. Так как ВМП машины, экранируется корпусом, это должно быть учтено, например, с помощью коэффициента экранирования  $k_0$ .

Таким образом, можно предположить, что ВМП бездефектного двигателя является синусоидой.

Теоретические выкладки подтверждены. Но, как показывает практика, на ВМП также могут иметь значительное влияние некоторые другие факторы, помимо рассмотренных [13].

Как показывают многочисленные исследования, подводы электроэнергии и межкатушечные соединительные токопроводы электрических машин в ряде случаев оказывают существенное влияние на их характеристики. В доказательств, что принятое в теории электрических машин допущение о пренебрежении магнитным полем токов в контурах соединений не всегда справедливо. Там же показана возможность замены сложного по форме контура обмотки машины замкнутыми контурами катушек и контурами соединений, а также обоснована справедливость независимого рассмотрения магнитного поля соединений и поля контуров катушек. Исходя из этих положений, ВМП соединений и его влияние на общее ВМП электрических машин, ВМП

подводящего кабеля при этом из рассмотрения исключим, так как кабель является самостоятельным изделием. Развилка его в месте подключения к выводам обмотки машины отнесена к машине. Это сделано потому, что ее конфигурация и расположение, как правило, определяются конструктором электрической машины и зачастую она находится в конструктивном элементе машины - коробке выводов.

При такой постановке вопроса соединения представляют собой замкнутый контур, обтекаемый рабочим током электрической машины. Расположение его элементов в пространстве определяется взаимным положением коробки выводов и соединяемых катушек.

Рассмотрим влияние токопровода на ВМП машин переменного тока.

Активное ядро машины переменного тока обладает вращающимся ВМП, которое является результатом взаимодействия двух пульсирующих в главной плоскости машины полей.

ВМП соединений, будучи представленным суммой магнитных моментов участков, каждый из которых содержит свое значение  $M$  и фазу  $\varphi$ , в общем случае имеет составляющие по всем осям. Суперпозиция ВМП активного ядра машины и соединения образует суммарное ВМП:

$$\begin{aligned} M_x &= M_\omega \sin(\omega t + \varphi_\omega) \\ M_y &= M_M \cos(\omega t + \varphi_M) + M_\omega \sin(\omega t + \varphi_\omega) \\ M_z &= M_M \sin(\omega t + \varphi_M) + M_\omega \sin(\omega t + \varphi_\omega) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Из формулы видно, что в осевом направлении (ОХ) ВМП машины переменного тока определяется соединениями. В радиальном направлении оно в значительной степени зависит от фазовых соотношений магнитных моментов активного ядра машины и соединений.

Для снижения ВМП электрических машин необходимо их выводы и соединения бифилировать путем плотной кладки проводов с обратным направлением тока, т.е. создания по оси вала машины контуров с против направленными магнитными моментами, сумма которых равна нулю.

Для дальнейших исследований будем считать, что выводы обмоток сбифилированы и его ВМП токов в контурах не оказывают значительное влияние на общее ВМП АД.

Доказано, что анизотропия свойств стали ротора влияет на ВМП АД, а именно создает спектр гармоник. В работе показано наличие ряда гармоник, представленных в таблице 2.1 ( $f_s$  - частот скольжения асинхронного двигателя) [14].

Таблица 2.1

Влияние свойств стали.

Полюсность машины $2p$	Частота магнитных мультиполей, Гц
------------------------	-----------------------------------

2	$50 - 2 f_s$
4	$f_s, (50 - 2 f_s)$
6	$(16,6 + 0,67 f_s), (16,6 - 1,3 f_s)$
8	$(25 + 0,5 f_s), f_s, (25 - 1,5 f_s)$

Таблица 2.1 показывает, что данный дефект создает гармоники ниже основной и оказывает небольшое влияние на общий уровень ВМП АД. В данной работе эти гармоники не являются диагностическим признаком для электродвигателей, поэтому они здесь не рассматриваются.

По итогам данного раздела можно сделать вывод о том, что ВМП ЭД имеет достаточную информативность для определения дефектности двигателя на ряду с этим стоит отметить очень сложную структуру внешнего магнитного поля, и для его моделирования необходимо сделать ряд допущений с целью упрощения расчетов и получения конечного результата моделирования.

## 2.2 Состояние параметров внешнего магнитного поля двигателя при дефектах

Структура внешнего магнитного поля складывается из трех составляющих переменного, остаточного и индуцируемого полей.

Основными первичными источниками переменного ВМП асинхронных двигателей являются обтекаемые током обмотки статора и ротора. В пределах магнитопровода обмотки создается рабочий магнитный поток от тока нагрузки. Поэтому первичное ВМП в основном образуется за счет ответвления части магнитного потока из ярма статора, который незначительно зависит от тока нагрузки, и за счет - лобовых частей обмоток статора и ротора, пропорционального току нагрузки. У короткозамкнутых электродвигателей поток рассеяния от лобовых частей обмотки ротора незначителен, хотя, он оказывает некоторое влияние на ВМП. Основным источником вторичного ВМП является обтекаемая вихревыми токами корпусная оболочка.

Таким образом, на основной частоте питающей сети, ВМП создается за счет ответвления части магнитного потока с поверхности сердечника, обтекаемыми током обмотки статора и ротора, а также вихревыми токами, индуцированными в корпусных и других деталях.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования переменное ВМП проявляет себя в достаточно широком диапазоне частот.

На частотах, кратных основной, переменное ВМП создается вследствие нелинейности характеристик ферромагнитных материалов и наличия высших гармоник в питающем напряжении.

На зубцовых гармониках появление ВМП обусловлено пульсациями рабочего магнитного потока.

На частоте скольжения ( $f_s = f S$ ) переменное ВМП может быть обусловлено

несимметричным растеканием токов по ротору и некоторыми другими причинами.

В спектре ВМП асинхронного двигателя возможно присутствие и других временных гармоник, обусловленных, например, статическим и динамическим эксцентриситетом ротора влиянием анизотропии свойств стали ротора.

Остаточное ВМП - это постоянное поле, которое создается неподвижными ферромагнитными деталями и узлами с остаточной намагниченностью. Оно может существовать и при включенном, и при выключенном состоянии АД.

Из-за остаточной намагниченности вращающихся частей может возникнуть и переменная составляющая ВМП соответствующей частоты.

Индукцированное ВМП - это неизменная во времени часть ВМП, которая возникает из-за того, что, намагничиваясь в магнитном поле Земли, ферромагнитные части АД вызывают его локальное изменение. Наиболее надежным способом снижения этого поля, а также остаточного является максимально возможное использование в конструкции двигателя немагнитных материалов.

В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. Эти гармоники имеют частоту выше и ниже основной, но их принято называть высшими гармониками. Высшие гармоники отличаются друг от друга амплитудами и частотой. Обычно исследуют высшие гармоники, имеющие частоты, кратные частоте первой - основной гармонике. Нечетные гармоники, имеющие в 3, 5, 7 и т.д. раз большие частоты, есть в воздушном зазоре всех машин, четные появляются при подмагничивании и в несимметричных электрических машинах.

Высшие гармоники делят на временные и пространственные. Временные гармоники - это те, которые попали в воздушный зазор машины со стороны выводов машины. Пространственные - гармоники, появившиеся из-за конструктивных особенностей и нелинейности параметров машины.

В установившемся режиме основной источник высших временных гармоник - несинусоидальное напряжение на выводах машины. Если к двухфазному идеализированному двигателю подведено несинусоидальное симметричное напряжение, то индукция в воздушном зазоре повторит форму приложенного напряжения при условии  $U_{ср} \approx E_{ср}$ . В воздушном зазоре вращающееся поле будет содержать наряду с первой гармоникой еще и высшие гармоники. Таким образом, зная форму подведенного к выводу машины напряжения, можно определить гармонический состав поля в воздушном зазоре.

Если форма напряжения прямоугольная, то амплитуды высших гармоник максимальны. При этом амплитуда третьей гармоники равна 1/3, пятой - 1/5, и  $i$ -й гармоники -  $1/i$  от амплитуды первой гармоники. При синусоидальном напряжении высшие гармоники в зазоре идеализированной машины отсутствуют. При всех промежуточных формах напряжения амплитуды высших гармоник соответственно меньше, чем при прямоугольной форме, и больше нуля. В переходном процессе и общем случае при несинусоидальном напряжении питания частота и амплитуда напряжения могут изменяться по

нелинейному закону. При этом в воздушном зазоре будет изменяться спектр высших гармоник от изменения частоты и напряжения.

Второй источник временных гармоник в воздушном зазоре - вал, механический выход машины. При нелинейном изменении момента нагрузки  $M_c$  или частоты вращения в воздушном зазоре появляются высшие гармоники. Максимальное значение - амплитуд высших гармоник имеет место при ударной нагрузке двигателя, когда момент сопротивления изменяется по прямоугольному закону. В этом случае, так же как и при прямоугольном напряжении, амплитуда третьей гармоники равна  $1/3$ , пятой -  $1/5$  и  $i$ -и -  $1/i$ , от амплитуды первой гармоники.

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью сети, к которой он подключен, то высшие гармоники от ударных моментов могут из зазора «выйти» на электрический вывод и исказить напряжение сети[15].

Со стороны механического вывода высшие гармоники в воздушном зазоре могут появиться при нелинейном изменении частоты вращения, а также при одновременном нелинейном изменении  $M_c$  и  $n$ . При линейном изменении  $M_c$ , а также при синусоидальном изменении нагрузки на валу двигателя и воздушном зазоре высшие гармоники не появляются.

Высшие временные гармоники могут «прийти» в воздушный зазор и с теплового вывода. При нелинейном изменении температуры среды, окружающей электрическую машину, в воздушном зазоре появляются высшие гармоники, и магнитное поле искажается. Наибольшие амплитуды высших гармоник имеют место при тепловых ударах.

В общем случае временные гармоники могут появиться в воздушном зазоре при одновременном воздействии нелинейных возмущений на три «входа» в электрическую машину, т.е. со стороны электрических, механических и тепловых выводов.

Временные гармоники отличаются от пространственных не только происхождением, но и тем, что частоты вращения временных гармоник равны частоте вращения первой гармоники. Пространственные гармоники имеют больше причин для возникновения в зазоре машины, они часто оказывают значительное влияние на процессы преобразования энергии в электрической машине. Пространственные гармоники возникают в воздушном зазоре также из-за нелинейностей параметров машины ( $r$ ,  $L$ ,  $M$  и  $J$ ), входящих в уравнения электромеханического преобразования энергии.

Амплитуды первой и высших гармоник токов нелинейно зависят от амплитуд первой и высших гармоник напряжений на нелинейных сопротивлениях.

Наибольшее влияние на характеристики машины оказывает насыщение магнитной системы электроприемников (ЭП, нелинейное изменение  $M$  и  $L$  в зависимости от намагничивающего тока, нагрузки и других факторов. В общем случае взаимная индукция и полные индуктивности нелинейны и являются функцией времени. Гармонический состав полей в воздушном зазоре определяется характеристикой намагничивания стали.

В уравнениях электромеханического преобразования энергии нелинейными могут быть активные сопротивления статора и ротора и момент инерции. Активные сопротивления в статоре могут меняться из-за изменения температуры или включения нелинейных резисторов (диодов, транзисторов и т.п.). Активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора меняется из-за вытеснения тока. В некоторых приводах в динамике происходит изменение приведенного к валу двигателя момента инерции.

Нелинейные изменения параметров образуют соответствующие спектры пространственных гармоник.

Значительное влияние на состав пространственных гармоник оказывают технологические факторы. На форму зазора влияют эксцентриситет расточки статора и ротора, конусность и эллипсность ротора и т.д.

Электрическая машина - нелинейная система, в которой достаточно иметь две гармоники, чтобы они породили бесконечные спектры комбинационных частот, но и без них в зазоре машины имеется бесчисленное множество гармоник [16].

Одна из причин появления гармоник в воздушном зазоре машины - несимметрия машины или несимметрия напряжений на выводах машины.

В переходных процессах изменяются не только амплитуды и частоты гармоник поля, но происходит изменение и периода основной частоты, по отношению к которой ведется отсчет частот высших гармоник.

Таким образом, в воздушном зазоре машины существует бесконечный спектр гармоник поля, который можно разбить на множества гармоник. Это деление можно производить ни их происхождению. Сложившееся деление гармоник на временные и пространственные достаточно условно. Все гармоники связаны с энергией поля и не могут рассматриваться вне пространства и времени.

Большинство из высших гармоник имеют бесконечно малые амплитуды и незначительно влияют на работу электрической машины. Поэтому в электромашиностроении обычно учитываются лишь несколько гармоник. Обычно ограничиваются исследованием двух-трех высших гармоник.

Магнитное поле рассеяния, создаваемое обмоткой, переменного тока в электрических машинах, подразделяется на три пространственные составляющие: поле высших гармонических составляющих в воздушном зазоре (дифференциальное рассеяние), поле пазов и поле лобовых частей. Понятно, что основные физические процессы и основные процессы взаимоиндукции между обмотками в машине осуществляются с помощью основной гармонической составляющей поля в воздушном зазоре.

Возникновение магнитных потоков рассеяния обусловлено конструктивными особенностями магнитопроводов и обмоток статора и ротора, насыщением стали, неравномерным распределением магнитного потока в воздушном зазоре.

Пространственная структура магнитного поля лобовых частей включает в себя немагнитное пространство вокруг лобовых частей, где линии данного

магнитного поля замыкаются, не охватывая магнитопроводы статора и ротора.

Точно определение поля лобовых частей очень затруднительно, главным образом из-за сложной формы лобовых частей катушек и объемного характера поля.

Следует отметить, что для задач диагностики, важным является определение степени нарушения пространственной структуры распределения поля в обмотке, т.е. требуется определение изменения текущих значений поля в лобовой части катушек относительно друг друга в условиях функционирования машины. Либо известно, что независимо от разнообразных конструкций трехфазной обмотки при электрической симметрии катушечных групп в фазах между ними существует и магнитная симметрия. Только в случае нахождения катушечных групп в одинаковых магнитных условиях результирующая ЭДС наибольшая и отсутствуют уравнивающие токи внутри обмотки.

Фазу обмотки при произвольном числе в катушечной группе можно представить состоящей из заданного числа  $q$  периодических систем катушек. Если принять, что расстояние между сторонами этих катушек равно полюсному шагу  $\tau$  и в рассматриваемый момент времени две стороны заданной катушки находятся в точках, где индукции максимальны (т. е. стороны находятся в фазах, совпадающих с центром полюсов), тогда ЭДС катушки, кривая которой является копией кривой поля, можно представить в виде выражения:

$$E_T = 2 \cdot B_m \cdot \omega \cdot l \cdot v \cdot 10^{12}, \quad (2.8)$$

где  $E_T$  - максимальное значение ЭДС, В;

$B_m$  - максимальное значение магнитной индукции под серединой полюса, Тл;

$\omega$  - число активных проводников;

$l$  - активная длина стороны катушки (проводника, м);

$v$  - скорость ротора, м/с.

ЭДС катушечной группы, очевидно, будет равна сумме ЭДС отдельных катушек.

В трехфазной обмотке конструкции в каждой фазе намотано одинаковое число катушек с равным числом витков, образовано одинаковое количество катушечных групп и соединены они между собой одинаково, чем обеспечиваются электрическая и магнитная симметрия между ними.

В лобовой части обмотки группа проводов, выходящих из пазов, составляет один общий пучок проводов, охватываемых общим потоком рассеяния. Для потока трубки магнитной индукции, сцепленной с числом витков  $\omega$  в лобовой части одной стороны катушек, можно записать:

$$\Phi_k = F_\lambda \Lambda, \quad (2.9)$$

где  $\Phi_k$  - магнитный поток, Вб;

$\Lambda$  -проводимость рассеяния лобовых частей группы катушек обмотки, складывается из проводимости самоиндукции и проводимости взаимоиנדукции других групп катушек, см;

При этом  $F_{\lambda}$ ,  $\Lambda$ , данной катушки, обтекаемой током  $i = \sqrt{2} \cdot I$  равна:

$$F_x = \omega_x \cdot i. \quad (2.10)$$

Так как данное поле рассеяния замыкается главным образом через воздух, то:

$$\Lambda = \mu_0 \cdot I_a \cdot \Lambda_a, \quad (2.11)$$

где  $\mu_0$  - принимается равной магнитной проницаемости воздуха;

$I_a$  -длина лобовой части обмотки, м;

$\Lambda_a$  - коэффициент проводимости лобового рассеяния. С помощью данного коэффициента в теории и практических расчетах характеризуются индуктивное сопротивление  $X_i$ , Ом лобового рассеяния фазной обмотки:

$$X_i = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \omega^2}{p} \right) \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot \lambda_i$$

(2.12) где  $p$  - число пар полюсов.

Как известно, выражение (2.12) является общим для индуктивного сопротивления всех пространственных составляющих рассеяния, при определении которых вместо  $\lambda$ , необходимо поставить коэффициенты проводимости рассеяния соответствующих составляющих [34].

Понятно, что значение ЭДС катушки (выражение 2.9) практически не зависят от поля рассеяния и формы выполнения лобовых частей катушек, так как они индуцируются только в активной части катушки. Лобовые же части нужны для соединения активных частей, охватываемых только основным магнитным полем.

Результирующая МДС остальных высших порядка определяется выражением:

$$F_v = F_{\Phi v} \cdot \sin(\omega \cdot t \pm v \cdot \alpha). \quad (2.13)$$

Все гармонические, порядок которых может быть выражен числом  $v = 6 \cdot k + 1$ , т.е.  $v = 7, 13, 19, \dots$  имеют прямовращающиеся с ротором (и полем первой гармоники) поля. Гармонические же порядка  $v = 6 \cdot k - 1$ , т. е.  $v = 5, 11, 17, \dots$  имеют обратновращающиеся с ротором поля.

В общем, в трехфазных электрических машинах в условиях электрической симметрии катушечных сторон и симметрии нагрузочных токов в фазных обмотках пространственные составляющие магнитного рассеяния фаз, в том

числе рассеяние лобовых частей, практически симметричны.

Нормально, исправно функционирующая электрическая машина имеет в воздушном зазоре, в сердечнике, вокруг него и в лобовой части установившуюся симметричную форму распределения магнитного поля, в том числе поля рассеяния. Другими словами, каждая электрическая машина с любой структурой трёхфазной обмотки статора в процессе функционирования имеет определенную магнитную ауру (наподобие биологической ауры).

Понятно, это справедливо при исправно работающей машине и отсутствии неисправностей в её конструктивных узлах.

Однако при возникновении межвиткового или межфазного короткого замыкания в статоре нарушается электрическая симметрия фазных обмоток и их катушечных групп. Как следствие этого, нарушается магнитная симметрия в фазных обмотках, искажается симметричное распределение индукции.

Очевидно, в таких случаях пространственные составляющие поля рассеяния фаз не будут симметричными. Поле рассеяния лобовых частей катушек, находящихся внутри короткозамкнутого контура поврежденной фазной обмотки, будет отличаться от поля в катушках данной фазы, находящихся вне зоны указанного контура. Это главным образом обусловлено изменением соотношения числа витков и токов, протекающих в периодических катушках.

Этому может способствовать и то, что лобовые части поврежденной катушки оказываются в зоне лобовых частей неповрежденных катушек, хотя взаимоиндукция между ними слабая. Действительно, в электрических машинах для всех трехфазных обмоток расположение фазных зон и зон лобовых частей фазных обмоток имеет чередование в порядке строгой последовательности. В каждой фазе соединяются все катушечные группы, отстоящие друг от друга на двойной полюсный шаг. На каждую пару полюсов приходится по одной катушечной группе. Исходя из этого, для размещения стороны катушечных групп каждое двойное полюсное деление ( $2\tau$ ) разбивают на шесть равных участков через  $60^\circ$ .

Следует отметить, что данное обстоятельство конструктивного выполнения трехфазной обмотки дает возможность оценить техническое состояние (симметрию поля) в условиях работы путем контроля нарушения симметрии поля рассеяния в одной из указанных зон лобовой части машины. Возможно, данную диагностическую задачу можно решить также путем наружного измерения и анализа этого поля без каких-либо контактов с самой обмоткой и вмешательства в нормальный технологический режим работы машины.

Все это показывает, что значения, и характеристики пространственных составляющих поля рассеяния являются хорошими информативными параметрами диагностического контроля технического состояния электрических машин в условиях работы [27].

Сравнительно слабое магнитное поле рассеяния лобовых частей машины может контролироваться измерением его различными методами, в том числе с помощью измерения индуцированной им в измерительной катушке ЭДС, кривая которой, повторяет кривую данного поля.

Из-за нарушения симметрии фазных токов при исследованных неисправностях искажается равномерность распределения магнитной индукции, и, как следствие этого, в фазных величинах появляются дополнительные высшие гармонические составляющие. Очевидно, магнитные поля, обусловленные токами высших гармонических составляющих в фазных обмотках, в том числе в лобовых частях их катушек, могут быть охарактеризованы с помощью ЭДС этих полей [18].

Однако, в случае наружного измерения поля рассеяния в лобовых частях машины необходимо иметь в виду возможность определенного нарушения магнитной симметрии из-за появления в путях силовых линий данного потока крепительных лап, торцевых крышек, подшипниковых щитов и т.д., изменяющих магнитное сопротивление. Поэтому в данном случае имеется в виду контроль картины фактического распределения указанного поля в каждой конкретной машине.

Наиболее часто встречающимися и трудно поддающимися контролю неисправностями электрических машин являются межвитковые и межфазные замыкания в обмотке статора. Основными признаками их наблюдаемыми на практике, являются местные нагревы в обмотках статора, несимметрия токов в фазах, понижение крутящего момента, высокий уровень шума в машине и т. д.

Как видно, указанные неисправности влияют на электромагнитные, вибрационные и акустические процессы работающей машины.

Однако явное проявление этих признаков имеет место на стадиях окончательного выхода машины из строя, т. е. при возникновении металлического соединения между витками или фазами, когда в короткозамкнутом контуре протекают большие токи. На начальных же стадиях повреждений из-за наличия определенного переходного сопротивления в месте замыкания токи в короткозамкнутом контуре бывают малой величины. В таких случаях признаками повреждений бывают слабыми и требуются дополнительные целенаправленные усилия по их диагностированию.

Наличие в фазных величинах обмотки статора высших гармоник, в частности, третьей и кратных ей, обусловлено насыщением магнитной системы основным потоком намагничивания. Ток намагничивания и соответствующий ему основной поток намагничивания практически остаются постоянными при изменении нагрузки от нуля до номинальной. Остается постоянной и третья гармоника, обусловленная насыщением магнитной системы указанным потоком. При этом результирующий поток от третьей гармоники в пространстве отсутствует, так как в условиях симметричности трехфазной обмотки статора и при нагружении её симметричными токами в любой момент времени намагничивающие силы, созданные токами третьей гармоники, совпадают по фазе и их сумма равна нулю. Благодаря этому они отсутствуют в линейных величинах. Однако электрическая несимметрия обмотки статора, которая возникает при исследуемых повреждениях, определенным образом нарушает симметрию намагничивающих сил третьей гармоники в фазах. В этом случае намагничивающие силы от третьих гармоник в фазах статора представляют уже

несимметричную систему и их сумма не равняется нулю. Благодаря этому в пространстве появляется результирующий поток частоты  $3 \cdot f_1$  ( $f_1$  - частота сети): вращающийся в направлении вращения потока основной гармоники. Данный поток индуктирует в фазных обмотках ЭДС,  $E$ , значения которых определяются выражением:

$$E_{v=3} = 4,44 \cdot W_k \cdot K_{обр} \cdot 3 f_1 \cdot \Phi_{v=3} , \quad (2.14)$$

где  $W_k$  - число витков фазы.

При возникновении межвитковых и межфазных замыканий в поврежденных обмотках для токов третьей гармоники образуется отдельный самостоятельный замкнутый контур, по которому они будут циркулировать. Благодаря этому в поврежденных фазах должна происходить частичная компенсация третьей гармоники и её значение должно уменьшаться по мере увеличения тока в короткозамкнутом контуре.

Эффект происходящего явления некоторым образом подобен эффекту, получаемому при соединении обмотки в треугольник, когда с целью компенсации третьей гармоники создают замкнутый контур для обеспечения циркуляции токов указанной гармоники, и это является одной из радикальных мер улучшения формы кривой напряжения [19].

При этом одновременно электрическое замыкание в фазных обмотках должно привести к определенному увеличению значения третьей гармоники и неповрежденных фаз, так как увеличение тока в короткозамкнутом контуре усиливает несимметрию токов в фазах, что приводит к увеличению результирующего потока от токов третьей гармоники и, как следствие, к увеличению ЭДС. Все это свидетельствует о информативности третьей гармоники и определяет эффективность использования, ее в качестве параметра диагностического контроля. Что касается 5-й, 7-й и других, не кратных трем, гармоник, как известно из теории, сумма МДС и фазовых от этих гармоник не равняется нулю. В результате этого в воздушном зазоре данные гармоники имеют свои результирующие потоки. При этом они выходят и на линейные величины и находятся также под влиянием сети. Все это делает их по сравнению с третьей гармоникой менее информативными, т.е. малопригодными для диагностического контроля.

Характерное влияние неисправностей на третью гармонику - уменьшение ее в поврежденных фазах (в одной фазе при межвитковых и двух фазах при межфазных замыканиях) и увеличение в неповрежденных фазах, является очень ценной диагностирующей информацией для распознавания этих неисправностей на начальных стадиях их возникновения.

Известно, что межфазные замыкания часто являются следствием первоначальных межвитковых замыканий и явное появление их сопровождается почти идентичными признаками, что затрудняет точное распознавание этих повреждений в работающей машине.

Фазу, имеющую межвитковое замыкание, можно найти по несимметрии

потребляемого тока из сети. При схеме соединения обмотки статора в звезду ток в поврежденной фазе будет больше, чем в других; при соединении схемы обмотки статора в треугольник ток в двух фазах будет больше, чем в третьей фазе. Однако в условиях работы это можно обнаружить на последних стадиях повреждения, следует отметить, что если не учитывать определенного изменения шума, вибрации и других динамических проявления процессов функционирования, то при рассмотренных степенях тяжести исследованных неисправностей машины практически работали нормально (некоторые непосредственно в цикле технологического режима) и явных изменений основных показателей не наблюдалось. Исследования в данной области показывают, что указанные электрические повреждения существенно влияют на значения гармонических составляющих фазного тока - при соединении обмотки статора в треугольник и фазного напряжения - при соединении её в звезду. При этом изменение в линейных параметрах слабое.

### 2.3 Математическая модель проявления дефектов

Внешнее магнитное поле электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы. Это в первую очередь относится к многополюсным машинам, собственное магнитное поле которых имеет мультипольный характер, определяемый числом пар полюсов. Несимметрии нарушают этот мультипольный характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник индукции, в том числе дипольную гармонику, спадающую с расстоянием от электрической машины наиболее медленно.

Одной из несимметрий, существенно влияющих на уровень внешнего магнитного поля электрических машин, является несимметрия основного воздушного зазора, вызванная, в частности, статическим эксцентриситетом ротора. Статический эксцентриситетом ротора является наиболее часто встречающимся видом несимметрии в электрической машине. Причины его появления - неточность установки ротора относительно расточки статора и выработка подшипников в процессе эксплуатации.

Текущее значение магнитной индукции в зазоре машины

$$B_{\varphi} = F_{\varphi} \cdot \lambda_{\varphi}, \quad (2.15)$$

где  $F_{\varphi}$  - текущее значение магнитодвижущей силы.

Основная гармоника намагничивающей силы в машине переменного тока

$$F_{\varphi} = F_{\mu} \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (2.16)$$

Магнитная индукция в зазоре при подстановке (2.16) в (2.17)

$$B = B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot (1 - \varepsilon \cos \varphi + \varepsilon^2 \cos^2 \varphi - \varepsilon^3 \cos^3 \varphi + \dots), \quad (2.17)$$

где  $B_m$  - максимальное значение основной гармоники магнитной индукции при симметричном положении ротора:

$$B_m = F_m \lambda_0 \quad (2.18)$$

Получим после преобразований (2.15) следующее выражение для магнитной индукции в воздушном зазоре машины:

$$\begin{aligned} B_{\varphi} = & B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot (1 + 0,5 \varepsilon^2 + \dots) - \\ & - 0,5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-1) \cdot \varphi) \varepsilon \cdot (1 + 0,75 \varepsilon^2 + \dots) - \\ & - 0,5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+1) \cdot \varphi) \varepsilon \cdot (1 + 0,75 \varepsilon^2 + \dots) + \\ & (2.19) \\ & + 0,25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + 0,75 \varepsilon^2 + \dots) + \\ & + 0,25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + 0,75 \varepsilon^2 + \dots) - \end{aligned}$$

Анализ (2.16) показывает, что наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению в зазоре электрической машины спектра гармоник магнитной индукции с порядком выше и ниже основной. Наиболее ярко выраженными являются гармоники порядка  $(p-1)$  и  $(p+1)$ .

Чем больше отличие порядка гармоники от основной, тем меньше её уровень, что связано с числовым коэффициентом при  $B_m$  и с возрастающей степенью относительного эксцентриситета, который всегда меньше единицы.

Появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины.

Учитывая то обстоятельство, что индукция внешнего магнитного поля с удалением от источника спадает по закону  $B = 1/R^{n+2}$  где  $n$  - порядок магнитного мультиполя, на уровне основного внешнего магнитного поля порядка  $p$  можно пренебречь гармониками порядка  $(p+k)$  в связи с их более быстрым спаданием.

Можно также в (2.16) пренебречь составляющими в скобках с  $\varepsilon^2, \varepsilon^1, \dots$ , так как всегда  $\varepsilon < 1$ .

Для простоты расчетов рассмотрим сначала влияние статического эксцентриситета на ВМП машины переменного тока [20].

Для простоты рассмотрения будем считать, что эксцентриситет расположен по одной оси ( $\varphi=0$ ). Тогда во внешнем магнитном поле рассматриваемой машины имеются только коэффициенты ряда  $Mgnm$ .

Рассмотрим влияние статического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле машин различной полюсности, как указано ранее, членами с порядком  $n \leq p$  и эксцентриситетом  $\varepsilon$  в степени  $k \leq 2$ .

Для двух полюсной электрической машины ( $p=1$ ):  
магнитная индукция внешнего магнитного поля машины:

$$B_R = B_0 \cos \varphi - \varepsilon B_1 + \varepsilon^2 B_2 \cos \varphi ; \quad (2.20)$$

при  $n=1$  и  $2$ ,  $m=0$  и  $1$  магнитная индукция внешнего магнитного поля:

$$\begin{aligned} \varphi + \dot{\iota} \frac{\mu_0}{4 \pi R^4} \cdot M_{20}, \\ B_R = \frac{\mu_0}{4 \pi R^3} \cdot M_{11} \cos \dot{\iota} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Приравнивая первые части (2.20) и (2.21) с учётом метода разделения переменных, находим значения магнитных моментов:

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{4 \pi R^3}{\mu_0} \cdot (B_0 + \varepsilon^2 B_2) ; \\ M_{20} &= \frac{4 \pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Из анализа формул следует, что статический эксцентриситет у двухполюсной машины несколько увеличивает собственный магнитный момент (добавка пропорциональна  $c^2$ ) и приводит к появлению квадруполья  $M_{20}$  радиальная компонента магнитной индукции которого в плоскости  $\theta = \frac{\pi}{2}$  не зависит от координаты  $\varphi$ . В целом влияние статического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле двухполюсной машины незначительно. Для четырёхполюсной машины ( $p=2$ ):

магнитная индукция внешнего магнитного поля

$$B_R = B_0 \cos 2\varphi - \varepsilon B_1 \cos \varphi + \varepsilon^2 B_2 ; \quad (2.23)$$

для  $n=1,2$ ;  $m=0,1,2$  (дипольно квадрупольная модель) магнитная индукция внешнего магнитного поля машины

$$\begin{aligned} \varphi + \dot{\iota} \frac{\mu_0}{4 \pi R^4} \cdot M_{20} + \frac{3 \mu_0}{4 \pi R^4} \cdot M_{22} \cos 2\varphi \\ B_R = \frac{\mu_0}{4 \pi R^3} \cdot M_{11} \cos \dot{\iota} \end{aligned} , \quad (2.24)$$

Приравнивая правые части (2.24) и (2.25), находим значение магнитных

МОМЕНТОВ:

$$M_{11} = \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1 ;$$

$$M_{20} = \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon^2 B_2 ;$$
(2.25)

$$M_{33} = \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot B_0$$

Из анализа формул следует, что статический эксцентриситет у четырёхполюсной машины приводит к появлению магнитного диполя  $M_{11}$ , магнитный момент которого пропорционален  $\varepsilon$ , и осевого квадруполья  $M_{20}$  магнитный момент которого пропорционален  $\varepsilon^2$ . Собственный магнитный момент машины  $M_{22}$  при этом практически не изменяется. Так как внешнее магнитное поле магнитного диполя спадает наиболее медленно с удалением от машины, можно заключить, что статический эксцентриситет оказывает существенное влияние на уровень внешнего магнитного поля четырёх полюсной электрической машины, определяя её внешнее магнитное поле на «далёких» расстояниях (вместе с другими несимметриями, вызывающими появление у четырёх полюсной машины дипольного магнитного момента).

Для шести полюсной машины ( $p=3$ ):

магнитная индукция внешнего магнитного поля

$$B_R = B_0 \cos 3\varphi - \varepsilon B_1 \cos 2\varphi + \varepsilon^2 B_2 \cos \varphi ;$$

для  $n = 1,2,3$ ;  $m = 0,1,2,3$  (дипольно – квадрупольно - октупольная модель) индукция внешнего магнитного поля машины

$$2\varphi + i \frac{15\mu_0}{4\pi R^5} \cdot M_{33} \cos 3\varphi ,$$

$$\varphi + i \frac{\mu_0}{4\pi R^4} \cdot M_{20} + \frac{3\mu_0}{4\pi R^4} \cdot M_{22} \cos i$$

$$B_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} \cdot M_{11} \cos i$$

Отсюда,

$$M_{11} = \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot \varepsilon^2 B_2 ;$$

$$M_{20} \approx 0 ;$$

$$M_{22} = \frac{4\pi R^3}{3\mu_0} \cdot \varepsilon B_1 ;$$

$$M_{33} = \frac{4\pi R^3}{15\mu_0} \cdot B_0.$$

Из анализа полученных выражений следует, что статический эксцентриситет у шестиполусной машины приводит к появлению диполя  $M_{11}$ , магнитный момент которого пропорционален  $\varepsilon^2$ , и магнитного квадруполья  $M_{22}$ , магнитный момент которого пропорционален  $\varepsilon$ . Собственный (октупольный) магнитный момент машины при этом практически не изменяется.

Таким образом, статический эксцентриситет вызывает у электрических машин наиболее существенные с точки зрения внешнего магнитного поля магнитный диполь, магнитный момент которого пропорционален  $M_a = \varepsilon^{p-1}$ . Наиболее существенно это проявляется четырехполусных машин ( $p=2$ ).

Влияние статического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле машин переменного тока аналогично его влиянию в машинах постоянного тока. Отличие связано с тем, что магнитное поле в зазоре машин переменного тока вращается. Поэтому все магнитные индукции и магнитные моменты являются синусоидальными функциями времени [21].

Сопоставление формул для четырехполусной машины показывает, что направление магнитного момента диполя, вызванного статическим эксцентриситетом ротора, зависит от взаимного расположения полюсов и эксцентриситета и определяется углом  $\varphi_m = 2(\varphi_\varepsilon - \varphi_N)$ , где  $\varphi_\varepsilon$  - направление эксцентриситета и  $\varphi_N$  - направление северного полюса машины, ближайшего к направлению эксцентриситета.

Учитывая то обстоятельство, что значительное число электрических машин выполняются с числом полюсов  $2p = 4$ , наличие дипольной составляющей индукции в их внешнем магнитном поле (дипольно магнитного момента) может служить диагностическим признаком статического эксцентриситета.

Из вышесказанного можно сделать выводы:

- наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению во внешнем магнитном поле многополусных электрических машин пространственных гармоник, порядок которых ниже порядка основной пространственной гармоники и которые в значительной мере определяют уровень внешнего магнитного поля электрической машины.
- наибольшее влияние статический эксцентриситет оказывает на уровень внешнего магнитного поля четырёхполусных электрических машин.
- наличие дипольной составляющей индукции во внешнем магнитном

поле четырёхполюсных электрических машин и её изменение в процессе эксплуатации может служить диагностическим признаком выработки подшипников. Проявление витковых и фазных замыканий во внешнем магнитном поле электродвигателя.

Рассмотрим поле двухполюсной машины, создаваемое катушкой с полным шагом, уложенной на поверхности равномерного воздушного зазора.

Если принять для стали  $\mu = \infty$  и пренебречь искажением поля около проводников катушки, то распределение  $B_\delta$  вдоль зазора будет представлено в виде прямоугольной волны. Связь между полным током катушки  $w_k i_k$ , где  $w_k$  — число витков в катушке и  $i_k$  — ток в ней, и напряженностью поля  $H$  определяется законом полного тока

$$w_k i_k = \int H dl, \quad (2.26)$$

причем интегрирование производится по любому замкнутому контуру, охватывающему катушку.

Если принять для стали  $\mu = \infty$ , то напряженность магнитного потока в стали  $H = 0$ . Кроме того, поскольку величина зазора  $\delta$  мала по сравнению с полюсным делением  $\tau$ , то можно считать, что магнитные линии пересекают зазор радиально, напряженность поля вдоль воздушного зазора постоянна по величине и изменяется по направлению а, б.

При этих условиях

$$\int H dl = 2 \delta H, \quad (2.27)$$

и, следовательно,

$$w_k i_k = 2 \delta H, \quad (2.28)$$

откуда

$$H = \frac{1}{\delta} \frac{w_k i_k}{2}. \quad (2.29)$$

Таким образом, мгновенное значение индукции поля в зазоре в данной точке будет

$$B_{[i.a]} = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{w_k i_k}{2} = \lambda_\delta F_{ki}, \quad (2.30)$$

где  $\lambda_\delta$  - удельная проводимость воздушного зазора;

$F_{ki}$  - намагничивающая сила (н.с), необходимая для проведения магнитного потока через один воздушный зазор,

Н. с. катушки изменяется вдоль зазора в виде прямоугольной волны с высотой  $F_{ki}$ .

При равномерном зазоре и при ненасыщенной стали кривая индукции вдоль зазора повторяет по форме кривую н.с так как  $\lambda_\delta = \text{const}$ .

Таким образом, в основу исследования магнитного поля воздушного зазора можно положить определенную указанным образом н. с. катушки обмотки.

Для удобства анализа происходящих в машине процессов кривую поля в зазоре и соответственно кривую н. с. разложим на гармонические.

Кривая н.с. катушки с полным шагом вследствие своей симметрии относительно оси абсцисс содержит только нечетные гармонические ( $v = 1, 3, 5, \dots$ ) и, когда ось ординат выбрана по оси катушки, может быть записана в виде:

$$F_{[l,\delta]} = F_{ki1} \cos \alpha + F_{ki3} \cos 3\alpha + F_{ki5} \cos 5\alpha + \dots \quad (2.31)$$

При протекании по катушке переменного тока, уравнение (2.31) будет представлять собой сумму пульсирующих волн н.с., так как их амплитуды  $F_{kiv}$  будут изменяться во времени по синусоидальному закону.

Намагничивающая сила группы катушек с полным шагом. Рассмотрим  $q$  катушек с полным шагом, уложенных на протяжении двойного полюсного деления и принадлежащих одной фазе [22].

Основные гармонические н.с. отдельных катушек группы с амплитудой  $F_{kt1}$ , складываясь, дадут основную гармоническую н.с. группы с амплитудой  $F_{i1}$ . Ось н.с., группы будет расположена по оси группы катушек. Следовательно, изменяющиеся в пространстве  $q$  н. с., сдвинутых относительно друг друга на угол  $\gamma$ , мы можем представить, так же как и при сложении  $q$  синусоидально изменяющихся во времени э. д. с.  $q$  векторами со сдвигом на угол  $\gamma$  относительно друг друга.

Намагничивающая сила трехфазной обмотки. При трехфазном токе мы имеем на якоре машины три системы обмоток, сдвинутых в пространстве на углы  $120^\circ$  и  $240^\circ$  градусов и питаемых синусоидальными токами, сдвинутыми во времени на те же углы  $120^\circ$  и  $240^\circ$ .

Результирующая н. с. для каждой гармонической в отдельности может быть найдена сложением данных гармонических всех трех фаз.

Отсюда следует, что основная гармоническая результирующей н. с. трехфазной обмотки представляет собой уже не пульсирующую в пространстве волну, как для одной фазы обмотки, а правобегущую волну по окружности статора. Амплитуда этой волны равна результирующей н.с.

основной гармонической на один полюс:

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{об1}}{p} I = 1,35 \frac{\omega k_{об1}}{p} I \quad (2.32)$$

Аналогичным путем можно легко показать, что при любом другом числе фаз  $mt$  и сдвиге токов в них во времени на тот же угол, амплитуда основной волны н.с, будет

$$F_1 = \frac{m}{2} F_{\phi 1} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{об1}}{p} I = 1,45 \frac{m\omega k_{об1}}{p} I \quad (2.33)$$

Для определения скорости перемещения синусоидальной волны н.с. основной гармонической вдоль воздушного зазора, определяемой уравнением, возьмем на ней какую-либо точку, жестко связанную с этой волной и перемещающуюся вместе с ней. Для такой точки  $\sin(\omega t - a) = \text{const}$  или  $\omega t - a = \text{const}$ . Дифференцируя это выражение по времени  $t$ , получаем:  $\omega - \frac{da}{dt} = 0$ , откуда угловая скорость вращения волны

$$\omega = \frac{da}{dt} ,$$

(2.34)

т.е. любая точка, связанная жестко с вращающейся волной н.с. перемещается по окружности статора с угловой скоростью  $\omega$ .

Содержание вышеприведенного математического анализа н.с. обмотки статора в отношении ее основной гармонической может быть сформулировано следующим образом [23].

При наличии на статоре трех синусоидальных н.с. сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$  градусов и пульсирующих со сдвигом во времени на  $120^\circ$ , каждую из них заменяем двумя бегущими в противоположные стороны синусоидальными н.с. с амплитудами, равными половине амплитуды пульсирующей н.с; при этом н.с. бегущие в сторону, противоположную вращению ротора, взаимно уничтожаются, как смещенные относительно друг друга на  $120^\circ$ , а н.с. бегущие в сторону вращения ротора, совпадают друг с другом и в пространстве дают результирующую синусоидальную их, бегущую синхронно с ротором, с амплитудой, равной  $\frac{3}{2}$  максимальной амплитуды пульсирующей н.с.

Аналогичным образом можно сложить н.с. любой высшей гармонической всех трех фаз. Для  $v=3$  при этом получим:

$$F_{a5} = \frac{(\omega t + 5a) = i F_5 \sin(\omega t + 5a)}{F_5 \left( \sin \omega t \cos 5a + \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos 5a \left( a - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \cos 5a \left( a - \frac{4\pi}{3} \right) \right)} = \frac{3}{2} F_{a5} \sin i$$

(2.35)

а для  $v = 5$

$$F_{a5} = \frac{(\omega t + 5a) = i F_5 \sin(\omega t + 5a)}{F_5 \left( \sin \omega t \cos 5a + \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos 5a \left( a - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \cos 5a \left( a - \frac{4\pi}{3} \right) \right)} = \frac{3}{2} F_{a5} \sin i$$

(2.36)

В выражении результирующей н. с. все гармонические порядка  $v=3k$  (кратные трем) исчезают. Все гармонические порядка  $v = 6k - 1$ , т. е.  $v=5, 11, 17$ , имеют множитель  $\sin(t' + va)$  и поэтому двигаются влево - напротив направления вращения основной волны.

Все гармонические порядка  $v = 6k + 1$ , т. е.  $v=1, 7, 13, \dots$ , имеют множитель  $\sin(t' + va)$  поэтому двигаются вправо, т. е. по направлению движения основной волны и ротора.

Магнитное поле обмотки переменного тока. При равномерном воздушном зазоре и отсутствии насыщения магнитная индукция в зазоре в пропорциональна н.с.  $F_a$  :

$$B = \lambda_b F_a$$

При наличии зубцов и пазов магнитное поле искажается. Таким образом, при неравномерности зазора, вызванной наличием зубцов и пазов, для вычисления основной гармонической поля, созданной основной гармонической н. с. проводимость зазора нужно принять равной

$$\Lambda_a = \mu_0 / (k_s \delta) \quad (2.37)$$

Если сталь насыщена, то магнитная индукция в зазоре также уменьшается, а кроме того, и искажается. Например, основная гармоническая н. с. при наличии насыщения стали создает уже не синусоидальную форму поля, а приплюснутую. Однако это искажение сравнительно невелико, так как вследствие наличия воздушного зазора и умеренных индукций в стали при нормальных режимах работы магнитное сопротивление стальных участков магнитной цепи относительно мало. Можно считать, что амплитуда основной гармонической поля от основной гармонической н.с. уменьшается. Степень этого уменьшения соответствует коэффициенту насыщения  $k$ , равному при данном магнитном состоянии стали отношению всей н.с. магнитной цепи к н.с. воздушного зазора. Коэффициент  $k_\mu$  определяем по данным расчета магнитной

цепи из кривой холостого хода машины.

Следовательно, с учетом зубчатости поверхностей воздушного зазора и насыщения проводимость воздушного зазора при расчете основной гармонической поля нужно принять равной

$$\lambda\delta = \mu_0 / (k\delta k\mu\delta) \quad (2.38)$$

Сложнее обстоит дело с высшими гармоническими н.с. на поле которых неравномерность зазора оказывает большее влияние. Неравномерность зазора приводит, кроме того, к появлению дополнительных гармонических поля.

Чтобы смоделировать ВМП при витковых и фазных замыканиях сначала необходимо получить картину магнитного поля в воздушном зазоре АД.

Отметим, что указанные неисправности (электрическая и магнитная несимметрии обмоток статора и ротора) основательно исследованы, влияние их на электромагнитные и другие физические процессы, в том числе на высшие гармонические и спектральные составляющие магнитных полей известно из теории электрических машин переменного тока. Здесь же оно рассматривается на предмет получения диагностирующей информации на основе анализа данных, полученных из натурно-экспериментальных исследований этих неисправностей, проведенных по специальной методике [24].

Сущность методики заключается в том, что задавая неисправности искусственно, путём их физического моделирования, контролируются и анализируются изменения свойств динамических проявлений электромагнитных процессов в АД, в его ВМП.

В результате проведения экспериментов было установлено, что неисправности обмотки машины существенно влияют на уровень её ВМП, а именно появляется третья гармоническая магнитного поля.

Для обоснования и целенаправленного анализа полученных экспериментальных данных коротко рассмотрим физические процессы и явления при возникновении исследованных неисправностей в машине, основываясь на известных из теорий электрических машин положениях и выводах. В данном случае нет необходимости глубоко их раскрывать.

Известно, что в симметричной трехфазной обмотке статора электрической машины образуется гармоника порядка  $v = 6k \pm 1$ , где  $k = 0, 1-2, 3, \dots$

МДС каждой отдельной фазы обмотки статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени всех гармонических составляющих.

Результирующая МДС машины для каждой гармонической составляющей в отдельности являются суммой соответствующих гармонических всех трех фаз. В условиях симметрии обмоток и нагружения машины симметричными токами в любой момент времени МДС, созданные токами третьей и кратных ей гармоник в обмотке статора, три фазы которой сдвинуты на  $120^\circ$ , совпадают по фазе и их сумма равна нулю. Таким образом, хотя три фазные обмотки статора имеют свои пульсирующие во времени и неподвижные в пространстве МДС третьей гармоники, результирующий поток от данной гармоники в воздушном

зазоре машины отсутствует.

Наличие в фазных напряжениях или фазных токах обмотки статора электрической машины третьей гармоники обусловлено насыщением магнитной системы основным потоком намагничивания, определяемым значением намагничивающего тока. Ток намагничивания и соответствующий ему основной поток намагничивания при изменении нагрузки от нуля до номинальной практически не изменяются. Остается постоянной и третья гармоника, обусловленная насыщением магнитной системы указанным потоком. Таким образом, третья гармоника (и кратные ей) определенным образом является симметричной в фазных обмотках и фиксированной величиной в фазных величинах статора машины.

При соединении обмотки статора в звезду гармоники третьего и кратного трём порядка содержатся только в фазовом напряжении и исчезают в линейном напряжении, так как при образовании линейного напряжения они взаимно уничтожаются. При соединении обмотки в треугольник третья и кратные ей гармоники содержатся в фазовых токах и не могут выходить на линейные токи. В последнем случае происходит полная компенсация данных гармоник в процессе циркуляции их токов в замкнутом треугольнике. Известно, что эффект указанного явления широко используется для улучшения формы кривой напряжения как радикальная мера, когда с целью компенсации третья гармоника соединением трехфазной обмотки в треугольник создают замкнутый контур для этих гармоник [25].

Однако при возникновении рассматриваемых неисправностей нарушаются электрическая и магнитная симметрии обмоток статора и ротора и, как следствие этого, определенным образом нарушается симметрия МДС третьей гармоники в фазных обмотках.

В этих случаях МДС третьих гармоник в трех фазах статора представляют уже несимметричную систему и их сумма не равняется нулю. В результате этого в пространстве воздушного зазора машины появляется результирующая МДС частоты  $3f_1$ , ( $f_1$  - частота сети), индуктирующая в обмотке статора ЭДС частоты  $3f$ , а в обмотке ротора - частоты  $3f_s$  ( $s$  - скольжение).

При возникновении межвитковых и межфазных замыканий в обмотке статора в повреждённых фазных обмотках для токов третьей гармоники образуется отдельный самостоятельный замкнутый контур, где они будут циркулировать.

Подобно эффекту, получаемому при соединении обмотки в треугольник, в повреждённых фазных обмотках должна происходить компенсация высших гармонических составляющих, в том числе третьих гармонических.

Благодаря этому, в фазных величинах повреждённых фаз значение данных гармоник должно уменьшаться по мере увеличения тока в короткозамкнутом контуре, т.с. по мере усиления степени тяжести их повреждений.

Одновременно электрические замыкания в фазных обмотках должны привести к определенному увеличению значения третьей гармоники в неповреждённых фазах, так как увеличение тока в короткозамкнутом контуре усиливает несимметрию токов в фазах.



$$\begin{aligned}x(t+\Delta t) &= f(x, u; t); \\y(t) &= g(x, u; t).\end{aligned}\tag{2.39}$$

Эта система уравнений отражает связи между функциями входа  $u(t)$ , состояния  $x(t)$  и выхода  $y(t)$ .

При решении задач автоматизации, мы должны сделать выбор между устройством управления с жестким алгоритмом работы и программируемым устройством управления. В последнем случае придется подбирать соответствующий программируемый контроллер. Прежде чем рассмотреть эти вопросы, вспомним о цели автоматизации и функции устройств управления [26].

Цели автоматизации. Условия острой конкуренции современного рынка вынуждают промышленные фирмы строго выдерживать параметры производства, необходимые для удовлетворения спроса, т. е. производить изделия стабильного качества, выпускать их в необходимом количестве (адаптивность), снижать себестоимость изделий. Иными словами, очень важно не только сохранить рынок, но и приспособиться к его изменениям (снижению стоимости, возрастающей технологической сложности изделий).

К этим факторам следует также отнести улучшение условий труда, поскольку оно все настойчивее становится одной из главных целей автоматизации.

Функции автоматических устройств управления. Степень автоматизации объекта управления в значительной степени зависит от его природы, сложности, знаний, которыми мы о нем располагаем, а также от целей, предусмотренных проектом. Например, задача обеспечения безопасной работы шахты выглядит совершенно иначе, чем задачи автоматизации управления лифтами или устройствами кондиционирования воздуха в шахте. Различают три степени автоматизации.

Контроль параметров даёт возможность знать технико-экономические параметры объекта управления. В этом случае можно говорить лишь о пассивной функции по отношению к объекту, по крайней мере, в течение короткого промежутка времени. Управляющее устройство собирает и анализирует информацию, ведет рабочие журналы и подводит итоги работы.

Для непрерывных процессов, описываемых аналоговыми величинами (в химической и других отраслях промышленности), это были бы функциональные уравнения (дифференциальные уравнения, уравнения состояния, передаточные функции).

Операторный режим в дополнение к предыдущей степени автоматизации обеспечивает более совершенную обработку информации и выработку конкретных предложений, направленных на решение задач управления в соответствии с определенным критерием. Полученная таким образом система является все еще разомкнутой системой, т. е. непосредственного воздействия на объект управления она не оказывает. Замыкание контура системы осуществляет сам оператор.

При автоматическом управлении создается замкнутая система. За счет получения информации, ее обработки и воздействия на объект управления обеспечивается полная автоматизация определенных функций. Оператор не участвует в процессе управления и осуществляет лишь функции наблюдения. В случае неполадок оператор берет управление на себя. При необходимости он использует операторный режим, соответствующий работе системы с более низкой степенью автоматизации.

Для полноты описания устройств управления введём ещё понятие «уровень автоматизации», поскольку указанные выше функции могут быть простыми и сложными в зависимости от характера автоматизируемого объекта или его части.

Элементарный уровень автоматизации предполагает автоматизацию работы простой машины или её части. Это может быть обеспечение безопасности оператора, последовательность выполнения операций, наблюдение за машиной в период ее работы на холостом ходу или же автоматизация процесса установки заготовок. Чаще всего элементы автоматики такого рода предусматриваются на этапе создания самой машины.

Следующий, более высокий уровень автоматизации касается более сложной машины или комплекса простых машин. Поскольку речь идет об управлении работой этих машин, то разработка и внедрение средств автоматизации осуществляются пользователем. Это традиционная сфера внедрения средств промышленной автоматики.

Третий уровень автоматизации охватывает технологический процесс или весь комплекс технологического оборудования. В этом случае процесс автоматизации может оказаться достаточно сложным и потребовать использования весьма совершенной техники. Он может затронуть не только технические параметры, но и экономические факторы, такие, как наличие заказов на продукцию, конкретные характеристики изделий, оптимизация экономических показателей деятельности предприятия.

И, наконец, уровень интегрального управления, когда решается задача осуществления связи производства с управлением.

Устройство жесткой логики отличается тем, что для его реализации необходимо и достаточно создать материальные связи (выполнить проводку) в соответствии с разработанной теоретически или полученной опытным путем принципиальной схемой [27, 28].

Схема решения задачи автоматизации показана на рисунке 2.2.

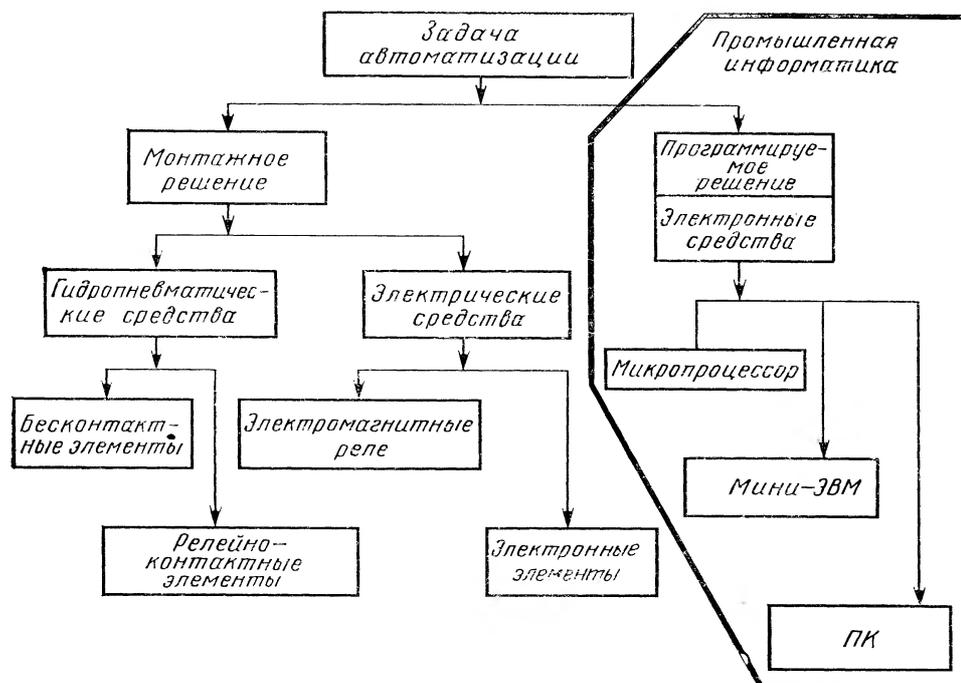


Рисунок 2.2. Схема решения задачи автоматизации

В электротехнике или электронике эти связи выполняются электрическим проводом. В пневмогидравлических системах - это трубопроводы, связывающие различные элементы. Каждая функция уравнений физически представляется в виде цепи

Эти схемы, как и булево уравнение, отображают решение задачи управления. Однако они не определяют варианты практического воплощения, который может быть реализован, например, в виде пневматического устройства.

Простота приведенного примера не позволяет показать уровень сложности соединений, применяемых в распространенных схемах. Стремительно развивающаяся полупроводниковая технология предоставляет в распоряжение конструктора, работающего над созданием устройств управления, интегральные микросхемы, выполненные на кристалле небольших размеров и осуществляющие такие функции, как прямой и обратный счет и др.

Высокое качество устройств управления с жесткой логикой различных видов, способствовало их широкому внедрению в промышленность (50 % всех устройств управления). Однако они имеют ряд недостатков: большие габариты и массу; недостаточную гибкость при редактировании и доводке программ (при внесении изменений, введении новых функций и др.); трудность использования для решения сложных задач управления; сложность диагностирования, а следовательно, и ремонта; низкую рентабельность при реализации сложных функций (20-30 реле), в этом случае целесообразнее применять программируемые устройства логического управления.

Программируемые устройства логического управления относятся к числу средств информатики, т. е. к машинам, предназначенным для обработки информации. Их использование в управлении и при выполнении расчетов для

научных целей общеизвестно. Применение программируемых устройств логического управления в технике относится к сфере промышленной информатики.

Промышленная информатика соединяет теорию автоматики с информатическими средствами для решения производственных задач. Информатика дает возможность альтернативного выбора вычислительных средств и открывает новые возможности, связанные с их высокой вычислительной мощностью и легкостью сохранения информации.

Примерно в 1970 г. появилось специализированное устройство - программируемый контроллер.

Программируемый контроллер - это электронная машина предназначенная для управления последовательными логическими процессами в условиях промышленной среды в реальном масштабе времени.

Можно перечислить характеристики программируемых устройств логического управления. Основные определения. Устройства жесткой логики позволяют производить параллельное решение уравнений, описывающих алгоритм управления объектом, за счет одновременного использования всего комплекса логических операторов, связанных проводкой.

В любой момент времени процессор выполняет только одну команду. Данные должны находиться в памяти, чтобы ими можно было воспользоваться, когда они потребуются. Указания о том, каким образом нужно работать с данными, т. е. весь набор команд, управляющих работой процессора, также хранятся в памяти и последовательно выдаются процессору.

После отработки команды результат, содержащийся в ячейке памяти процессора, называемой аккумулятором, передается в память, если это промежуточный результат, или выдается из машины. Генератор тактовых импульсов (на схеме не показан) позволяет синхронизировать этапы отработки команд и их последовательное чередование.

Программируемые устройства логического управления (рис. 2.3) отличаются последовательным подходом к решению той же задачи с использованием процессора, которому с помощью соответствующих команд можно сообщить, какие операции он должен выполнять в данный момент и на каких сигналах.

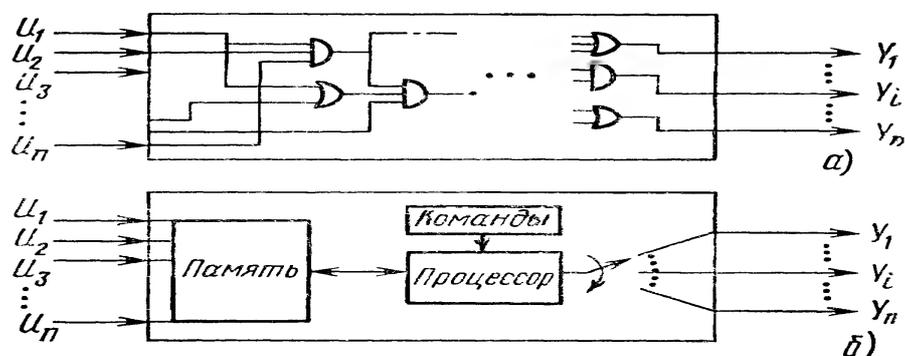


Рисунок 2.3. Принципиальная схема устройства логического управления с жестким алгоритмом работы (а) и программируемого устройства логического

## управления (б)

Команда - это распоряжение, выполняемое программируемым устройством логического управления. Процессор выполняет не любые команды, а только те, которые входят в набор команд, заложенных в его память. Любая булева функция может быть реализована с помощью операторов (И, ИЛИ, НЕ), поэтому следовало бы полагать, что набор команд программируемого контроллера может быть ограничен этими тремя операторами, но на самом деле это не так. Можно было бы также предположить возможность создания машины лишь с одним из операторов И - НЕ или ИЛИ - НЕ, каждый из которых сам по себе является функционально полным, т. е. эквивалентным группе операторов (И, ИЛИ, НЕ).

Память - это функциональная часть программируемого контроллера, предназначенная для хранения информации [29].

Устройство логического управления называется программируемым, если при его использовании в работе выполняются записанные в его память команды. Такое устройство отделяет процесс работы объекта управления от процесса обработки данных, осуществляемого выполнением последовательности команд, соответствующих решению уравнений управления.

Программа - это последовательность команд, обеспечивающая необходимую обработку информации.

Структура (или формат) команд.

Команда должна четко предписывать процессору, «что» и «с чем» делать. Одна часть команды, называемая кодом операции (КО), указывает, «что» нужно делать, а другая часть, адрес операнда (АО), уточняет, «с чем» это нужно делать.

Код операции находится в наборе машинных команд (И, ИЛИ и др.). Данные, к которым относится определенная кодом команда, указываются адресом памяти, т. е. участком памяти (в виде последовательности ячеек с номерами от нуля до  $n$ ), где они хранятся (рис. 2.4). Этим обеспечивается косвенный доступ к информации, что позволяет в соответствии с одним и тем же алгоритмом осуществлять обработку различных данных.

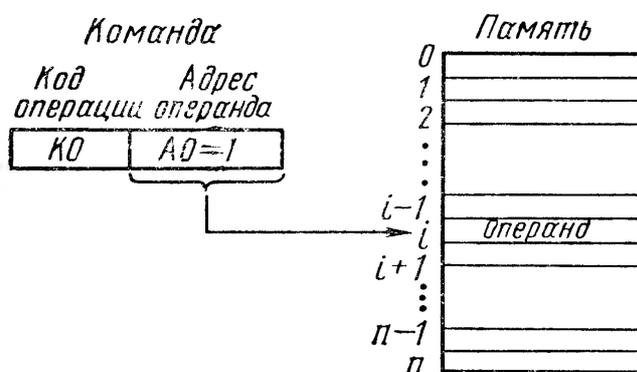


Рисунок 2.4. Структура одноадресной команды

Команды такого типа (КО, АО) называются одноадресными. Именно они в

основном и применяются в программируемых устройствах логического управления. Лишь в отдельных крупных ЭВМ используются команды с двумя или тремя адресами (первый операнд, второй операнд, адрес результата).

Одноадресная структура является достаточной для представления таких односложных функций, как ДОПОЛНЕНИЕ, СДВИГ, СТЕПЕНЬ при данном основании (например,  $x \rightarrow 2^x$ ). При реализации более сложных функций, т. е. при выполнении операций с двумя операндами, возникает необходимость косвенной адресации памяти, содержащей второй операнд. Речь идет об аккумуляторе процессора, где производится операция и хранится ее результат после выполнения команды. Таким образом, в наборе команд имеются коды (возможно, косвенного свойства), позволяющие загрузить аккумулятор содержимым памяти или же, наоборот, переслать содержимое аккумулятора в память.

При написании программ проявляется последовательный характер обработки информации. Сами команды программы записаны в зону памяти, называемую программной памятью. Как и данные, команды имеют свои адреса. Развитие программируемых устройств логического управления обязано быстрдействию процессора, который, выполняя отдельные операции примерно за 1 мкс, создает в сравнении с продолжительностью производственного процесса впечатление, что все логические функции решаются одновременно.

Отсутствие непосредственной связи между физическими ( $u_i$ ) и логическими ( $U_i$ ) переменными обеспечивает большую гибкость использования программируемых устройств логического управления.

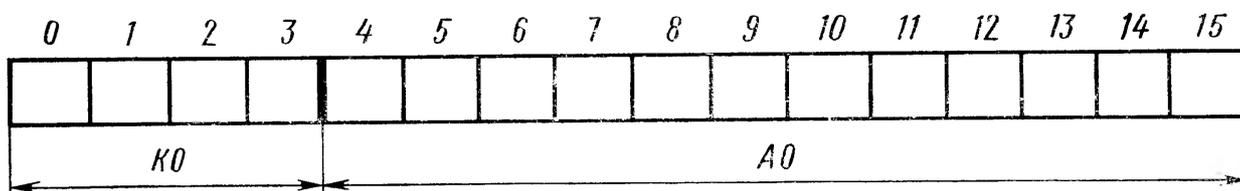


Рисунок 2.5. Двоичная структура 16-битовой команды

Внутренний код команд и данных. Внутренние структуры программируемой и жесткой логики подобны. Физическая переменная дискретного (двоичного) типа становится в контроллере двоичным элементом, или битом (binary digit - двоичная цифра). Бит является единицей измерения количества информации [30].

Известно, что  $n$  бит позволяют закодировать  $2^n$  комбинаций. Чтобы отобразить машинную команду, необходимо соединить несколько бит в логическую цепочку, называемую словом. Длина слова, выраженная числом содержащихся в нем бит, является одной из характеристик логики. Большинство современных машин работают с 16-битовыми словами. В этом случае команда принимает форму, показанную на рис. 2.5, где КО определен 4 бит (16 команд); а 12 бит резервируются для адреса, что позволяет иметь доступ непосредственно к 2048 позициям памяти (иными: словами, к 2К слов, поскольку  $1К=2^{10}$ ). Программная память и различные элементы, которые

должны хранить или обрабатывать команды или их части, должны иметь соответствующие размеры.

Если машина предназначена для решения только логических задач, память данных организуется в битах с индивидуальной адресацией. Однако можно работать и с более сложной информацией, производя группирование определенного числа бит в слова. В противном случае, по крайней мере, часть памяти организуется в словах. При этом адрес определяется не отдельным битом, а целым словом.

Представление буквенно-цифровых данных. Код дает символам (цифры от 0 до 9, буквы от A до Z, специальные знаки и знаки пунктуации) двоичное представление в нескольких битах. В зависимости от числа элементов, которое нужно закодировать, требуется больше или меньше бит. При ограниченном наборе символов достаточно 6 бит для кодирования каждого из них. Именно из этих соображений большая часть средств вычислительной техники организована в байтах, или 8-битовых словах. Доводами в пользу байтовой структуры являются возможное число кодов, возможность разместить две десятичные цифры в одном байте (для каждой цифры требуется 4 бита) и то, что  $8 = 2^3$ .

Наиболее широкое распространение получили коды ASCII (американский стандартный код обмена информацией), EBCDIC (расширенный двоично-десятичный код обмена данными) и HOLLERITH (перфокарточный код Холлерита).

Представление чисел. Целые числа представляются в двоичной форме очень просто. Числа с десятичной дробью кодируются двумя словами. В первое слово заносится целая часть числа, а во второе - дробная. Отрицательные числа представляются «дополнением до 2».

Для кодирования слишком больших или слишком малых чисел с помощью одного или двух слов используется так называемое представление с плавающей запятой, которое заключается в том, что это число представляют в виде мантиссы и показателя степени. Например, число 425 записывается как  $0,425 \cdot 10^3$  и представляется в двоичном коде в виде мантиссы 0,425 в одном слове и +3 в битах, зарезервированных для показателя степени.

Применяются и другие коды. Код Грея, или циклический двоичный код, наиболее пригоден для предотвращения неоднозначности преобразования двух последовательных значений (два последовательных значения отличаются друг от друга только в одном бите кодовой комбинации). Двоично-десятичный код (BCD) переводит цифру за цифрой десятичного числа в двоичное выражение. Таким образом, из расчета 4 бит на цифру число 325 будет представлено следующим образом: 001100100101. Десятично-двоичный и двоично-десятичный переводы не вызывают трудностей, но чрезвычайно усложняют арифметические расчеты.

Различные коды ориентированы на удовлетворение специфических требований. При необходимости перехода от одного кода к другому используются функции преобразования кодов [31].

Связь с внешней средой. Обмен информацией между программируемым

устройством логического управления и внешними устройствами предъявляет жесткие требования к однозначности представления информации, т. е. к «информатическому языку», и создает ряд технических проблем (необходимость изоляции, обеспечения безопасности, согласование мощности и др.).

Рассмотрим связи типа программируемое устройство логического управления - объект управления и программируемое устройство логического управления - оператор.

Связь программируемое устройство логического управления - объект управления. Эта связь устанавливается наиболее просто, поскольку задача состоит в обеспечении диалогового режима между двумя машинами. Для воздействия на объект управления, или, как говорят, «для возбуждения выхода», программируемому устройству логического управления нужно с помощью соответствующего КО определить операцию (т. е. указать выход), а также назначить орган воздействия, который должен произвести обработку сигнала. В действительности обращение

производится не к самому органу воздействия, а к связанному с ним модулю машины, называемому выходным адаптером. Определенная таким образом выходная команда, имеет ту же одноадресную структуру, что и команда программы обработки информации. Предполагается, что к моменту пересылки данные находятся в аккумуляторе. Выходная команда обеспечивает пересылку содержимого аккумулятора в адаптер, который эту информацию запоминает и в соответствии с ней управляет органом воздействия на объект управления до получения другой выходной команды.

Процесс сбора информации (измерение параметров) программируемым устройством логического управления аналогичен описанному выше процессу. Входная команда определяет с помощью КО операцию и путь следования сигналов, адресованных с помощью входного адаптера. Информация всегда проходит через аккумулятор.

В то время как объект управления всегда готов выполнить команды программируемого устройства логического управления, последнее, когда к нему приходит информация от объекта управления, может быть занято выполнением каких-либо операций по обработке данных. Такая ситуация допустима, если поступающая к устройству управления информация обрабатывается достаточно быстро. Если очень важно определенную информацию принять немедленно, необходимо, чтобы объект управления мог предупредить программируемое устройство логического управления о срочном характере такого сообщения. Эту задачу выполняет устройство приоритетных прерываний, которое по команде прерывания логического управления временно прекращает выполняемую работу, чтобы принять и обработать поступающую информацию.

Для реализации описанных выше процедур программируемые устройства логического управления снабжены набором входных и выходных команд. Программируемый контроллер является единственной машиной, где такого рода обмен информацией, за исключением отдельных случаев, носит неявный характер [32]. Управление этим обменом осуществляет система, поставляемая

производителем контроллера и не требующая программирования со стороны пользователя.

Связь программируемое устройство логического управления - оператор. Обмен информацией основан на использовании описанных выше процедур. Основное различие заключается в кодировании информации. Чтобы облегчить задачу программиста, выражающего с помощью команд алгоритм управления объектом, или задачу оператора, управляющего машиной и наблюдающего за ее работой, машина должна воспринимать и сама воссоздавать, коды высокого уровня, т. е. такую информацию, с которой человеку было бы просто обращаться. Группы бит здесь уже неприемлемы за исключением тех, что отражают состояние определенной последовательности логических переменных. Гораздо удобнее заменить их естественными эквивалентами (буква, символ или десятичная цифра вместо двоичного кода).

Команда, в частности, представляется мнемоническим кодом в эквивалентной форме более высокого уровня или булевым уравнением

$$U_1 + U_2 \cdot U_3 = Y, \quad (2.40)$$

Цифровые данные, значения различных параметров или константы представляются в десятичной форме или, по крайней мере, в восьмеричном или шестнадцатеричном коде с основаниями соответственно 8 или 16. В процедуры обмена информацией включаются операции перевода в условный формат или же в формат, определенный пользователем машины (число цифр, место расположения запятой и т. д.).

Сложность диалога оператор - программируемое устройство логического управления определяется необходимостью решения практических задач и проявляется с фазы анализа проблемы до этапа программирования и отладки программ. Программы должны включать в себя все функции, необходимые для обеспечения простого диалога при эксплуатации системы.

## **2.5 Программируемые контроллеры в промышленном производстве**

Причины появления программируемых контроллеров. Программируемые контроллеры появились в США в 1969 г. для организации автоматизированного конвейерного производства в автомобилестроении таким образом, чтобы технологический процесс можно было постоянно совершенствовать и быстро перестраивать на выпуск других моделей автомобиля. Программируемые контроллеры, обладающие высокой гибкостью при внедрении и последующем совершенствовании, заменили шкафы с релейно-контактной аппаратурой. К тому же стоимость создания и отладки устройств логического управления с жестким алгоритмом работы для сложных технологических процессов становилась слишком высокой. Потребность в программируемых контроллерах предопределила появление в США двух таких крупных фирм, как «Модикон» (Modicon) и «Аллен Бредли» (Allen Bradley). Ниже перечислены другие производители программируемых контроллеров АВВ (Bristol Babcock),

Advanced Micro Controls, Baldor Electric, Beckhoff Automation, Bosch Rexroth Control Technology Corp, Eaton (Cutler-Hammer), Emerson Process Management, FujiElectric, Hitachi, IDEC, Keyence, Mitsubishi Electronics, Moeller Electric, Panasonic Electric Works, Phoenix Contact (Entivity), Toshiba, Wago, Owen, Arduino.

В задания на проектирование контроллеров входили требования по обеспечению их пригодности к эксплуатации в неблагоприятной промышленной среде, многообразия и большого числа входов-выходов, доступности их для имеющегося на предприятии персонала и, естественно, включались ограничения относительно стоимости дальнейшего совершенствования всей системы управления объектом [33]. Таким образом, традиционные варианты программируемых устройств логического управления (мини-ЭВМ и др.) были отодвинуты на второй план.

Негативные факторы промышленной среды. На негативных, иногда проявляющихся чрезвычайно остро факторах промышленной среды, в который могут быть установлены устройства логического управления, следует остановиться особо. Различают три типа этих факторов.

Физические и механические факторы. К ним относятся температура, влажность, вибрация и удары. Расположение в непосредственной близости от нагревателей, химических реакторов, доменных печей, а также тяжелые климатические условия могут негативно отразиться на работоспособности элементов устройств управления (откуда вытекает необходимость создания систем естественной или принудительной вентиляции программируемого контроллера). Высокий уровень влажности (более 80%) вызывает конденсацию паров и ускоряет коррозию. Уровень влажности менее 35 % способствует возникновению электростатических зарядов, вызывающих случайные срабатывания логических схем. При установке устройств рядом с агрегатами, являющимися источниками вибрации и ударов, сварные, контактные и другие соединения подвергаются опасным воздействиям.

Химические факторы. К ним относятся вызывающие коррозию газы ( $Cl_2$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ), углеводородные пары, металлическая (литейный, сталеплавильный цеха) или минеральная (цементный завод) пыль. Являющаяся следствием действия этих факторов коррозия поражает контакты и микросхемы. Для ее предотвращения чаще всего покрывают лаком платы с печатными схемами и устанавливают фильтры, препятствующие попаданию пыли или агрессивных газов. Иногда контроллеры делают полностью герметичными (фирма «Модикон»).

Электрические факторы. Обычно энергия электрической промышленной помехи может достигать 100 мкДж. Энергия переключения схемы ТТЛ при напряжении 5 В, токе 2 мА и продолжительности переключения 10 нс равна  $10^{-4}$  мкДж, т. е. в  $10^6$  меньше. Отсюда следует, что уровень помех должен быть снижен на 120 дБ. Основными источниками помех являются: термоЭДС (эффект Пелтье) в несколько милливольт, разность потенциалов в зоне контакта металлов с различной химической активностью, электростатические влияния и электромагнитные влияния, вызываемые включением индуктивностей и

емкостей (расположение вблизи трансформаторов, сварочных агрегатов и др.).

Помехи от источников двух первых типов могут внести погрешность в результаты измерений аналоговых величин низкого уровня или вызвать коррозию элементов; для защиты от помех от источников двух последних типов необходимо соответствующее исполнение входов-выходов, например обеспечение эффективной гальванической развязки (оптрон, реле, разделительный трансформатор).

Роль программируемого контроллера в автоматизированной системе. Рассмотрим роль программируемого контроллера в реализации проекта автоматизации и области его применения.

Этап разработки и внедрения. Программируемый контроллер призван быть инструментом, наиболее доступным для пользователя. Однако при решении вопросов, связанных с внедрением контроллеров, зачастую целесообразно воспользоваться помощью проектной организации или фирмы, специализирующейся в области автоматизации. Одно из преимуществ программируемого контроллера по сравнению с устройством с жестким алгоритмом работы состоит в том, что разработка конструкции контроллера может проводиться отдельно от оборудования, с которым он будет работать.

Двойственный характер оборудования программируемого контроллера (технические средства и программное обеспечение) способствует успешной реализации проекта благодаря возможности отдельного ведения работ по каждому типу оборудования. Поскольку технические средства имеют модульную структуру, контроллер может быть легко перестроен с учетом изменившихся требований. Программное обеспечение, т. е. программы, поставляемые изготовителем и разрабатываемые проектировщиком потребителя, также могут быть легко приспособлены к новым требованиям.

Параллельная работа над техническими средствами и программным обеспечением на конечной фазе моделирования сливается воедино, что особенно эффективно при доводке системы. И только после этого контроллер проходит проверку на месте, в результате чего сводятся до минимума затруднения, возникающие в эксплуатации объекта управления.

Простота программируемого контроллера позволяет легко и быстро переучивать обслуживающий персонал, уже знакомый с релейно-контактными или бесконтактными устройствами логического управления. Внедрение программируемых устройств логического управления не создает каких-либо трудностей в работе соответствующих служб предприятия [34]. В этом заключается одно из преимуществ контроллера по сравнению с применяемыми для решения тех же задач микро- или мини-ЭВМ, для обеспечения бесперебойной работы которых требуется подготовка специализированных бригад обслуживания. При этом переобучение персонала значительно усложняется, поскольку очень трудно быстро освоиться с режимом «реального масштаба времени» промышленной информатики.

Промышленный контроллер можно считать первым этапом на пути к более сложным проектам информатического характера. На этом этапе можно освоить методологию (или, по меньшей мере, пробудить к ней интерес) реализации

проектов с программированием (анализ, разработка программы, отладка и т. д.). Специалисты в области информатики знакомятся при этом с управляемыми технологическими операциями, которые в конечном счете определяют оптимальную конфигурацию программируемого контроллера.

Однако для реализации проекта с использованием контроллера необходимо знать его возможности и уметь выбрать оборудование, отвечающее потребностям пользователя.

Этап эксплуатации и обслуживания. Четкое распределение функций между работающими совместно с программируемого контроллера устройствами автоматики последовательного действия обеспечивает гармоничную работу всего комплекса технологического оборудования. С помощью стандартных устройств (устройство программирования, линейный диалоговый модуль и др.), или с помощью специализированных модулей можно организовать операторный диалог различного уровня.

При этом очень важны возможности изменения программы в соответствии с новыми условиями и ведения эксплуатационного журнала с помощью дистанционного печатающего устройства или пишущей машинки, что невозможно при использовании устройств логического управления с жестким алгоритмом работы.

Обслуживание систем управления облегчается вследствие того, что машины имеют модульную конструкцию. Различные устройства сигнализируют о наличии неисправности системы и помогают отыскать ее причину. Устранение неполадок заключается в замене модуля, т. е. печатной платы. Неисправная плата отправляется для ремонта на завод-изготовитель.

Области использования контроллеров. Программируемые контроллеры находят применение в различных отраслях промышленности. Их используют также в области просвещения и в системе постоянной профессиональной подготовки.

Черная и цветная металлургия. Особое значение в этих отраслях имеют требования безопасности. Программируемые контроллеры применяются для управления транспортными операциями на коксовых батареях, загрузкой доменных печей, для автоматизации литейных цехов. Их используют также для решения задач, связанных с анализом газов и с контролем качества.

Металлообработка и автомобильная промышленность. Это как раз те отрасли, где контроллеры нашли широкое применение. Их можно встретить на автоматических линиях и сборочных конвейерах, на стендах для испытания двигателей, а также на прессах, токарных автоматах, шлифовальных и агрегатных станках, сварочных установках, автоматических станках для резки.

Химическая промышленность. В настоящее время ПЛК используются для управления технологическими установками, устройствами дозирования и смешивания продуктов, очистки отходов химического производства, а также на установках по переработке пластмасс и некоторых агрегатах в производстве резины.

Нефтедобыча. Кроме областей применения, аналогичных предыдущей

отрасли, контроллеры используются на перекачивающих и распределительных станциях, для управления работой и наблюдения за магистральными трубопроводами.

Сельское хозяйство и пищевая промышленность. Программируемые контроллеры применяются на установках для смешивания консистентных и порошкообразных продуктов на сушильных агрегатах, а также при контроле и расфасовке различных продуктов.

Транспортные и погрузочно-разгрузочные операции. Программируемые контроллеры используются при сортировке посылок, почтовых отправок, механизированном управлении складскими операциями, упаковке, конвейерной пересылке, комплектации изделий на поддонах, в лифтовом хозяйстве, грузоподъемных механизмах и др.

Другие области применения. Все случаи использования контроллеров перечислить невозможно. В текстильной промышленности они могут применяться для управления операциями автоматического раскроя тканей и контроля нитей, на транспортных конвейерах.

В стекольной промышленности, в производстве хрусталя они управляют операциями отрезки и упаковки. Устройства логического управления используются при решении задач, связанных с охраной (зданий, заводов) и обеспечением безопасности (ядерная энергетика).

Функциональные возможности и легкость внедрения позволяют использовать ПЛК как учебное пособие. Возможно использование ПЛК в системе образования (последовательная и комбинаторная логика) [35].

Современный программируемые контроллеры подразделяются на моноблочные, модульные и распределенные. Моноблочные имеют фиксированный набор входов выходов (рис.2.6).



Рисунок 2.6. Моноблочный контроллер фирмы Овен.

В модульных контроллерах модули входов-выходов устанавливаются в разном составе и количестве в зависимости от предстоящей задачи (рис.2.7).

Рисунок 2.7. Модульный программируемый контроллер



В распределенных системах модули или даже отдельные входа-выхода, образующие единую систему управления, могут быть разнесены на значительные расстояния

## 2.6 Программное обеспечение программируемых контроллеров

При создании системы управления технологического процесса, всегда существует проблема по взаимопониманию программиста и технологов. Технолог скажет «нам надо немного подсыпать, чуть подмешать, еще подсыпать и чуть нагреть». И мало когда следует ждать от технолога формализованного описания алгоритма. И получалось так, что программисту нужно долго вникать в тех. процесс, потом писать программу. Зачастую при таком подходе программист остается единственным человеком, способным разобраться в своем творении, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Такая ситуация породила стремление для создания технологических языков программирования, доступные инженерам и технологам и максимально упрощающим процесс программирования.

За последнее десятилетие появилось несколько технологических языков. Более того, Международной Электротехнической Комиссией разработан стандарт МЭК-61131-3, концентрирующий все передовое в области языков программирования для систем автоматизации технологических процессов. Этот стандарт требует от различных изготовителей ПЛК предлагать команды, являющиеся одинаковыми и по внешнему виду, и по действию.

Стандарт специфицирует 5 языков программирования:

Sequential Function Chart (SFC) – язык последовательных функциональных блоков;

Function Block Diagram (FBD) – язык функциональных блоковых диаграмм;

Ladder Diagrams (LAD) – язык релейных диаграмм;

Statement List (STL) – язык структурированного текста, язык высокого уровня. Напоминает собой Паскаль

Instruction List (IL) – язык инструкций, это типичный ассемблер с аккумулятором и переходам по метке.

Язык LAD или КОР (с немецкого Kontaktplan) похожи на электрические схемы релейной логики. Поэтому инженерам не знающим мудреных языков

программирования, не составит труда написать программу. Язык FBD напоминает создание схем на логических элементах. В каждом из этих языков есть свои минусы и плюсы [36]. Поэтому при выборе специалисты основываются в основном на личном опыте. Хотя большинство программных комплексов дают возможность переконвертировать уже написанную программу из одного языка в другой. Так как некоторые задачи изящно и просто решаются на одном языке, а на другом придется столкнуться с некоторыми трудностями.

Наибольшее распространение в настоящее время получили языки LAD, STL и FBD.

Большинство фирм изготовители ПЛК традиционно имеют собственные фирменные наработки в области инструментального программного обеспечения. Например такие как «Concept» Schneider Electric, «Step 7» Siemens, программный комплекс CoDeSys.

Открытость МЭК стандартов привели к созданию фирм занимающихся исключительно инструментами программирования ПЛК.

Наибольшей популярностью в мире пользуются комплекс CoDeSys. CoDeSys разработан фирмой 3S. Это универсальный инструмент программирования контроллеров на языках МЭК, не привязанной к какой-либо аппаратной платформе и удовлетворяющим всем современным требованиям.

Основные особенности:

- полноценная реализация МЭК языков
- встроенный эмулятор контроллера позволяет проводить отладку проекта без аппаратных средств. Причем эмулируется не некий абстрактный контроллер, а конкретный ПЛК с учетом аппаратной платформы
- встроенные элементы визуализации дают возможность создать модель объекта управления и проводить отладку, т.е. дает возможность создавать человеко-машинного интерфейса (HMI)
- очень широкий набор сервисных функции, ускоряющий работу программиста
- существует русская версия программы, и русская документация.

Выбор комплекса и языка.

Ведущие изготовители ПЛК, опираясь на собственные фирменные наработки в плане инструментального программного обеспечения и поддерживавшие стандарт МЭК 61131-3, используют с различными вариациями один или несколько комплексов. В каждом из них есть свои «плюсы» и «минусы». Поэтому предпочтение тому или иному инструменту программирования диктуется в основном предыдущим накопленным опытом. Наибольшей популярностью все-таки пользуется комплекс CoDeSys, который насчитывает более 150 адаптаций, не противоречащих стандарту МЭК, но учитывающий фирменные особенности.

CoDeSys (Controllers Development System) представляет проектировщику удобную среду для программирования контроллеров на языках МЭК. Используемые редакторы и отладочные средства базируются на широко известных принципах.

Стоит отметить, что CoDeSys поставляется изначально в англоязычной

версии, что представляет собой определенную трудность в ее освоении. Однако при использовании актуальной версии CoDeSys V2.3.9. и выше никаких русификаторов не следует загружать, поскольку русский интерфейс уже входит в дистрибутив. Установив CoDeSys на свой компьютер, можно приступать к освоению приемов программирования, используя пока режим эмуляции и не имея даже на какое-то время самого ПЛК.

CoDeSys позволяет использовать языки IL, ST, LD, SFC, FBD и CFC. Мы будем использовать в качестве примера графический язык LD.

Редакторы. Текстовые редакторы CoDeSys производят автоматическое объявление переменных, тип которых задается в диалоговом окне и другие действия.

Графический редактор автоматически выполняет расстановку компонентов схемы (контактов, катушек реле, таймеров и т. д.) и трассировку их соединений; нумерацию цепей; масштабирование изображения, что позволяет увидеть всю диаграмму или какую-то её часть и выделять цветом активные цепи. Встроенные эмулятор и элементы визуализации дают возможность выполнять отладку проекта без самих аппаратных средств.

Инсталляция среды CoDeSys.

Установим среду CoDeSys. Следующим обязательным шагом должна стать инсталляция целевой (аппаратной) платформы TSP (Target Support Packages). В нее включено все необходимое для CoDeSys при создании кода, отладки и конфигурировании аппаратуры. Платформа определяет параметры генератора кода, распределение памяти, функциональность ПЛК, модули ввода-вывода. Кроме того, в TSP могут входить дополнительные библиотеки, драйверы связи и список команд ПЛК-Браузера. Центральным местом в TSP является один или несколько целевых файлов (Target files). В нем присутствуют данные о всех дополнительных файлах, необходимых для конфигурирования данной платформы. Для инсталляции TSP запускаем утилиту InstallTarget, которая обычно входит в стандартный пакет среды CoDeSys. В открывшемся при запуске утилиты InstallTarget окне (рис. 2.8) - нажать кнопку Open и указать путь доступа к инсталлируемому Target-файлу (имеющему расширение. tnf). Target-файлы контроллеров находятся на компакт-диске, поставляемом с контроллером, в папке «Target» или могут быть скачены с сайта [www.owen.ru](http://www.owen.ru). После открытия требуемого файла в области «Possible Targets» окна отобразится папка «Owen». Открыв папку «Owen» и выделив находящуюся там строку, нажать кнопку Install. В области «Installed Targets» окна отобразится список инсталлированных Target-файлов. На этом установку можно считать законченной. Аналогичные действия следует выполнить, если планируется работа с ПЛК других производителей, руководствуясь при этом их рекомендациями [37].

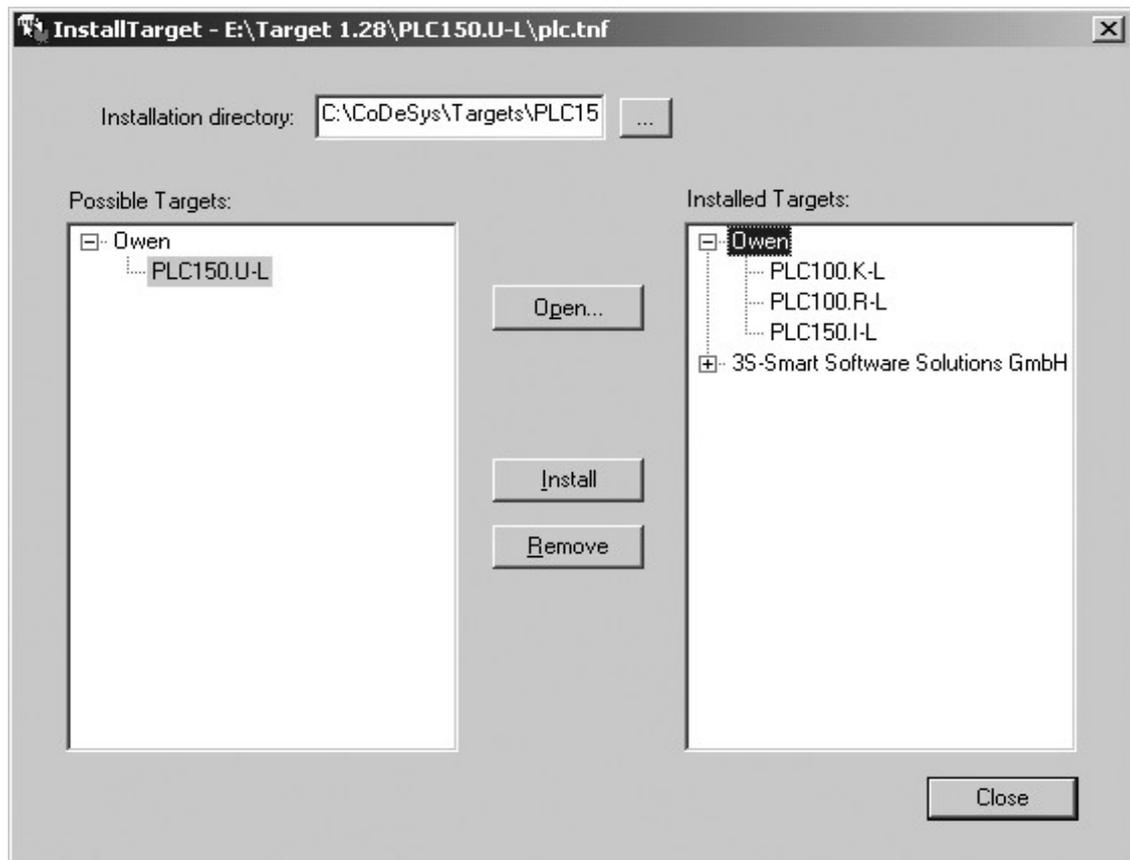


Рисунок 2.8. Окно «InstallTarget» утилиты InstallTarget

### Компоненты организации программ. (POU)

Компоненты создают под прикладное программное обеспечения ПЛК. Компоненты организации программ POU – Program Organization Unit содержат функции, функциональные блоки и программы. Компонент выступает как «черный ящик», внутреннее устройство и содержание которого знать не нужно. В графическом изображении он представлен прямоугольником с входами (слева) и выходами (справа). Выбор нужного POU производится в окне объявлений (рис. 2.9) в строках Program, Function Block или Function. Для LD будем использовать только Program, т. к. нам потребуются только стандартные компоненты (контакты, катушки реле, FB).

### Запуск CoDeSys

Произведем первый запуск среды CoDeSys. В окне Target Settings напротив строки Configuration выбираем тип логического контроллера PLC, поскольку в нашем случае мы остановились именно на нем, и нажмем ОК. В появившемся окне New POU выбираем тип POU Program (Программа) и язык, на котором будет осуществляться написание программы - LD. Имя программы оставляем без изменения. Подтверждаем выбор нажатием на кнопку ОК.

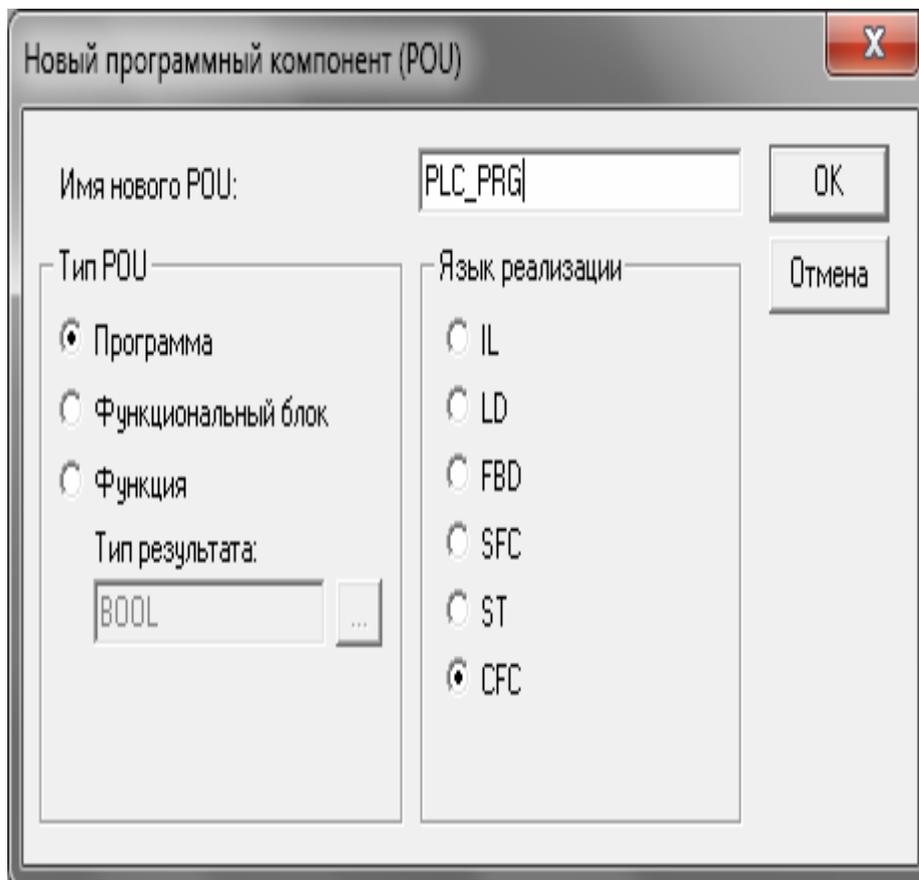


Рисунок 2.9. Выбор языка программирования и задание имени программы

После выполнения всех вышеописанных действий откроется главное окно (рис. 2.10) среды CoDeSys.

Его можно разделить на различные области (в окне они расположены сверху вниз):

- Меню (рис. 2.11).

- Панель инструментов. На ней находятся кнопки для быстрого вызова команд меню (рис. 2.12).

- Организатор объектов, имеющий вкладки POU, Data types, Visualizations и Resources.

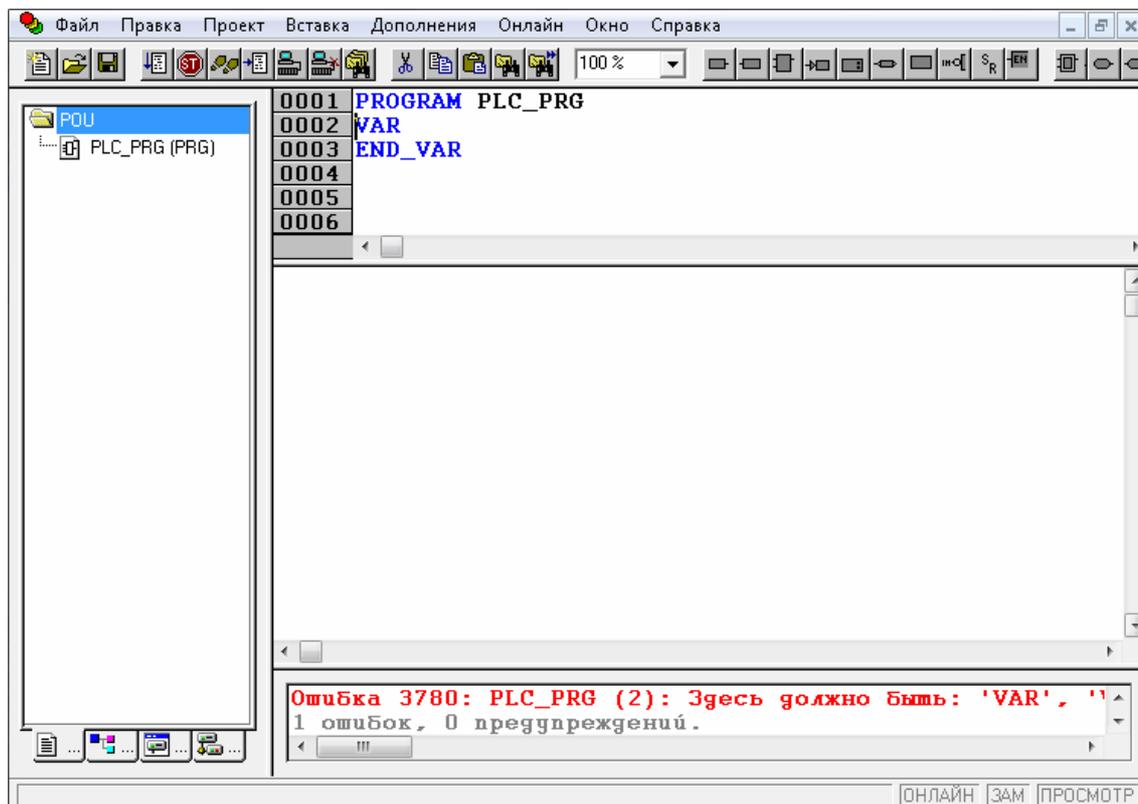


Рисунок 2.10. Главное окно среды CoDeSys

- Разделитель Организатора объектов и рабочей области CoDeSys.
- Рабочая область, в которой находится редактор.
- Окно сообщений.
- Строка статуса, содержащая информацию о текущем состоянии проекта.



Рисунок 2.11. Меню среды

Меню находится в верхней части главного окна. Оно содержит все команды CoDeSys.



Рисунок 2.12. Панель инструментов

Кнопки на панели инструментов обеспечивают более быстрый доступ к командам меню. Вызванная с помощью кнопки на панели инструментов команда автоматически выполняется в активном окне. Команда выполнится, как только нажатая на панели инструментов кнопка будет отпущена. Если мы поместим указатель мышки на кнопку панели инструментов, то через

небольшой промежуток времени увидим название этой кнопки в подсказке. Кнопки на панели инструментов различны для разных редакторов CoDeSys [38].

Получить информацию относительно назначения этих кнопок можно в описании редакторов. Рассмотрим каждую из них по отдельности. Кнопок много. Однако они очень важны, и их использование упрощает составление программы на языке LD.

В других языках эта панель выглядит иначе. При желании панель инструментов можно отключить. Описание графических изображений кнопок в панели инструментов Project 'Options' категория Desktop, убрать галочку Tool bar).

Организатор объектов (рис. 2.13) всегда находится в левой части главного окна CoDeSys. В нижней части организатора объектов находятся вкладки POU, Data types (Типы данных), Visualizations (Визуализации) и Resources (Ресурсы). Переключаться между соответствующими объектами можно с помощью мышки, нажимая на нужную вкладку.

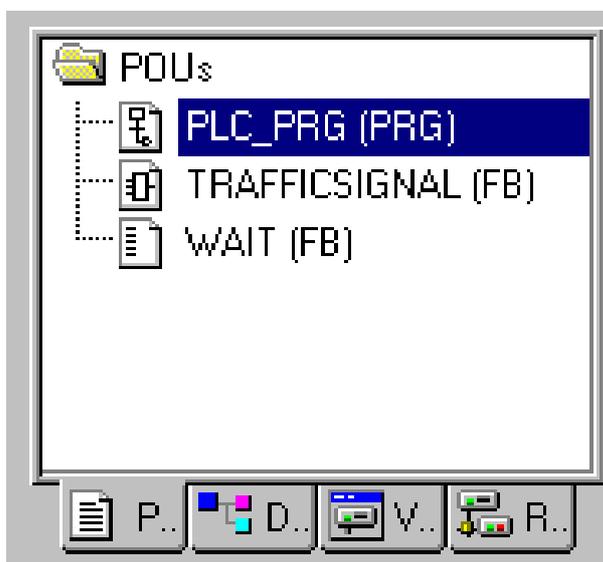


Рисунок 2.13. Организатор объектов

Разделитель экрана.

Разделить экрана - это граница между двумя непересекающимися окнами. В CoDeSys есть следующие разделители: между организатором объектов и рабочей областью, между разделом объявлений и разделом кода POU, между рабочей областью и окном сообщений. Можно перемещать разделители с помощью мышки, нажав ее левую кнопку. Разделитель сохраняет свое положение даже при изменении размеров окна. Если больше не видно разделителя на экране, значит, стоит изменить размеры окна. Рабочая область находится в правой части главного окна CoDeSys. Все редакторы, а также менеджер библиотек открываются именно в этой области. Имя открытого объекта находится в заголовке окна.

Окно сообщений.

Окно сообщений отделено от рабочей области разделителем. Именно в этом окне появляются сообщения компилятора, результаты поиска и список перекрестных ссылок. При двойном щелчке левой клавишей мыши или при нажатии клавиши Enter на сообщении будет открыт объект, к которому относится данное сообщение. (Далее сокращенно операции с кнопками мыши будем записывать так: 1ЛКМ, если одно нажатие на левую клавишу мышки, 2ЛКМ - если два нажатия; 1 ПКМ, если один щелчок правой кнопкой.). С помощью команд "Edit" "Next error" и "Edit" "Previous error" можно быстро перемещаться между сообщениями об ошибках.

#### Статусная строка

Статусная строка находится в нижней части главного окна CoDeSys и предоставляет информацию о проекте и командах меню.

При выборе пункта меню его описание появляется в левой части строки статуса. Если работать в режиме Online, то надпись Online в строке статуса выделяется черным цветом. В ином случае надпись серая. С помощью статусной строки в режиме online можно определить, в каком состоянии находится программа: SIM - в режиме эмуляции, RUN - программа запущена, BP - установлена точка останова, FORCE - происходит фиксация переменных.

При работе в текстовом редакторе в строке статуса указывается позиция, в которой находится курсор (например, Line:5, Col.:11). В режиме замены надпись «0V» выделяется черным цветом. Нажимая клавишу <Ins>, можно переключаться между режимом вставки и замены [39]. В визуализации в статусной строке выводятся координаты курсора X и Y, которые отсчитываются относительно верхнего левого угла окна. При вставке элемента в строке статуса указывается его название (например, Rectangle). Если поместить указатель на пункт меню, то в строке статуса появляется его краткое описание. Статусную строку можно убрать либо включить (см. 'Project' Options' категория Desktop).

#### Контекстное меню.

Альтернативой использования главного меню для вызова команд может стать контекстное меню. Это меню, вызываемое 1ПКМ на рабочей области, содержит наиболее часто используемые команды.

## 2.7 Выводы

Программируемый контроллер или по другому программируемый логический контроллер (ПЛК), представляют собой микропроцессорное устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления, имеющий конечное количество входов и выходов, подключенных к ним датчиков, ключей, исполнительных механизмов к объекту управления, и предназначенный для работы в режимах реального времени.

## 3. Исследование дефектов электрического двигателя

### 3.1 Модель дефектообразования в обмотке электродвигателя

Моделирование дефектов рассматривается, как физическое моделирование реальных процессов происходящих с изоляцией статора АД.

Разница между моделью и реальным процессом заключается в продолжительности развития дефекта. Ухудшение изоляции статора АД происходит при продолжительной эксплуатации, перегрузках и т.п. в нормальных режимах. Процесс этот может растягиваться на долгое время, и чтобы отследить его необходимо большое количество измерений, с большим интервалом между замерами. Искусственные замыкания в обмотках статора создаются при помощи специальных предварительно выведенных наружу из лобовой части обмотки статора выводов. Для имитации переходного сопротивления изоляционного слоя в точке замыкания эти выводы замыкаются через регулируемое активное сопротивление. Это позволяет регулировать значение тока в короткозамкнутом контуре и получать различные степени тяжести исследуемых повреждений, которые создаются путем изменения тока в короткозамкнутом контуре.

Переменное активное сопротивление (реостат) подключается к выводам  $a'$ ,  $a''$ ,  $b'$ ,  $b''$ ,  $c'$ ,  $c''$ . Максимальное сопротивление выставляемое на реостате 1134 Ом. Для опытов были избраны сопротивления 1000, 800, 600, 400, 200, 50, 0 Ом. Такой способ позволил моделировать, как тяжесть повреждения, так и место расположение и вид дефекта.

Физическое моделирование - ответственная задача, имеющая общее принципиальное и познавательное значение. Оно основывается на проникновении в явление (в процесс), в разработку экспериментальных и теоретических методов исследования для получения достоверных, результатов и в итоге получения систематических правил и рекомендаций для решения конкретных практических задач. Альтернативой физическому моделированию является математическое моделирование приведшее в последние десятилетия XX века к подлинно революционному преобразованию науки вообще и математики в особенности и гармонично дополняющее физическое моделирование.

Математическое моделирование - это, как правило, численное решение на компьютере алгебраических, дифференциальных или интегральных уравнений, вытекающих из применения законов механики, физики, химии, биологии, экономики к решению конкретных задач.

Для правильного физического моделирования необходимо, во-первых, установить условия подобия двух явлений - в модели и натуре и, во-вторых, определить, как ими пользоваться для проектирования натуральных объектов с заданными параметрами или предсказания явления натуральных процессов.

Понятие механического или физического подобия можно рассматривать как обобщение геометрического подобия, хорошо известного из курса геометрии. Две геометрические фигуры подобны, если отношения всех

соответствующих длин одинаковы, а безразмерные параметры - углы при соответствующих вершинах - для обеих фигур равны.

Для количественного определения физического подобия вернемся к анализу размерностей и кратко сформулируем его главный результат. Пусть ищется (имеется, подозревается) какая-либо зависимость, определяющая искомую величину  $a$  в функции  $n$  определяющих параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n) \quad (3.1)$$

Ещё эта зависимость выражает некоторую физическую закономерность, то она должна отражать тот бесспорный факт, что функция не должна зависеть от произвола выбора единиц измерения. Для получения следствия из этого факта разобьем параметры  $a, a_1, a_2, \dots, a_n$  на две группы.

В первую группу ( $a, a_1, \dots, a_k; k \leq n$ ) включаются величины с независимыми размерностями (например некоторая длина, скорость, плотность и т.д.); во вторую группу ( $a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n$ ) входят остальные параметры с размерностями, выражаемыми через размерности величин первой группы. Тогда размерности величин ( $a, a_{k+1}, \dots, a_n$ ) будут выражаться в виде произведения степеней от размерностей параметров ( $a_1, a_2, \dots, a_k$ ):

$$\begin{aligned} [a] &= [a_1]^\alpha [a_2]^\beta \dots [a_k]^\gamma, \\ [a_{k+1}] &= [a_1]^{\alpha_{k+1}} [a_2]^{\beta_{k+1}} \dots [a_k]^{\gamma_{k+1}}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

М М М М

$$[a_n] = [a_1]^{\alpha_n} [a_2]^{\beta_n} \dots [a_k]^{\gamma_n}$$

Степени  $\alpha, \beta, \gamma$  получаются сравнением размерностей левых и правых частей в выражении (3.2).

$$\prod_i \frac{a}{a_1^\alpha \dots a_k^{\gamma_i}}, \prod_{k+1} \frac{a_{k+1}}{a^{\alpha_{k+1}} \dots a_n^{\gamma_{k+1}}}, \quad (3.3)$$

При этом величины, как легко установить, оказываются безразмерными (числители и знаменатели в них имеют одинаковые размерности), то есть их значения будут одними и теми же при любом выборе единиц измерения.

Из независимости физической закономерности (3.1) от выбора единиц измерения вытекает, что соответствующее ей соотношение можно представить

$$a = f(a_1 a_2 \dots, a_n) = a_1^\alpha a_2^\beta \dots a_k^\gamma \Phi(\Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n), \quad (3.4)$$

в виде зависимости только между безразмерными параметрами

$$\left( \Pi = f(a_1^\alpha a_2^\beta \dots a_k^\gamma) \right) :$$

$$\begin{matrix} \Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n \\ \Pi = \Phi(i) \\ i \end{matrix} \quad (3.5)$$

искомая функция на самом деле всегда может быть представлена через функцию меньшего числа безразмерных аргументов. Число аргументов в (3.4) меньше исходного числа  $n$  на столько, сколько среди величин  $a_1 a_2 \dots a_n$ , имеется величин с независимыми размерностями. Уменьшение числа аргументов упрощает исследование, иногда существенно. Приведение искомой закономерности к безразмерному виду (3.5) называется пи-теоремой (П-теорема). Теперь можно количественно определить понятие физического подобия подобий.

Для физического подобия двух геометрически подобных явлений необходимо и достаточно, чтобы они определялись одним и тем же набором определяющих параметров  $a_1 a_2 \dots a_n$  численные значения которых могут отличаться в этих явлениях, но притом так, что численные значения безразмерных параметров  $\Pi_{k+1} \dots, \Pi_n$ , совпадают в этих явлениях. В связи с принятым определением подобных явлений параметры  $\Pi_{k+1} \dots, \Pi_n$ , называются параметрами подобия.

Итак, при подобии двух явлений, которые будем далее называть одно натурным и другое модельным, определяемая величина  $a$  должна иметь одинаковую функциональную зависимость от определяющих параметров  $a_1, a_2, \dots, a_k$ . То есть функция  $f$  для обоих явлений будет одна и та же, поскольку явления подобны, хотя численные значения определяющих параметров и определяемой физической величины  $a$  могут различаться. Поэтому для натурального явления искомая зависимость (3.1) принимает вид:

$$a^{(n)} = f(a_1^{(H)}, \dots, a_k^{(H)}, \dots, a_{k+1}^{(H)}, \dots, a_n^{(H)}) \quad (3.6)$$

для модельного явления:

$$a^{(m)} = f(a_1^{(M)}, \dots, a_k^{(M)}, \dots, a_{k+1}^{(M)}, \dots, a_n^{(M)}) \quad (3.7)$$

Здесь верхние индексы (H) и (M) относятся соответственно к натуре и

модели. Применяя П-теорему, обе зависимости (3.6) и (3.7) можем переписать в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \Pi^{(n)} &= \Phi(\Pi_{k+1}^{(n)}, \dots, \Pi_n^{(n)}) \\ \Pi^{(m)} &= \Phi(\Pi_{k+1}^{(m)}, \dots, \Pi_n^{(m)}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Причем важно отметить, что здесь функция  $\Phi$  для природы и модели одна и та же, так как она в обоих случаях одинаково выражается через одну и ту же функцию  $f$ .

Существует правило пересчёта опытов с подобной модели на природу. Если условия подобия выполнены, то должны выполняться равенство:

$$\Pi_{k+1}^{(m)} = \Pi_{k+1}^{(n)}, \dots, \Pi_k^{(m)} = \Pi_k^{(n)} \quad (3.9)$$

Эти условия иногда именуют критериями подобия. Следовательно, с учетом (3.9) из (3.5) получаем равенство безразмерной определяемой величины для модели и природы:

$$\Pi^{(n)} = \Pi^{(m)} \quad (3.10)$$

Возвращаясь от равенства (3.10) обратно к размерным переменным  $a, a_1, \dots, a_k$  с учетом первой формулы (3.8) получим простое правило пересчета результатов измерений с подобного модельного явления на натурное явление в виде:

$$a^{(m)} = a^{(n)} \left( \frac{a_1^{(n)}}{a_1^{(m)}} \right)^\alpha \dots \left( \frac{a_k^{(n)}}{a_k^{(m)}} \right)^\gamma \quad (3.11)$$

Всё что стоит справа в (3.9) после  $a^{(m)}$  часто называют переходным масштабом. Для  $k$  величин с независимыми размерностями  $a_1, a_2, \dots, a_k$  переходные масштабы могут быть произвольными, и их нужно задавать или определять условиями задачи, а при экспериментах - из опытов, имея в виду получение максимальной простоты и удобства моделирования.

Приведенные выше простые определения и утверждения полностью исчерпывают содержание теории подобия: ничего другого в этой теории больше нет. Однако на практике часто выполнение всех условия (3.11) одновременно бывает затруднено (они всегда выполняются, если модель совпадает с натурой, но тогда моделирование теряет всякий смысл), и тогда встает вопрос о величине погрешностей (масштабном эффекте), которые возникают при переносе на природу результатов, полученных на модели. Здесь возникает проблема приближенного моделирования (иногда часть безразмерных параметров слабо

влияет на результат, тогда выполнение некоторых критериев (3.11) можно игнорировать, иногда прибегают к частичному или локальному моделированию, условия для которого ослаблены по сравнению с условиями полного моделирования [40].

Как следует из теории подобия, моделирование дефекта и реальное ухудшение изоляции являются подобными, так как определяются одними и тем же набором параметров. А так как модель соответствует реальному объекту, то результаты проведенных опытов можно интерпретировать.

### 3.2 Приборы и инструменты для проведения эксперимента

Для проведения эксперимента была использована лабораторная установка, включающая в себя:

- Асинхронный двигатель;
- Датчик;
- Экранированный кабель;
- Программируемый контроллер (ПЛК);
- Персональный компьютер (ПК);
- Программное обеспечение на ПК.

Установка изображена на рисунке 3.1.

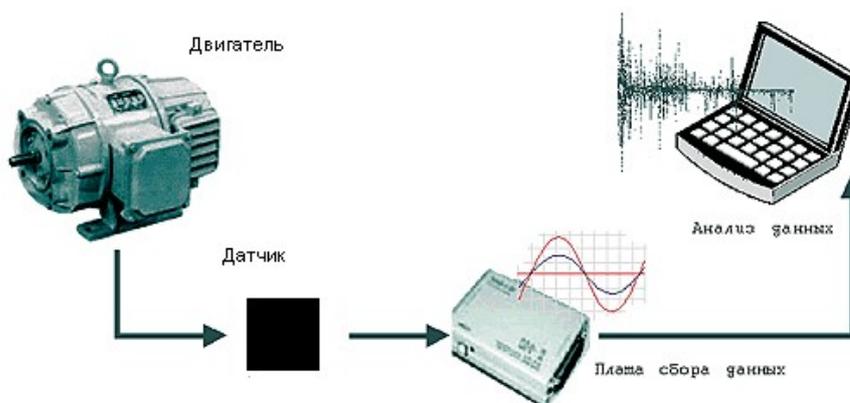


Рисунок 3.1. Лабораторная установка

При проведении опытов было замечено, что внешние наводки (фон) имеют большую амплитуду и могут влиять на чистоту эксперимента. Была проведена серия опытов, в которой изучался фон. Его анализ, представленный на рисунке 3.2. показал, что он периодичный и вызван сильным внешним источником помех

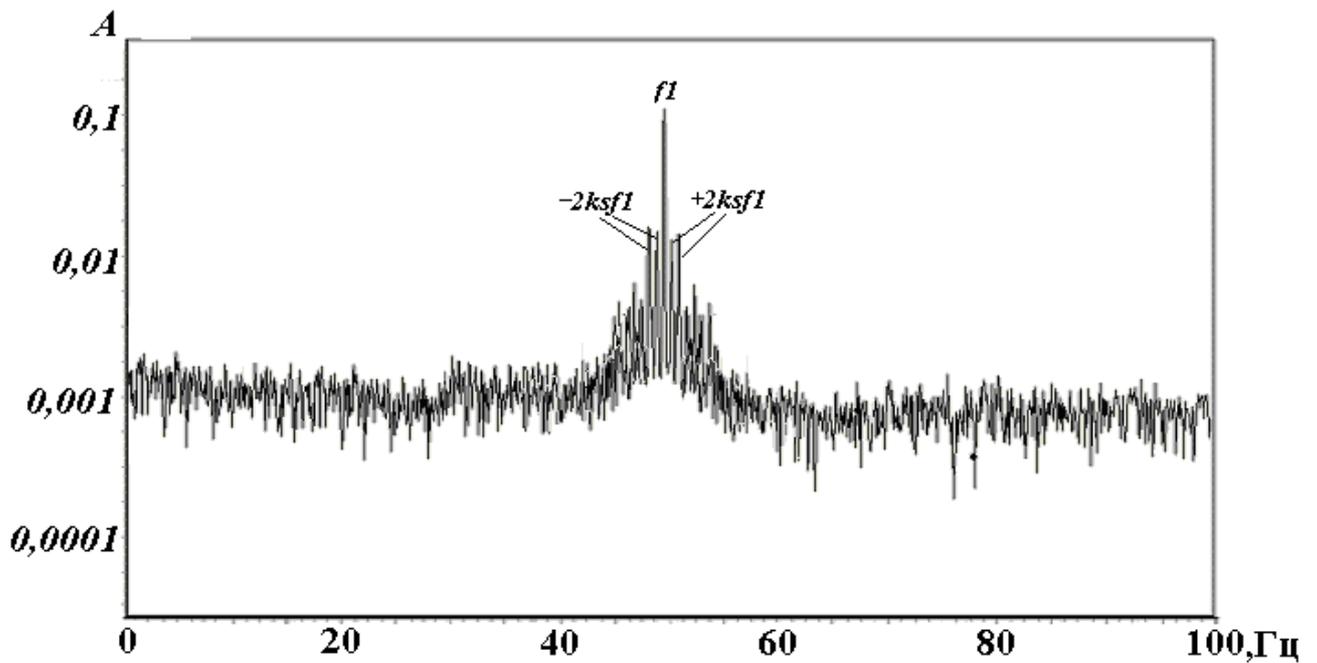


Рисунок 3.2. Форма сигнала фона

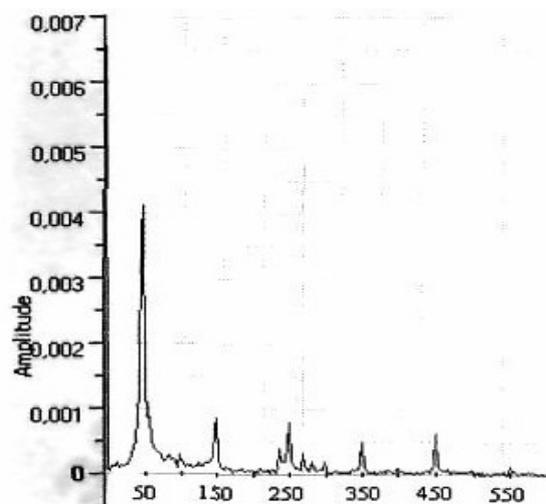


Рисунок 3.3. Гармонический сигнал фона

Как видно из рисунка 3.3 основные гармоники наводок совпадают по частоте с гармониками изучаемого сигнала, поэтому возникла необходимость уменьшить это влияние до минимума. Для этого был произведен целый ряд модернизаций:

- применение более защищенного от внешних полей кабеля, соединяющий датчик с контроллером;
- произведено заземление корпуса компьютера;
- применен датчик со встроенным экраном;
- увеличено количество витков датчика.

После перечисленных операции было достигнуто резкое уменьшения

внешних влияний. Анализ фона показал отсутствие и нём каких-либо периодически составляющих.

Датчик представляет собой катушку индуктивности, имеющую 6000 витков, которая является нелинейным индуктивным сопротивлением, или нелинейной индуктивностью.

Нелинейные индуктивности подразделяют на управляемые и неуправляемые, но деление на инерционные и безынерционные на них не распространяется, так как нелинейность их обусловлена свойствами ферромагнитного материала, а нетепловым эффектом [41].

Сердечники нелинейных индуктивностей при относительно низких частотах делают обычно двух типов: пакетные и спиральные.

Пакетные сердечники состоят из тонких пластин ферромагнитного материала кольцевой или П-, или Ш-образной формы.

Спиральные сердечники изготавливают из тонкой ферромагнитной ленты, по форме в виде туго навитой часовой пружины. Пластины пакетного сердечника и отдельные витки спирального сердечника изолируют друг от друга эмалевым лаком, жидким стеклом или каким-либо иным изолирующим составом и запекают.

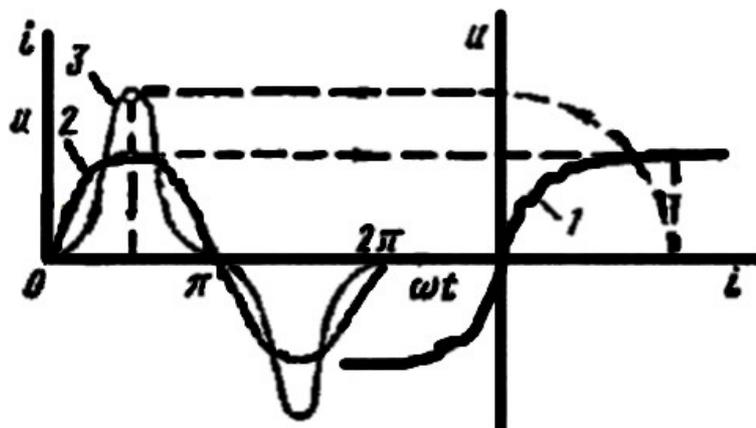
Изоляция необходима для уменьшения потерь энергии в сердечнике от вихревых токов.

При высоких частотах резко возрастает потеря в листовых сердечниках, поэтому сердечники, предназначенные для работы на высоких частотах, выполняют обычно из феррита.

Если нелинейное сопротивление присоединить к генератору синусоидального напряжения, то протекающий через сопротивление ток будет иметь несинусоидальную форму и поэтому нелинейное сопротивление будет являться генератором высших гармоник тока.

Для построения кривой  $i = f(\omega t)$  последовательно придаем  $\omega t$  значения, например равные 0,  $\pi/6$ ,  $\pi/4$ ,  $\pi/3$ ,  $\pi/2$  и так далее; для каждого из них находим напряжение  $u$ , переносим соответствующее значение  $u$  на кривую  $u = f(t)$  и из нее определяем значение тока  $i$  для взятого момента времени. Найденное значение тока  $i$  откладываем на той ординате, которой соответствует выбранный момент времени.

Эти операции показаны на рисунке 3.4 стрелками. Так, по точкам строят кривую 3. Она имеет пикообразную форму и может быть разложена на гармоники. Аналогично, если через нелинейное сопротивление пропустить синусоидальный ток, то напряжение на нем будет иметь несинусоидальную форму.



- 1- вольтамперная характеристика сопротивления, кривая;
- 2- синусоидальное значение напряжения на нем, кривая;
- 3- ток через сопротивление

Рисунок 3.4. Генерация высших гармоник тока

Электромагнитные датчики предназначены для измерений переменных электрических токов и напряжений. Их принцип действия заключается в следующем. Соответствующие построения приведены на рисунке 3.4. Следовательно, нелинейное сопротивление будет являться генератором высших гармоник напряжения.

Амплитуды первой и высших гармоник токов нелинейно зависят от амплитуд первой и высших гармоник напряжений на нелинейных сопротивлениях.

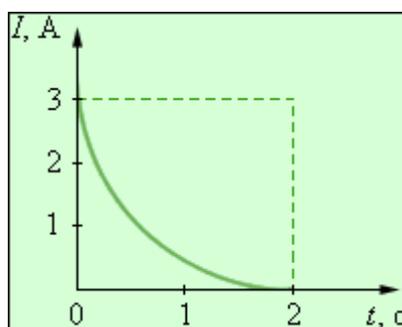


Рисунок 3.5. ЭДС индукции возникающая в датчике при воздействии электромагнитного поля

Под воздействием электромагнитного поля, создаваемого измеряемым током, в датчике возникает ЭДС индукции, которая, складываясь с напряжением переходного процесса в датчике (рисунок 3.5), влияет на операцию преобразования длительности переходного процесса в длительность TTL-импульса на выходе компаратора, В то же время изменений самих параметров датчика не происходит. Таким образом, в отличие от обычных индукционных датчиков. В которых возникающая в них ЭДС индукции используется, как выходная величина, в индукционно-индуктивных датчиках ЭДС индукции выполняет роль модулирующего фактора, в конечном итоге влияющего на

выходной сигнал измерительного устройства. Тем самым способ преобразования, основанный на возбуждении в датчиках переходных процессов и измерении их длительности, можно использовать не только для параметрических датчиков, но и для датчиков генераторного типа [42].

Индукционно-индуктивные датчики имеют одну особенность, отличающую их от параметрических датчиков. Поскольку в основу их принципа действия положено явление электромагнитной индукции, то выходной сигнал согласно закону Фарадея пропорционален скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки датчика. Для определения магнитной индукции или силы тока, создающего магнитное поле, выходной сигнал необходимо проинтегрировать. Поэтому измерительные приборы, основанные на индукционном методе, обычно содержат интеграторы тока или ЭДС. Поскольку индукционно-индуктивные датчики входят в состав микропроцессорных измерительных устройств или устройств, реализованных на основе платы расширения для персонального компьютера, то это обстоятельство делает возможным и целесообразным использование численных методов интегрирования сигналов вместо аппаратных. В основу метода обработки сигналов положено одно из свойств Фурье - преобразования, согласно которому, если  $G(v)$  есть трансформанта первой производной  $f'(t)$  некоторой функции  $f(t)$ , то  $G(v) = -i2\pi v F(v)$ , где  $F(v)$  есть трансформанта самой функции.

Таким образом, осуществив Фурье - преобразование выходного сигнала (пропорционального первой производной магнитного потока по времени) и разделив трансформанты, можно с помощью обратного Фурье - преобразования восстановить сигнал, пропорциональный потоку.

Практическая реализация этого способа включает в себя следующие операции.

Вначале формируется выборка из результатов измерений полученных индукционно-индуктивными датчиками через строго фиксированные промежутки времени  $T$ . Объем выборки обычно составляет  $v=1024$  отсчета.

Вычисляется среднее арифметическое и вычитается их всех результатов измерений:

$$u[n] = U[n] \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U[n] \quad (3.12)$$

Далее используются прямое и обратное преобразования Фурье, связывающие  $N$  - точечную временную последовательность  $u[n]$ , и соответствующую ей  $N$  - точечную частотную последовательность  $u[k]$  :

$$u[k] = \sum_{n=0}^{N-1} u[n] \cdot \exp\left(\frac{i2\pi kn}{N}\right) \quad (3.13)$$

Конкретное значение частоты  $\nu$ , соответствующее каждому из членов последовательности  $u[k]$  определяется выражением  $\nu=k/NT$ , а значение времени  $t$  для членов последовательности  $u[n]$  - выражением  $t=nT$ . Подученные согласно выражению амплитуды гармоник делятся, а к фазам гармоник добавляется величина  $\pi/2$ . Последней операцией является обратное Фурье-преобразование и восстановление тем самым сигнала индукционно-индуктивного датчика, пропорционального измеряемому магнитному потоку или физической величине, связанной с магнитным потоком.

Анализ сигналов, полученных после численного интегрирования, и сравнение их с результатами, полученными на основе измерений электрической тока другими методами, позволяет сделать вывод о корректности рассмотренного способа интегрирования сигналов индукционно-индуктивных датчиков.

Для электромагнитных датчиков, имеющих разомкнутую магнитную цепь, линейный характер зависимости между воздействующей на датчик величиной и соответствующим изменением его параметров выполняется только очень ограниченном диапазоне измеряемых величин или не выполняется совсем. Поэтому для микропроцессорных измерительных устройств, в состав которых входят такие датчики, необходимо формировать градуировочные зависимости, устанавливающие связь между измеряемой величиной и цифровым значением выходного напряжения. Такая связь устанавливается на основе измерений ограниченного числа узловых точек и соответствующей математической обработки полученных табличных данных. Анализ возможных методов интерполяции показал, что в данном случае наилучшие сходимость и точность обеспечивает сплайн - интерполяция.

Для оценки инструментальной составляющей погрешности измерительного устройства была разработана его математическая модель.

Анализ модели позволил сделать вывод, что наибольший вклад вносят два структурных блока. Один из них обеспечивает преобразование длительности импульса рассогласования в напряжение, другой блок представляет собой схему усиления и коррекции.

Кроме инструментальной погрешности в некоторых случаях на точность измерений может оказать серьезное влияние методическая погрешность.

Датчики, входящие в состав систем технической диагностики и контроля, отличаются широким разнообразием как по конструкции и принципу действия, так и по измеряемым физическим величинам. Поэтому источники методических погрешностей и способы их снижения в каждом конкретном случае свои. При измерении перемещений или толщины диэлектрических слоев на металлическом основании методическая погрешность может быть обусловлена отличием геометрических размеров объекта измерений и эталонного объекта, на основании измерения которого рассчитывалась градуировочная зависимость [43].

При измерении толщины металлических пленок на результаты измерений

влияет температура, поскольку от нее зависит электропроводность пленок. При бесконтактном измерении электрических токов на результаты измерений влияют форма и размеры проводников, их положение и ориентация относительно датчика, а также внешние магнитные поля, создаваемые токами и соседних близко расположенных проводниках. При измерении полей рассеяния с помощью соответствующих датчиков на результаты влияет ориентация датчика относительно магнитного поля Земли.

Некоторые из рассмотренных выше методических погрешностей, например, обусловленные влиянием температуры на электропроводимость объекта, могут быть снижены или устранены совсем с помощью входящей в состав программного обеспечения процедуры коррекции. В других случаях снизить методическую погрешность можно, проводя операцию градуировки после установки датчиков в местах их стационарного крепления. Иногда влияние методической погрешности не имеет существенного значения из-за специфики решаемой задачи. Например, при измерении электромагнитных полей рассеяния электрических машин с целью последующей оценки их технического состояния основной задачей является определение отношений амплитуд гармоник высших порядков к амплитуде основной гармоники.

Прежде, чем производить Фурье-преобразование, из исходного сигнала вычитается его среднее арифметическое значение, поэтому влияние постоянной составляющей магнитного поля Земли на результаты измерений амплитуд гармоник не существенно.

Одним из наиболее важных среди перечисленных выше факторов, искажающих результаты измерений и практически не поддающихся коррекции, является влияние формы и размеров объекта при измерении, например, толщины металлизации вихретоковыми датчиками. Градуировка датчиков в этом случае, как правило, производится на образцах достаточно больших размеров, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Реальные же объекты могут иметь размеры, намного превышающие диаметр катушки вихретокового датчика. Поэтому важно знать величину погрешности, вносимой конечными размерами объекта измерений и его минимальные размеры при которых погрешность измерений не превышает заданную величину.

Для оценки данной методической погрешности были произведены расчеты пространственного распределения магнитного поля, создаваемого током вихретокового датчика и на их основе - магнитного потокоцепления системы «датчик - проводящая плоскость».

В результате изучения принципа действия электромагнитного датчика установлено:

- амплитуды первой и высших гармоник токов нелинейно зависят от амплитуд первой и высших гармоник напряжений на электромагнитном датчике;
- под воздействием электромагнитного поля, создаваемого измеряемым током, в датчике возникает ЭДС индукции;
- ЭДС индукции выполняет роль модулирующего фактора;
- если электромагнитный датчик присоединить к генератору

синусоидального напряжения, то протекающий через сопротивление ток будет иметь несинусоидальную форму, что при размерах плоскости, превышающих четырехкратный диаметр катушки вихретокового датчика методическая погрешность составляет величину менее 0,1%. Это даст основание считать такие размеры объекта «бесконечно» большими, и, тем самым, пренебречь вкладом методической погрешности в результирующую погрешность измерений.

Аналоговый сигнал с датчика через вход подается в контроллер, который ограничивает полосу частот сигнала.

Далее сигнал проходит оцифровку. Аналого-цифровое преобразование дискретные отсчетов, которые преобразуются в последовательность чисел, причем поток цифровых данных, представляющий сигнал, включает как полезные, так и нежелательные высокочастотные компоненты и помехи. Для фильтрации высокочастотных помех, данные пропускаются через цифровой фильтр с высокой крутизной амплитудно-частотной характеристики и малыми фазовыми искажениями.

Оцифрованный сигнал характеризуется такими величинами. Как частота дискретизации и величина квантования.

Дискретизация - это выборка отсчетов аналогового сигнала с заданной периодичностью. Периодичность отсчетов определяется частотой дискретизации. В свою очередь, частота дискретизации должна быть не менее удвоенной частоты наивысшей гармоники исходного звукового сигнала. В противном случае оцифрованный звуковой сигнал нельзя преобразовать в аналоговый, точно соответствующий исходному сигналу.

Одновременно с дискретизацией осуществляется квантование отсчетов по амплитуде - мгновенные значения амплитуды измеряются и преобразуются в цифровой код. При этом точность измерения зависит от количества разрядов кодового слова. Таким образом, чем выше разрядность, тем ближе к реальному.

Для используемого метода диагностики была выбрана частота дискретизации 44,1 кГц а величина квантования 16 бит. Такие параметры частот возможность без ущерба для информативности сигнала производить преобразование из цифровой в аналоговый. И не занимают большое пространство на «жестком» диске ПК.

Формат хранения данных. Формат аудио-файла, представляющий произвольный сигнал в виде цифрового исходного звукового колебания или звуковой волны (wave), позволяет работать со звуками любого вида, любой формы и длительности.

Для анализа гармонического состава сигнала была использована программа PowerGraph 3.3. Функции данного программного обеспечения позволяют оценить очень большое количество параметров сигнала.

Для спектрального анализа в программе «PowerGraph» используется алгоритм «Быстрое преобразования Фурье». Спектроанализатор позволяет строить различные типы спектральных графиков, проводить дополнительные статистические вычисления в заданных частотных полосах. Также данная программа позволяет фиксировать точное значение амплитуд гармоник [44].

Порядок проведения экспериментов. Для проведения опытов на двигателе выбирались фиксированные точки, в которых проводились измерения напряженности ВМП. Было выбрано восемь точек, которые представлены на рисунке 3.6.

Восемь - это не фиксированное значение, количество точек может быть и больше, однако меньшее количество не рекомендуется, поскольку не позволяет адекватно оценить полную картину ВМП.

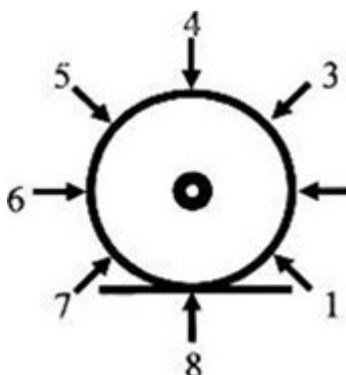


Рисунок 3.6. Выбор точек для проведение замеров ВМП

В выбранных точках необходимо было поставить маркеры, чтобы в дальнейшем исключить вероятность неточности установки датчика.

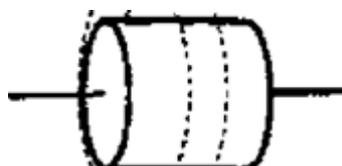
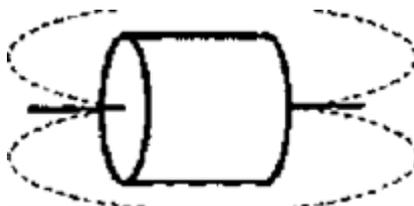
В ходе опытов было выявлено, что наибольшей информативностью обладает составляющая поля вокруг двигателя.

Поэтому датчик необходимо устанавливать так, чтобы его витки максимально пронизывались именно этим полем. Опыты проводились в несколько этапов.

Первый этап.

Измерение ВМП бездефектного двигателя.

Для этого последовательно в каждой точке производилась запись сигналов (треков) продолжительностью по 10 секунд (меньшая продолжительность может дать не полную картину гармоническое состава, что связано со спецификой быстрого преобразования Фурье).



### Рисунок 3.7. Схематическое изображение состояния ВМП двигателя

Круговое измерение повторялось пять раз, необходимое для уменьшения погрешности от неточной установки датчика. Затем амплитуды сигнала заносились в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Амплитуды сигналов

Позиция датчика	Значение амплитуды ВМП					
	$a_{11}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
1	$a_{11}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
2	$a_{21}$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$	$a_{25}$
...	...	...	...	...	...	...
8	$a_{81}$	$a_{81}$	$a_{82}$	$a_{83}$	$a_{84}$	$a_{85}$

Второй этап.

Измерение ВМП при межвитковом моделировании дефекта.

Первоначально моделирование дефекта производилось в фазе А. Для этого к выводам  $a'$ ,  $a''$  подключался реостат и устанавливалось значение сопротивления равное 1000 Ом. Замеры ВМП производились аналогично первому этапу. Значения заносились в таблицу и обрабатывались.

Затем сопротивление реостата уменьшалось до 800 Ом и повторялись серии замеров, и т. д. до сопротивления реостата равного 0 Ом. Затем моделировался дефект в фазе В и С. Данные обрабатывались аналогично.

Третий этап.

Измерение ВМП при межфазном моделировании дефекта.

Процесс проведения эксперимента аналогичен межвитковому, за исключением того, что реостат подключался к предварительно сделанным выводам от различных фаз ( $a'$ ,  $b'$ ;  $a'$ ,  $c'$ ,  $b',c'$ ). После этого полученные данные заносились в таблицу 3.2.

Обоснование информативности полученного ВМП АД. Первоначально были проведены опыты по анализу качества напряжения подводимого к АД.

Для этого была использована активная нагрузка включенная по схеме звезда. Она подключалась к сети через трансформаторы тока, соединенные последовательно. Нагрузкой для ТТ служило сопротивление  $R$ , падение напряжения на нем записывалось на ПК. При таком включении из-за того, что токи в фазах сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$  сигнал сети должен отсутствовать.

В случае появления каких-либо искажений в одной из фаз, симметрия нарушается [45]. Это нарушение можно зафиксировать на дисплее компьютера.

Таблица 3.2

Результаты экспериментов

Фаза в которой моделировался дефект	Сопротивление реостата	Амплитуда ВМП			
		$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	(без дефекта)	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
А	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
В	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
С	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
А-В	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
А-С	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
В-С	1000 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$
	...	...	...	...	...
	0 Ом	$a_{1cp}$	$a_{2cp}$	...	$a_{8cp}$

При работе было определено, что в ходе исследований определяется действительно магнитное поле данной машины, а не какое-либо другое магнитное поле. Был проделан ряд опытов, в ходе которых датчик (катушку индуктивности) перемещали от машины на определенное расстояние и оценивали уровень снижения сигнала.

По рисунку 3.8 видно, что на расстоянии 10 см напряженность ВМП уменьшается в 5 раз, а на 0,5 м ее амплитуда соизмерима с собственными шумами измерительной системы.

Резкое уменьшение уровня сигнала говорит о том, что производится измерение электромагнитного поля именно от данной машины. Высокая помехозащищенность может быть объяснена конструкцией первичного датчика, который был экранирован в ходе всего эксперимента, что обеспечивало значительное уменьшение внешних электромагнитных наводок.

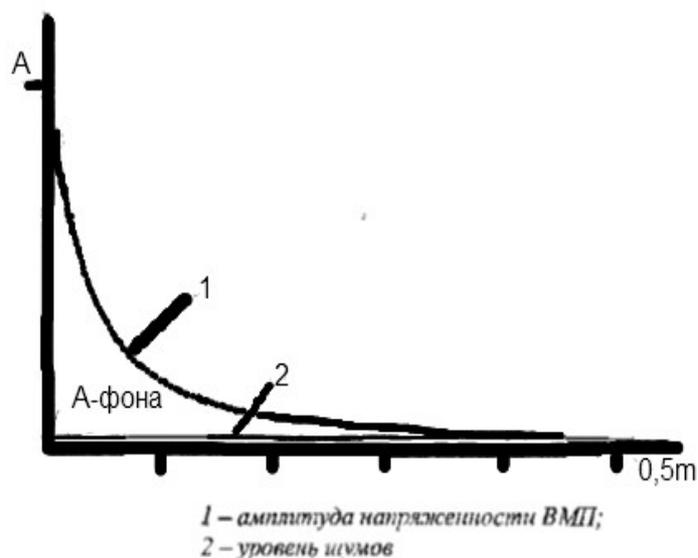


Рисунок 3.8. Зависимость напряженности ВМП от расстояния между датчиком и двигателем

Резкое уменьшение уровня сигнала говорит о том, что производится измерение электромагнитного поля именно от данной машины. Высокая помехозащищенность может быть объяснена конструкцией первичного датчика, который был экранирован в ходе всего эксперимента, что обеспечивало значительное уменьшение внешних электромагнитных наводок.

В ходе экспериментов были получены следующие результаты: было доказано, что ВМП асинхронного двигателя можно использовать для диагностики состояния двигателя.

Зависимость формы кривой ВМП от расстояния заключается только в уменьшении амплитуды и не как не влияет на гармонический состав.

Этот факт доказывает то, что информация полученная датчиком исходит действительно от испытуемого объекта.

### 3.3 Закономерности проявления гармоник спектра

По табличным значениям, полученным в процессе измерения, по методике описанной выше строятся диаграммы, и проводится спектральный анализ в точках с наибольшим значением амплитуды.

Результаты представлены на рисунках 3.9 – 3.10.

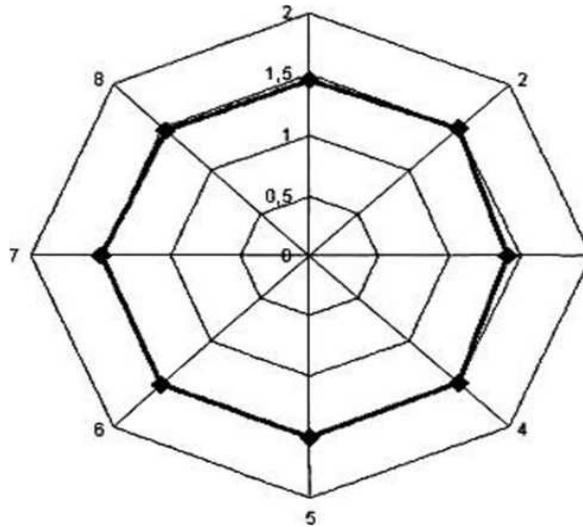


Рисунок 3.9. Картина напряженностей ВМП вокруг двигателя без дефекта

На рисунке 3.10 видно, что амплитуда ВМП вокруг двигателя на равноудаленных точках почти одинаковая и близка к идеальному.

При рассмотрении гармонического состава видно, что амплитуда основной гармоники (50 Гц) ярко выражена, а амплитуды остальных имеют небольшую амплитуду или не присутствуют вовсе.

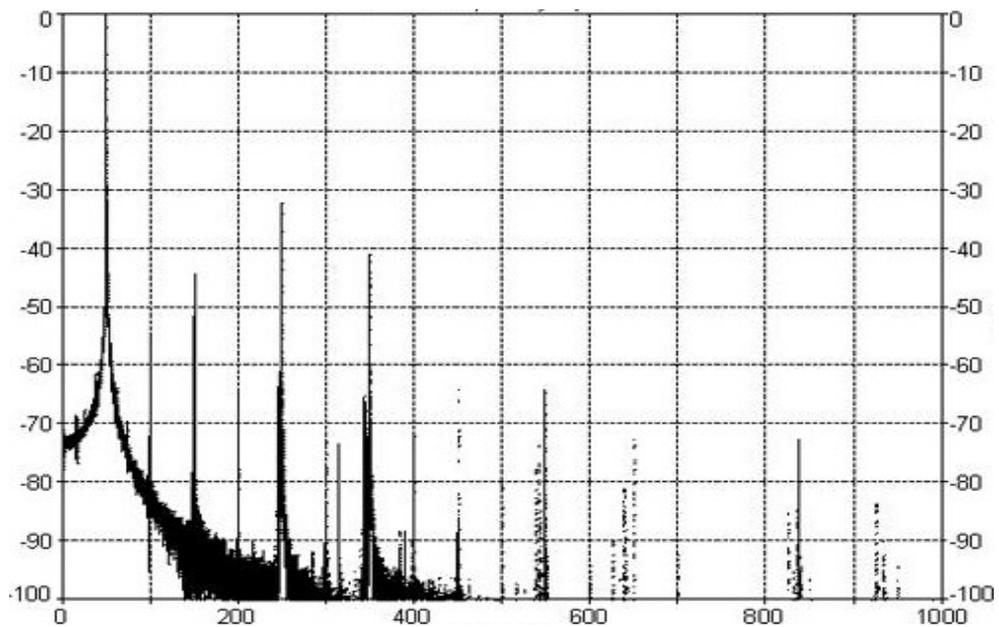


Рисунок 3.10. Гармонический состав ВМП АД без дефекта

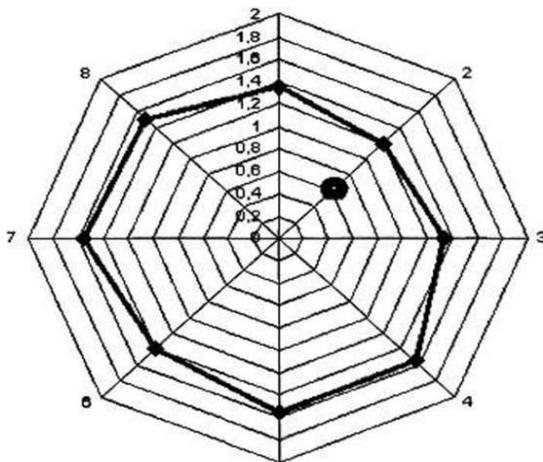


Рисунок 3.11. Картина напряженностей ВМП двигателя с межвитковым замыканием в катушке фазы А

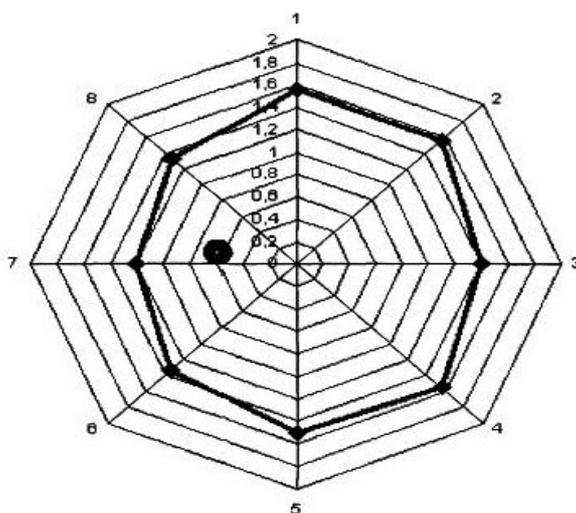


Рисунок 3.12. Картина напряженностей ВМП двигателя с межвитковым замыканием в катушке фазы В

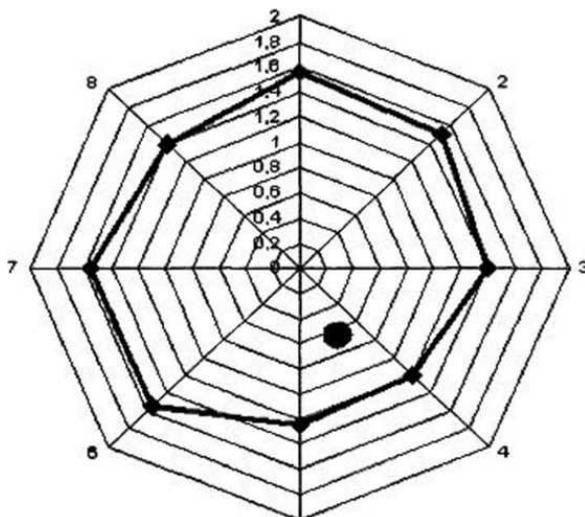


Рисунок 3.13. Картина напряженностей ВМП двигателя с межвитковым замыканием в катушке фазы С

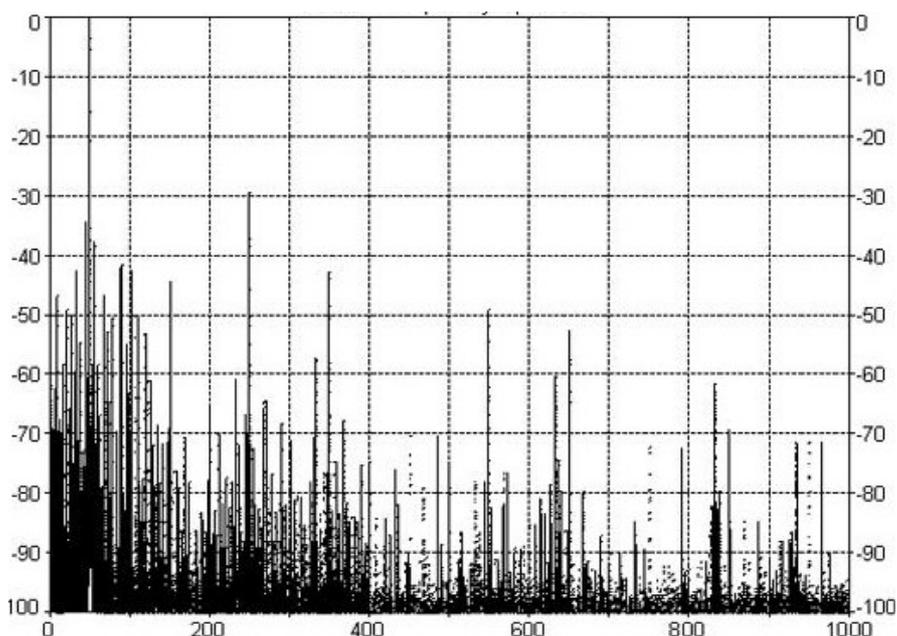


Рисунок 3.14. Гармонический состав ВМП АД в точке наибольшей амплитуды сигнала при межвитковом замыкании

Из рисунков 3.15- 3.16 видно, что картина ВМП меняется в зависимости от места расположения дефекта. При анализе гармонического состава сигнала в точках наибольшей амплитуды выявлено, что его характер никак не зависит от места расположения межвиткового замыкания и почти одинаков. На рисунке 3.18 изображен гармонический состав ВМП АД при межвитковом замыкании, на нем видно, что амплитуда первой гармоники уменьшилась почти в два раза, амплитуды же 3, 5 и 9 выросли, при этом амплитуда 7 гармоники осталась без изменения относительно бездефектного.

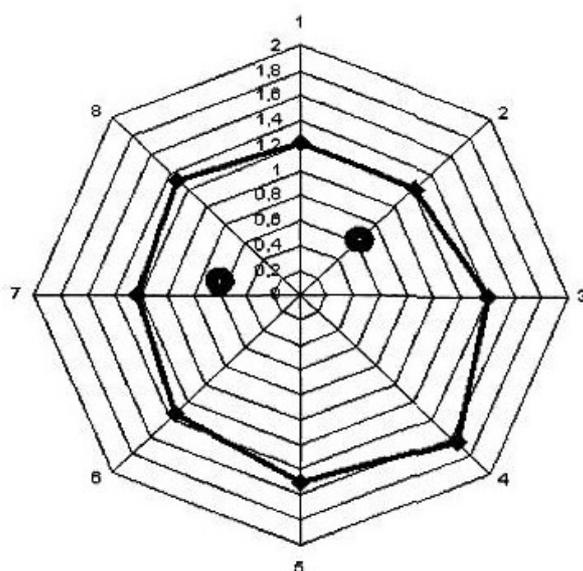


Рисунок 3.15. Картина напряженностей ВМП двигателя при межфазном замыкании между фазами А – В

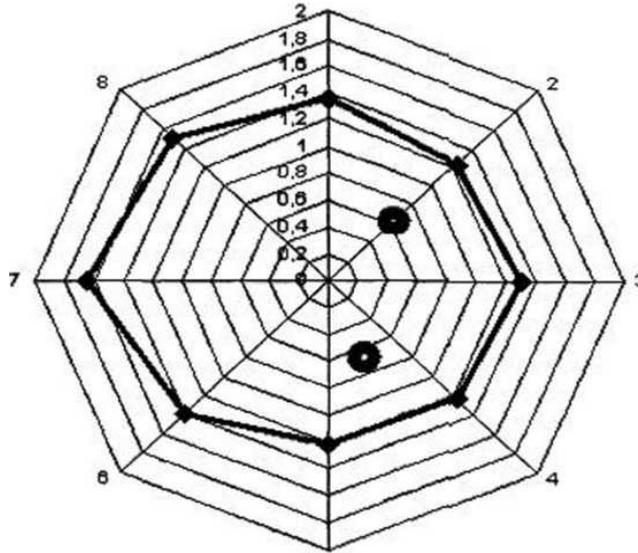


Рисунок 3.16. Картина напряженностей ВМП двигателя при межфазном замыкание между фазами А – С

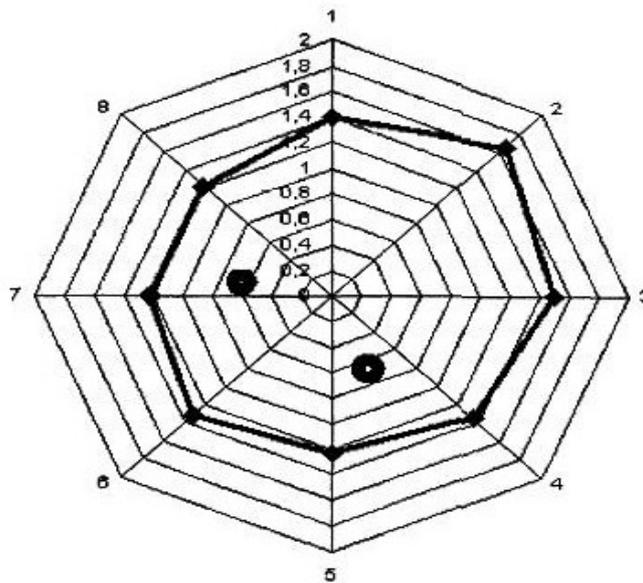


Рисунок 3.17. Картина напряженностей ВМП двигателя при межфазном замыкание между фазами В – С

При рассмотрении рисунков 3.16 - 3.17 видно, что картина ВМП также меняется в зависимости от фаз, между которыми присутствует межфазное замыкание. При анализе гармонического состава сигнала, замеренного в точке наибольшей амплитуды ВМП легко заметить, что амплитуда первой гармоники уменьшилась незначительно, при этом значительно увеличили свои амплитуды 3, 7 и 9 гармоники, а амплитуда пятой гармоники осталась без изменения.

Обобщая сказанное ранее отметим порядок проведения эксперимента. Его суть заключается в размещении рядом с двигателем первичного

преобразователя (электромагнитного датчика), позволяющего фиксировать внешнее магнитное поле, образующееся вокруг двигателя в процессе его работы и представляющее собой отголоски мультипликативного поля в магнитном зазоре АД.

Сигнал с датчика поступает на контроллер, где он оцифровывается и записывается в ПК. При этом, разложение сигнала на гармоники осуществляется по методу «быстрое преобразование Фурье».

В первую очередь, для подтверждения информативности ВМП был осуществлен цикл экспериментов с удалением датчика от включенного двигателя. Кроме того, была проведена серия опытов, в которой снимались характеристика с двигателя без дефектов.

Для каждого двигателя отдельно полученные картины гармонического состава отличаются друг от друга не более, чем на 0,2%. Ввиду этого было принято, что гармонический состав у конкретного двигателя без дефектов стабилен и может быть рассмотрен как эталонный.

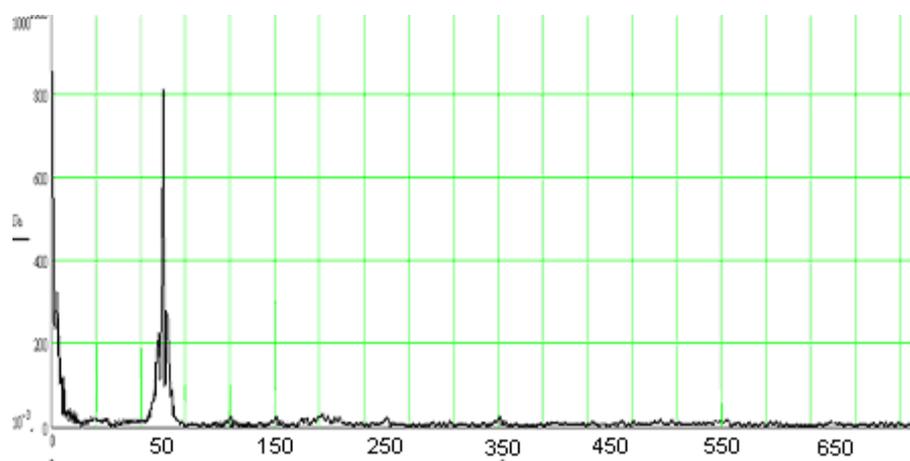


Рисунок 3.18. Гармонический состав ВМП двигателя без дефектов

Данный гармонический спектр характеризует двигатель до появления в нем дефектов. При этом, ярко выражены первая (50 Гц) гармоника, а остальные имеют небольшую амплитуду и на общем фоне не выделяются. Для достижения поставленной цели, были смоделированы межвитковое и межфазное замыкания.

Полученные гармонический состав ВМП, показанные на рисунках 3.19 и 3.20, резко отличаются от эталонного.

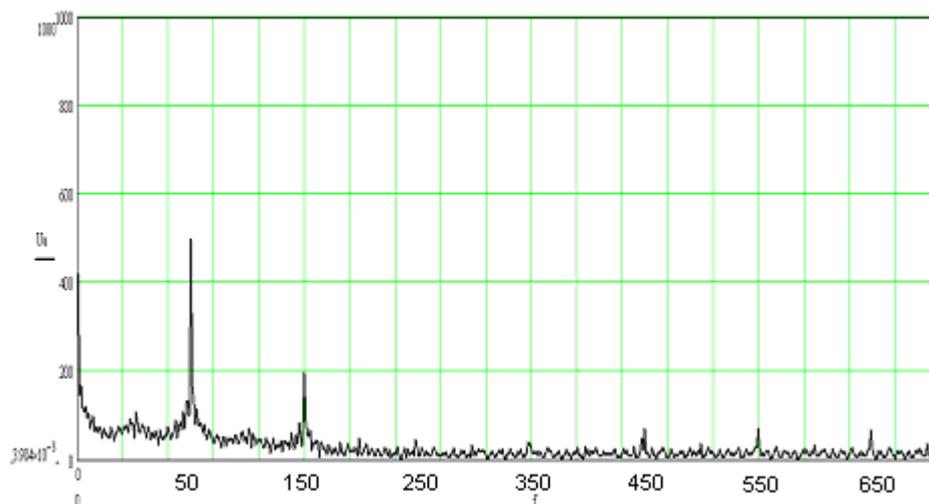


Рисунок 3.19. Гармонический состав ВМП двигателя с межвитковым замыканием

Из рисунка 3.19 видно, что амплитуды первой гармоники (50 Гц) уменьшилась почти на 40% относительно первоначального значения, а третья (150 Гц) увеличила свою амплитуду и стала соизмерима с основной гармоникой, также несколько увеличили свою амплитуду 9, 11 и 13 гармоники (450, 550, 650 Гц соответственно). Данный опыт был проведен на двигателях с различной мощностью. Анализ полученных данных показал, что от мощности зависит только амплитуда ВМП, при этом характер гармонического состава остается тот же.

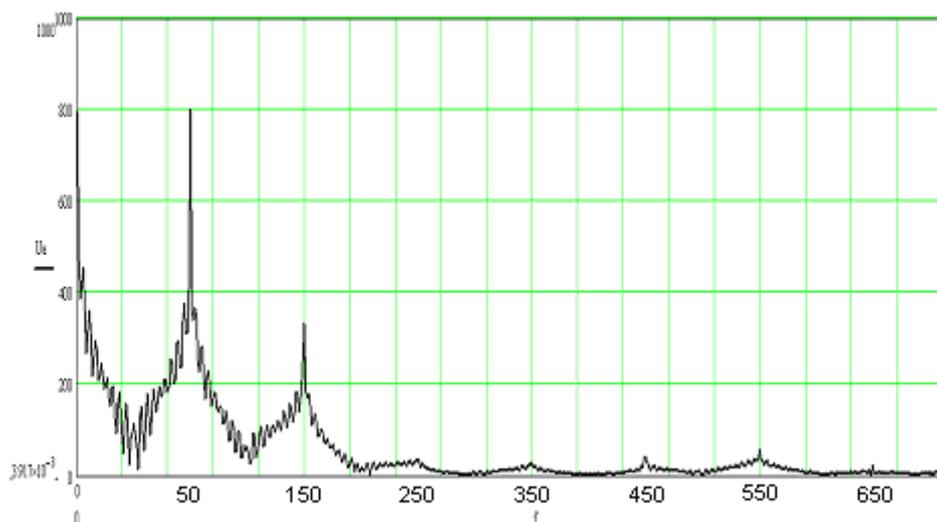


Рисунок 3.20. Гармонический состав ВМП двигателя с межфазным замыканием

### 3.4 Выводы

В ходе описанных лабораторных исследований, путем ускоренного старения изоляции АД, моделирования витковых и межфазных замыканий

обмоток, была доказана зависимость между спектром гармоник внешнего магнитного поля электрического двигателя и видом дефекта. Выполнены задачи исследования:

- в ходе проведения опытов было доказано, что развитие дефектов электродвигателя влияет на изменение его внешнего магнитного поля.

Более того, результаты данных исследований позволили установить, что анализ спектра внешнего магнитного поля асинхронного двигателя дает возможность получить достоверную информацию не только о виде дефекта, но и о степени его развития.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучено, что эффективное планирование ремонтов электрооборудования во многом определяет надежность технологического процесса предприятия и позволяет заблаговременно определить необходимые объемы финансовых вложений для успешного проведения ремонтной компании. При анализе ситуации, сложившейся в промышленности, было выявлено, что показатели надежности установленного в данном секторе производства электрооборудования являются неудовлетворительными.

Планирование отсутствует, а ремонты происходят на 85% по факту выхода из строя электродвигателе что влечет за собой значительные убытки от простоя оборудования. Наряду с вышесказанным стоит отметить значительный рост разработок новых методов диагностики. Основными причинами слабого практического применения новейших методов является отсутствие на предприятиях специалистов, способных правильно интерпретировать результаты диагностики, сложность и высокая стоимость диагностической аппаратуры.

Основные выводы и результаты исследований.

1. Исследована возможность диагностики неисправностей электрических машин по их внешнему магнитному полю, зависящему от несимметрий. Они обусловлены возникшими дефектами, изменяют характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник индукции, что даст возможность использовать индукцию ВМП для диагностирования ЭД.

2. Проведены экспериментальные исследования с применением программируемого контроллера, подтвердившие полученные зависимости формы ВМП ЭД от развития различных дефектов в двигателе. Экспериментально доказано, что наличие во ВМП АД гармоник, кратных  $3k$ , где  $k$  - основная гармоника, является диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора; проявление гармоник кратных  $2k$  является признаком эксцентриситета ротора двигателя. Обосновано, что ВМП АД наиболее сильно проявляется в плоскости, перпендикулярной оси вала ротора.

## Список использованной литературы

1. Грибанов, А. А. Повышения эксплуатационной надёжности электродвигателей в условиях значительных перепадов температуры и динамических нагрузок А. А. Грибанов, А. В. Левачев Тезисы докладов Международной молодёжной научной конференции «XXVI Гагаринские чтения». Т. 2. - М.: ЛАТМЭС, 2000, - 46 с.
2. Вайда, Д. Исследования повреждений изоляции. - М.: Энергия, 1968 - 400 с.
3. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания сельскохозяйственных предприятий Госагропром СССР. - М: ВО Агропромиздат, 1987. -191 с.
4. Глушков, А. М. Исследование условий работы электрооборудования в сельскохозяйственных предприятиях Приморского края Научные труды. - Челябинск: ЧИМЭСХ, 1973. - Вып. 83. - ч. 2. -с. 5-10,
5. Таран, В. П. Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве. - М.: Колос; 1975. – 304 с.
6. Грачев, Н. Н. Защита человека от опасных излучений: Н. Н. Грачев, Л.О. Мырова М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 2005. - 317 с.
7. Левачев, А. В. - Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток: дис.канд. техн. наук: 05.20.02. - Защищена 26.12.02: Утв. - Барнаул, 2002, -145 с.
8. Ключев, В. В. Технические средства диагностирования: Справочник Б. В. Ключев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред.В. В.Ключева.-М.: Машиностроение, 1989. - 672 с.
9. Сырых, Н. Н. Техническое обслуживание электрооборудования в сельском хозяйстве Н. Н. Сырых, В. С. Черкрыгин, С. А. Калмыков: М.: Россельхозиздат, 1980.-224 с.
10. Пястолов, А. А. Эксплуатация силового оборудования в сельском хозяйстве - М.: Колос, 1964. - 25 с.
11. Минаков, В. Ф., Обзор современных методов мониторинга электрических машин В. Ф. Минаков, С. К. Пустохайлов: материалы VII региональной научно-технической конференции «Вузовская наука — Северо-Кавказскому региону». Ставрополь: СевКавГГУ, 2003.
12. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин. Л., «Энергия», 1975.
13. Сотников, В. В. Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения [Электронный ресурс]: Дис. д-ра техн. наук: 05.09.01.-М.:РГБ,2003.
14. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». - М: Высш.шк., 1989-312 с.
15. Аполлонский, С. М. Зависимость момента дипольной модели внешнего магнитного поля электрической машины от режима работы Известия вузов. Электромеханика, 1979,№ 12.- с. 1093-1097.

16. Апполонкий, С. М. Моделирование внешних магнитных полей асинхронного двигателя Известия вузов. Энергетика. 1978, №7. - с. 126-131.
17. Волохов, С. А. Влияние анизотропии свойств стали ротора на внешнее магнитное поле электрических машин С. А. Волохов, П. Н. Добродеев Электротехника, 1997. №6.
18. Каганов, З. Г. Витковые напряжения электрических машин. - М.: Энергия, 1970.-150 с.
19. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. -928 с.
20. Волохов, С. А. Проявление статического эксцентриситет ротора во внешнем магнитном поле электрических машин С. А. Волохов, П. Н. Добродеев Электротехника. 2002. №11.
21. Гашимов, М. А., Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора М. А. Гашимов, С. В, Абдуладзе Электротехника. 2004. №2.
22. Рыбаков, В. А. Создание модели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации В. А. Рыбаков XV Международная интернет - конференция молодых ученых, аспирантов и студентов по современным проблемам машиноведения. - М., 2004
23. Добродеев, П. Н. Влияние токов в контурах соединений на внешнее магнитное поле электрических машин Электротехника, 1997. №8. - с. 32-34.
24. Алексеенко, А. Ю. Моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя с учетом процессов дефектообразования А. Ю. Алексеенко, С. О. Хомутов Измерение, контроль, информатизация: материалы Седьмой Международное НТК. - Барнаул: АлтГТУ. 2006. - с. 256.
25. Алексеенко, А, Ю. Диагностика асинхронных двигателей на основе использования параметров спектра их внешнего магнитного поля Л. Ю. Алексеенко, О. В, Бродский, В. Н. Веденев Наука и молодежь: Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Горизонты образования. – Барнаул, 2006.
26. Колот, Р. А. Диагностика повреждений: Перевод с английского. Под ред. П. Г. Бабаевского. - М.; Мир, 1989. - 516 с.
27. Каменев, Н. Г. Разработка автоматизированной системы технической диагностики и прогнозирования механических дефектов объектов роторного типа: Дис.канд. техн. наук. - Тверь, 1995. - 186 с.
28. Парр, Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера. – М.: Бином; Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.
29. Петров, И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 246 с.

30. Мишель Ж., Лоржо К., Эспьо Б. М. Программируемые контроллеры. М.: Машиностроение, 1986.
31. Мишель Ж. Программируемые контроллеры: архитектура и применение. М.: Машиностроение, 1992.
32. Микропроцессорная Система Технических Средств (МСТС). Руководство по программированию. Смоленск: ОАО НПО «Техноприбор».
33. Карпов Ю. Г. Теория автоматов. СПб.: Питер. - 2002.- 224 с.
34. Шалыто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000.- 780 с.
35. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж. - 2001. - 1296 с.
36. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 2001. - 575 с.
37. Минаев, И.Г. Программируемые логические контроллеры: практическое руководство для начинающего инженера И.Г.Минаев, В.В.Самойленко. – Ставрополь: АГРУС, 2009. – 100 с.
38. Деменков, Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров: Учебное пособие Под ред. К.А.Пупкова. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 172с.
39. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов А.Б.Сергиенко – Сб.: Питер, 2002. – 608с.
40. Сато, Юкио. Без паники! Цифровая обработка сигналов. Юкио Сато: пер. с яп. Селиной Т.Г.М.: Додэка – XXI, 2010. – 176 с.
41. Марпл-мл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
42. Куприянов, М.С., Матюшкин, Б.Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 1999.
43. Шнедепко, Б, В. Математические методы в теории надежности Б. В. Шнедепко, Ю. К, Беляев, А. Д. Соловьёв. – М.: Наука, 1965. - 409 с.
44. Ермаков, С. М. Математическая теория оптимального эксперимента С. М. Ермаков, Л. А. Жиглявский Учеб. пособие.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 320 с.
45. Барщевский, С. В. Экспериментальные исследования внешних переменных магнитных полей асинхронных машин С. В. Барщевский, А. В. Рулев Известия ЛЭТИ. - Л.: 1960. Вып. 42. - с. 290-307.