

ТАВРИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Курашкин Сергей Федорович

УДК 621.313.17: 621.316.95

**МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Овчаров Владимир Васильевич,
доктор технических наук,
профессор

Мелитополь – 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ	10
1.1. Условия эксплуатации погружных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве	10
1.2. Анализ причин выхода погружных электродвигателей из строя	12
1.3. Методы и средства, повышающие эксплуатационную надежность погружных электродвигателей	19
1.4. Выводы и задачи исследования	34

ГЛАВА 2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	36
2.1. Выбор метода исследования теплового режима работы электродвигателя	36
2.2. Обоснование тепловой схемы замещения погружного электродвигателя	39
2.3. Тепловой процесс погружного электродвигателя при неустановившемся режиме работы	42
.....	46
2.4. Аналитическое исследование тепловых проводимостей	49
2.5. Исследование процесса нагрева обмотки электродвигателя	
2.6. Аппроксимация реальной кривой нагрева электродвигателя как системы трех тел	51
.....	52
2.7. Выводы	
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ	54
3.1. Исследование режима работы погружного электродвигателя при несимметрии питающего напряжения	54
3.2. Исследование режима работы погружного электродвигателя при схлестывании питающих проводов воздушной линии электропередачи	63
3.3. Исследование режима работы погружного электродвигателя при обрыве фазы	67
.....	71
3.4. Выводы	
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАСХОДА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	72
4.1. Обоснование критериев диагностирования погружного электродвигателя	72
4.2. Математическая модель диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя	77
4.3. Обоснование допустимой величины дополнительного теплового износа изоляции при тепловой перегрузке	79
.....	87
4.4. Выводы	
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	89
.....	89
5.1. Технические требования к устройству диагностирования	
5.2. Структурная схема и алгоритм работы устройства диагностирования	89
.....	91
.....	95
5.3. Принципиальная схема устройства диагностирования	97

	3
5.4. Алгоритм работы устройства диагностирования	
5.5. Оценка надежности устройства диагностирования	98
5.6. Экспериментальное исследование математической модели диагностирования	98
5.6.1. Постановка вопроса	99
5.6.2. Описание экспериментальной установки, приборов и оборудования	101
5.6.3. Методика проведения экспериментального исследования модели диагностирования	102
5.6.4. Статистический анализ и оценка результатов исследования	105
5.7. Оценка экономической эффективности устройства диагностирования	108
5.8. Выводы	109
ВЫВОДЫ	111
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	121
ПРИЛОЖЕНИЯ	

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Опыт эксплуатации электрооборудования в сельскохозяйственном производстве показывает высокую аварийность асинхронных электродвигателей погружных насосов, что ведет к дополнительным технологическим убыткам, незапланированным ремонтам электрооборудования. Ежегодно в сельскохозяйственном производстве выходит из строя до 25% от общего числа эксплуатируемых электродвигателей [11]. Нормированный ресурс работы погружных электродвигателей составляет 14000

часов, фактически они выходят из строя значительно раньше – реальный ресурс их работы составляет 3000...4000 часов. Значительная аварийность электродвигателей погружных насосов обусловлена особенностями их эксплуатации в условиях агропромышленного комплекса, к специфике которых, в частности, относятся низкое качество напряжения сети, недостаточный уровень технического обслуживания.

Особенностью сельских распределительных сетей является смешанное подключение трехфазных и однофазных потребителей, что приводит к асимметрии напряжений и токов. Питание потребителей осуществляется по воздушным линиям электропередачи, имеющим значительную протяженность, в связи с чем, частыми являются случаи обрыва и замыкания проводов. Аварийность асинхронных электродвигателей по причине асимметрии питающего напряжения, в том числе из-за обрыва фазы, достигает 44% от общего количества вышедших из строя электродвигателей. Существующие устройства диагностирования и защиты погружных электродвигателей от аварийных режимов имеют недостаточную эксплуатационную надежность. Исследования, направленные на анализ особенностей режимов работы погружных электродвигателей в условиях агропромышленного комплекса, на разработку методов функционального диагностирования, обоснование параметров диагностирования и на основании этого разработку устройств диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей, являются актуальными.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы Таврического государственного агротехнологического университета на 2005-2010 г.г. по научно-технической программе № 1 «Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (государственный регистрационный номер 0102U000678), *підпрограмме 1.6. «Розробка методів і засобів технічного сервісу електрообладнання та ресурсоенергозбереження», напрямленню 1.6.4. «Розробка пристрою функціонального діагностування заглибних електронасосів».*

Цель работы – повышение эксплуатационной надежности погружных электродвигателей путем функционального диагностирования режимов их работы на базе математической модели процессов расхода ресурса изоляции в период их эксплуатации.

Задачи исследования:

- провести анализ повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей;
- аналитически исследовать тепловые переходные процессы погружного электродвигателя как гетерогенного тела в функции токовых нагрузок;
- исследовать режимы работы погружного электродвигателя под влиянием внешних факторов;
- разработать математическую модель диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя в процессе его работы и обосновать параметры диагностирования;

- разработать устройство функционального диагностирования режимов работы погружного электродвигателя;
- экспериментально проверить работу устройства диагностирования в эксплуатационных условиях.

Объект исследования – тепловые процессы, протекающие в асинхронном электродвигателе погружного насоса под влиянием эксплуатационных воздействий.

Предмет исследования – закономерности расхода ресурса изоляции электродвигателя погружного насоса в функции параметров эксплуатационных воздействий.

Методы исследования. Процесс нагрева асинхронного электродвигателя погружного насоса исследовался с помощью эквивалентных тепловых схем замещения, операторного метода решения дифференциальных уравнений, матричного расчета. Исследование режимов работы погружного электродвигателя под влиянием внешних факторов проводилось с помощью метода симметричных составляющих трехфазной системы величин, символического метода расчета цепей и общих методов расчета линейных электрических цепей.

Обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel и Maple 9.5.

Научная новизна полученных результатов:

1. Получила дальнейшее развитие теория тепловых переходных процессов асинхронного электродвигателя погружного насоса как гетерогенной системы в части определения парциальных составляющих установившегося превышения температуры обмотки и постоянной времени нагрева.
2. Разработана методика определения параметров эквивалентной тепловой схемы замещения погружного электродвигателя как системы трех тел на основании опытов холостого хода и короткого замыкания.
3. Впервые предложен коэффициент преобразования энергии в электродвигателе погружного насоса, учитывающий потери активной мощности в нем и скорость расхода ресурса изоляции, позволяющий интегрировано оценивать режим работы электродвигателя с учетом загрузки насоса, асимметрии напряжения, неполнофазного режима.
4. Впервые предложена математическая модель функционального диагностирования режимов работы электродвигателя погружного насоса с обоснованием параметров диагностирования.

Практическая значимость полученных результатов. На основании результатов исследования разработано устройство функционального диагностирования режимов работы погружного электродвигателя и обоснованы его уставки, которое позволяет повысить эксплуатационную надежность электродвигателей погружных насосов.

Предложена методика практического определения параметров тепловой модели погружного электродвигателя как системы трех тел.

По результатам исследований разработана проектно-конструкторская документация на устройство функционального диагностирования режимов работы асинхронного электродвигателя погружного насоса, изготовлен экспериментальный образец, который внедрен и прошел производственные испытания в Каменском

межрайонном управлении водного хозяйства Запорожской области.

Личный вклад соискателя. В диссертации лично автором разработана математическая модель процессов расхода ресурса изоляции при совокупном влиянии эксплуатационных воздействий, с помощью которой исследованы режимы работы электродвигателя погружного насоса и предложена модель функционального диагностирования последнего.

В научных работах, написанных в соавторстве вклад соискателя состоит в следующем: в работе [39] обосновано использование электрической модели тепловой схемы замещения погружного электродвигателя для непрерывного диагностирования тепловых процессов, которые протекают в нем; в работе [58] проведены теоретические исследования скорости теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя в зависимости от влияния коэффициента несимметрии напряжения обратной последовательности и коэффициента загрузки; в публикациях [59, 60] разработана методика определения параметров и потерь мощности тепловой схемы замещения погружного электродвигателя; в работах [61, 63] автор применил в устройствах диагностирования режимов работы асинхронных электродвигателей результаты исследования, которые были получены в предыдущих работах по определению влияния несимметрии напряжения питания на скорость износа изоляции; в работе [62] проведен анализ процесса преобразования электроэнергии, определены условия нормального режима преобразования электрической энергии в погружном электродвигателе, составлен алгоритм расчетов текущего превышения температуры обмотки статора; в работе [64] автором определены параметры схемы замещения одной фазы погружного электродвигателя и проведенный анализ его режима работы во время схлестывания проводов линии электропередачи; в работе [65] определены корни характеристического уравнения тепловой схемы замещения, выполнена аппроксимация парциальных составляющих превышения температуры обмотки с целью применения полученной зависимости в устройстве функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов (г. Мелитополь, ТГАТУ, 1998-2010 г.г.), международной научно-технической конференции «Энергетика в АПК» (г. Мелитополь, ТГАТА, 2002 г.), научно-технической конференции «Проблемы энергобезопасности та енергозбереження в АПК України» (г. Харьков, ХНТУСГ, 2010 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 13 статьях за период с 1998 по 2010 г.

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ

1.1. Условия эксплуатации погружных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве

В настоящее время для подъема воды из скважин глубиной 20...250 м от поверхности земли с целью орошения сельскохозяйственных полей, водоснабжения населенных пунктов, животноводческих ферм и промышленных объектов широко применяется погружной электропривод (рис. 1.1), состоящий из центробежного насоса типа ЭЦВ и водозаполненного асинхронного электродвигателя типа ПЭДВ.

Электродвигатели ПЭДВ (ОСТ 26.06.1161 – 79) выпускаются на номинальную мощность 0,4...65 кВт с внешним диаметром корпуса 93...270 мм. Их конструкция существенно отличается от конструкции асинхронных двигателей единых серий, что объясняет их специфические условия эксплуатации [1]:

- 1) погружной электродвигатель расположен в скважине вертикально, т.к. наружный диаметр электронасосного агрегата ограничен. Расположение погружного электродвигателя 1 (рис. 1.1) ниже входа 3 для откачиваемой воды центробежного насоса 2 обеспечивает уменьшение общего диаметра агрегата и конструктивную простоту;
- 2) электродвигатель всегда находится под уровнем откачиваемой воды, которая имеет различные температуру, загрязненность и химический состав. Наличие механических примесей в воде вызывает необходимость в герметизации внутренней полости погружного электродвигателя и специальной системы «дыхания», компенсирующей изменение объема жидкости (воды), заполняющей эту полость;
- 3) откачиваемая вода перед поступлением в насос омывает наружную поверхность корпуса электродвигателя, интенсивно его охлаждая;
- 4) электронасосный агрегат находится в скважине на значительной глубине, и подвод электроэнергии к двигателю осуществляется специальным водостойким кабелем ВПВ или ВПП, который обладает определенным электрическим сопротивлением, что, обуславливает рабочие характеристики погружного электродвигателя как электродвигателя с предвключенным сопротивлением;

- 5) момент сопротивления на валу погружного электродвигателя, обуславливаемый параметрами насоса, имеет вентиляторный характер;
- 6) при остановке работавшего в скважине насосного агрегата, который не имеет обратного клапана, вода, заполняющая напорный трубопровод, начнет уходить из него через насос в скважину. Вследствие этого насос некоторое время будет работать турбиной, вращая ротор двигателя с повышенной скоростью в сторону, противоположную его номинальному направлению вращения;
- 7) по условиям работы системы водоснабжения, а также в период монтажа электронасосной установки может возникать необходимость в определенном числе остановок и повторных запусков в течение, например, одного часа;
- 8) подъем и опускание электронасоса – трудоемкая и продолжительная операция, поэтому и профилактические работы в процессе эксплуатации не производятся.

Электродвигатели рассчитаны для работы при температуре воды до 25 °С и допускают до трех включений в течение часа с интервалом между ними не менее 5 минут. Уровень напряжения в точках подсоединения выводов двигателей к кабелю питания при пуске электронасосного агрегата должен быть по отношению к номинальному напряжению, не менее: 80 % – для двигателей мощностью до 2,8 кВт и 65 % – для двигателей мощностью более 2,8 кВт.

Сопротивление изоляции обмоток статора относительно корпуса электродвигателя, заполненного водой и выдержанного не менее одного часа, должно быть не менее 10 МОм в холодном состоянии и 0,5 МОм при рабочей температуре.

Скорость воды, которая омывает двигатель в скважине, должна быть не менее: 0,1 м/с – для двигателей мощностью до 2,8 кВт включительно; 0,3 м/с – для двигателей мощностью свыше 2,8 до 16 кВт включительно и 0,6 м/с – для двигателей мощностью свыше 16 кВт.

Обмотка статора выполняется проводами с водостойкой изоляцией типа ПЭВВП (ТУ 16.505.733-75) или ПВДП-1 (ТУ 16.505.733-78), допустимая температура нагрева которых равна соответственно 67 и 80 °С. Пазовая изоляция выполняется полихлорвиниловой пленкой марки В (ГОСТ 16272-70), а выводы концов обмотки – проводом с полиэтиленовой изоляцией марки ВПВ (ГОСТ 5.1618-72) или ВПП (ТУ 16.06.364-69).

Средний ресурс работы до первого капитального ремонта двигателей должен быть не менее: для типоразмеров с внешним диаметром 69; 114; 150 мм – 12500 часов; 180; 219; 270 мм – 14000 часов. Средний срок службы соответственно 4 и 5 лет.

1.2. Анализ причин выхода погружных электродвигателей из строя

Эксплуатационная надежность погружных электродвигателей, входящих в состав электронасосных установок, остается все еще низкой. Нормированный ресурс работы этих электродвигателей составляет 14000 часов, однако в условиях сельскохозяйственного производства они выходят из строя значительно раньше,

1 – электродвигатель; 2 – вход в насос; 3 – насос; 4 – зазор; 5 – обсадная труба скважины; 6 – токопроводящий кабель; 7 – водоподъемный трубопровод; 8 – пояс; 9 – опорное устройство; 10 – система автоматического управления; 11 – трехходовой кран; 12 – манометр; 13 – задвижка.

Проблема исследования эксплуатационной надежности погружных электродвигателей посвящены работы Ю.М. Бабаханова, А.И. Белоусова, М.М. Гамзаева, В.М. Гетманенко, А.А. Мамедова, А.А. Пястолова, В.Г. Семака, Г.Г. Счастливого, В.П. Тарана, Г.М. Федоренко, а также ряда других инженеров и ученых. Существующие методы и средства, повышающие эксплуатационную надежность водоподъемных установок, не обеспечивают необходимый уровень надежности, что предопределяет необходимость дальнейшего их развития.

Основные причины, по которым погружные электродвигатели выходят из строя следующие [4, 9, 69]:

- отсутствие либо недостаточный уровень эксплуатационного обслуживания;
- перегрузка и работа в неполнофазном режиме;
- снижение сопротивления изоляции;
- отсутствие надежной защиты от аварийных режимов и низкая надежность сельских электрических сетей;
- износ подшипников и выход из строя деталей насоса;
- влияние окружающей среды.

Согласно данным [2, 69] на обмотку статора погружного электродвигателя приходится 79,5% отказов. По данным литературы [3, 4, 8] 85...90% насосов выходят из строя из-за неисправностей в электродвигателях, – сгорает обмотка, т. к. не срабатывает защитно-отключающее устройство. В таблице 1.1 приводится более подробный анализ причин, приводящих к отказу электронасосной установки.

Таблица 1.1

Распределение основных причин отказов погружных электродвигателей

Причина выхода из строя	Доля, % по различным литературным источникам			
	[4]	[5]	[6]	[7]
Несимметрия питающего напряжения, в том числе обрыв фазы	17,5	44,0	30,0	31,3
Перегрузка	49,5	6,0	11,0	32,3
Пробой изоляции из-за переувлажнения	-	23,0	33,0	7,8
Заклинивание вала насоса или ротора двигателя	-	23,0	9,0	18,1
Износ и разрушение подшипников	25,6	-	1,0	-
Прочие причины	7,4	4,0	16,0	10,5

Рис. 1.2. Блок – схема развития повреждений погружного электродвигателя:

1 – начальные дефекты технологического происхождения; 2 – эксплуатационные воздействия, приводящие к развитию начальных дефектов

;

3-8 – последующие стадии развития повреждений

Однако приведенные данные нельзя считать точными, т.к. отдельные причины тесно связаны друг с другом и нередко взаимозависимы.

Главная причина выхода статорных обмоток погружных электродвигателей из

Дефекты технологии производства обусловлены нарушением технологических процессов изготовления деталей и узлов, и носят как общий так и индивидуальный характер.

Дефекты, зависящие от условий эксплуатации, возникают в случаях нарушения правил и норм технической эксплуатации электрооборудования при несоответствии конструкции электрооборудования условиям окружающей среды или режима работы.

Дефекты, связанные с естественным износом обусловлены старением материалов изоляционной конструкции, возникновением коррозии, износом рабочих поверхностей деталей и другими причинами.

Другой важный фактор, обуславливающий отказ электродвигателей, является повреждение изоляции обмоток после их длительной работы. Повреждения возникают или в лобовых частях или в пазу. В лобовых частях повреждения обусловлены, как правило, частичными механическими повреждениями изоляции при намотке или сборке двигателя, а также механическими включениями в изоляции, приводящими со временем к ее пробоям. Повреждения изоляции в пазу вызываются в основном перегрузками двигателя, т. к. пазовая часть обмотки при номинальной нагрузке более нагрета и при перегрузках быстрее нагревается до предельной температуры [1]. Вследствие развития местных дефектов в поливинилхлоридном слое изоляции возникают каналы и трещины, через которые поступает вода ко второму слою изоляции из эмальлака "винифлекс", толщина которого составляет 0,05 мм. В связи с тем, что эмальлак не приспособлен к работе в воде, через определенное время совместное действие воды, напряжения и температуры разрушает и этот изоляционный слой.

В работе [8] в результате проведенных исследований установлено, что вначале через место пробоя или механического повреждения изоляции начинает протекать ток, который постепенно нагревает изоляцию в месте пробоя. Нагретая изоляция разрушается, проходящий через место повреждения ток увеличивается, нагревает изоляцию расположенных рядом с дефектом витков обмотки, и в их изоляции также возникают трещины. После определенного периода работы возникает витковое замыкание, ток в поврежденных витках быстро увеличивается, нагревает изоляцию по всей длине коротко замкнутых витков и она выходит из строя, спекаясь и растрескиваясь.

Часто встречаются повреждения коррозионного характера: разрушение пакета ротора и статора, других элементов конструкции.

Один из основных видов повреждений погружных электродвигателей являются повреждения в результате износа подшипников скольжения – направляющих и упорного. Подшипниковая пара состоит из напрессованной на вал втулки из нержавеющей стали 3Х13 или 4Х13 и резиновой втулки, армированной железом, или втулки из текстолита марки Б. Смазкой таких подшипников служит вода, заполняющая внутреннюю полость электродвигателя. В случаях повреждения узла уплотнения верхнего конца вала во внутреннюю полость электродвигателей попадает песок или другие абразивные частицы и на поверхности втулок возникают кольцевые риски, на рабочих поверхностях выкрашивается материал. Во время "сухого хода" электродвигателя, т. е. когда подшипники работают без

смазки водой, втулки из текстолита подгорают и разрушаются. Упорные подшипники электродвигателей также подвергаются растрескиванию рабочей поверхности пяты и выкрашиванию поверхности трения подпятника. Таким образом, к факторам, ускоряющим износ подшипников относятся:

- перегрузки;
- наличие механических примесей в воде, которая омывает подшипник, ее агрессивность, смазывающая способность;
- работа в режиме "сухого хода";

Износ подшипников приводит к изменению размеров ротора, его эксцентриситету и как следствие, возникает трение ротора о пакет стали статора, в результате чего повреждается и выходит из строя обмотка статора [1, 4, 8].

1.3. Методы и средства, повышающие эксплуатационную надежность погружных электродвигателей

В практике технического обслуживания погружных электродвигателей можно выделить три стратегии обслуживания [8, 12, 13, 14]: по необходимости (при выходе из строя электрической машины); планово-профилактическую (профилактические мероприятия проводятся независимо от технического состояния электрической машины); планово-диагностическую (профилактические мероприятия проводятся с учетом технического состояния электрической машины путем ее дискретного диагностирования).

Ни одна из указанных стратегий технического обслуживания не позволяет контролировать развитие повреждения и износа отдельных элементов конструкции электродвигателя, в первую очередь изоляционной конструкции (изоляции).

Методы непрерывного диагностирования, позволяющие увеличить срок службы погружных электродвигателей, согласно литературе [12] базируются на стратегии раннего предупреждения развития процессов повреждения и износа изоляции обмоток и других элементов конструкции электродвигателей. Сущность стратегии состоит в непрерывном контроле параметров, характеризующих текущее техническое состояние изоляции, в своевременной подаче сигнала обслуживающему персоналу о ненормальном развитии процессов в электрической машине с целью дальнейшего более глубокого диагностирования ее технического состояния в технологические паузы, не отключая электродвигатель в ходе техпроцесса и не нанося этим самым технологического ущерба. Отключение погружного электродвигателя должно производиться только в том случае, когда дальнейшая его работа в таком режиме может привести к резкому ухудшению ее технического состояния или выходу из строя. Защиту электродвигателя от работы в аварийном режиме следует рассматривать как крайнюю меру [70].

Согласно классификации (рис. 1.3), методы непрерывного диагностирования охватывают тепловые процессы электрических машин; процессы сопровождающиеся сверхтоками; процессы при неполнофазных режимах, а также техническое состояние изоляции электрических машин.

Для защиты погружных электродвигателей от аномальных режимов работы в настоящее время применяют как специализированные станции управления и защиты, так и общераспространенные устройства, которые выпускаются промышленностью.

Устройства, повышающие эксплуатационную надежность электродвигателей, реагируют на определенные виды аварийных режимов: технологические перегрузки, несимметрию напряжения фаз сети, снижение сопротивления изоляции обмотки статора, однофазное или многофазное к.з., заклинивание ротора. Принцип защиты электродвигателя определяется физической природой параметра, измеряемого или контролируемого измерительным преобразователем или другим чувствительным органом. При этом представляется целесообразным известные устройства защиты классифицировать по параметру, контролируемому чувствительным органом (рис. 1.4): тепловые, токовые, температурные, фильтровые и комбинированные [11, 15, 16].

В устройствах, реализующих тепловой принцип защиты, параметром контроля является сила тока, а само устройство реагирует на количество теплоты, выделяющейся в нагревательных элементах, которые включаются последовательно

с фазами статора (рис. 1.5 а). На этом принципе работают тепловые реле ТРН, ТРП, РТТ, TSA, ТРА и РТЛ.

Основной элемент теплового реле – пластина, выполненная из двух металлов, имеющих различный коэффициент линейного расширения. В результате прямого или косвенного нагрева токами фаз статора биметаллическая пластина изгибается. При достаточной простоте конструкции и условий монтажа защитные характеристики теплового реле имеют значительный разброс, причем, время срабатывания реле зависит от того, в каком состоянии оно находилось до момента возникновения аварийного режима – холодном или нагретом. Поэтому на время пуска нагревательные элементы шунтируются резисторами, а после разбега электродвигателя – дешунтируются [19]. Тепловые реле при 20% перегрузках срабатывают в течение 30 мин, а при токах $(5 \dots 7)I_n$ – 10...20 секунд (здесь I_n – номинальный ток электродвигателя). При длительных перегрузках меньше 20% время срабатывания теплового реле имеет большой разброс и не обеспечивает надежной защиты электродвигателей даже при точной его регулировке [14]. Согласно литературе [18] постоянные времени нагрева и охлаждения обмотки электродвигателя и термочувствительного элемента теплового реле различны, что приводит к повторному включению двигателя тогда, когда его обмотка еще не охладилась до допустимой температуры и не дает желаемого результата при защите асинхронного электродвигателя в режиме работы S2 – S8 [15]. Обслуживающий персонал не имеет возможности точно определить время повторного включения, что приводит к ошибочным его действиям и быстрому выходу обмотки из строя. В работе [20] отмечено, что при защите тепловыми реле ежегодно выходит из строя до 10,3% электродвигателей.

Как в тепловых защитных устройствах, так и в токовых (рис. 1.5 б, в) контролируемым параметром является сила тока электродвигателя. Идеальное устройство токовой защиты должно иметь времятоковую характеристику, совпадающую с перегрузочной характеристикой двигателя $t_f(k_i)$, или быть несколько ниже последней. Защита асинхронных электродвигателей, в том числе и погружных осуществляется токовыми реле, например, реле минимального тока ЭТ-521, реле максимального тока РЭ-2111, Р-4000, РЭ-570Т, ЭТ-522, РТ-40, РТ-140 и др. Чувствительным элементом токовых реле является электромагнитный механизм, который играет роль порогового элемента. Во время пуска двигателя катушки токовых реле шунтируются, а после его разгона – дешунтируются с помощью промежуточных реле. Реле минимального тока разрывает цепь питания

электродвигателя при исчезновении тока в любой из фаз, поэтому реле устанавливают в каждой из фаз питания. Реле максимального тока, напротив, срабатывает при увеличении тока, потребляемого электродвигателем. Основные недостатки схем с использованием реле максимального тока состоят в следующем: они не реагируют на обрыв фаз, их нельзя отрегулировать на небольшие перегрузки, возможны ложные срабатывания при кратковременных бросках тока, необходимо применять в одной схеме до трех реле, для мощных электродвигателей необходимо применение трансформаторов тока [5, 11, 15]. Однако, они надежно защищают электродвигатели от больших перегрузок, режима заторможенного ротора, замыкания фазы на корпус.

Для защиты электродвигателей от перегрузок и к.з. применяются автоматические выключатели серий АЕ-2000, ВА-51 и др. Выключатели имеют электромагнитный или комбинированный расцепитель дополнительно оснащенные электротепловым расцепителем. Выключатели могут быть снабжены как расцепителями минимального напряжения отключающими автомат при падении напряжения в сети ниже допустимого значения, так и расцепителями дистанционного отключения, срабатывающими и отключающими автомат путем подачи напряжения на его катушку. Автоматическое отключение во время к.з. происходит вследствие того, что якорь электромагнитного расцепителя под действием силы электромагнитного поля притягивается и действует на механизм отключения выключателя. Тепловой расцепитель действует при относительно небольших, но продолжительных перегрузках, его устройство и принцип действия аналогичен тепловому реле.

Простота конструкции и возможность коммутации силовых цепей – основное достоинство автоматических выключателей. Ими оснащают все станции управления погружными электродвигателями, в том числе и станция управления ПЭТ, где автоматический выключатель является единственным защитным аппаратом [5]. Недостаток – отсутствие контроля неполнофазного режима, большой разброс параметров теплового расцепителя. Согласно статистическим данным [20] ежегодно выходят из строя 8,02% электродвигателей, защищаемых тепловыми реле и автоматическими выключателями.

Большое распространение в токовых защитных устройствах получили трансформаторные датчики тока, у которых выходное напряжение пропорционально входному току. Трансформаторные датчики тока (ТДТ) являются неотъемлемой частью станций управления погружными насосами ШЭТ-5801, ШЭП-5801, ШЭП-5802, «Каскад» (рис. 1.5 г) и устройств защиты РДЦ [87]. Здесь ТДТ выполняют функцию первичного преобразователя тока нагрузки двигателя. В каждой фазе электродвигателя включена первичная обмотка ТДТ, а вторичные обмотки соединены в звезду, напряжение от которой поступает на трехфазный выпрямитель и далее на элементы задержки времени и пороговый элемент. При перегрузке или обрыве одной фазы, ток в двух других возрастает и соответственно увеличивается напряжение на выходе выпрямителя. Если это напряжение превышает напряжение порогового элемента U_p , происходит отключение электродвигателя от сети. Согласно данным литературы [11], узел защиты станций управления ШЭТ, ШЭП, Каскад настраивается заводом

изготовителем на срабатывание при токе, равном $(1,2 \dots 1,35)I_n$, что обеспечивает четкое срабатывание при симметричных перегрузках. Как было отмечено ранее, многие станции управления эксплуатируются ненастроенными [25]. В работах [5, 11, 15, 24] предложены способы, позволяющие повысить надежность защиты путем настройки станций. Однако указанные станции не обеспечивают отключение электродвигателя при обрыве фазы, если он недогружен [26]. В работе [22] также указывается на неудовлетворительную работу станции управления ШЭП-5802 – при увеличении переходного сопротивления контактных соединений в цепи датчика нижнего уровня, обрыва провода, соединяющего датчик со станцией управления либо коррозии электрода датчика возникает аварийный режим работы погружного электродвигателя. Станция управления формирует сигнал на отключение двигателя при достижении водой датчика верхнего уровня и сигнал на повторное включение в момент освобождения его от воды. В водонапорной башне поддерживается максимальный уровень воды, однако, число пусков электронасосного агрегата достигает 2...3 тыс. за сутки, что приводит к повреждению механических узлов насоса, перегреву обмотки электродвигателя.

Для оценки качества изоляционной конструкции асинхронных электродвигателей используется принцип контроля тока утечки через изоляцию. Это позволяет сравнивать нормированное значение сопротивления изоляции обмотки статора двигателя с действительным значением, поскольку непосредственного измерения сопротивления, как правило, не производится. Контроль токов утечки производится перед каждым пуском электродвигателя, как это сделано в станции управления УСУЗ [5], устройстве комбинированной защиты [28]. Пороговым элементом в этих устройствах служит неоновая лампа, параллельно которой включается конденсатор. Зарядка конденсатора токами утечки происходит через резисторы, и при достижении напряжения зажигания лампы происходит сигнализация аномального режима работы [5] или формируется импульс на шунтирование устройства управления [28]. Следует заметить, что токи утечки перед вводом погружных электродвигателей в эксплуатацию находятся в пределах от 1,5 до 6 мкА [8], а по мере ухудшения изоляционных свойств увеличиваются на несколько порядков.

Основной критерий нормальной работы двигателя – допустимая температура обмотки статора, что привело к созданию ряда устройств (УВТЗ-1, УВТЗ-1М, УВТЗ-1Г, АЗП, Kriwan, 3UN8), повышающих эксплуатационную надежность электродвигателей. Эти устройства работают по температурному принципу. Температурная защита надежно отключает двигатели во всех аварийных режимах, ведущих к нагреву обмоток. Принцип действия этих устройств основан на измерении сопротивления терморезисторов (позисторов), встраиваемых в лобовые части статорной обмотки двигателя (рис. 1.6 а). Если температура обмотки выше классификационной температуры позистора, происходит резкое увеличение сопротивления последнего и релейный блок подает команду на отключение электродвигателя. Однако температурная защита срабатывает с некоторым запаздыванием из-за температурных барьеров между обмоткой статора и терморезистором, динамической погрешности при быстром нарастании

температуры в тяжелых аварийных режимах [5, 7, 11, 14, 15, 29, 31]. Чтобы повысить точность следования температуры термодатчиков за температурой обмотки в любом режиме работы двигателя, скомпенсировать динамическую погрешность терморезисторы RK1, RK2 подогревают током нагрузки, протекающим через нагреватели В1, В2 расположенные внутри двигателя (рис. 1. 6 б). Однако такой способ устранения динамической погрешности усложняет конструкцию устройства, является непростой технологической операцией и в погружных двигателях не применяется.

Устройства встроенной температурной защиты не обеспечивают надежной защиты электродвигателей с заторможенным ротором, в том числе не запустившихся на двух фазах, при обрыве фазы недогруженных двигателей. Провода подключения терморезисторов прокладываются совместно с силовыми проводами и кабелями и имеют значительную протяженность, что способствует возникновению паразитной э.д.с. в проводах питания позисторов и погрешности из-за чего наблюдаются ложные срабатывания защитного устройства и даже выход его из строя [30]. Согласно данным [20] ежегодно выходит из строя 6,06% двигателей, защищаемых УВТЗ. Устройства типа УВТЗ непригодны для защиты погружных электродвигателей, т.к. установка позисторов непосредственно в обмотках статора не обеспечивает их нормальное функционирование из-за несоответствия предельно допустимой температуры изоляции обмоток ($70 \dots 80^{\circ}\text{C}$) и температуры срабатывания позисторов ($105 \dots 130^{\circ}\text{C}$). Чтобы сделать устройство УВТЗ-1 пригодным и для защиты двигателей ПЭДВ в работе [9] предложено новое техническое решение, которое заключается в том, что позисторы устанавливаются в полости специально разработанных нагревательных элементов, которые находятся внутри корпуса, жестко присоединенного к наземной части водонапорного трубопровода. Недостатки данного устройства следующие: при попадании работающего двигателя в режим заторможенного ротора, время срабатывания защиты составляет $21 \dots 34$ секунды, что является недопустимым для данного режима; из-за больших токов нагревательные элементы подвергаются перегреву, что сокращает их долговечность.

На основе фильтрового принципа разработан ряд защитных устройств. В свою очередь существует фильтровый принцип по току и по напряжению. В устройствах РУД-05, ЗОУП-25 используется фильтр токов нулевой последовательности, что позволяет контролировать токи утечки через изоляцию электродвигателя (рис. 1.7 а).

Первичной обмоткой трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) являются три провода питающей сети двигателя. Вторичная обмотка равномерно наматывается на сердечник и подключается к исполнительному реле устройства управления. При нормальном состоянии изоляции обмотки статора геометрическая сумма магнитных потоков, наведенных в сердечнике токами двигателя, равна нулю, следовательно, во вторичной обмотке э.д.с. отсутствует. Уменьшение величины сопротивления изоляции какой-либо фазы относительно корпуса приводит к появлению тока утечки, замыкающегося по контуру: фаза – сопротивление изоляции – корпус электродвигателя – нулевой провод. Ток утечки, являясь током нулевой последовательности, создает в сердечнике ТТНП нескомпенсированный магнитный поток, который наводит э.д.с. во вторичной обмотке. Этот сигнал и используется для отключения двигателя.

Структурная схема защиты электродвигателя по току нулевой последовательности, обеспечивающая контроль за полнофазным режимом приведена на рис. 1.7 б. При обрыве одной из фаз на выходе фильтра, образованного тремя трансформаторами тока, появляется ток, достаточный для срабатывания токового реле. Основным недостатком этого способа заключается в ложном срабатывании защиты при несимметрично нагруженных электрических

сетях.

Используется также защита асинхронных электродвигателей с использованием фильтров обратной последовательности (ФОП), структурная схема защиты приведена на рис. 1.7 в. Напряжение на выходе ФОП образованного RC элементами зависит от значения и симметрии токов нагрузки, снимаемых с трансформаторов тока и увеличивается при заклинивании электродвигателя или обрыве фазы. Далее сигнал поступает на элемент задержки, пороговый элемент и устройство управления, электродвигатель. Согласно [5] основной недостаток схемы заключается в нестабильности при реальных асимметриях в сельских электрических сетях.

Защита электродвигателей по напряжению нулевой последовательности может быть реализована путем создания искусственной звезды (рис. 1.8 а) из трех резисторов, например, в устройстве УЗНП-1 [16] либо конденсаторов как в асимметре РА-74/2 [11] или же при помощи реле напряжения нулевой последовательности (рис. 1.8 б). Оба способа позволяют защитить электродвигатель от неполнофазного режима.

Недостаток первого способа защиты заключается в том, что при обрыве фазы на клеммнике электродвигателя либо в питающей сети защита на это не реагирует. Второй способ невозможно реализовать, если нет доступа к нулевой точке двигателя или же фазы обмотки соединены по схеме треугольника, также необходимо использовать дополнительный провод.

Промышленность выпускает специальные устройства – реле обрыва фаз типов ЕЛ-8, ЕЛ-12, Е-511, РНФ-1М, РСН-13 [5, 11, 16] предназначенные для защиты электроустановок, в том числе электродвигателей от обрыва фаз. Структурная схема реле ЕЛ-8, ЕЛ-12 приведена на рис. 1.9 а. Чувствительным органом реле является RC фильтр напряжения обратной последовательности (ФНОП). Сигнал

с выхода ФНОП поступает на выход порогового элемента, который предотвращает срабатывание реле при несимметрии напряжения в допустимых пределах. Устройство задержки введено для исключения ложных срабатываний при кратковременных аварийных ситуациях. Реле Е-511 по конструкции несколько проще и в нем отсутствует звено задержки времени. Преимуществом указанных реле является их чувствительность к обрыву фазы как на стороне 0,4 кВ, так и на стороне высокого напряжения, а недостаток – наличие в ФНОП конденсаторов, которые могут создавать с обмотками статора резонансные колебательные LC-контуры, что сказывается на разброс порога срабатывания реле [15].

Реле типа ЕЛ-10, ЕЛ-11 (рис. 1.9 б) выполняют те же функции что и ЕЛ-8, ЕЛ-12, но в качестве чувствительного элемента применяются три пороговых элемента и логическая схема (ЛС). При симметричном трехфазном напряжении прямой последовательности фаз на выходе пороговых элементов присутствует последовательность импульсов с частотой и временным сдвигом, соответствующим частоте и временному сдвигу фазных напряжений. Всякое недопустимое изменение трехфазного напряжения или изменение порядка чередования фаз приводит к тому, что на выходе ЛС исчезает последовательность импульсов и по истечении времени выдержки происходит отключение двигателя.

Чувствительным органом реле ЕЛ-13 (рис. 1.9 в) является трехфазный выпрямитель. При симметричном напряжении сети уровень пульсаций на выходе выпрямителя имеет определенное значение и увеличивается при появлении несимметрии напряжений в контролируемой сети. Сигнал асимметрии поступает на вход порогового элемента.

По данным [11] более 60% недогруженных электродвигателей при защите по схемам рис. 1.8, 1.9 не будут отключены при обрыве одной фазы на высокой стороне питающего трансформатора, т.к. напряжение в этой фазе будет составлять 75% и более от напряжения остальных фаз, что недостаточно для срабатывания защитных устройств.

Дальнейшим развитием фильтровых схем является устройство ФУЗ, чувствительным органом которого является специальный фазовращающий трансформатор тока (ФТТ) и кольцевой фазовый детектор (ФД) на выходе которого включено реле (рис. 1.10 а). Достоинством ФУЗ есть чувствительность к

обрыву фазы как до, так и после ее подключения. Недостаток проявляется в том, что устройство не реагирует на небольшие длительные перегрузки в режимах работы S3 – S8 и не имеет инерционности срабатывания, вследствие чего ФУЗ реагирует на пусковые токи электродвигателя.

Модернизированное устройство ФУЗ-М (рис. 1.10 б) имеет дополнительный узел защиты улучшающий его работу в области небольших длительных перегрузок, однако не реагирует на некоторые косвенные причины, из-за чего статорная обмотка может перегреваться [5, 15]. Поэтому дальнейшим шагом явилось создание комбинированных защитных устройств, реагирующих на несколько параметров диагностирования. В фазочувствительном устройстве ФУЗ-У, ФУЗ-С, ФУЗ-Т дополнительно контролируется температура корпуса электродвигателя или его обмотки [5, 32]. В ФУЗ-И [5] и устройстве [28] дополнительно контролируется сопротивление изоляции статорной обмотки и ее температура. На базе ФУЗ-М разработана станция управления УСУЗ [5] дополнительно защищающая погружной электродвигатель от пониженного сопротивления изоляции. Комбинированный принцип защиты от аварийных режимов также применен в устройстве УВТЗ-5 [5, 7, 16], в котором контролируется температура обмотки статора и напряжение нулевой последовательности.

Однако указанные выше температурно-токовые и температурно-фильтровые защиты не позволяют использовать во всем диапазоне перегрузочную способность электродвигателя, особенно в случае резкопеременной нагрузки [15, 33].

В последнее время в технической и патентной литературе периодически обсуждаются предложения о создании токовых защитных устройств на основе теплового аналога электродвигателя, принцип действия которых основан на моделировании тепловых процессов в электродвигателях. К достоинствам таких устройств относят простоту монтажа в непосредственной близости от силового коммутационного аппарата, устранение необходимости прокладки проводов, подключения терморезисторов и монтажа последних на обмотках статора.

1.4. Выводы и задачи исследования

1. В настоящее время для подъема воды из скважин глубиной 20...100 м от поверхности земли применяются электронасосные агрегаты с погружными электродвигателями ПЭДВ. При среднем ресурсе работы 14000 часов, в условиях сельскохозяйственного производства, электродвигатели выходят из строя после 3000...4000 часов эксплуатации.
2. Исходя из анализа причин выхода электродвигателей погружных насосов ПЭДВ из строя выяснено, что наиболее повреждаемым элементом является обмотка статора и в частности ее изоляционная конструкция. По этой причине 80...90% электродвигателей выходят из строя.
3. Для защиты погружных электродвигателей от аварийных режимов и повышения их эксплуатационной надежности в настоящее время в основном применяются станции управления ШЭП, ШЭТ, «Каскад» построенные по токовому принципу защиты и станция управления УСУЗ, реализующая комбинированный принцип защиты. При правильной настройке, в целом, эти средства защиты надежно защищают погружные электродвигатели, однако в отдельных случаях при значительной асимметрии и малой нагрузке возможен выход из строя электродвигателя. Не учитывается значительная перегрузочная способность погружного электродвигателя.
4. Для устранения недостатков, присущих вышеназванным устройствам защиты погружных электродвигателей от аномальных режимов работы предлагается применить токовый принцип защиты с моделированием тепловых процессов, происходящих в электродвигателе.
5. Современное состояние вопросов, актуальность указанных задач определяют следующие основные направления, требующие решения в связи с указанной проблемой:
 - аналитически исследовать тепловые переходные процессы погружного электродвигателя как гетерогенного тела;
 - исследовать влияние эксплуатационных условий на режим работы погружного электродвигателя;
 - разработать математическую модель диагностирования режима работы погружного электродвигателя ПЭДВ;
 - разработать и экспериментально исследовать устройство диагностирования эксплуатационных режимов погружных электродвигателей.

ГЛАВА 2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

2.1. Выбор метода исследования теплового режима работы электродвигателя

К основным эксплуатационным воздействиям, влияющим на температуру обмотки статора погружного электродвигателя, относятся – длительная перегрузка по току и несимметрия напряжения питания, в том числе неполнофазный режим.

Задачей исследования теплового режима работы электродвигателя является определение средней температуры активных частей машины и в ряде случаев – исследование максимальной температуры и температуры его поля. В соответствии с режимами работы электродвигателя различают: а) установившийся тепловой режим, имеющий место при продолжительной работе электродвигателя, когда дальнейшее превышение температуры практически уже не происходит; б) неустановившийся тепловой режим, соответствующий кратковременным режимам работы электродвигателя.

Для обоснования выбора параметров функционального диагностирования необходимо исследовать максимальную температуру обмотки статора погружного электродвигателя в различных режимах его эксплуатации.

Электродвигатель является сложным сочетанием разнородных тел, обладающих неодинаковыми теплофизическими свойствами. Поэтому температура той или иной части электродвигателя не является постоянной для всего его объема. Стационарное температурное поле электродвигателя в общем случае описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [34, 35]:

(2.1)

где $\lambda_{ix}, \lambda_{iy}, \lambda_{iz}$ – коэффициенты теплопроводности i -го элемента в направлении осей координат, Вт/(м·°C);
 θ_i – температура i -го элемента, °C;
 p_0 – удельная мощность источника тепла в i -м элементе, Вт/м³.

При исследовании тепловых процессов электродвигателей применяются следующие методы: метод температурного поля; метод эквивалентных греющих потерь [45]; метод эквивалентных тепловых схем [35].

Метод температурного поля предполагает решение краевых задач теории теплопроводности. При аналитическом исследовании стационарного режима электродвигателя используется система уравнений теплопроводности (2.1), составленных для элементов машины с внутренними источниками теплоты. В этом виде уравнения практически не используется – обычно решаются одно- или двухмерные задачи. Решение дифференциальных уравнений приводит к сложным и громоздким расчетам, использование которых не всегда целесообразно, если

учитывать некоторую неопределенность исходных данных: распределения потерь в электродвигателе, погрешность вентиляционного расчета и т.д. [35].

Метод эквивалентных греющих потерь основан на принципе наложения, в соответствии с которым превышение температуры одного из активных элементов электродвигателя представляет собой сумму превышений температур, обусловленных потерями, выделяющимися в других элементах. Так, превышение температуры обмотки статора равно:

$$\Delta T_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{м1}}}{K_{\text{с1}}} + \frac{P_{\text{м2}}}{K_{\text{с2}}} + \Delta T_{\text{э}}, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{м1}}$ и $P_{\text{м2}}$ – потери мощности в обмотке статора и ротора, Вт;

$P_{\text{с1}}$ – потери мощности в статоре, Вт;

$k_{\text{с}}$, km^2 – коэффициенты влияния потерь;

$\Lambda_{\text{э}}$ – эквивалентная тепловая проводимость, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

Метод может быть использован при исследовании средних превышений температур активных частей двигателя, работающего в стационарных и повторно-кратковременных режимах. Тепловые параметры определяются экспериментально или по методу эквивалентных тепловых схем и являются постоянными только для данного типоразмера электродвигателя [35].

Метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС) основан на аналогии тепловых потоков и электрических токов. Эта аналогия основана на единой форме уравнений теплообмена (закон Фурье)

$$Q = \Lambda \Delta T, \quad (2.3)$$

и электрического тока (закон Ома)

$$I = g \Delta \phi, \quad (2.4)$$

где Λ – тепловая проводимость, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$;

ΔT – разность превышений температур, $^\circ\text{C}$;

g – электрическая проводимость, См;

$\Delta \phi$ – разность потенциалов, В.

Основное допущение метода ЭТС состоит в замене распределенных источников теплоты и тепловых проводимостей сосредоточенными. Это позволяет свести метод к расчету линейной цепи обычными алгебраическими методами.

Так, электродвигатель можно условно представить как совокупность n однородных тел с внутренними источниками теплоты P и превышениями температуры T [34, 35, 36]. Отвод теплоты в окружающую среду происходит от некоторого n тела, связанного с этой средой проводимостью $\Lambda_{\text{н0}}$. В соответствии с вышеизложенным для такой ЭТС можно записать систему линейных алгебраических уравнений:

$$(2.5)$$

Решая систему уравнений (2.5) можно по известным значениям проводимостей и потерь мощности определить превышения температур тел.

По методу ЭТС определяют значения средних температур элементов двигателя. Недостаток метода заключается в трудности определения тепловых проводимостей и решении системы уравнений при значительном числе тел в эквивалентной схеме.

В последнее время находит применение совместное использование перечисленных методов, что дает возможность анализа распределения температур в элементах электродвигателя.

Таким образом, принимаем решение использовать метод ЭТС для определения количества тел электродвигателя, их взаимосвязи между собой и окружающей средой, а для определения превышения температуры обмотки статора воспользоваться методом эквивалентных греющих потерь.

2.2. Обоснование тепловой схемы замещения погружного электродвигателя

При анализе процесса нагрева встречаются эквивалентные тепловые схемы с различным количеством элементов, на которые разбивается электродвигатель.

Чем большее число эквивалентных элементов может быть предложено для замены отдельных частей электрической машины, тем точнее окажется результат. Однако усложнение тепловой схемы, а следовательно, и аналога должно сочетаться с достижимой точностью результатов [34].

Так, большинство схем функциональной диагностики погружных электродвигателей, где учитывается нагрев двигателя, основано на представлении ЭТС последнего телом с одним источником тепловыделения [4, 5, 9, 37, 38, 72]. Дальнейшее развитие получила уточненная ЭТС погружного электродвигателя с двумя источниками тепла – обмотки и стали статора [12, 39, 40]. В работах [33, 41] электродвигатель представлен системой трех тел – обмоткой, сталью статора и ротором. В работе [42] добавлен еще один элемент, обладающий потерями мощности – подшипниковый узел. Более сложная ЭТС погружного электродвигателя, состоящая из пяти тел (зубцы пакета статора, короткозамкнутая клетка вместе с зубцами ротора, пазовая часть обмотки статора, корпус двигателя) представлена в работе [1].

С целью получения уточненной картины превышения температуры обмотки статора и влияния на нее тепловых потерь других тел, а также, учитывая, что основная доля суммарных потерь в двигателе типа ПЭДВ приходится на обмотки статора и ротора, а также пакет статора, ЭТС электродвигателя принимается как

система, состоящая из трех тел: обмотки статора (1); обмотки ротора (2); стали (3).

Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного электродвигателя типа ПЭДВ при симметричном напряжении питания представлена на рис. 2.1. С учетом несимметрии напряжения была составлена ЭТС, в которой каждая фаза обмотки статора представлена отдельным телом (рис. 2.2).

На схемах приведены следующие условные обозначения:

C_1, C_2, C_3 – теплоёмкости соответствующих тел, Дж/°C;

T_1, T_2, T_3 – превышения температур соответствующих тел над температурой окружающей среды, °C;

P_1, P_2, P_3 – потери активной мощности в соответствующих телах, Вт;

$\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$ – тепловые проводимости между соответствующими телами, Вт/°C;

$\Lambda_{1AB}, \Lambda_{1BC}, \Lambda_{1CA}$ – тепловые проводимости между обмотками статора разных фаз, Вт/°C;

Λ – тепловая проводимость между третьим телом и окружающей средой, Вт/°C;

$C_{ср}$ – теплоёмкость окружающей среды, Дж/°C;

$\vartheta_{ср}$ – температура окружающей среды, °C.

Тепловые потоки в погружном двигателе распространяются в следующих направлениях. Поток от пазовой части обмотки статора 1 передается зубцам и спинке статора 3. Тепловой поток ротора 2 передается статору 3 и обмотке статора 1. Поток от ротора и обмотки статора передаются статору, который отдает теплоту перекачиваемой насосом жидкости. Вода внутри электродвигателя служит теплоносителем между ротором и статором, между ротором и обмоткой статора.

В дальнейших исследованиях тепловых процессов, происходящих в асинхронном электродвигателе погружного насоса, используется ЭТС, приведенная на рис. 2.1. При составлении ЭТС с учетом [1, 35, 43] приняты следующие допущения:

- 1) в поперечном сечении электродвигателя отсутствует перемещение теплоты, что позволяет рассматривать двумерную задачу в продольном сечении машины [46];
- 2) температура обмотки статора, магнитопровода статора, а также ротора принимается одинаковой по каждому из рассматриваемых объемов;
- 3) потери в стали сердечника статора не зависят от температуры;
- 4) величины теплопроводностей и теплоотдач постоянны и равны средним значениям для диапазона рабочих температур;
- 5) теплоемкость окружающей среды принимается равной ∞ , а температура – постоянной;
- 6) не учитывается теплопередача через вал электродвигателя и тепловое сопротивление между магнитопроводом статора и корпусом двигателя.

Указанные допущения не нарушают общей действительной картины тепловых процессов, дают незначительную погрешность и возможны для практических исследований.

2.3. Тепловой процесс погружного электродвигателя при неустановившемся режиме работы

Уравнения теплового баланса для каждого тела схемы замещения имеют вид:

(2.6)

где $C_1 dT_1$, $C_2 dT_2$, $C_3 dT_3$ – энергии, расходуемые на нагрев соответствующих тел, Дж;

$P_1 dt$, $P_2 dt$, $P_3 dt$ – энергии, которые выделяются в соответствующих телах, Дж;

$\Lambda_{12}(T_1 - T_2)dt$ – энергия, которая передаётся от обмотки статора к ротору, Дж;

$\Lambda_{13}(T_1 - T_3)dt$ – энергия, которая передаётся от обмотки статора магнитопроводу, Дж;

$\Lambda_{23}(T_2 - T_3)dt$ – энергия, которая передаётся от ротора магнитопроводу статора, Дж;

$\Lambda T_3 dt$ – энергия, которая передаётся от статора окружающей среде, Дж;

α – температурный коэффициент сопротивления материала проводников обмотки, $1/^\circ\text{C}$; $\alpha^\circ\text{C}$.

Преобразуем систему уравнений (2.6) к следующему виду:

(2.7)

где k – кратность силы тока;

$P_{1н}$, $P_{2н}$ – потери активной мощности соответственно в обмотке статора и ротора при номинальной нагрузке, Вт.

Система уравнений (2.7) в операторной форме имеет вид:

(2.8)

где p – оператор.

Решим систему уравнений (2.8) относительно $T_1(p)$.

Общий определитель $\Delta(p)$:

(2.9)

где коэффициенты a , b , c и d равны:

$$aC_1C_2C_3; \quad (2.10)$$

$$bC_1C_2(\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1C_3(\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_2C_3(\Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha k_2 P_{1H}); \quad (2.11)$$

$$c\Lambda_{12}(C_1 + C_2)(\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1\Lambda_{23}(\Lambda + \Lambda_{13}) + C_2\Lambda_{13}(\Lambda + \Lambda_{23}) + C_3(\Lambda_{13}\Lambda_{12} + \Lambda_{13}\Lambda_{23} + \Lambda_{12}\Lambda_{23}) - \alpha k_2 P_{1H}(C_2\Lambda_{13} + C_2\Lambda_{23} + C_3\Lambda_{12} + C_3\Lambda_{23} + C_2\Lambda); \quad (2.12)$$

$$d\Lambda_{12}\Lambda_{23}\Lambda + \Lambda_{12}\Lambda_{13}\Lambda + \Lambda_{13}\Lambda_{23}\Lambda - \alpha k_2 P_{1H}(\Lambda_{12}\Lambda + \Lambda_{12}\Lambda_{13} + \Lambda_{12}\Lambda_{23} + \Lambda_{23}\Lambda + \Lambda_{13}\Lambda_{23}). \quad (2.13)$$

Найдём определитель $\Delta_1(p)$:

(2.14)

где коэффициенты b_1 , c_1 и d_1 равны:

$$b_1C_2C_3k_2P_{1H}; \quad (2.15)$$

$$c_1C_2k_2P_{1H}(\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_3k_2P_{1H}(\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_3k_2P_{2H}\Lambda_{12} + C_2P_3\Lambda_{13}; \quad (2.16)$$

$$d1\Lambda12k2(P1н + P2н)(\Lambda + \Lambda13 + \Lambda23) + k2P1н\Lambda23(\Lambda + \Lambda13) + k2P2н\Lambda13\Lambda23 + P3(\Lambda13\Lambda12 + \Lambda13\Lambda23 + \Lambda12\Lambda23). \quad (2.17)$$

Решение системы уравнений (2.8) относительно $\tau_1(p)$ имеет вид:

$$(2.18)$$

Приняв

$$.3 \quad (2.19)$$

$$.3 \quad (2.20)$$

уравнение (2.18) в соответствии с преобразованием Лапласа примет вид

$$(2.21)$$

В соответствии с теоремой разложения [44], оригинал $\tau_1(t)$ изображения (2.21) имеет вид:

$$(2.22)$$

или

$$(2.23)$$

где p_1, p_2, p_3 – корни характеристического уравнения (2.20).

Производная функции $F_2'(p)$:

$$.3 \quad (2.24)$$

Зависимость (2.22) – уравнение нагрева обмотки статора электродвигателя в функции времени для случая трех тел (обмотка статора, сталь, ротор). Каждое тело оказывает влияние на нагрев обмотки [42], и доля этого влияния изменяется по экспоненциальному закону. Т.о. кривая нагрева обмотки статора представляет

собой сумму трех экспонент. Составляющая показывает, с какого состояния – холодного или нагретого производится пуск электродвигателя.

Как видно, превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды $\tau_1(t)$ зависит от конструктивных (постоянных) параметров погружного электродвигателя (теплоемкости активных частей и тепловые проводимости между ними), а также от переменных параметров (активные потери в телах ЭТС), которые зависят от кратности силы тока.

2.4. Аналитическое исследование тепловых проводимостей

От достоверности тепловых проводимостей зависит точность теплового расчета. Определение тепловых проводимостей погружного электродвигателя имеет определенные трудности и может быть определено приблизительно [1]. Предполагая, что превышение температуры тел в режимах холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.) электродвигателя можно получить опытным путем, а их тепловые потери – расчетным, возможно определение тепловых проводимостей между телами с помощью экспериментальных данных.

Запишем систему уравнений (2.8) для случая установившегося режима х. х.:

(2.25)

То же, но для режима к.з.:

(2.26)

После перегруппировки системы уравнений (2.25) и (2.26) примут вид:

(2.27)

(2.28)

Для определения тепловых проводимостей (рис. 2.1) достаточно четырех уравнений:

(2.29)

где $\tau_{12x}\tau_{21x}\tau_{1x}-\tau_{2x};$
 $\tau_{13x}\tau_{1x}-\tau_{3x};$
 $\tau_{12k}\tau_{1k}-\tau_{2k};$
 $\tau_{13k}\tau_{31k}\tau_{1k}-\tau_{3k};$
 $\tau_{23x}\tau_{2x}-\tau_{3x};$
 $\tau_{23k}\tau_{32k}\tau_{2k}-\tau_{3k}.$

Определители системы уравнений (2.29):

(2.30)

;

(2.31)

;

(2.32)

;

(2.33)

;

(2.34)

В опыте холостого хода напряжение на зажимах электродвигателя номинальное, а скольжение $s \approx 0$, поэтому можно принять, что $P_{2x} \approx 0$. В опыте короткого замыкания механические потери равны нулю, т.к. ротор заторможен. Потери в магнитопроводе практически равны нулю, т.к. напряжение на зажимах электродвигателя в 5 – 7 раз меньше номинального. Следовательно, можно принять, что $P_{3k} \approx 0$. Искомые величины тепловых проводимостей:

(2.35)

;

(2.36)

;

(2.37)

;

(2.38)

Таким образом, на основании опытов холостого хода и короткого замыкания можно определить тепловые проводимости между телами принятой эквивалентной тепловой схемы замещения асинхронного электродвигателя ПЭДВ (приложение А.2).

2.5. Исследование процесса нагрева обмотки электродвигателя

В соответствии с принятой теорией нагрева электродвигателя как гомогенного тела [34, 47, 72] можно показать, что превышение температуры обмотки статора

изменяется в соответствии с выражением:

(2.39)

где — установившееся значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды, °C;

— первая парциальная постоянная времени нагрева обмотки, с.

В рассматриваемом случае электродвигатель представлен как гетерогенная система тремя телами, уравнение нагрева обмотки статора которого, имеет вид:

(2.40)

что следует из (2.22), (2.23).

Здесь

— установившиеся значения парциальных превышений

температуры обмотки над температурой окружающей среды, °C;

— парциальные постоянные времени нагрева обмотки, с;

(2.41)

Исходя из полученных в приложении А.3 данных, уравнения (2.39), (2.40) для номинального режима работы имеют вид:

(2.42)

(2.43)

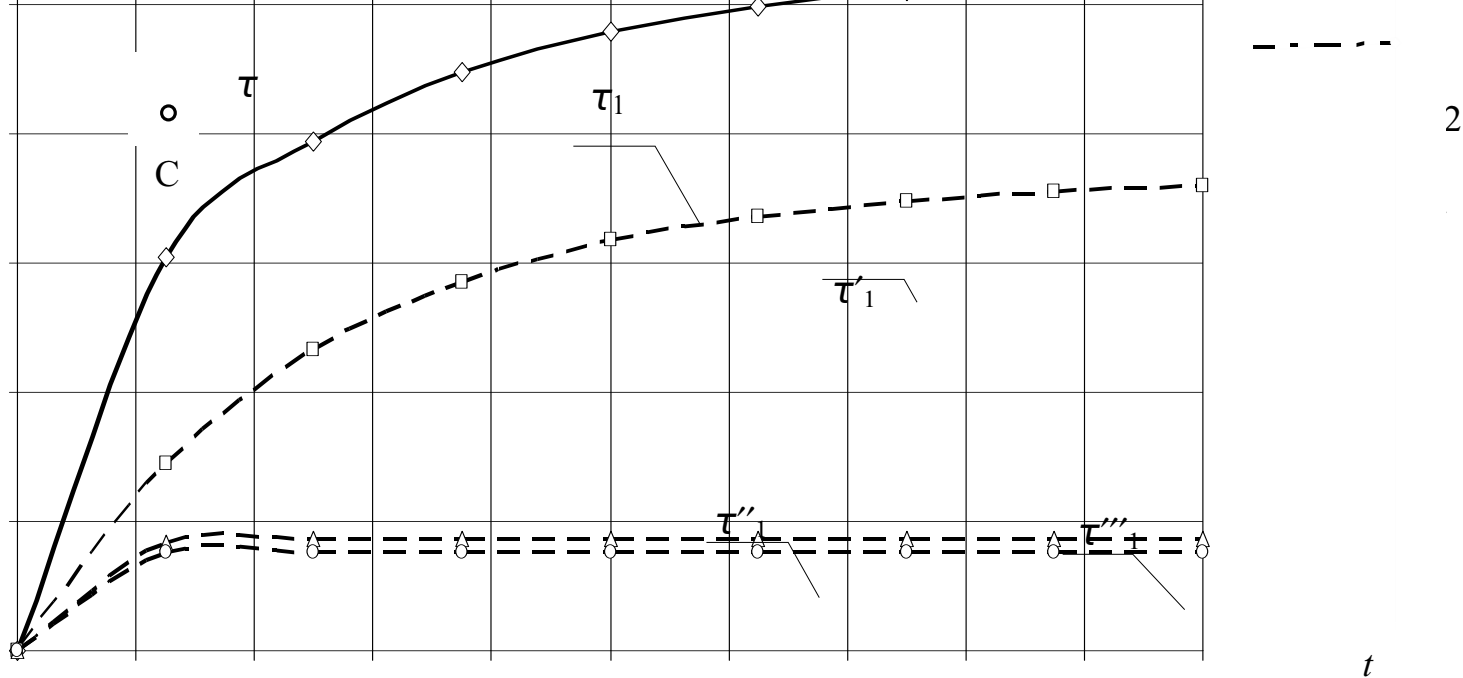
На рис. 2.3 представлены кривые нагрева $\tau_1(t)$ для двух случаев:

— кривая 1, которой соответствует уравнение нагрева электродвигателя как гомогенного тела (2.42);

— кривая 2, которой соответствует уравнение нагрева электродвигателя как гетерогенного тела (2.43).

Видно, что в начале процесса нагрева обмотки статора есть существенные расхождения, которые достигают 30% (приложение А.3, таблица А.3). Таким образом, более точной является гетерогенная модель нагрева электродвигателя, в то время как большинство систем защиты погружных электродвигателей базируются на модели нагрева электродвигателя, как одного тела.

В рассматриваемой модели нагрева обмотки статора погружного электродвигателя (2.41) присутствуют три парциальных составляющих, каждая из которых характеризуется установившимся значением



с холодного состояния и характеризуется постоянной времени $4T''$ (кривая 3):

$$(2.44)$$

$$(2.45)$$

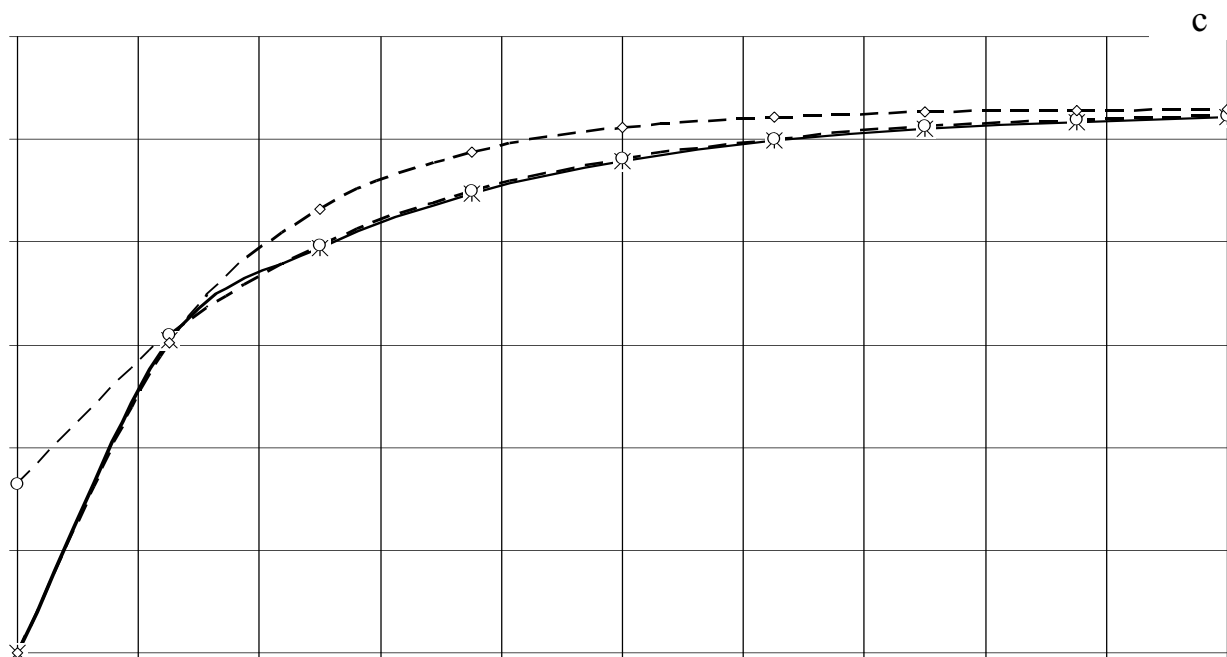
Вторая экспонента моделирует процесс нагрева с горячего состояния и характеризуется постоянной времени T' (кривая 4):

$$(2.46)$$

$$(2.47)$$

2.7. Выводы

1. Проведено обоснование тепловой схемы замещения погружного электродвигателя, представленной системой, состоящей из трех тел: обмотки



- проводимостей между телами, энергетических показателей двигателя.
3. Предложена методика, с помощью которой определены тепловые проводимости тепловой схемы замещения. Найдено, что тепловые проводимости между обмотками статора и ротора Λ_{12} , между обмоткой статора и сталью электродвигателя Λ_{13} , между обмоткой ротора и сталью электродвигателя Λ_{23} , между сталью электродвигателя и окружающей средой (водой) Λ .
 4. Показано, что между уравнениями нагрева электродвигателя как гомогенного тела и гетерогенного тела имеется существенно расхождение в результатах нагрева. Например, в начальной стадии нагрева оно достигает 30%.
 5. Предложен метод аппроксимации кривой нагрева электродвигателя как системы трех тел двумя кривыми, моделирующими процесс нагрева из холодного и из горячего состояния. Рекомендуется их использовать в математической модели диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

3.1. Исследование режима работы погружного электродвигателя при несимметрии питающего напряжения

В сельскохозяйственном производстве питание электронасосных агрегатов, как правило, осуществляется с помощью воздушных линий электропередачи, от которых также питается и несимметричная бытовая нагрузка, имеющая активный характер, чем часто обусловлена асимметрия напряжения. Напряжение по фазам сдвинуты на угол 120° , а величины напряжений разнятся.

Проведём аналитическое исследование режима работы системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – погружной электродвигатель» для общего случая несимметрии питающего напряжения.

Для условного идеального несимметричного генератора можно записать:

$$kAE_n; \quad (3.1)$$

$$kBE_n; \quad (3.2)$$

$$kCE_n, \quad (3.3)$$

где k_A, k_B, k_C – коэффициенты асимметрии по фазам;

E_n – номинальное напряжение фазной э.д.с., В.

Коэффициент асимметрии представляет собой отношение действующего значения э.д.с. фазы, к ее номинальному значению, т.е.

$$k_A; \quad (3.4)$$

$$k_B; \quad (3.5)$$

$$k_C. \quad (3.6)$$

Разложив фазные э.д.с. на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей [65], можно записать:

$$; \quad (3.7)$$

$$; \quad (3.8)$$

$$. \quad (3.9)$$

Запишем симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей для фазы А электродвигателя:

$$i_{1A}; \quad (3.10)$$

$$i_{2A}; \quad (3.11)$$

$$i_{0A} \quad (3.12)$$

где z_{1A}, z_{2A} – комплексы полных сопротивлений прямой и обратной последовательностей фазы А, Ом.

;

(3.13)

,

(3.14)

здесь z_T – комплекс полного сопротивления фазы силового трансформатора, Ом;
 z_L – комплекс полного сопротивления фазы линии электропередачи, Ом;
 $z_{1д}, z_{2д}$ – комплексы полных сопротивлений прямой и обратной последовательностей фазы электродвигателя, Ом;

Сопротивления z_T и z_L для прямой и обратной последовательностей равны, а $z_{1д}, z_{2д}$ – разные вследствие различия частоты тока в роторе для разных последовательностей [50], и могут быть найдены по выражениям:

;

(3.15)

;

(3.16)

;

(3.17)

;

(3.18)

,

(3.19)

где – параметры схемы замещения одной фазы электродвигателя (рис. 3.1), Ом;
 s – скольжение электродвигателя.

Таким образом, комплексы фазных токов электродвигателя:

$$\dot{I}_A \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_B \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \quad (3.21)$$

$$\dot{I}_C \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}. \quad (3.22)$$

Токи прямой и обратной последовательностей создают магнитные потоки, которые вращаются в противоположную сторону и создают вращающий 1 и тормозящий 2 моменты (рис. 3.2).

Рассмотрим механические характеристики электродвигателя на рабочем участке (рис. 3.3) [85].

Линеаризуем механическую характеристику 2, создаваемую обратным магнитным потоком. Из подобных треугольников можно записать:

$$= . \quad (3.23)$$

В свою очередь

$$(3.24)$$

$$M_{п2} M_{п} \quad , \quad (3.25)$$

где $M_{п}$ – пусковой момент электродвигателя, Н·м;

U_2 – действующее значение напряжения симметричной составляющей обратной последовательности, В;

U_n – номинальное фазное напряжения, В;

$M_{п2}$ – пусковой момент, создаваемый обратным магнитным полем, Н·м.

С учетом введенного обозначения получаем выражение обратного момента:

$$M_2 M_{п} \quad s. \quad (3.26)$$

Запишем выражение момента, создаваемого прямым магнитным потоком

$$M_1 \quad \text{EMBED Equation.3} \quad M_n. \quad (3.27)$$

Находим выражения результирующей механической характеристики

$$M = M_1 - M_2 = \quad . \quad (3.28)$$

В установившемся режиме

$$M_c M. \quad (3.29)$$

В свою очередь

$$M_c M_o + (M_{сн} - M_o) \quad ; \quad (3.30)$$

где M_o – момент трогания рабочей машины, Н·м;

$M_{сн}$ – номинальный момент сопротивления рабочей машины при номинальной угловой скорости электродвигателя, Н·м;

– угловая скорость рабочей машины, рад/с;

n – номинальная скорость электродвигателя и рабочей машины, рад/с;

x – коэффициент, характеризующий рабочую машину.

на рабочем
[85], можно
скольжения, для

чен

$$M_{CH} = K_3 M_H;$$

(3.31)

(3.32)

В результате получим:

(3.33)

Подставив (3.28) и (3.33) в (3.29), получим:

(3.34)

Перепишем (3.34) в относительных единицах

(3.35)

Таким образом, из (3.35), может быть найдена зависимость скольжения s от кратностей симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей напряжений электродвигателя и коэффициента загрузки, если он приводит во вращение рабочую машину с гиперболической механической

характеристикой ($x = 2$), каковой является механическая характеристика погружного насоса [88]:

$$(3.36)$$

$$\text{где} \quad ; \quad (3.37)$$

$$(3.38)$$

;

$$(3.39)$$

;

$$(3.40)$$

, ;

k_z – кратность загрузки насоса (отношение момента сопротивления на валу насоса к его номинальному значению);

m_0 – относительный момент трогания насоса (отношение момента трогания насоса к его номинальному значению);

s_n – номинальное скольжение электродвигателя;

m_p – относительный пусковой момент электродвигателя;

k_{u1} – кратность напряжения симметричной составляющей прямой последовательности;

k_{u2} – кратность напряжения симметричной составляющей обратной последовательности;

U_1 – действующее значение напряжения симметричной составляющей прямой последовательности, В;

U_2 – действующее значение напряжения симметричной составляющей обратной последовательности, В;

U_n – номинальное действующее значение фазного напряжения, В.

Таким образом, при асимметрии напряжения скольжение электродвигателя зависит от кратности напряжения прямой и обратной последовательностей k_{u1} и k_{u2} , коэффициента загрузки k_z , кратности пускового момента m_p , относительного момента трогания m_0 и номинального скольжения s_n .

Например, для погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140, параметры схемы замещения одной фазы [1, 34, 75] и другие каталожные данные [17]:

Ом;	Ом;	;
Ом;	Ом;	;
Ом;	Ом;	В;
Ом;	Ом;	А.

Принимаем условные параметры рабочей машины: ; .

Принимаем условные параметры фазы силового трансформатора [49]: гтхтктропередачи: гл Ом, хл

Принимаем коэффициенты асимметрии по фазам: $k_A k_B k_C$

Симметричные составляющие фазных э.д.с. прямой и обратной последовательностей по (3.7), (3.8):

В;

В.

Симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей по (3.10), (3.11):

А;

А.

Находим по (3.20), (3.21), (3.22) комплексы действующих значений сил электрического тока в фазах:

A;

A;

A.

Скольжение электродвигателя по (3.36):

s

3.2. Исследование режима работы погружного электродвигателя при схлестывании питающих проводов воздушной линии электропередачи

При питании электронасосных агрегатов с помощью воздушных линий электропередачи во время сильных ветров наблюдается явление схлестывания проводов. Как показывает практика, это приводит к аварийным режимам работы электродвигателей, запитанных от этих линий, в случае несрабатывания защиты от коротких замыканий из-за большого сопротивления петли «фаза-нуль».

Проведём аналитическое исследование режима работы системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – погружной электродвигатель» в случае схлестывания проводов воздушной линии электропередачи. На рис. 3.5 приведена расчётная схема системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – асинхронный электродвигатель» в случае схлестывания двух проводов в конце линии.

На расчётной схеме введены следующие условные обозначения:

, , – комплексы действующих значений э. д. с фаз силового трансформатора на стороне 0,4 кВ, В;
 Z_T – комплекс полного сопротивления фазы силового трансформатора, Ом;
 $Z_{Л}$ – комплекс полного сопротивления фазы линии электропередачи, Ом;
 Z_D – комплекс полного сопротивления фазы электродвигателя, Ом;

– комплексы действующих значений фазных напряжений электродвигателя, В;

– комплекс действующего значения силы электрического тока в фазе А, А.

Комплексы действующих значений напряжений прямой и обратной последовательностей находим по выражениям [44]:

(3.41)

;

(3.42)

Комплексы действующих значений фазных напряжений электродвигателя:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = U_{\phi} \cdot e^{j\alpha} \quad ; \quad (3.43)$$

$$\dot{U}_A = U_{\phi} \cdot e^{j\alpha} \quad ; \quad (3.44)$$

$$\dot{U}_B = U_{\phi} \cdot e^{j(\alpha - 120^\circ)} \quad ; \quad (3.45)$$

Комплекс действующего значения силы электрического тока в фазе А равен:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_1} \quad , \quad (3.46)$$

где $\dot{U}_0$ – комплексы действующих значений потенциалов точек 0 и b, В;
 $\dot{U}_{b0}$ – комплекс действующего значения напряжения между точками b и 0, В;
 Z_1 – комплекс полного сопротивления первой ветви, Ом.
Последний, в свою очередь равен:

$$Z_1 = Z_{\Sigma} \quad . \quad (3.47)$$

Напряжение между точками b и 0 находим по методу двух узлов [44]:

$$\dot{U}_{b0} = \frac{\dot{U}_B}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad , \quad (3.48)$$

где Y_A, Y_B, Y_C – комплексы полных проводимостей ветвей расчётных схем, См.
В свою очередь проводимости равны:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A} \quad . \quad (3.49)$$

Тогда:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_1} \quad . \quad (3.50)$$

Введём обозначения:

$$\dot{I}_A = I_A \cdot e^{j\alpha} \quad ; \quad (3.51)$$

(3.52)

После преобразований находим:

(3.53)

;

(3.54)

Запишем комплексы действующих значений фазных напряжений:

(3.55)

;

(3.56)

;

(3.57)

Находим симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей фазных напряжений электродвигателя, подставив выражения (3.55), (3.56) и (3.57) в (3.41) и (3.42):

(3.58)

Комплекс полного сопротивления фазы электродвигателя находим, пользуясь схемой замещения одной фазы электродвигателя (рис.3.1):

(3.59)

;

(3.60)

Для нахождения скольжения электродвигателя при схлёстывании проводов применим метод последовательных приближений [86] в такой последовательности:

- 1) задаёмся значением скольжения электродвигателя и рассчитываем комплекс полного сопротивления фазы двигателя по выражениям (3.17), (3.60), (3.59);
- 2) рассчитываем комплексы напряжений прямой и обратной симметричных составляющих по выражениям (3.47), (3.51), (3.58);
- 3) рассчитываем кратности напряжений прямой и обратной последовательностей по выражению (3.40);

- 4) определяем скольжение электродвигателя по выражениям (3.39), (3.38), (3.37), (3.36) и сравниваем значение скольжения с заданным;
- 5) в случае расхождения значений скольжений заданного и полученного задаёмся новым, более близким к расчётному значению скольжения и повторяем расчёт до полного совпадения;
Например, для погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 проводим расчёт методом последовательных приближений и находим скольжение электродвигателя:

s

Находим комплекс действующего значения силы электрического тока в фазе А:

$A.$

Действующее значение симметричной составляющей нулевой последовательности фазного напряжения:

Выводы:

- 1) При схлёстывании проводов электродвигатель привода рабочей машины переходит в однофазный режим.
- 2) Так как скольжение электродвигателя ниже критического, то он «опрокидывается».
- 3) При периодическом исчезновении схлёстывания проводов электродвигатель повторно запускается.
- 4) В зависимости от периода схлёстывания проводов пуски электродвигателя могут быть частыми, что приводит к недопустимому перегреву.

3.3. Исследование режима работы погружного электродвигателя при обрыве фазы

Проведём аналитическое исследование режима работы системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – погружной электродвигатель» в случае обрыва одной из фаз, вследствие неудовлетворительного контакта коммутационной аппаратуры, обрыва провода линии электропередачи, обрыва фазы обмотки статора электродвигателя. На рис. 3.6 приведена расчетная схема для случая обрыва линейного провода фазы А.

При обрыве фазы а ее проводимость будет равна нулю:

(3.61)

Следовательно, ток этой фазы:

$$I_{\alpha} = \dots; \quad (3.62)$$

Комплексы действующих значений фазных токов оставшихся в работе фаз:

$$I_{\beta} = \dots; \quad (3.63)$$

$$I_{\gamma} = \dots, \quad (3.64)$$

где $I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma}$ — комплексы симметричных составляющих прямой обратной и нулевой последовательностей тока фазы B, A .

$$I_{\alpha} = \dots; \quad (3.65)$$

$$I_{\beta} = \dots; \quad (3.66)$$

$$I_{\gamma} = \dots. \quad (3.67)$$

Симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей на оставшихся в работе фазах определяются по (3.7), (3.8):

$$U_{\alpha} = \dots; \quad (3.68)$$

$$U_{\beta} = \dots; \quad (3.69)$$

Под действием симметричных составляющих напряжений протекают симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательностей, которые создают прямо и обратно вращающиеся поля. Им соответствуют механические характеристики (рис.3.7).

Напряжения на фазах электродвигателя:

$$; \quad (3.70)$$

$$; \quad (3.71)$$

$$. \quad (3.72)$$

Скольжение электродвигателя в этом случае находится по выражению (3.36).

Для погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 комплексы действующих значений симметричных составляющих напряжений прямой и обратной последовательностей составят:

V ;

V .

При тех же, что и в п.п. 3.1 параметрах рабочей машины:

Параметры фазы силового трансформатора мощностью 160 кВА: гтхтктропередачи, выполненной проводом марки А-16 длиной 500 м: гл Ом, хл

По выражению (3.36) скольжение электродвигателя:

s

Комплексы действующих значений токов в фазах В и С:

A ;

A ;

A ;

A .

Напряжения на фазах электродвигателя:

V ;

V .

Зависимость скольжения от кратности загрузки электродвигателя при неполнофазном режиме представлена на рис. 3.8.

Выводы:

- 1) при обрыве проводника линии электропередачи электродвигатель привода рабочей машины переходит в однофазный режим.
- 2) так как кратности напряжений симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей равны между собой: результирующий пусковой момент равен нулю.
- 3) скольжение электродвигателя для заданной кратности загрузки не изменяется.

3.4. Выводы

1. Получена зависимость скольжения электродвигателя от кратностей симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей напряжения электродвигателя и коэффициента загрузки.
2. Схлестывание проводов воздушной линии электропередачи приводит к переходу привода погружного насоса в однофазный режим, ток его здоровой фазы значительно увеличивается по сравнению с номинальным режимом (до 3 раз), скольжение электродвигателя увеличивается до величины ниже критического, что приводит к его «опрокидыванию». при периодическом характере схлестывания пуски электродвигателя могут быть частыми.
3. При обрыве фазы погружной электродвигатель переходит в однофазный режим. Силы токов здоровых фаз увеличиваются примерно в 1,5 раза.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАСХОДА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.1. Обоснование критерия диагностирования погружного электродвигателя

Скорость теплового износа изоляции показывает количество базовых часов, которые расходуются за один час работы электродвигателя и найдено в [12]:

(4.1)

где $\mathcal{E}$ – скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$\mathcal{E}_n$ – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

θ_n – абсолютная номинальная температура изоляции данного класса, К;

θ_y – фактическая абсолютная установившаяся температура изоляции, К;

B – показатель, который характеризует изоляцию данного класса, К.

В свою очередь, установившееся превышение температуры изоляции электродвигателя и абсолютная установившаяся температура изоляции зависят от кратности силы электрического тока, который потребляется электродвигателем [12]:

(4.2)

где T_n – номинальное превышение температуры изоляции данного класса, °C;

a – коэффициент потерь;

k – кратность силы электрического тока по отношению к номинальному значению.

Коэффициент потерь, в свою очередь, представляет собой отношение номинальных потерь в стали $\Delta P_{сн}$ к номинальным потерям в меди $\Delta P_{мн}$, т.е.:

(4.3)

Фактическая абсолютная установившаяся температура изоляции определяется в соответствии с выражением:

(4.4)

где $\vartheta_{ср}$ – температура окружающей среды, °C.

Введем понятие коэффициента потерь электрической энергии в асинхронном электродвигателе, который представляет собой отношение фактических потерь активной мощности ΔP к номинальным ΔP_n , т.е.:

(4.5)

В свою очередь, номинальные потери складываются с номинальных потерь в стали $\Delta P_{сн}$ и номинальных потерь в меди $\Delta P_{мн}$:

(4.6)

Фактические потери активной мощности представляют собой сумму номинальных потерь в стали и фактических потерь в меди [51]. Последние, в свою очередь, пропорциональны квадрату кратности силы электрического тока, который потребляется электродвигателем:

(4.7)

Таким образом, коэффициент потерь электрической энергии можно записать:

(4.8)

или в другом виде

(4.9)

Для исследуемого погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140: $\Delta P_{сн} = 270$ Вт; $\Delta P_{мн}$

Установившееся превышение температуры изоляции с учетом (4.9):

(4.10)

Коэффициент расхода ресурса изоляции представляет собой отношение скорости теплового износа изоляции ε к номинальному значению ε_n , т.е.:

(4.11)

или

(4.12)

Исследуем расход ресурса изоляции погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 в функции загрузки по току при различной температуре воды в артезианской скважине: $\vartheta_{ср}$

Для электродвигателя, который исследуется: $\theta_{нВтн}^{\circ}\text{C}$; $\Delta P_{сн}$ $\Delta P_{мна}$

Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

На основании полученных результатов построены зависимости расхода ресурса изоляции в функции температуры окружающей среды и кратности тока загрузки погружного электродвигателя (рис. 4.2).

Таблица 4.1
двигателя

1,4	1,6
1059,6	1172,4
1,30	2,53
1,72	3,29
2,25	4,24
2,94	5,42

двигателя
за изоляции
при этом
а ресурса по
окружающей

(4.13)

где τ – текущее превышение температуры изоляции электродвигателя, $^{\circ}\text{C}$.

Учитывая, что погружной электродвигатель с точки зрения нагрева представляет собой гетерогенное тело, тепловой процесс которого описывается суммой нескольких экспонент, заменяем, как было показано ранее, уравнение нагрева электродвигателя одной эквивалентной экспонентой с установившимся превышением температуры обмотки над температурой окружающей среды T_u и первой парциальной составляющей постоянной времени нагрева T' :

(4.14)

где $T_{нач}$ – начальное превышение температуры обмотки статора, °C.

Составляем структурную схему функционального диагностирования погружного электродвигателя (рис. 4.3).

Условие нормального режима преобразования электрической энергии и ресурса изоляции в погружном электродвигателе:

$$и \quad . \quad (4.15)$$

4.2. Математическая модель диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя

Предполагается, что диагностирование расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя происходит с временным интервалом Δt . Среднеквадратичное действующее значение тока на i -ом участке времени определяется по выражению:

$$(4.16)$$

где I_{Ai} , I_{Bi} , I_{Ci} – действующие значения фазных токов на i -ом участке времени, А.

Коэффициент загрузки электродвигателя по току на i -ом участке времени:

$$(4.17)$$

где I_n – действующее значение номинального фазного тока электродвигателя, А.

Установившееся превышение температуры обмотки статора на i -ом участке времени:

$$(4.18)$$

где d_i , dl_i – коэффициенты тепловой модели замещения электродвигателя ПЭДВ, определяются по (2.13) и (2.17) соответственно.

Текущее превышение температуры обмотки статора на i -ом участке времени:

Рис. 4.5. Зависимости $\tau = f(t)$, $\varepsilon = f(t)$ при перегрузке электродвигателя

(4.19)

оставляющей (п

(4.20)

(4.21)

где θ_n – абсолютная номинальная температура, соответствующая классу изоляции провода обмотки статора электродвигателя, К;

$\theta_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды (воды), °С.

Таким образом, предлагается математический алгоритм функционального диагностирования погружного электродвигателя по коэффициентам потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляции.

4.3. Обоснование допустимой величины дополнительного теплового износа изоляции при тепловой перегрузке

Принимаем, что электродвигатель работает с номинальной нагрузкой и имеет номинальное превышение температуры изоляции t_n . При возникновении токовой перегрузки, вследствие возникшего аномального эксплуатационного режима, превышение температуры обмотки электродвигателя за время перегрузки t_p достигает максимального значения t_{max} (рис. 4.4), а при сбросе нагрузки, за время охлаждения t_o – снижается до номинального превышения температуры t_n . В то же время, скорость износа изоляции обмотки увеличивается с номинального значения ε_n до максимального значения ε_{max} . Как следствие, возникает дополнительный тепловой износ изоляции $\varepsilon_{\text{доп}}$ за время перегрузки и охлаждения, который представляет собой площадь, ограниченную кривой $\varepsilon f(t)$ выше номинального значения скорости износа изоляции ε_n .

Как было показано выше, причиной повышенного теплового износа изоляции погружного электродвигателя является тепловая перегрузка, которая, в свою очередь, возникает из-за ряда факторов, ведущих к превышению номинального тока, среди которых наиболее существенными являются несимметричное напряжение питания, выпадение фазы, короткое замыкание в линии электропередачи.

Определим допустимый дополнительный тепловой износ изоляции электродвигателя при перегрузке в расчете на один аварийный режим.

Планируемый тепловой износ изоляции в течение года работы погружного электродвигателя определяется выражением [12]:

(4.22)

где D_n – базовый срок службы изоляции обмотки статора электродвигателя, бч [54];

T_m – моральный срок службы электродвигателя, лет [54].

Фактический тепловой износ изоляции за год работы погружного электродвигателя, как правило, меньше допустимого, т.к. зависит от графика нагрузки:

(4.23)

где N – число часов работы электродвигателя в году, ч;

$\theta_{\text{ср.н}}$ – номинальная температура окружающей среды (воды), °C;

$T_{\text{ф}}$ – эквивалентное среднегодовое превышение температуры обмотки электродвигателя в рабочий период, °C, которое, в свою очередь, определяется следующим образом:

(4.24)

где $k_{\text{ф}}$ – эквивалентный среднегодовой коэффициент загрузки электродвигателя по току в рабочий период.

Таким образом, допустимый дополнительный тепловой износ изоляции обмотки погружного электродвигателя в течение года равен [74]:

(4.25)

В течение года работы электродвигателя происходит n тепловых перегрузок по разным причинам, с учетом чего может быть определен допустимый дополнительный тепловой износ изоляции на одну тепловую перегрузку:

(4.26)

где n – вероятное число тепловых перегрузок в течение года.

После подстановки (4.22) – (4.25) в (4.26) окончательно получим

(4.27)

Зависимость допустимого дополнительного теплового износа изоляции электродвигателя на один аварийный режим от числа перегрузок в течение года $E_{д.доп} f(n)$ представлена на рис. 4.5.

Вероятное число тепловых перегрузок в течение года по статистическим данным составляет 50 – 100 перегрузок [74], таким образом значение допустимого дополнительного теплового износа изоляции электродвигателя на один аварийный режим $E_{д.доп}$

Допустимый дополнительный тепловой износ изоляции на одну тепловую перегрузку можно представить как сумму дополнительного теплового износа изоляции при перегрузке $E_{доп.п}$ и охлаждении $E_{доп.о}$:

(4.28)

В свою очередь, дополнительный тепловой износ изоляции при перегрузке:

(4.29)

где t_p – время перегрузки, с;

ϵ_p – скорость теплового износа изоляции при перегрузке, бч/ч.

Скорость теплового износа изоляции может быть определена по выражению (4.1) с учетом токовой перегрузки:

(4.30)

где T_p – текущее превышение температуры изоляции при перегрузке, °C, которое, в свою очередь, описывается уравнением:

(4.31)

Дополнительный тепловой износ изоляции при охлаждении:

(4.32)

где t_o – время охлаждения изоляции до номинального превышения температуры, с;

ϵ_o – скорость теплового износа изоляции при охлаждении, бч/ч.

(4.33)

где T_o – текущее превышение температуры изоляции при охлаждении, °C, которое, в свою очередь, описывается выражением:

(4.34)

Составляем математическую модель для определения допустимого времени работы электродвигателя с перегрузкой, задавшись температурой окружающей среды $\theta_{ср}$, допустимым дополнительным тепловым износом изоляции на один аварийный режим $E_{д.доп}$, кратностью действующего среднеквадратичного значения силы электрического тока k :

(4.35)

(4.36)

;

 k

(4.37)

Рис. 4.6. Зависимость $t_d = f(k, \vartheta_{cp})$ при $E_{д.доп} = 2$ бч.

.38)

.39)

.40)

.41)

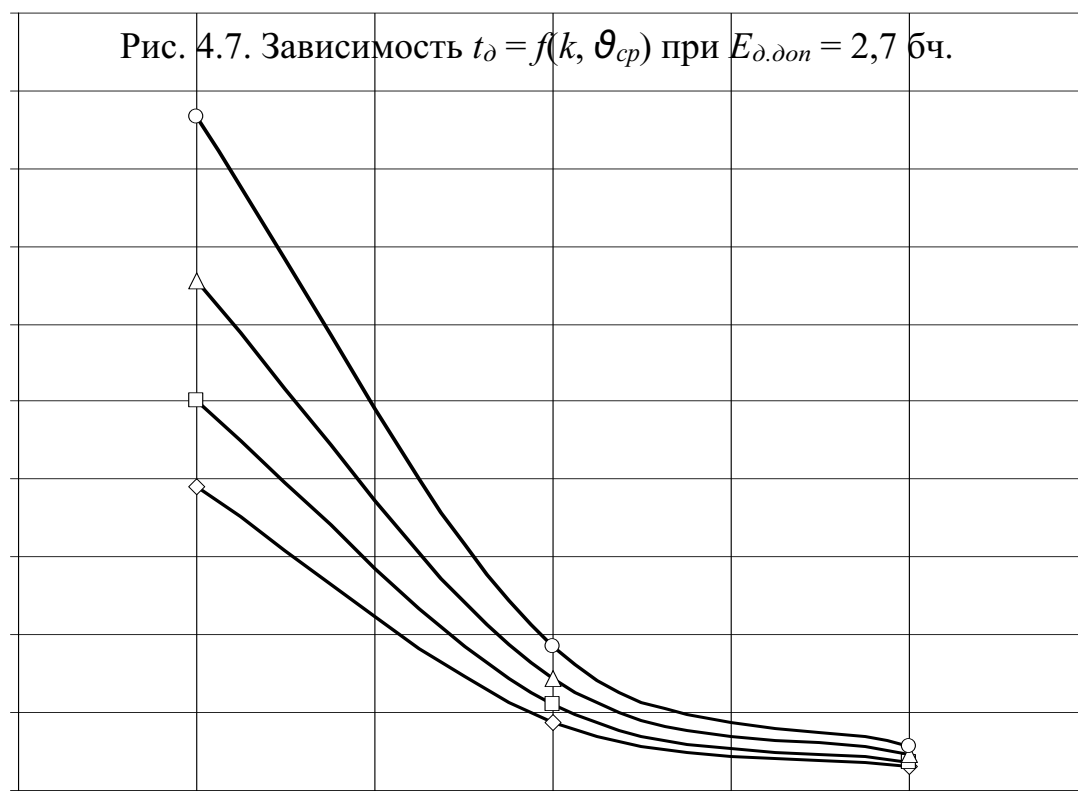
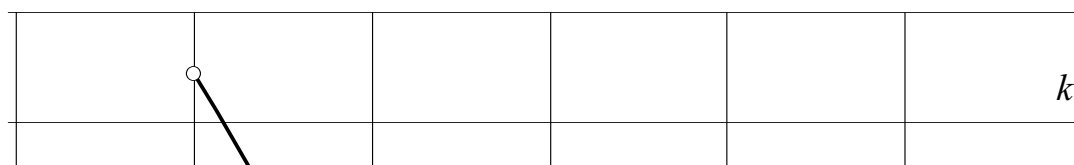
.42)

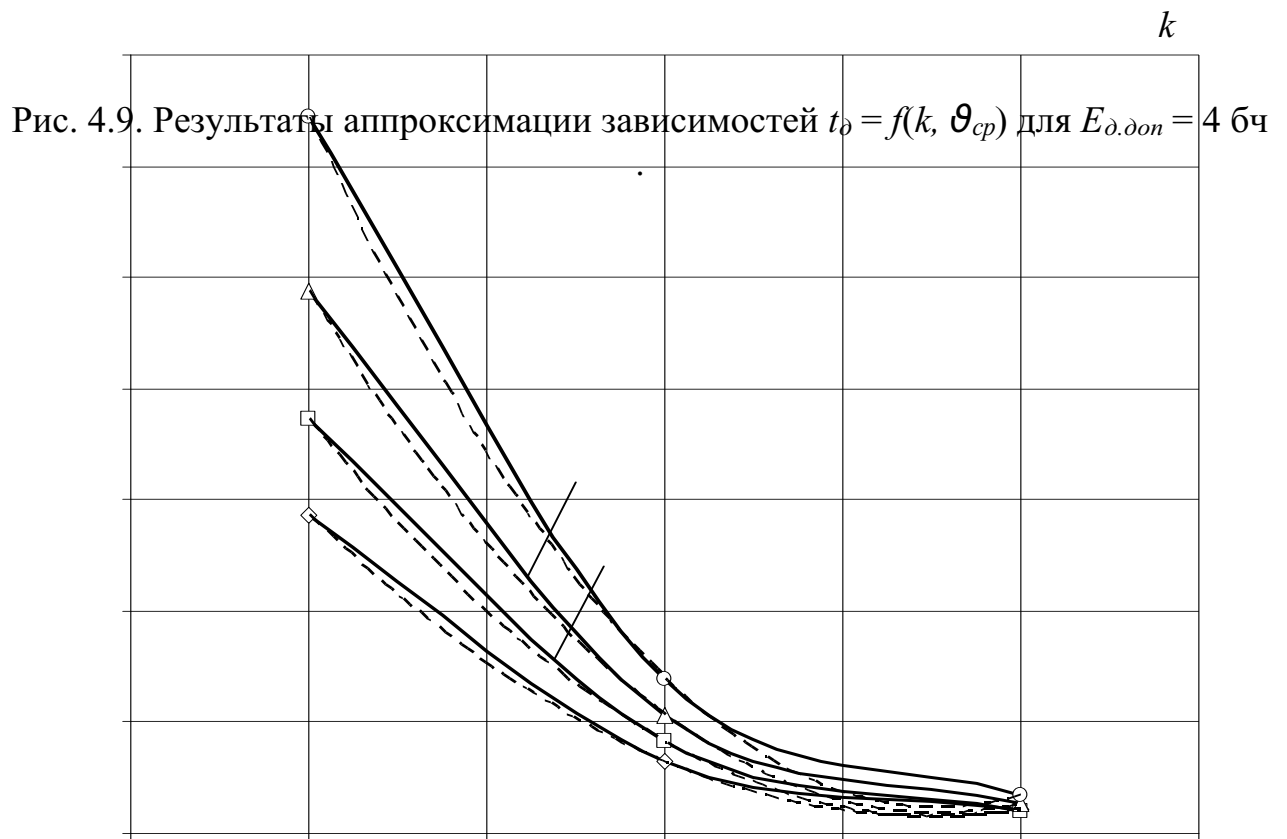
.43)

Соответствующие значения допустимого дополнительного теплового износа изоляции Ед.доп, определяем допустимое время работы электродвигателя с перегрузкой t_p .

Результаты расчета допустимого дополнительного теплового износа изоляции приведены в таблице Б.1, а результаты расчета допустимого времени работы с перегрузкой приведены в таблице Б.2 приложения Б. Зависимости допустимого времени работы электродвигателя от кратности перегрузки $t_p = f(k)$ для различных значений допустимого дополнительного теплового износа изоляции Ед.доп и температуры воды в артезианской скважине ϑ_{cp} представлены на рис. 4.6 – рис. 4.8.

С помощью метода наименьших квадратов проведена аппроксимация полученных кривых $t_d f(k, \vartheta_{cp}, E_{д.доп})$. Результаты аппроксимации для случая Ед.доп бч представлены на рис. 4.9.

k 



Для других случаев, уравнения, с помощью которых произведена аппроксимация, приведены ниже:

Едоп

$$\vartheta_{cp10} \text{ °C}; yx2 - 781163x + 607190;$$

$$\vartheta_{cp15} \text{ °C}; yx2 - 580463x + 451795;$$

$$\vartheta_{cp20} \text{ °C}; yx2 - 437438x + 340785;$$

$$\vartheta_{cp25} \text{ °C}; yx2 - 341388x + 264965.$$

Едоп

$$\vartheta_{cp10} \text{ °C}; yx2 - 106x + 826060;$$

$$\vartheta_{cp15} \text{ °C}; yx2 - 803725x + 623255;$$

$$\vartheta_{cp20} \text{ °C}; yx2 - 608838x + 472415;$$

$$\vartheta_{cp25} \text{ °C}; yx2 - 476925x + 369690.$$

Едоп

$$\vartheta_{cp10} \text{ °C}; yx2 - 2 \cdot 106x + 106;$$

$\vartheta_{\text{ср}15} \text{ }^{\circ}\text{C}; y_{\text{x}2} - 106x + 909114;$

$\vartheta_{\text{ср}20} \text{ }^{\circ}\text{C}; y_{\text{x}2} - 886838x + 690580;$

$\vartheta_{\text{ср}25} \text{ }^{\circ}\text{C}; y_{\text{x}2} - 694688x + 539024.$

Полученные уравнения регрессии могут быть использованы в устройстве функционального диагностирования электродвигателя погружного насоса для определения допустимого времени работы электродвигателя при токовой перегрузке, возникшей по разным причинам и заданной температуре воды в артезианской скважине.

4.4. Выводы

1. Определены критерии диагностирования погружного электродвигателя – коэффициент потерь электрической энергии k_p и коэффициент расхода ресурса изоляции k_{pi} .
2. Составлена структурная схема функционального диагностирования электродвигателя погружного насоса.
3. Разработана математическая модель диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя.
4. Установлено, что допустимый дополнительный тепловой износ изоляции на одну тепловую перегрузку составляет 2-4 бч.
5. Разработана математическая модель определения допустимого времени работы электродвигателя с перегрузкой.
6. Получены уравнения регрессии, с помощью которых производится расчет допустимого времени работы электродвигателя с перегрузкой.

ГЛАВА 5

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

5.1. Технические требования к устройству диагностирования

Устройство предназначено для контроля и диагностирования эксплуатационных режимов работы. Оно должно обеспечивать выполнение следующих требований:

- контроль фазных токов погружного асинхронного электродвигателя;
- непрерывная индикация текущих значений фазных токов статора;
- отключение электродвигателя от сети при длительном воздействии токов перегрузки и сверхтоков;
- подачу предупреждающего сигнала при достижении коэффициентами преобразования электрической энергии и расхода ресурса изоляции допустимых значений;
- отключение погружного электродвигателя от сети при достижении коэффициентами преобразования электрической энергии и расхода ресурса изоляции предельно допустимых значений;
- отключение погружного электродвигателя от сети при обрыве одной из фаз;
- отключение погружного электродвигателя от сети при схлестывании проводов воздушной линии электропередачи;
- отключение погружного электродвигателя от сети при нештатном исчезновении нагрузки («сухой ход» насоса);
- дистанционную передачу данных об аномальном режиме работы электродвигателя с помощью GSM-модема.

5.2. Структурная схема устройства диагностирования

На основании предложенной математической модели диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя, а также технических требований, которые были выдвинуты выше, разработана структурная схема устройства, которая приводится на рис. 5.1.

Устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя содержит блок измерения фазных токов БИТ, с которого на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) однокристального микроконтроллера МК подаются напряжения, пропорциональные фазным токам электродвигателя.

Микроконтроллер МК выполняет расчеты текущих коэффициентов преобразования электрической энергии и расхода ресурса изоляции, формирования выходных сигналов, обслуживания периферийных устройств, подключенных к нему.

Датчик «сухого хода» ДСХ находится в артезианской скважине и предотвращает работу электродвигателя в случае падения уровня воды в скважине.

Блок цифровой индикации БЦИ позволяет визуально контролировать текущие значения фазных токов, превышение температуры обмотки электродвигателя, коэффициенты преобразования электрической энергии и расхода ресурса изоляции.

С помощью блока БЦИ и клавиатуры К производится ввод параметров математической модели погружного электродвигателя, а также включения и отключения электродвигателя. Ввод параметров математической модели можно также выполнять с помощью блока сопряжения БС, реализующего функцию интерфейса RS-232C, обеспечивающего связь с персональным компьютером для ввода/вывода или GSM-модемом для вывода данных.

Блок коммутации БК предназначен для управления работой магнитного пускателя КМ – включения электродвигателя в рабочий режим и его отключения в случае превышения критериев диагностирования сверх допустимых значений.

Питание устройства постоянным током осуществляется с помощью блока питания БП. В целом устройство питается от сети трехфазного переменного тока 220/380 В с помощью автоматического выключателя QF.

5.3. Принципиальная схема устройства диагностирования

Схема электрическая принципиальная устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя приведена на рис. 5.2.

Реализация алгоритма работы устройства диагностирования возложена на микроконтроллер DD2, в постоянной памяти которого хранится программное обеспечение. Все остальные элементы подключаются к портам ввода-вывода микроконтроллера и управляются им. Загрузка программного обеспечения осуществляется с помощью интерфейса JTAG (разъем X3) [52].

Питание устройства осуществляется от стабилизированного источника постоянного тока 5 В, включающего понижающий трансформатор Tr1, выпрямительный мост VD1, стабилизатор напряжения VR1. Индикация работы источника питания и устройства в целом осуществляется с помощью светодиода LED1.

АЦП микроконтроллера использует источник опорного напряжения, выполненный на микросхеме DA4.

Блок измерения фазных токов выполнен на монолитных интегральных датчиках тока DA1 – DA3, в которых используется эффект Холла [66]. Входная цепь гальванически развязана от выходной цепи. Выходное напряжение уровнем до 5 В с датчиков подается на выводы ADC0 – ADC2 АЦП микроконтроллера DD2.

Блок коммутации содержит два электромеханических реле К1 и К2, которые управляются транзисторными ключами соответственно VT1 и VT2. Контакты реле используются для управления работой погружного электродвигателя. Нормально разомкнутые контакты реле К1 предназначены для пуска двигателя с блока клавиатуры KB1, а нормально замкнутые контакты реле К2 находятся в цепи питания катушки магнитного пускателя электродвигателя для его отключения от сети в случае аномального режима или технологической необходимости.

Блок цифровой индикации выполнен жидкокристаллическом буквенно-цифровом индикаторе HG1 и подключается к микроконтроллеру DD2 по четырехбитной шине данных D1 – D4.

Клавиатура KB1 состоит из двенадцати кнопок мембранного типа и подключается к портам микроконтроллера DD2.

Блок сопряжения выполнен на интегральном преобразователе уровня DD1 и обеспечивает связь с персональным компьютером или GSM-модемом по протоколу RS-232C, для чего используется стандартный разъем COM-порта DB9 (разъем X2). Обмен данными с микроконтроллером DD2 осуществляется по шине RXD-TXD встроенного универсального асинхронного приемопередатчика UART микроконтроллера [53, 84].

Общий вид устройства диагностирования приведен на рис. 5.3.

Технические характеристики элементов устройства функционального диагностирования представлены в приложении Г.

5.4. Алгоритм работы устройства диагностирования

Алгоритм работы основной части программы приведен на рис. 5.4.

При включении устройства выполняется инициализация аппаратной части, переменных и констант модели (блоки 2, 3), после чего микроконтроллер опрашивает состояние датчика «сухого хода» (блоки 4, 5). Если контакты датчика не омываются водой – контакт DSH разомкнут, микроконтроллер дает команду исполнительному реле K2 на размыкание. Включение электродвигателя невозможно.

В случае, если контакт DSH замкнут, выполняет считывание значений силы тока электродвигателя с трех датчиков тока (блоки 8, 10, 12). Производится проверка на наличие полнофазного режима – если отсутствует ток любой из фаз, реле K2 размыкается, пуск электродвигателя невозможен, в случае, если он не был еще запущен, либо электродвигатель отключается от сети, если до этого находился в работе. При полнофазном режиме микроконтроллер выполняет расчет среднеквадратичного значения силы тока (блок 14) и коэффициента загрузки (блок 15). При коэффициенте загрузки более двух электродвигатель погружного насоса отключается от сети, т.к. на реле K2 от микроконтроллера поступает команда на размыкание (блоки 17, 18).

На основе собранных данных и начальных условий в соответствии с математической моделью диагностирования теплового режима работы производится расчет установившегося превышения температуры обмотки электродвигателя (блок 19), текущего превышения температуры обмотки электродвигателя (блок 20), коэффициента преобразования электроэнергии (блок 21), коэффициента расхода ресурса изоляции (блок 23).

Условием дальнейшей работы насосного агрегата является выполнения условия, при котором коэффициент преобразования электроэнергии и коэффициент расхода ресурса изоляции не превышают предельного значения, иначе микроконтроллер производит расчет допустимого времени работы электродвигателя (блок 25). Расчет времени производится в виде отдельной подпрограммы, до тех пор, пока не наступит одно из событий: коэффициенты преобразования электроэнер-

гии и расхода ресурса изоляции уменьшаться до предельного значения либо истечет расчетное время допустимой работы. В первом случае электродвигатель продолжает работать и выполнять технологическую операцию, а во втором – отключается от сети.

Через промежуток времени, ограниченный временем восстановления интегральных датчиков тока, цикл повторяется.

На основании рассмотренного алгоритма на языке программирования С составлена программа, листинг которой приведен в приложении В.2.

5.5. Оценка надежности устройства диагностирования

Отказ любого элемента, входящего в состав устройства диагностирования, приводит к потере работоспособности устройства в целом [48, 71]. К количественным показателям надежности устройства относятся: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ.

Вероятность безотказной работы $p(t)$ определялась из выражения:

$$p(t) = K e^{-\lambda t}, \quad (5.1)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды; для стационарных условий $K = 1$;

λ – интенсивность отказов, ч⁻¹ [73];

t – время работы устройства, ч;

Интенсивность отказов устройства определялась по выражению:

$$\lambda = \frac{1}{T_{ср}}, \quad (5.2)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента, ч⁻¹;

n_i – количество однотипных элементов, шт.

Среднее время наработки на отказ $T_{ср}$ и интенсивность отказов λ устройства связаны следующим соотношением:

(5.3)

Результаты расчета вероятности отказов элементов устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей приведены в таблице В.2, исходя из которого, количественные показатели надежности следующие:

- вероятность безотказной работы устройства $p(t) = 0,9$;
- интенсивность отказов устройства $\lambda - 6$ ч;
- среднее время безотказной работы устройства $T_{ср}$

Полученные расчетные показатели соответствуют среднестатистическим, следовательно, разработанное устройство диагностирования обеспечивает надежный процесс контроля количественных показателей эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей.

5.6. Экспериментальное исследование математической модели диагностирования

5.6.1. Постановка вопроса

Экспериментальное исследование проводилось с целью проверки адекватности математической модели диагностирования расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя (п.п. 4.2).

В программу исследования входило определение превышения температуры лобовой части обмотки статора погружного электродвигателя в зависимости от времени теплового переходного процесса при его номинальной нагрузке. Загрузка электродвигателя производилась путем открытия задвижки на напорном трубопроводе погружного электродвигателя.

В качестве исследуемого использовался асинхронный погружной электродвигатель типа ПЭДВ 2,8-140 номинальной мощностью 2,8 кВт.

5.6.2. Описание экспериментальной установки, приборов и оборудования

Установка, принципиальная электрическая схема которой приведена на рис. 5.5, состоит из исследуемого погружного электродвигателя М1, измерительного комплекта, пусковой и защитной аппаратуры (автоматический выключатель, магнитный пускатель), измерительного прибора mV, измерительного преобразователя температуры t°С. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 5.6.

- В процессе исследований проведены измерения следующих величин:
- фазных токов обмотки статора электродвигателя М1 с помощью амперметра прибора К50 (класс точности 0,5);
 - фазных напряжений обмотки статора электродвигателя М1 с помощью вольтметра прибора К50 (класс точности 0,5);
 - напряжение небаланса измерительного преобразователя температуры $t^{\circ}\text{C}$ с помощью милливольтметра М1200 (класс точности 0,5).

Для измерения превышения температуры обмотки статора согласно ГОСТ 11828-86 (2003) [77], использовался метод заложенных термопреобразователей.

В качестве термопреобразователя использовался полупроводниковый кремниевый диод КД102А [78], который был предварительно отградуирован при температуре окружающей среды 20°C . Во время градуировки полупроводниковый термопреобразователь помещался вместе с термометром TGL 11998 (точность шкалы $0,1^{\circ}\text{C}$) в электронагревательную ванну с трансформаторным маслом, на достаточную глубину для того, чтобы исключить влияние окружающего воздуха.

Термопреобразователь был уложен во время ремонта обмотки погружного электродвигателя в лобовой части обмотки статора со стороны насоса по рекомендациям [9]. Крепление термопреобразователя к виткам обмотки осуществлялось с помощью фторопластовой ленты. К милливольтметру термопреобразователь подключался с помощью двужильного экранированного медного кабеля сечением 1,5 мм².

5.6.3. Методика проведения экспериментального исследования модели диагностирования

Проверка адекватности математической модели производилась путем сравнения превышения текущей температуры обмотки, полученного согласно модели функционального диагностирования (4.19) с фактическим превышением температуры обмотки, измеренным с помощью термопреобразователя. Измерения производились для номинального режима работы электродвигателя, который устанавливался с помощью открытия задвижки на нагнетательном трубопроводе установки для испытания погружных электродвигателей.

Определение превышения температуры обмотки с помощью полупроводникового первичного преобразователя основано на том, что при неизменном и малом токе падение напряжения на нем пропорционально температуре окружающей среды [78, 79].

Для измерения превышения температуры была применена схема измерительного преобразователя температуры (рис. 5.7).

Питание измерительного преобразователя температуры осуществлялось выпрямленным напряжением 12 В от источника постоянного тока, которое стабилизировалось на уровне 9 В с помощью стабилизатора DA1. Стабилизатор DA2, включенный по схеме генератора стабильного тока, обеспечивал ток диода VD1 на уровне 10 мА. Потенциометр R1 предназначался для баланса моста R1R2R3VD1 – с его помощью стрелка милливольтметра устанавливалась в ноль, компенсируя температуру воды в погружном электродвигателе. Таким образом, показания милливольтметра были пропорциональны превышению температуры обмотки статора погружного электродвигателя.

Милливольтметр mV, включенный в измерительную диагональ моста, R1R2R3VD1 измерял напряжение его небаланса при изменении падения напряжения на полупроводниковом диоде в результате его нагревания.

Тепловая инерция малогабаритного кремниевого диода массой 100 мг составляет 2,5 °C/с [79], что достаточно для поставленной задачи. Результаты измерений выполненные с помощью полупроводникового термоэлектрического преобразователя приведены в таблице В.3 приложения В.

5.6.4. Статистический анализ и оценка результатов исследования

При обработке результатов экспериментальных исследований была получена статистическая информация о превышении температуры обмотки погружного электродвигателя

Для получения достоверной информации необходимо n-кратное повторение опыта. Используя зависимость между необходимым числом измерений, надежностью опыта и относительной ошибкой, а также рекомендациями [80], принята надежность Н

Статистическая обработка результатов измерений выполнялась в соответствии с положениями методик, изложенных в [80, 81], в следующей последовательности:

—вычисление среднего арифметического значения по выражению

(5.4)

где x_i – значение результатов отдельных измерений;

n – количество измерений;

—определение среднеквадратичного отклонения результата наблюдения

(5.5)

—определение дисперсии

(5.6)

—вычисление ошибки выборки

(5.7)

;

—определение показателя точности опыта

(5.8)

.3

;

—расчет коэффициента вариации относительно величины среднего квадратичного отклонения

(5.9)

.3

;

Приведенные выборочные оценки представлены в таблице В.4 приложения В. . Анализируя полученные данные, видно, что коэффициент вариации превышения температуры обмотки не превысил 5,17%, что свидетельствует об однородности экспериментальных данных.

Статистическая адекватность математической модели теплового процесса погружного электродвигателя устанавливалась с помощью критерия Фишера:

.3

(5.10)

,

где m – объект выборки;

p – число факторов;

– теоретическое значение, полученное из модели функционального диагностирования.

Критическое значение F-критерия Фишера для уровня значимости α и $2m - p - 1 = 49$ составляет [81]:

.

Для нашего случая имеем F

Так как выполняется условие $F < F_{кр}$, то математическая модель диагностирования признается адекватной экспериментальным данным.

Относительное отклонение теоретических значений полученных из модели диагностирования от экспериментальных значений превышений температуры обмотки определялось по выражению:

$$\Delta = \frac{\Delta T_{\text{теор}} - \Delta T_{\text{эксп}}}{\Delta T_{\text{теор}}} \cdot 100\% \quad (5.11)$$

На рис. 5.8 представлены результаты экспериментального исследования: линией 1 отображено превышение температуры обмотки, рассчитанной на базе математической модели диагностирования по силе тока, а линией 2 показана кривая превышения температуры обмотки статора погружного электродвигателя, построенная по экспериментальным данным.

5.7. Оценка экономической эффективности устройства диагностирования

Главной задачей при эксплуатации погружных электродвигателей является обеспечение их надежности. Внедрение устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы позволит контролировать фактический нагрев электродвигателей, а также текущий расход ресурса изоляции.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы достигается за счет

сокращения затрат на ремонт погружного электродвигателя, увеличения срока между профилактическими ремонтами.

При эксплуатации асинхронных электродвигателей без устройств диагностики аномальных режимов работы, выход их из строя составляет 20% [12] от общего парка электродвигателей, в то время как использование устройств диагностики снижает выход из строя до 5%.

При замене вышедших из строя электродвигателей на новые и отсутствии диагностирующего устройства затраты определяются следующим образом:

$$Z_{нд} = 0,2C_{эд}, \quad (5.4)$$

где $C_{эд}$ – стоимость новых электродвигателей, грн.

При замене вышедших из строя электродвигателей на новые и использовании диагностирующего устройства затраты определяются следующим образом:

$$Z_{нд.д} = 0,05C_{эд}. \quad (5.5)$$

В настоящее время большинство предприятий вместо замены вышедших из строя электродвигателей производят их капитальный ремонт, т.к. это не менее чем на треть снижает затраты на восстановление работоспособности технологического оборудования.

Расчет стоимости затрат на капитальный ремонт погружных электродвигателей производится с учетом таблицы цен от 14.09.2010 г. на капремонты электродвигателей ЧП Калинишин В.В. (г. Мелитополь), приведенной в таблице В.5 приложения В.

Стоимость затрат на капитальный ремонт погружных электродвигателей для двух вариантов – при отсутствии диагностирующего устройства и при использовании диагностирующего устройства, соответственно определяется следующим образом:

$$Z_{кр} = 0,2C_{кр}; \quad (5.6)$$

$$Z_{кр.д} = 0,05C_{кр}. \quad (5.7)$$

Годовой экономический эффект от снижения затрат при использовании диагностирующего устройства, связанный с заменой асинхронных двигателей, вышедших из строя на новые или с капитальным ремонтом определяется по формулам:

$$\mathcal{E}_{г.нд} = Z_{нд} - Z_{нд.д}; \quad (5.8)$$

$$\mathcal{E}_{г.кр} = Z_{кр} - Z_{кр.д}. \quad (5.9)$$

Срок окупаемости устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей для двух вариантов определяется по

выражению:

(5.10)

где C_y – стоимость устройства диагностирования (таблица В.6 приложения В), грн.

(5.11)

Для погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 стоимостью 1375 грн. имеем:

Эг.нд

Эг.кр

Ток.нд 2,6 года;

Ток.кр 3,7 года.

Разработанное устройство диагностирования внедрено в производство на эксплуатационном участке №3 Каменского межрайонного управления водного хозяйства Запорожской области (приложение Г.1) на дренажной насосной станции и на насосной станции в Геническом производственном управлении водоканализационного хозяйства (приложение Г.2).

Экономический эффект от внедрения устройства зависит от стоимости электродвигателя и стоимости его капитального ремонта – при использовании устройства диагностирования для более мощных электродвигателей этот показатель существенно изменяется. Так, для двигателя ПЭДВ 11-180:

Эг.нд

Эг.кр

Ток.нд 1,3 года;

Ток.кр 2,1 года.

5.8. Выводы

1. Разработано микропроцессорное устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей, которое позволяет диагностировать схлестывание питающих проводов линии электропередачи, обрыв фазы, перегрузку по току.
2. Проведено экспериментальное исследование, которое подтвердило адекватность математической модели диагностирования по силе тока статора электродвигателя. Значение критерия Фишера составило $FF_{кр}$

3. Исследования и производственные испытания устройства диагностирования показали, что вероятность безотказной работы устройства составляет 0,9, среднее время безотказной работы 131216 часов.

4. Годовой экономический эффект от внедрения устройства диагностирования для насоса ЭЦВ 6-4-130 с двигателем ПЭДВ 2,8-140 составляет 206 грн., капитальные затраты окупаются за 2,6 года.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований для решения научно-технической задачи, состоящей в обосновании метода и разработке устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей с целью повышения их эксплуатационной надежности. По результатам исследования сделаны следующие выводы:

7. Теоретически обоснована необходимость рассмотрения тепловых процессов в погружном электродвигателе как в гетерогенной системе, которая состоит из трех тел – обмотки статора, обмотки ротора, стали.

8. Предложена методика определения тепловых проводимостей между телами и окружающей средой тепловой схемы замещения погружного электродвигателя на основании результатов опытов холостого хода и короткого замыкания. Для исследуемого электродвигателя найдены тепловые проводимости: между обмотками статора и ротора Λ_{12} , между обмоткой статора и сталью электродвигателя Λ_{13} , между обмоткой ротора и сталью электродвигателя Λ_{23} , между сталью электродвигателя и окружающей средой (водой) Λ .

9. Получено уравнение нагрева обмотки статора электродвигателя, представленного системой трех тел, которое состоит из трех парциальных составляющих, имеющих следующие постоянные времени: первая – 496 с, вторая – 66 с, третья – 20 с. Проведена аппроксимация уравнения нагрева эквивалентной кривой, которая имеет постоянную времени первой парциальной экспоненты.

10. Определено, что во время схлестывания проводов линии электропередачи системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – погружной электродвигатель», ток здоровой фазы электродвигателя значительно повышается относительно номинального тока: I_{As}

11. Определены критерии диагностирования погружного электродвигателя – коэффициент потерь электрической энергии k_p и коэффициент расхода ресурса изоляции k_r .

12. Предложена методика функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы на базе разработанной математической модели нагрева погружного электродвигателя, как гетерогенного тела.

13. Получены уравнения регрессии $\ln p_{rf}(k, \theta_{cp}, \text{Ед.пр})$, которые используются для определения допустимого времени работы электродвигателя с перегрузкой.

14. Разработано микропроцессорное устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя. Проведено экспериментальное исследование, которое подтвердило адекватность математической модели диагностирования по силе тока статора электродвигателя. Относительная погрешность определения температуры обмотки не превышает 3%. Вероятность безотказной работы устройства составляет 0,9; среднее время безотказной работы – 131216 часов. Устройство внедрено на эксплуатационном участке №3 Каменского межрайонного управления водного хозяйства, в Геническом производственном управлении водоканализационного хозяйства. Ожидаемый годовой экономический эффект зависит от мощности электродвигателя, который диагностируется – так, для рассматриваемого в работе электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 он составляет 206 грн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Счастливый Г.Г. Погружные электродвигатели / Счастливый Г.Г., Семак В. Г., Федоренко Г.М. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
2. Ахмедов А.Д. К вопросу об эксплуатационной надежности погружных двигателей / А.Д. Ахмедов // Промышленная энергетика. – 1987. – № 7. – С. 14-16.
3. Майоров В.Н. Исследование эксплуатационной надежности защитно-отключающих средств станций управления погружными насосами / В.Н. Майоров, Ю.О. Истомин // Научно-технический бюллетень Сибирского НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства. – Новосибирск: – 1980. – № 6. – С. 43.
4. Гетманенко В.М. Методы и средства повышения эксплуатационной надежности электродвигателей погружных насосов: автореф. дисс. на соиск . учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / В.М. Гетманенко – М., 1986. – 16 с.
5. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А.О. Грундулис. – [2-е изд.]. – М.: Агропромиздат, 1988. – 111 с.
6. Пястолова И.А. Анализ потока отказов электродвигателей в сельском хозяйстве / И.А. Пястолова, А.Х. Тлеуов // Повышение надежности работы электроустановок в сельском хозяйстве. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1986, – с. 63-68.
7. Данилов В.Н. Защита электродвигателей от аварийных режимов / В.Н. Данилов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 2. – С. 19-22.
8. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования / В.П. Таран. – К.: Техніка, 1983. – 200 с.
9. Гамзаев М.М. Повышение эксплуатационной надежности погружных электронасосных установок с помощью температурной защиты: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / М.М. Гамзаев. – Челябинск, 1987. – 20 с.
10. Белов Ю.А. Пути повышения надежности защиты погружных электронасосов / Ю.А. Белов // Повышение эксплуатационной надежности силового сельскохозяйственного электрооборудования. – К.: УСХА, 1987. – С. 12-14.
11. Мишин В.Н. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве / В.Н. Мишин, И.В. Собор. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 127 с.
12. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – К.: УСХА, 1990. – 168 с.

13. Сырых Н.Н. Эксплуатация сельских электроустановок / Н.Н. Сырых. – М.: Агропромиздат, 1986. – 58 с.
14. Корчемный Н.А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве / Н.А. Корчемный, В.П. Машевский. – К.: Урожай, 1988. – 176 с.
15. Данилов В.Н. Классификация устройств защиты электродвигателей от аварийных режимов / В.Н. Данилов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 6. – С. 34-37.
16. Защита электродвигателей в АПК: Обзор. информ. Госагропром СССР. АгроНИИТЭИИТО / [сост. В.Я. Жарков]. – М.: 1989. – 28 с.
17. Довідник сільського електрика / [Олійник В.С., Гайдук В.М., Гончар В.Ф. та ін.]; за ред. В.С. Олійника. – [3-є вид.]. – К.: Урожай, 1989. – 264 с.
18. Сыч И.П. Направления совершенствования тепловой защиты электродвигателя / И.П. Сыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 12. – С. 3-8.
19. А. с. 1394319. СССР, МКИ 4 Н02 Н7/08. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя от аномальных режимов работы / В.Я. Жарков (СССР). – № 3985209/24-07; заявл. 09.12.85; опубл. 07.05.88, Бюл. № 17.
20. Сыч И.П. Температурная защита электродвигателей с компенсацией динамической погрешности / И.П. Сыч // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. – № 3. – С. 24.
21. А. с. 1117763. СССР, МКИ 4 Н02 Н7/08. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя от перегрузки / В.Я. Жарков (СССР). – № 3587596/24-07; заявл. 10.05.83; опубл. 07.10.84, Бюл. № 37.
22. Билиневич В.Н. Автоматическое управление скважинным электронасосом / В.Н. Билиневич, А.П. Фоменков // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 5. – С. 38-39.
23. Мамедов М.Д. Особенности регулировки и наладки защитных устройств электродвигателей погружных электронасосов / М.Д. Мамедов, И.Д. Керимов // Повышение надежности работы электроустановок в сельском хозяйстве. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1986. – С. 15-18.
24. Катюха А.А. Защита блока-логики / А.А. Катюха, В.Н. Билиневич // Техника в сельском хозяйстве. – 1982. – № 3. – С. 38-39.
25. Белов Ю.А. Устройство для проверки исправности и наладки блоков защиты погружных электродвигателей / Ю.А. Белов, И. В. Тронин // Технические средства диагностирования электрооборудования. – К.: УСХА, 1988. – С. 10-13.
26. Белов Ю.А. Универсальный стенд для моделирования аномальных режимов электронасосов при настройке станций управления серии ШЭТ и ШЭП / Ю.А. Белов // Оптимизация режимов и повышение эксплуатационной надежности силового оборудования в условиях сельскохозяйственного производства. – К.: УСХА, 1983. – С. 13-16.
27. Калашник В. Устройство защиты электродвигателя / В. Калашник // Радио. – 1988. – № 7. – с. 24.

28. Шнидерс А.А. Разработка и исследование фазочувствительных устройств комбинированной защиты электроприводов сельскохозяйственного назначения: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / А.А. Шнидерс – Челябинск, 1982. – 20 с.
29. Сыч И.П. Совершенствование тепловой защиты электродвигателей в сельских сетях / И.П. Сыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 3. – С. 29-31.
30. Данилов В.Н. О паразитных э.д.с. в проводах подключения терморезисторов к устройству температурной защиты электродвигателя / В.Н. Данилов, С.В. Оськин // Повышение надежности работы электроустановок в сельском хозяйстве. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1986. – С. 19-24.
31. Шнидерс А.А. Нагрев и защита асинхронного электропривода сельскохозяйственных механизмов в энергонапряженных режимах / А.А. Шнидерс, Л.Я. Шнидере // Технология и механизация животноводческих ферм и комплексов. – Елгава: ЛСХА, 1984. – Вып. 224. – С. 87-96.
32. Грицкус А.А. Параметры элементов устройства защиты асинхронных двигателей температурно-зависимой времятоковой характеристикой / А.А. Грицкус // Технология и механизация животноводческих ферм и комплексов. – Елгава: ЛСХА, 1984. – Вып. 224. – С. 87-96.
33. Хомутов О.И. Разработка защиты электродвигателей на основе моделирования тепловых процессов / О.И. Хомутов, В.В. Усов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 12. – С. 51-52.
34. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / [Копылов И.П., Клоков Б.К. и др.]; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
35. Асинхронные двигатели общего назначения / [Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др.]; под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
36. Гутенмахер Л.И. Электрические модели / Л.И. Гутенмахер. – [2-е изд.]. – К.: Техника, 1975. – 176 с.
37. А. с. 1557620. СССР, МКИ 4 Н02 Н5/04. Устройство для тепловой защиты трехфазного электродвигателя / В.П. Калявин, А.В. Мозгалеvский, Д.Н. Палишкин, С.В. Тарасов (СССР). – № 4458233/24-07; заявл. 19.05.88; опубл. 15.04.90, Бюл. № 14.
38. А. с. 1772861. СССР, МКИ 4 Н02 Н5/04 Устройство для тепловой защиты трехфазных асинхронных электродвигателей / В. М. Ходырев, Ф.Г. Марьяхин, А.Н. Гераськов (СССР). – № 4867698/07; заявл. 20.09.90; опубл. 30.10.92, Бюл. № 40.
39. Курашкін С.Ф. Безупинне діагностування теплових процесів асинхронних електродвигунів заглибних насосів / С.Ф. Курашкін, В.В. Овчаров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 1998. – Вип. 1, Т. 7. – С. 7-10.

40. Курашкін С.Ф. Теоретичні передумови застосування операторного методу розрахунку електричної моделі теплової схеми заміщення електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2000. – Вип. 1, Т. 17. – С. 85-88.
41. Белоусов А.И. Теоретические и экспериментальные исследования привода погружных электронасосов сельскохозяйственного водоснабжения и водооткачки: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / А.И. Белоусов. – М., 1967. – 19 с.
42. Курашкін С.Ф. Математична модель нагріву заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – Вип. 1, Т. 19. – с. 105-108.
43. Степин Ю.А. Тепловой расчет асинхронного электродвигателя при несимметрии напряжений по методу эквивалентных тепловых схем / Ю.А. Степин // Повышение эксплуатационной надежности силового сельскохозяйственного электрооборудования. – К.: УСХА, 1987. – С. 36-40.
44. Основы теории цепей: [учебник для вузов] / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
45. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
46. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: [учеб. пособие для вузов] / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
47. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – [4-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
48. Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики / И.И. Мартыненко, В.Ф. Лысенко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 243 с.
49. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров. – М.: Энергия, 1972. – 140 с.
50. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 639 с.
51. Овчаров С.В. Исследование потерь мощности в асинхронном электродвигателе / С.В. Овчаров, Р.В. Телюта // Проблеми енергозбереження та енергозбереження в АПК України: Збірник наукових праць. – 2009. – С. 53-57.
52. Белов А.В. Конструирование устройств на микроконтроллерах / А.В. Белов. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
53. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты / И.В. Петров; под ред. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.
54. Електродвигуни асинхронні заглибні. Загальні технічні умови: ДСТУ 2649-94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 30 с. – (Національні стандарти України).

55. Казьмерковский М. Схемы управления в промышленной электронике: пер. с польск. / М. Казьмерковский, А. Вуйцак. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 224 с.
56. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин / Э.И. Гуревич – Л.: Энергия, 1977. – 296 с.
57. Курашкін С.Ф. Моделювання електромеханічних перехідних процесів заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Вісник Харківського Державного Університету сільського господарства. – Харків, 2001. – Вип. 6. – С. 374-375.
58. Експериментальне дослідження режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі / [Курашкін С.Ф., Овчаров В.В., Вовк О.Ю., Попова І.О.] // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2003. – Вип. 15. – С. 153-157.
59. Курашкін С.Ф. Визначення параметрів теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін, І.О. Попова // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. Науково-виробничий журнал. – 2004. – № 1 (6). – С. 39-42.
60. Курашкін С.Ф. Дослідження втрат потужності еквівалентної теплової схеми заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін, В.В. Овчаров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 32. – С. 50-54.
61. Пристрій діагностування режимів роботи електродвигунів при несиметрії напруг / [Курашкін С.Ф., Борт С.М., Юдіна О.В., Попова І.О.] // Матеріали науково-технічної конференції магістрів та студентів Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 8, Т. 2. – С. 9-10.
62. Курашкін С.Ф. Діагностування перетворення електричної енергії в заглибному електродвигуні / С.Ф. Курашкін, С.В. Овчаров, А.В. Островський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 15. – С. 153-157.
63. Курашкін С.Ф. Розробка мікроконтролерного пристрою діагностування режимів роботи асинхронного електродвигуна. / С.Ф. Курашкін, В.В. Кузьменко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 15. – С. 153-157.
64. Попова І.О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.16 «Електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі» / І.О. Попова. – Мелітополь, 2003. – 19 с.
65. Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки / В.В. Овчаров. – К.: Урожай, 1993. – 224 с.
66. Козенков Д. Интегральные датчики тока / Д. Козенков // Электронные компоненты. – 2005. – № 9. – С. 59-63.
67. Курашкин С.Ф. Анализ режима работы асинхронного электродвигателя при схлестывании питающих проводов воздушной линии электропередачи / С.Ф. Курашкин, С.В. Овчаров, А.В. Островский // Вестник Национального

- технического университета «Харьковский политехнический институт». / Материалы научно-технической конференции. – Харьков: НТУ ХПИ, 2010. – № 29. – С.120-125.
68. Курашкин С.Ф. Диагностирование эксплуатационного режима погружного электродвигателя / С.Ф. Курашкин, Р.В. Телюта // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал. 2010. – № 8 (78). – С. 60-65.
 69. Иноземцев Г.Б. Виды повреждения и причины выхода из строя электродвигателей в сельскохозяйственном производстве / Г.Б. Иноземцев, И.И. Ефименко, М.Е. Колекуст // Сборник научных трудов УСХА. – К.: УСХА, 1972. – Вып. 54. – С. 42 -45.
 70. Патент 36569 А Україна, МПК7 G05F1/22, H02J3/26. Пристрій регулювання і симетрування змінної напруги / П.І. Савченко, І.М. Трунова (Україна). – №2000010030; Заяв.04.01.2000; Опубл.16.04.2001, Бюл. № 3.
 71. Малинский В.Д. Испытания радиоаппаратуры / В.Д. Малинский, Д.Н. Ошер, Л.Я. Теплицкий. – М.: Энергия, 1965. – 440 с.
 72. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А.М. Мусин. – М.: Колос, 1979. – 112 с.
 73. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
 74. Хоменко О.В. Прогнозирование остаточного ресурса изоляции электродвигателей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / О.В. Хоменко – Челябинск, 1988. – 18 с.
 75. Назар'ян Г.Н. Методика визначення параметрів схеми заміщення асинхронних електродвигунів серії 4А за паспортними даними / Г.Н. Назар'ян // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – Вип. 1, Т. 24. – С. 49-54.
 76. Курашкін С.Ф. Математична модель і пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи електродвигуна заглибного насосу/ С.Ф. Курашкін // Вісник Харківського національного університету сільського господарства «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 102. – С. 131-132.
 77. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний: ГОСТ 11828-86 (2003). – [Введен в действие 1986-15-08]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт).
 78. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах. Кн.1 / [Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.]; пер. с франц. под ред. А.С. Обухова. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
 79. Шустов М. Электронный термометр / М. Шустов // Радиомир. – 2001. – № 11. – С. 31.
 80. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.

81. Назарьян Г.Н. Практический курс планирования эксперимента: учебное пособие / Назарьян Г.Н. – Мелитополь: ТГАТА, 1999. – 66 с.
82. Вислогузов В.М. Обоснование рациональных параметров погружных гидронасосных агрегатов для повышения надежности их работы: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (машиностроение)» / В.М. Вислогузов. – Тула, 2005. – 20 с.
83. Катюха А.А. Энергетика автоматизованого электропривода / А.А. Катюха //

Испр.	R1-2	K1-3	R2-3	Rφ ср.	Rмех.	Мето испытаний	ВГМ
ОМ	ОМ	ОМ	ОМ	ОМ	ВГ	Дата испытаний	27.03.98
.0180	5.95	6.0200	5.8300	2.9577	227.18	1:2	

(ПВДП-0.95 30 витков в пазу)

М15

ПДВ 2,8-140

Протокол параметрических испытаний

погружного электродвигателя

С насосом ЗНВ 6-10-80

Уразаг. = 144 В

Опыт холостого хода

М15

f	V ₀	C _{во}	U ₀	Mo1	Mo2	I Mo	C _{ро}	P ₀	Ao1	Ao2	Ao3	C _ю	I ₀ ср	Pom1	Pст	Pст
Гц	дел	В/дел	В	дел	дел	дел	Вт/дел	Вт	дел	дел	дел	А/дел	А	Вт	Вт	Вт
49.5	105	4	424.2424			40.00	15	600.00	64		60	.075	4.73	138.10	401.90	174.73
49.5	97.5	4	393.9394			34.00	15	510.00	54		57	.075	4.13	150.98	359.02	131.84
49.5	95	4	383.8384			32.00	15	480.00	52		48	.075	3.79	127.28	352.72	125.54
49.5	90	4	363.6364			30.00	15	450.00	47.5		45	.075	3.50	108.69	341.31	114.13
49.5	82	4	331.3131			26.00	15	390.00	41.5		39	.075	3.04	81.87	308.13	80.96
49.5	75	4	303.0303			25.00	15	375.00	37		35	.075	2.71	65.28	309.72	82.54
49.5	67.5	4	272.7273			23.00	15	345.00	33.5		31.5	.075	2.44	52.72	292.28	65.10
49.5	60	4	242.4242			21.50	15	322.50	30		28	.075	2.16	41.49	281.01	53.83
49.5	105	2	212.1212			20.50	15	307.50	27		25.5	.075	1.96	34.17	273.33	46.15
49.5	90.5	2	182.8283			19.00	15	285.00	25		23	.075	1.79	28.35	256.65	29.47
49.5	75	2	151.5152			18.50	15	277.50	23.5		22	.075	1.69	25.27	252.23	25.05
49.5	60	2	121.2121			18.00	15	270.00	24		23	.075	1.74	26.79	243.21	16.03
49.5	49.5	2	100			17.50	15	262.50	26.5		25.5	.075	1.93	32.88	229.62	2.44
49.5	95	4	383.8384			32.00	15	480.00	52		49	.075	3.83	129.82	350.18	124.87

ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

f	V _к	C _{ук}	U _к	Mo1	Mo2	I Mo	C _{рк}	P _к	Ak1	Ak2	Ak3	C _{ик}	I _к ср	Pom1	Pm2	Мк	Cosφ _к
Гц	дел	В/дел	В	дел	дел	дел	Вт/дел	Вт	дел	дел	дел	А/дел	А	Вт	Вт	кГ*м	Вт
49.6	120	2	241.9355			65.00	100	6500.00	88		80	.25	21.00	3912.99	2533.18	83	.74
49.6	104	2	209.6774			47.00	100	4700.00	75		68	.25	17.75	2795.55	1858.30	61	.73
49.6	90	2	181.4516			38.50	100	3450.00	64		57	.25	15.00	1996.43	1424.10	47	.73
49.6	75	2	151.2097			23.50	100	2350.00	52		46.5	.25	12.21	1322.46	1002.48	33	.73
49.6	50	2	100.8065			13.00	50	900.00	33		28.5	.25	7.58	510.26	387.30	13	.68

IRH= 34.91 (A)

MEN= 2.293500 (кГ*м)

MRR/MH= 5574358

IRH/IR= 2.709621

ИСПЫТАНИЯ ПРОИЗВЕЛ: КЭОНА
Расчеты произвел: РОЖКОВА Н.А.

А.2. Алгоритм расчета тепловых проводимостей погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140

Исходные данные:

$P_{1x}, P_{2x}, P_{3x}, t_{1x}, t_{2x}, t_{3x}, P_{1к}, P_{2к}, P_{3к}, t_{1к}, t_{2к}, t_{3к}.$

Таблица А.1.

Величина	P_{1x}	P_{2x}	P_{3x}	t_{1x}	t_{2x}	t_{3x}	$P_{1к}$	$P_{2к}$	$P_{3к}$	$t_{1к}$	$t_{2к}$	$t_{3к}$
Ед. изм.	Вт	Вт	Вт	°C	°C	°C	Вт	Вт	Вт	°C	°C	°C
Значение	151,0	0,0	131,8	4,7	0,0	4,1	510,3	387,3	0,0	16,0	12,1	0,0

Расчет

1. $\tau_{12x} \tau_{21x} \tau_{1x} - \tau_{2x};$
2. $\tau_{13x} \tau_{1x} - \tau_{3x};$
3. $\tau_{12к} \tau_{1к} - \tau_{2к};$
4. $\tau_{13к} \tau_{31к} \tau_{1к} - \tau_{3к};$
5. $\tau_{23x} \tau_{2x} - \tau_{3x};$
6. $\tau_{23к} \tau_{32к} \tau_{2к} - \tau_{3к};$

7. ;

8. ;

9. ;

10.

Таблица А.2.

Результаты расчета тепловых проводимостей погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140

Величина	τ_{12x}	τ_{13x}	τ_{23x}	$\tau_{12к}$	$\tau_{13к}$	$\tau_{23к}$	Λ_{12}	Λ_{13}	Λ_{23}	Λ
Ед. изм.	°C	°C	°C	°C	°C	°C	Вт/°C	Вт/°C	Вт/°C	Вт/°C
Значение	4,7	0,6	-4,1	3,8	16,0	12,1	28,8	25,0	22,8	51,1

А.3. Алгоритм расчета кривой нагрева обмотки статора погружного электродвигателя
ПЭДВ 2,8-140

Исходные данные:

$m_1, m_2, m_3, c_{01}, c_{02}, c_{03}, P_{1н}, P_{2н}, P_3, \alpha, \Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}, \Lambda.$

Переменные величины:

k

t = 0; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; 1750; 2000; 2250; 2500; 2750; 3000; 3250; 3408; 3500 с.

Расчет

1. m_1
2. m_2
3. m_3
4. c_{01}
5. c_{02}
6. c_{03}
7. $\alpha - 1$;
8. P_{1H376} Вт;
9. P_{2H}
10. P_3
11. Λ_{12}
12. Λ_{13}
13. Λ_{23}
14. Λ
15. $C_1 c_{01} \cdot m_1$;
16. $C_2 c_{02} \cdot m_2$;
17. $C_3 c_{03} \cdot m_3$;
18. $a C_1 C_2 C_3$;
19. $b C_1 C_2 (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1 C_3 (\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_2 C_3 (\Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha k^2 P_{1H})$;
20. $c \Lambda_{12} (C_1 + C_2) (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1 \Lambda_{23} (\Lambda + \Lambda_{13}) + C_2 \Lambda_{13} (\Lambda + \Lambda_{23}) + C_3 (\Lambda_{13} \Lambda_{12} + \Lambda_{13} \Lambda_{23} + \Lambda_{12} \Lambda_{23}) - \alpha k^2 P_{1H} (C_2 \Lambda_{13} + C_2 \Lambda_{23} + C_3 \Lambda_{12} + C_3 \Lambda_{23} + C_2 \Lambda)$;
21. $d \Lambda_{12} \Lambda_{23} \Lambda + \Lambda_{12} \Lambda_{13} \Lambda + \Lambda_{13} \Lambda_{23} \Lambda - \alpha k^2 P_{1H} (\Lambda_{12} \Lambda + \Lambda_{12} \Lambda_{13} + \Lambda_{12} \Lambda_{23} + \Lambda_{23} \Lambda + \Lambda_{13} \Lambda_{23})$;
22. $b_1 C_2 C_3 k^2 P_{1H}$;
23. $c_1 C_2 k^2 P_{1H} (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_3 k^2 P_{1H} (\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_3 k^2 P_{2H} \Lambda_{12} + C_2 P_3 \Lambda_{13}$;
24. $d_1 \Lambda_{12} k^2 (P_{1H} + P_{2H}) (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + k^2 P_{1H} \Lambda_{23} (\Lambda + \Lambda_{13}) + k^2 P_{2H} \Lambda_{13} \Lambda_{23} + P_3 (\Lambda_{13} \Lambda_{12} + \Lambda_{13} \Lambda_{23} + \Lambda_{12} \Lambda_{23})$;
25. $pp := \text{fsolve}(a \cdot p^3 + b \cdot p^2 + c \cdot p + d = 0, p)$ – решение кубического уравнения с помощью программы Maple 9.5;
26. p_1
27. p_2
28. p_3
- 29.

$$\tau_1(t) = 18,3e(-t/496) - 4,3e(-t/66) - 3,8e(-t/20).$$

Таблица А.3

Результаты расчета кривой нагрева обмотки статора погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 при k

t, с	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$\tau_1(t)$, °C	0	10,5	16,8	20,7	23,0	24,4	25,2	25,7	26,0
$\Sigma\tau_1(t)$, °C	0	15,2	19,7	22,4	24,0	24,9	25,5	25,9	26,1
$\Delta\tau(t)$, °C	0	4,7	2,9	1,7	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1
$\Delta\tau(t)\%$	0	30,9	14,7	7,6	4,2	2,0	1,2	0,8	0,4

Таблица А.4

Результаты расчета парциальных составляющих $\tau'_{1.1}(t)$, $\tau'_{1.2}(t)$, $\tau'_{1.3}(t)$ кривой нагрева $\tau'_1(t)$ обмотки статора погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 при k

t, с	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
$\tau'_{1.1}(t)$, °C	0	7,2	11,6	14,3	15,9	16,8	17,4	17,8	18,0
$\tau''_{1.1}(t)$, °C	0	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
$\tau'''_{1.1}(t)$, °C	0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8

Б.1. Расчет допустимого времени работы погружного электродвигателя ПЭД 2,8-140

Таблица Б.1

Результаты расчета в допустимого дополнительного теплового износа изоляции Ед.доп в зависимости от кратности расхода тока k и температуры окружающей среды $\theta_{ср.}$.

k	1,2								
θ_{cp} 10 °C	Нагрев						Охлаждение		
t, c	0	12886	25772	38658	51544	64430	64680	64930	65000
, °C	30,0	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	34,1	30,8	30,0
, бч/ч	0,40	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,52	0,42	0,40
Δi , бч	0,00	0,44	0,89	0,89	0,89	0,89	0,01	0,00	0,00
, бч	4,0								
θ_{cp} 15 °C	Нагрев						Охлаждение		
t, c	0	9750	19500	29250	39000	48750	49000	49250	49320
, °C	30,0	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	34,1	30,8	30,0
, бч/ч	0,55	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,70	0,58	0,55
Δi , бч	0,00	0,44	0,88	0,88	0,88	0,88	0,02	0,01	0,00
, бч	4,0								
θ_{cp} 20 °C	Нагрев						Охлаждение		
t, c	0	7445	14890	22335	29780	37225	37475	37725	37795
, °C	30,0	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	34,1	30,8	30,0
, бч/ч	0,74	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	0,95	0,78	0,74
Δi , бч	0,00	0,44	0,88	0,88	0,88	0,88	0,02	0,01	0,00
, бч	4,0								
θ_{cp} 25 °C	Нагрев						Охлаждение		
t, c	0	5725	11450	17175	22900	28625	28875	29125	29195
, °C	30,0	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	34,1	30,8	30,0
, бч/ч	1,00	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,27	1,05	1,00
Δi , бч	0,00	0,44	0,88	0,88	0,88	0,88	0,03	0,01	0,00
, бч	4,0								

Продолжение таблицы Б.1

k	1,4									
θ_{cp} 10 °C	Нагрев							Охлаждение		
t, c	0	2320	4640	6960	9280	11600	13920	14420	14920	15280
, °C	30,0	51,7	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	42,4	34,7	30,0
, бч/ч	0,40	1,47	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	0,86	0,54	0,40
Δi , бч	0,00	0,34	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,11	0,04	0,01
, бч	4,0									
θ_{cp} 15 °C	Нагрев							Охлаждение		
t, c	0	1775	3550	5325	7100	8875	10650	11150	11650	12010

, °C	30,0	51,3	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	42,4	34,7	30,0
, бч/ч	0,55	1,89	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,15	0,73	0,55
Δ i, бч	0,00	0,33	0,68	0,70	0,70	0,70	0,70	0,14	0,05	0,01
, бч	4,0									
θ _{ср} 20 °C	Нагрев							Охлаждение		
t, c	0	1370	2740	4110	5480	6850	8220	8720	9220	9580
, °C	30,0	50,5	51,8	51,9	51,9	51,9	51,9	42,4	34,7	30,0
, бч/ч	0,74	2,38	2,55	2,56	2,56	2,56	2,56	1,53	0,98	0,74
Δ i, бч	0,00	0,31	0,66	0,69	0,69	0,69	0,69	0,18	0,07	0,01
, бч	4,0									
θ _{ср} 25 °C	Нагрев							Охлаждение		
t, c	0	721	1442	2163	2884	3605	4326	4826	5326	5686
, °C	30,0	46,8	50,7	51,6	51,8	51,9	51,9	42,4	34,7	30,0
, бч/ч	1,00	2,55	3,13	3,28	3,32	3,32	3,33	2,02	1,31	1,00
Δ i, бч	0,00	0,15	0,37	0,44	0,46	0,46	0,47	0,23	0,09	0,02
, бч	4,0									

1,6

Охлаждение

[illegible]

Продолжение таблицы Б.1

ϑ_{cp} 15 °C	Нагрев							Охлаждение			
t, c	0	439	878	1317	1756	2195	2634	3134	3634	4134	4734
, °C	30,0	53,4	63,1	67,1	68,7	69,4	69,7	57,0	46,6	38,1	29,9
, бч/ч	0,55	2,13	3,54	4,33	4,70	4,86	4,93	2,57	1,46	0,89	0,54
Δ i, бч	0,00	0,10	0,28	0,41	0,48	0,52	0,53	0,83	0,74	0,09	0,03
, бч	4,0										
ϑ_{cp} 20 °C	Нагрев							Охлаждение			
t, c	0	340	680	1020	1360	1700	2040	2540	3040	3540	4115
, °C	30,0	49,8	59,8	64,8	67,3	68,6	69,2	56,6	46,3	37,8	30,0
, бч/ч	0,74	2,29	3,85	4,95	5,60	5,96	6,15	3,28	1,89	1,18	0,74
Δ i, бч	0,00	0,07	0,22	0,35	0,43	0,48	0,50	0,90	0,91	0,11	0,03
, бч	4,0										

$\theta_{\text{ср}}$ 25 °C	Нагрев							Охлаждение			
t, с	0	358	716	1074	1432	1790	2148	2648	3148	3648	4228
, °C	30,0	50,5	60,5	65,3	67,7	68,8	69,4	56,7	46,4	37,9	30,0
, бч/ч	1,00	3,10	5,12	6,47	7,24	7,63	7,84	4,25	2,49	1,57	1,00
Δi , бч	0,00	0,10	0,31	0,48	0,58	0,64	0,67	0,70	0,33	0,14	0,05
, бч	4,0										

Таблица Б.2

Результаты расчета времени допустимого работы электродвигателя t_d в зависимости от кратности расхода ресурса изоляции погружного электродвигателя k_p и допустимого дополнительного расхода ресурса изоляции $E_{\text{доп}}$.

k_p	1,00	2,02	3,94	7,42
t_d , ч	Едоп			
	∞	7,8	2,7	1,2
t_d , ч	Едоп			
	∞	3,9	1,4	0,6
t_d , ч	Едоп			
	∞	2,6	0,9	0,4

Продолжение таблицы Б.2

t_d , ч	Едоп			
	∞	2,0	0,7	0,3
k_p	1,00	2,02	3,94	7,42
t_d , ч	Едоп			
	∞	1,6	0,5	0,2
t_d , ч	Едоп			
	∞	1,3	0,4	0,2

Приложение В

В.1. Технические характеристики устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей

Таблица В.1

Технические характеристики элементов устройства диагностирования

Поз. обозначение	Наименование	Кол-во, шт.	Примечание
	Микросхемы интегральные		
DA1 – DA3	ACS754KBC-150-PSF	3	150 А
DA4	REF195	1	
DD1	MAX232CPE	1	
DD2	ATmega16	1	
VR1	L7805CV	1	5 В
	Биполярные транзисторы		
VT1, VT2	BC847C	2	100 мА; 45 В
	Диоды, диодные сборки		
VD1	M1C2W10M	1	2 А; 1000 В
VD3, VD4	1N4002	2	1 А; 100 В
LED1, LED2	OSHR5111P	2	100 мА; 5 В
	Резисторы		
R1, R7	RES 0402 470R 5%	2	470 Ом; 0,125 Вт
R2	RES 0402 10R 5%	1	10 Ом; 0,125 Вт
R3 – R6	RES 0402 5K6 5%	4	5,6 кОм; 0,125 Вт
R8	P3329H-10K	1	10 кОм; 0,5 Вт
R9 – R11	RES 0402 10K 5%	3	10 кОм; 0,125 Вт
	Конденсаторы		
C1, C3	CERCAP 0.33/25V 0603	2	0,33 мкФ; 25 В
C2, C4	TECAP 100/20V D 10	2	100 мкФ; 20 В

Продолжение таблицы В.1

Поз. обозначение	Наименование	Кол-во, шт.	Примечание
C5 – C9	CERCAP 0.1/50V 1206	5	0,1 мкФ
C10, C13	TECAP 10/25V C 10	2	10 мкФ; 25 В
C11, C12	CERCAP 0.01/50V 0805	2	0,01 мкФ; 50 В
C14, C15	CERCAP 22/50V 0805	2	22 пФ; 50 В
	Дроссель		
L	RCH114-103KB	1	10 мГн; 0,16 А
	Трансформатор питания		
TR1	DB6628H-01	1	220/16В; 1,87 А; 30 ВА
	Реле электромеханические		
K1, K2	BSC-115C	2	5 В; 72 мА; 5А/240 VAC
	Акустическое устройство		
BR1	HPM14AX	1	12 В; 7 мА; 80 дБ; 4 кГц

	Матрица жидкокристаллическая		
HG1	WH1602A	1	5 В; 100 мА
	Резонатор кварцевый		
XT1	KX-ZTA MT 8.0 MHz	1	8 МГц
	Клавиатура		
KB1	STD34-07	1	
	Разъемы, клеммники		
X1	DJK-01A	1	
X2	DBI-9M	1	
X3	BH-10	1	
X4.1, X4.2	25.161.0253.0 (Wieland)	2	300В; 16 А
X5.1,X5.2,X6	25.161.0353.0 (Wieland)	3	300 В; 16 А

Таблица В.2

Расчет вероятности отказов элементов устройства диагностирования

Наименование элемента	Кол-во, шт.	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, ч ⁻¹	
		одного элемента	группы элементов
Интегральная микросхема	7	0,10	0,70
Биполярный транзистор	2	0,20	0,40
Диод, диодная сборка	5	0,05	0,025
Резистор	10	0,04	0,40
Резистор подстроечный	1	0,43	0,43
Конденсатор	15	0,02	0,30
Дроссель	1	0,12	0,12
Трансформатор питания	1	0,12	0,12
Реле электромеханическое	2	0,50	1,00
Разъем	8	0,4	3,2
Плата печатная	1	0,70	0,70
Точки пайки	226	0,001	0,226
Итого			7,621

Таблица В.3

Основные технические характеристики устройства диагностирования

Наименование	Ед. изм, шт.	Показатель
Количество диагностируемых электродвигателей	шт.	1
Номинальный фазный ток	А	7
Максимальный измеряемый ток	А	150
Номинальное напряжение питания	В	220
Напряжение стабилизированного источника питания	В	5
Количество измерительных преобразователей тока	шт.	3
Дискретность опроса измерительных преобразователей тока	мс	100
Вид индикации	-	дискретная
Вероятность безотказной работы	-	
Габаритные размеры	мм	210×240×80
Масса	кг	2,1
Средний срок службы	лет	14

В.2. Листинг программы main.c

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>
#include "timer.h"
#include "a2d.h"
#include "lcd.h"
#include <avr/sleep.h>

void runge4(double x, double y[], double step); /* Runge-Kutta function */
double f(double x, double y[], int i); /* function for derivatives */

short unsigned int i = 1;
short unsigned int Number = 0;
unsigned char    Dig[10];

```

```

unsigned char    Digd[10];
char            Disp4, Disp5, Disp6, Disp7;
float tOil, curA, curB, curC;
float P1n, P2n, L12, L13, L23, L, C1, C2, C3, Te, B, Tn, Tsr, dPsn, dPmn
unsigned int kta1, kta2, ktb1, ktb2, ktc1, ktc2;
float dTaz, dTbz, dTcz, dT1az, dT1bz, dT1cz;
float disp;
unsigned int curABuffer[30], curBBuffer[30], curCBuffer[30];
unsigned short dToil;
u08 comm;
unsigned char k = 0;

```

```

void initModel() {
    P1n = 376;
    P2n = 110;
    P3 = 180;
    L12 = 28.8;
    L13 = 25;
    L23 = 22.8;
    L = 51.1;
    C1 = 1267.5;
    C2 = 2350;
    C3 = 20025;
    Te = 1136;
    B = 6300;
    Tn = 353;
    Tsr = 25;
    dPsn = 270;
    dPmn = 834;
    Tiz = 0;
}

```

```

void mesure() {
    unsigned int dA, dB, dC;

    //TCNT0 = 130;
    dA = a2dConvert10bit(ADC_CH_ADC0);
    dB = a2dConvert10bit(ADC_CH_ADC1);
    dC = a2dConvert10bit(ADC_CH_ADC2);
    dToil = a2dConvert10bit(ADC_CH_ADC3);

    for (i = 29; i > 0; i--) {
        curABuffer[i] = curABuffer[i - 1];
    }
    curABuffer[0] = dA;
    for (i = 29; i > 0; i--) {
        curBBuffer[i] = curBBuffer[i - 1];
    }
    curBBuffer[0] = dB;
    for (i = 29; i > 0; i--) {
        curCBuffer[i] = curCBuffer[i - 1];
    }
}

```

```

    curCBuffer[0] = dC;
}

void calcTemp() {
    float ka, kb, kc, dTa, dTb, dTc, dT1a, dT1b, dT1c, Tv;
    float PIa, PIb, PIc, Ta, Tb, Tc;
    unsigned int tmin = 1024;
    unsigned int tmax = 0;
    float Rt;

    for (i = 0; i < 30; i++) {
        tmin = MIN(tmin, curABuffer[i]);
        tmax = MAX(tmax, curABuffer[i]);
    }
    curA = (tmax - tmin) * 0.0128495 * (kta2 / kta1);
    for (i = 0; i < 30; i++) {
        tmin = MIN(tmin, curBBuffer[i]);
        tmax = MAX(tmax, curBBuffer[i]);
    }
    curB = (tmax - tmin) * 0.0128495 * (ktb2 / ktb1);
    for (i = 0; i < 30; i++) {
        tmin = MIN(tmin, curCBuffer[i]);
        tmax = MAX(tmax, curCBuffer[i]);
    }
    curC = (tmax - tmin) * 0.0128495 * (ktc2 / ktc1);
    curI = sqrt((curA^2 + curB^2 + curC^2)/3);
    k = curI / In;
    if (k > 2) {
        PORTA = (1 << PIN6);
    } else {
        PORTA = (0 << PIN6);
    }
    d = L12*L23*L+L12*L13*L+L13*L23*L-al*k^2*P1n*(L12*L+L12*L13+L12*L23+L23*L
+L13*L23);
    d1 = L12*k^2*(P1n+P2n)*(L+L13+L23)+k^2*P1n*L23*(L+L13)+k^2*P2n*L13*L23+P3*(
L13*L12+L13*L23+L12*L23);
    Ti = Tiu*(1-exp(-dt/Te))+Tiz*exp(-dt/Te);
    kn = (dPsn + k^2*dPmn)/(dPsn + dPmn);
    kp = exp(B*((1/Tn)-(1/(Ti+Tsr+273))));

    if (kn > 1) {
        PORTA = (1 << PIN6);
    } else {
        PORTA = (0 << PIN6);
    }
    if (kp > 1) {
        PORTA = (1 << PIN6);
    } else {
        PORTA = (0 << PIN6);
    }
    Tiz = Ti;
}

```

```

void main() {
    unsigned char receivedByte;
    unsigned char uartBuffer[20];

    DDRA = (1 << PIN4);
    PORTA = (0 << PIN4);
    initModel();
    timer0Init();
    timer1Init();
    timer2Init();
    timer0SetPrescaler(TIMER_CLK_DIV64);
    timer1SetPrescaler(TIMER_CLK_DIV1024);
    timer2SetPrescaler(TIMER_CLK_DIV64);
    timerAttach(TIMER0OVERFLOW_INT, &measure);
    timerAttach(TIMER1OVERFLOW_INT, &calcTemp);
    TCNT0 = 130;
    TCNT1 = 65000;
    a2dInit();
    a2dSetPrescaler(ADC_PRESCALE_DIV128);
    a2dSetReference(ADC_REFERENCE_AREF);
    // initialize LCD
    /* initialize display, cursor off */
    lcd_init(LCD_DISP_ON);
    // print message on LCD
    lcd_clrscr();
    /* put string to display (line 1) with linefeed */
    lcd_puts(Ti);
    while(1) {
    }
}

```

Таблица В.3.

Результаты экспериментальных исследований превышения температуры обмотки статора погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 при k

Время t, с	Превышение температуры τ , °C			
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение
0	0	0	0	0
60	5,0	5,5	5,3	5,3
120	9,5	9,8	9,7	9,7
180	12,8	14,0	13,5	13,4
240	14,8	15,5	15,4	15,2
300	16,2	16,8	16,6	16,5
420	18,5	19,0	18,7	18,7
540	20,3	20,7	19,8	20,3
660	21,8	22,2	21,0	21,7
780	22,2	24,0	21,8	22,7
900	24,0	24,0	22,4	23,5

1200	24,6	25,3	25,4	25,1
1500	25,7	25,9	25,9	25,8
1800	26,0	26,2	26,3	26,2
2100	26,2	26,8	26,7	26,6
2400	26,3	26,9	26,8	26,7
2700	26,8	26,5	27,0	26,8
3000	27,0	26,9	26,8	26,9

Таблица В.4.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований превышения температуры обмотки статора погружного электродвигателя ПЭДВ 2,8-140 при k

	s	D		P	V%	β
0	0	0	0	0	0	0
5,3	0,25	0,06	0,15	2,76	4,78	-2,5
9,7	0,15	0,02	0,09	0,91	1,58	-0,3
13,4	0,60	0,36	0,35	2,59	4,49	2,5
15,2	0,38	0,14	0,22	1,43	2,49	1,5
16,5	0,31	0,09	0,18	1,07	1,85	0,8
18,7	0,25	0,06	0,15	0,78	1,34	1,2
20,3	0,45	0,20	0,26	1,28	2,22	0,3
21,7	0,61	0,37	0,35	1,63	2,82	0,3
22,7	1,17	1,37	0,68	2,98	5,17	0,3
23,5	0,92	0,85	0,53	2,27	3,94	0,3
25,1	0,44	0,19	0,25	1,00	1,74	1,2
25,8	0,12	0,01	0,07	0,26	0,45	1,3
26,2	0,15	0,02	0,09	0,34	0,58	1,0
26,6	0,32	0,10	0,19	0,70	1,21	1,8
26,7	0,32	0,10	0,19	0,70	1,21	1,4
26,8	0,25	0,06	0,15	0,54	0,94	1,7
26,9	0,10	0,01	0,06	0,21	0,37	1,9

Таблица В.5

Цены на капитальный ремонт скважинных электронасосных агрегатов типа ЭЦВ ЧП Калинишин В.В. (г. Мелитополь) по состоянию на 14.09.2010 г.

Марка насоса	Мощность электродвигателя, кВт	Стоимость ремонта электродвигателя, грн.
ЭЦВ 6-4-130	2,8	954,0
ЭЦВ 6-10-80	4,5	1111,0
ЭЦВ 6-10-110	5,5	1230,0
ЭЦВ 6-10-140	8,0	1284,0
ЭЦВ 8-16-140	11,0	1800,0

ЭЦВ 8-16-180	16,0	1971,0
ЭЦВ 10-63-65	22,0	2694,0
ЭЦВ 10-63-110	32,0	2982,0
ЭЦВ 10-63-150	45,0	3417,0

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ТГАТУ

проф. В.Н. Кюрчев

« 14 » 10 2010 г.

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Каменского МУВХ

С.А. Хорешков

« 14 » 10 2010 г.

АКТ

ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврического государственного агротехнологического университета (ТГАТУ) Овчаров В.В. – проф., д.т.н., Курашкин С.Ф. – соискатель, инженер с одной стороны и представители Каменского межрайонного управления водного хозяйства (МУВХ) главный энергетик Ткаченко А.П., главный инженер Герман А.И., главный бухгалтер Борисенко О.Ф. с другой стороны составили настоящий акт о том, что с 14.06.2010 г. по 20.08.2010 г. в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме «Метод и устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей» на эксплуатационном участке №3 Каменского МУВХ внедрено устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

- монтаж устройства диагностирования;
- настройка параметров устройства диагностирования;
- тестовая эксплуатация устройства диагностирования.

Годовой экономический эффект от внедрения устройства диагностирования составит 206 грн. на двигатель ПЭДВ 2,8-140 в составе погружного насоса ЭЦВ 6-4-130.

Рекомендации по дальнейшему внедрению результатов работы:

1. Довести разработку устройства до стадии производства.
2. Усовершенствовать методику ввода базовых данных и отладку устройства диагностирования, применительно к погружным электродвигателям различных типоразмеров.

Представители ТГАТУ

Руководитель НИР

В.В. Овчаров

Соискатель

С.Ф. Курашкин

Представители Каменского МУВХ

Гл. энергетик

А.П. Ткаченко

Гл. инженер

А.И. Герман

Гл. бухгалтер

О.Ф. Борисенко

УТВЕРЖДАЮ



Ректор ТГАТУ

проф. В.Н. Кюрчев

2010 г.

УТВЕРЖДАЮ



Начальник Генічеського ПУВКХ

Ф.Н. Аникеевич

2010 г.

АКТ

ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврического государственного агротехнологического университета (ТГАТУ) Овчаров В.В. – проф., д.т.н., Курашкин С.Ф. – соискатель, инженер с одной стороны и представитель Генічеського производственного управления водоканализационного хозяйства (ПУВКХ) главный энергетик Удод В.В. с другой стороны составили настоящий акт о том, что с 04.06.2010 г. по 13.06.2010 г. в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме «Метод и устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей» на насосной станции №7 Генічеського ПУВКХ внедрено устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружного электродвигателя.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

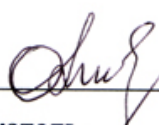
- монтаж устройства диагностирования;
- настройка параметров устройства диагностирования;
- тестовая эксплуатация устройства диагностирования.

Годовой экономический эффект от внедрения устройства диагностирования составит 206 грн. на двигатель ПЭДВ 2,8-140 в составе погружного насоса ЭЦВ 6-10-50.

Рекомендации по дальнейшему внедрению результатов работы:

Представители ТГАТУ

Руководитель НИР

 В.В. Овчаров

Соискатель

 С.Ф. Курашкин

Представитель Генічеського ПУВКХ

Гл. энергетик



В.В. Удод

