

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Электропривода и Автоматизации
Специальность 61101800

Допущен к защите
Зав. кафедрой

« » 20 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Тема Модернизация автоматизированного
электропривода насосной аппаратуры шортенере-
кавивающей станции

Магистрант Светлана - Башапанов Айгерим Бейбиткызы
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации Цыба Юрий Александрович
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент _____
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2017 г.

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Электроэнергетический
Специальность 61071800
Кафедра Электропривода и Автоматизации

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Жаппан Жагерис Байдытқұлы
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Модернизация автоматизированного электропривода насосной станции переперекачивающей станцией
утверждена Ученым советом университета №149 от «23» октября 2015 г.
Срок сдачи законченной диссертации «25» мая 2017 г.

Цель исследования Модернизация автоматизированного электропривода насосной станции переперекачивающей станцией посредством обеспечения соответствующим решением работ на основе разработки системы регулирования на базе беспроводных датчиков с применением пакетно-регулируемого привода

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Анализ трубопроводной системы транспортировки угля, оптимальное решение работы насосов и система управления на насосной станции
2. SimpleGate: операционная ОС сети беспроводных датчиков для насосов
3. Экспериментальное исследование в программах СС3 и Matlab

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Классификация трубопроводов. Схема сооружения магистрального трубопровода
2. Структура автоматизированного диспетчерского пункта
3. Структурная схема операционного управления SimpleGate пункта, схема структурной реализации
4. Видеа структурной схемы векторного управления
5. Скриншоты результатов исследований из программ СС3, Matlab, MathCAD

Рекомендуемая основная литература

1. Мустафини И.А., Мустафини В.И. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосов. Монография - Ашхабат, 2009
2. Salman Ali, Adnan Ashraq. SimpliMote: A Wireless Sensor Network In Real IEEE, Symp. Apr., 2016
3. Анушин А.С., Кожанко В.Ф. Архитектура и программирование DSP-микроматрицеров для управления увлажнением. М.: ИИИ, 2003

ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Анализ составные трубопроводного транспорта нефти. Оптимальные режимы работы насосостановов. Системы управления на скважинной станции	22.12.2015г.	
2. Выбор местной участка 'Кенкиек - Кункиек'	11.01.2016г.	
3. Беспроводная системы управления SimpliMote: операционная система на базе датчиков	10.05.2016г.	
4. Программное обеспечение системы автоматизации ИК ТМС-320 в программе CCS для ПЭ-40	9.10.2016г.	
5. Моделирование электромагнитного машина. Расчет переходных процессов (пуск и торможение в приводе насосов). Оптимизация способностей ЭП, расчет энергетических показателей.	16.04.2016г.	

Дата выдачи задания _____

1 ноября 2015г.

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

(Мустафини И.А.)
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____

(подпись)

(Цооба Ю.А.)
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____

(подпись)

(Бамаганов З.Б.)
(Ф.И.О.)

Аннотация

Диссертационная работа посвящена модернизации автоматизированного электропривода насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций. Модернизация заключается в усовершенствовании системы управления с помощью внедрения сети отслеживающих устройств на базе беспроводных датчиков SimpliMote, устанавливаемых на нефтеперекачивающем трубопроводе.

В диссертации описываются технологические особенности работы нефтеперекачивающих станций и трубопроводов. Предлагается методика отслеживания параметров перекачиваемой жидкости (нефти), такие как давление и температура.

В программе CodeComposer Studio исследуется работа модели двигателя, соответственно обрабатываются полученные данные с помощью вычисления базовых величин при частотном регулировании (выбирается векторное управление). С помощью данной программы получаем графики изменение напряжения, тока, скорости и момента, необходимые для управления двигателем.

Двигатель представляется в виде обобщенной электрической машины, а также проводится анализ переходного процесса пуска обобщенной электрической машины и линеаризации механической характеристики асинхронного двигателя в среде Matlab. С помощью программы MathCAD производится расчет переходного процесса в разомкнутой системе и оценка динамических показателей электропривода. Приводится анализ возможности электропривода по демпфированию упругих колебаний в механической системе.

Аңдатпа

Диссертациялық жұмыс мұнай айдайтын станициялардың сорғы агрегаттардың автоматтандырылған жетегін жаңғыртуға арналған. Жаңғырту мұнай айдау құбыр желісінде орнатылған сымсыз сенсорлар негізінде SimpliMote қадағалау құрылғылар арқылы басқара жүйесін жетілдіру болып табылады.

Диссертацияда мұнай сорғы станциялардың және құбыр желісінің жұмыстын технологиялық ерекшеліктері қарастырылады. Құбыр арқылы айдайтын сұйықтың параметрларын қадағалау методикасы көрсетілді.

CodeComposer Studio бағдарламалық ортада қозғалтқыштың моделінің жұмысы зерттелді. Одан басқа бұл бағдарламада датчиктардан алынған мәліметтер жиілікті реттелу базалық шамаларды есептеу арқылы өңделген. Бағдарлама арқылы қозғалтқышты басқаруға арналған кернеу, ток, жылдамдық және момент өзгеру кестесі табылды.

Қозғалтқыш жалпыланған электр машина түрінде көрсетілген, және Matlab ортада өтпелі үдірес процесі, асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамаларын линеаризациясы талдаған. MathCAD бағдарлама арқылы ашық циклда өтпелі процесі есептеледі және демпфирлеу анализы жүргізіледі.

Annotation

The thesis is devoted to the modernization of the automated electric drive of pump units of oil pumping stations. SimpliMote, installed on an oil pipeline.

The thesis describes technological features of oil pumping stations and pipelines. A technique for monitoring the parameters of a pumped liquid (oil), such as pressure and temperature, is proposed.

The program CodeComposer Studio explores the work of the engine model, respectively, processed data by calculating the base values for frequency control (vector control is selected). With this program: the results of the change, current, speed and torque required to control the motor.

The mechanism in the form of a generalized electric machine, and also the analysis of the transient process is conducted, in which the mathematical characteristic of the induction motor in the Matlab environment is analyzed. With the help of the program, MathCAD calculates the transient in an open system and estimates the dynamic performance of the drive. The possibility of an electric drive for damping elastic vibrations in a mechanical system is analyzed.

Содержание

	Введение.....	8
1	Трубопроводный транспорт нефти как объект автоматизации и основные задачи исследований.....	11
1.1	Классификация нефтепроводов и их свойства. Параметры для поддержания оптимальных режимов работы нефтепровода.....	11
1.2	Анализ средств контроля и системы управления трубопроводом на наземной станции.....	23
1.3	Обоснование и выбор линейного участка «Кенкияк-Кумколь». Реализация и основные этапы исследования.....	36
	Выводы по разделу.....	39
2	Цифровая система автоматического управления на базе датчиков SimpliMote.....	41
2.1	SimpliMote: Операционная система управления сети беспроводных датчиков для нефтепровода.....	41
2.2	Проектирование платформы SimpliMote.....	45
2.3	Сетевые алгоритмы и алгоритмы связи.....	47
2.4	Обработка сигналов для обнаружения утечки. Обнаружение утечки на основе давления.....	56
2.5	Программное обеспечение сигнальных микроконтроллеров TMS320 в интегрированной среде CCS для цифрового управления системы ПЧ-АД.....	59
2.6	Исследование модели асинхронного двигателя в режиме скалярного управления.....	73
	Выводы по разделу.....	82
3	Экспериментальные исследования системы управления магистрального нефтепровода методом регулирования частоты вращения двигателей насосных агрегатов.....	83
3.1	Выбор двигателя с помощью упрощенной нагрузочной диаграммы. Построение уточненной диаграммы. Проверка выбора двигателя.....	83
3.2	Представление двигателя в виде обобщенной электрической машины; Уравнения в координатах.....	87
3.3	Расчет с помощью ЭВМ переходного процесса пуска обобщенной электрической машины и сравнение его с линеаризации механической характеристики выбранного двигателя.....	90
3.4	Выбор необходимого силового преобразователя; построение механических характеристик в разомкнутой системе. Оценка диапазона регулирования скорости	93
3.5	Переходный процесс в разомкнутой системе, оценка динамических показателей электропривода. Анализ возможности электропривода по демпфированию упругих колебаний в механической системе.....	98
3.6	Расчет энергетических показателей.....	101
	Выводы по разделу.....	103

Заключение.....	104
Список использованной литературы.....	105
Приложение А.....	107
Приложение Б.....	108

Введение

В настоящее время сеть магистральных нефтепроводов (МН) в нашей стране интенсивно расширяется. На подходе масштабные проекты, которые еще находятся на стадии разработки. В рамках реализации проекта расширения нефтепровода Казахстан-Китай продолжается строительство первоочередных объектов, необходимых для создания технической возможности поставки западноказахстанской нефти на ПНХЗ. При этом ведется реконструкция главной нефтеперекачивающей станции (ГНПС) Кенкияк, и нефтепровода Кенкияк – Кумколь который, проходит по трем областям Республики Казахстан: Актюбинской, Кызылординской и Карагандинской.

Пропускная способность нефтепровода Кенкияк-Кумколь на начальном этапе составила 10 млн. тонн нефти в год, с возможностью последующего расширения до 20 млн. тонн в год. Согласно прогнозам, только участок Кенкияк-Кумколь за период с 2010 по 2020 год принесет Казахстану доходов на сумму 60 млрд. тенге.

Поэтому дальнейшее развитие проекта «Казахстан-Китай» предполагает:

- для реверсирования и увеличения мощности НП Атырау-Кенкияк до 12 млн.т/год - модернизацию узлов подключения к существующим НПС и строительство 3-х новых промежуточных НПС (НПС Макат, НПС Аман и НПС Копа);

- для увеличения мощности НП Кенкияк-Кумколь до 20 млн.т/год - модернизацию узлов подключения к существующим НПС и строительство 3 промежуточных НПС (НПС Шалкар, НПС №4 и НПС Аральск);

- для увеличения мощности НП Кумколь –Каракоин до 20 млн.т/год - расширение ГНПС Кумколь (2-очередь) и строительство НПС Кызылжар на участке Каракоин-Атасу.

Наиболее существенные затраты при транспортировке нефти приходятся на энергопотребление насосными агрегатами нефтеперекачивающей станции (НПС).

Анализ работы магистральных нефтепроводов показывает, что существующие методы автоматизированного контроля и управления режимами работы магистральных нефтепроводов не в полной мере учитывают постоянные изменения внешних факторов эксплуатации, недостаточно освещены вопросы регулирования при изменении температуры, плотности и давлений перекачиваемых партий нефти. Указанные недостатки ведут к отклонению от оптимальных режимов перекачки и перерасходу электроэнергии.

Поэтому актуальность диссертационной работы заключается в модернизации автоматизированного электропривода насосных агрегатов НПС, и разработке системы управления режимами транспортировки нефти с сетью отслеживающих устройств на базе беспроводных датчиков SimpliMote, устанавливаемых на нефтепроводе, которые позволяют вести контроль над выше названными параметрами с учетом объемов перекачки нефти.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка и исследование системы регулирования обеспечивающей соответствующие режимы транспортирования нефти на базе частотно-регулируемого электропривода НПС в условиях постоянно изменяющихся характеристик перекачиваемой смеси нефтей. При этом для отслеживания за состоянием параметров перекачиваемой нефти предлагается использование беспроводных датчиков «интеллектуальная пыль».

Базовые элементы «умной пыли» - моты (англ. mote пылинка), в итоге будут размером с частицу песка или даже пыли. Каждый мот имеет собственные сенсоры, вычислительный узел, коммуникацию и питание. Группируясь вместе, моты автоматически создают очень гибкие сети с малым потреблением питания. Области их применения могут варьироваться от систем управления климатом до устройств развлечения, взаимодействующих с другими информационными устройствами.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Рассмотрены существующие прототипы периферийных устройств, программных обеспечений и микроконтроллеров для сбора данных при подземных условиях, в коих прокладываются магистральные нефтепроводы.

2. Проведены экспериментальные исследования в интегрированной компьютерной среде разработки Code Composer Studio на базе выбранных датчиков.

3. Предложен метод выбора рациональных режимов работы нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов, с учетом изменения, частоты вращения роторов насосных агрегатов.

4. На основе полученных расчетных данных проведены экспериментальные исследования в среде программирования MatLab с использованием пакета Simulink.

Научная новизна работы заключается в том что:

1. Установлено и обосновано применение беспроводных датчиков операционной системы управления нефтепроводными сетями;

2. Разработана математическая модель работы НПС магистрального нефтепровода с учетом регулирования частоты вращения роторов насосных агрегатов при изменяющихся параметрах смеси нефтей.

3. Применено цифровое управление с использованием нескольких программных обеспечений таких как, CodeComposer Studio, MatLab, MathCAD, SimpliMote verification для более детального и подробного рассмотрения вопроса.

В основу методики проведенных исследований положен системный подход к изучаемому объекту. При решении поставленных задач использован комплексный метод исследований: обобщение и анализ теоретических и экспериментальных трудов в области радиотехники с использованием микропроцессорных средств. Математическое имитационное моделирование, расчеты и анализ полученных результатов проводились с использованием пакета прикладных программ MatLab и CCS.

Практическая ценность работы определяется тем, что она выполнялась, исходя из конкретных потребностей нефтяной отрасли, и направлена на реализацию принципа повышения надежности и более гибкой управляемостью процессом перекачки нефти.

Реализация результатов работы заключается в том, что разработанная в среде Simulink модель может быть использована для анализа технологических режимов, а предлагаемое микропроцессорное устройство применяться на базовых нефтеперекачивающих станциях для улучшения надежности и качества перекачки нефти.

Диссертация состоит из введения, трех разделов, в каждом разделе содержится не менее трех пунктов, освещающих вопросы и методы решений, более 30 графических иллюстраций, приложений, списка литературы и заключения. Диссертационная работа содержит более 100 страниц.

1 Трубопроводный транспорт нефти как объект автоматизации и основные задачи исследований

1.1 Классификация нефтепроводов и их свойства. Параметры для поддержания оптимальных режимов работы нефтепровода

1.1.1 Нефтепроводом называют трубопровод, предназначенный для перекачки нефти и нефтепродуктов (при перекачке нефтепродукта иногда употребляют термин нефтепродуктопровод). В зависимости от вида перекачиваемого нефтепродукта трубопровод называют также бензино-, керосино-, мазутопроводом и т. д.

На сегодняшний день практически весь добываемый газ и нефть (и продукты их переработки) доставляются по магистральным нефтегазопроводам. Это неудивительно, так как трубопроводы обладают массой преимуществ:

- значительные расстояния, на которые можно осуществить транспортировку нефти и газ;
- высокий темп доставки и различная пропускная способность;
- потери на трассе сведены к минимуму, благодаря конструктивным особенностям трубопроводов и их профилактическому обслуживанию;
- высокая степень механизации и автоматизации строительно-монтажных мероприятий при создании трубопроводов;
- комплексное наблюдение и управление за всеми процессами.

Особенно значимой чертой трубопроводов является непрерывная работа круглый год, но существует ряд факторов, который может воспрепятствовать данному качеству трубопровода, а именно:

- изменение величины подачи нефти в результате сезонных и годовых колебаний добычи;
- появление нестационарных процессов в нефтепроводах, связанных с различными технологическими операциями и колебаниями физических параметров перекачиваемой нефти;
- аварийные и ремонтные ситуации.

Все это приводит к изменениям режимов работы станций. В некоторых случаях эти изменения могут привести к аварийной остановке НПС и другим неблагоприятным ситуациям, сопровождаемым большими экономическими потерями.

Поэтому необходимо осуществлять непрерывное согласование работы станций на всех участках транспортировки, а также выполнять защиту оборудования и правильную эксплуатацию нефтепровода.

Трубопровод – сооружение, состоящее из плотно соединенных между собой труб, деталей трубопроводов, запорно-регулирующей аппаратуры, контрольно-измерительных приборов, средств автоматики, опор и подвесок, крепежных деталей, прокладок, материалов и деталей тепловой и

противокоррозионной изоляции и предназначенное для транспортировки сред различного агрегатного состояния, состава и назначения.

Трубопроводы могут выполнять функции транспортировки как газообразных, так жидких и даже твердых сред различной консистенции. Рассмотрим подробнее классификацию и параметры трубопроводов.

1.1.2 По своему назначению трубопроводы делятся на следующие группы:

1. Внутренние (внутрипромысловые) – соединяют различные установки на промыслах, нефтегазоперерабатывающих заводах и газонефтехранилищах (рисунок 1.1). Режим работы определяется регламентом работы промысла или завода.



Рисунок 1.1 – Внутрипромысловые трубопроводы

2. Местные – по сравнению с внутренними трубопроводами имеют большую протяженность и соединяют нефтегазопромыслы (межпромысловые) или нефтегазоперерабатывающие заводы с головной станцией магистрального трубопровода (рисунок 1.2). Режим работы определяется регламентом поставок нефтегазопродуктов.



Рисунок 1.2 – Межпромысловые трубопроводы

3. Магистральные – характеризуются большой протяженностью, высокой пропускной способностью и соединяют поставщика нефтегазопродуктов с потребителем (рисунок 1.3). В связи с большой протяженностью перекачка ведется не одной, а несколькими станциями, расположенными по трассе. Режим работы магистральных трубопроводов – непрерывный (кратковременные остановки носят случайный характер или связаны с ремонтно-восстановительными работами).



Рисунок 1.3 – Надземный магистральный трубопровод

4. Технологические – характеризуются малой протяженностью и служат для обеспечения работоспособности в заданных режимах технологических установок перекачивающих станций магистральных трубопроводов, газонефтехранилищ и нефтебаз. По ним транспортируют различные вещества, в том числе сырье, полуфабрикаты, промежуточные и конечные продукты, отходы производства, необходимые для ведения технологического процесса или эксплуатации оборудования (рисунок 1.4). Режим работы определяется технологическим регламентом оборудования.



Рисунок 1.4 – Технологические трубопроводы КС

В состав системы технологических трубопроводов входят внутриплощадочные нефтепроводы, запорная, регулирующая и предохранительная арматура, фильтры-грязеуловители, система сглаживания волн давления и другие устройства. Границы технологических трубопроводов определяются входными и выходными задвижками НПС.

1.1.3 Кроме того, трубопроводы можно классифицировать по следующим признакам:

1. По роду транспортируемого вещества на нефтепроводы, нефтепродуктопроводы, газопроводы, конденсатопроводы, паропроводы, водопроводы, маслопроводы, бензопроводы, кислотопроводы, щелочепроводы, углепроводы, а также специального назначения (трубопроводы густого и жидкого смазочного материала, вакуумпроводы) и другие.

2. По материалу на металлические (рисунок 1.5), неметаллические и футерованные.

К металлическим относят стальные (изготовленные из углеродистой, легированной и высоко легированной стали), из цветных металлов и их сплавов (медные, латунные, титановые, свинцовые, алюминиевые), чугунные, биметаллические.

К неметаллическим относят полиэтиленовые (полипропиленовые, поливинилхлоридные), винилпластовые, стеклянные и фторопластовые.

К футерованным относят трубопроводы с поверхностями, покрытыми резиной, полиэтиленом, фторопластом, обетонированные (рисунок 1.6) и эмалированные.

3. По температуре транспортируемого вещества на холодные (температура ниже 0 °С), нормальные (от 1° до 45 °С) и горячие (от 46°С и выше).

4. По степени агрессивности транспортируемого вещества на трубопроводы для неагрессивных, мало-, средне- и высоко агрессивных сред.



Рисунок 1.5 – Металлические трубы



Рисунок 1.6 – Трубопровод с бетонным покрытием

Стойкость металла в коррозионных средах оценивают скоростью проникновения коррозии – глубиной коррозионного разрушения металла в единицу времени (мм/год). К неагрессивной и мало агрессивной средам относят вещества, вызывающие коррозию стенки трубы, скорость которой менее 0,1 мм/год, средне агрессивной – в пределах от 0,1 до 0,5 мм/год и агрессивной – более 0,5 мм/год.

Для трубопроводов, транспортирующих неагрессивные и мало агрессивные вещества, обычно применяют трубы из углеродистой стали; транспортирующих средне агрессивные вещества из углеродистой стали с повышенной толщиной стенки (с учетом прибавки на коррозию), из легированной стали, неметаллических материалов, футерованные; транспортирующих высоко агрессивные вещества – только из высоко легированных сталей, биметаллические, из цветных металлов, неметаллические и футерованные.

5. По гидравлической схеме:

- а) простые, то есть, не имеющие ответвлений;
- б) сложные, то есть, имеющие ответвления или переменный по длине расход, или вставку другого диаметра, или параллельный участок.

6. По характеру заполнения сечения:

- а) трубопроводы с полным заполнением сечения трубы жидкостью;
- б) трубопроводы с неполным заполнением сечения.

Полное заполнение сечения трубы жидкостью обычно бывает в напорных трубопроводах, а неполное может быть как в напорных, так и в безнапорных трубопроводах. С полным заполнением сечения жидкостью чаще бывают нефтепроводы, транспортирующие товарную нефть, то есть без газа, и реже – выкидные линии. Нефтеборные коллекторы обычно работают с неполным заполнением сечения трубы нефтью, так как верхняя часть сечения коллектора занята газом, выделившимся в процессе движения нефти.

7. По типу укладки:

- а) подземные;
- б) наземные;

- в) надземные;
- г) подвесные;
- д) подводные.

8. Технологические трубопроводы делят:

1. По величине напора:

- а) высоконапорные – выше 2,5 МПа;
- б) средненапорные – 1,6...2,5 МПа;
- в) низконапорные – до 1,6 МПа;
- г) безнапорные (самотечные).

Самотечным называется трубопровод, перемещение жидкости в котором происходит только за счет сил тяжести. Если при этом нефть и газ движутся отдельно, то такой нефтепровод называют свободносамотечным, а при отсутствии газовой фазы – напорно-самотечным.

9. По месторасположению на внутрицеховые и межцеховые.

Внутрицеховые соединяют отдельные аппараты и машины в пределах одной технической установки и размещаются внутри здания или на открытой площадке, имеют сложную конфигурацию с большим количеством деталей, арматуры и сварочных соединений. По конструктивным особенностям могут быть обвязочные (около 70 % общего объема внутрицеховых) и распределительные. Межцеховые соединяют отдельные технологические установки, аппараты и емкости, находящиеся в разных цехах, характеризуются довольно длинными прямыми участками (длиной до нескольких сотен метров) со сравнительно небольшим количеством деталей, арматуры и сварных соединений.

1.1.4 Состав сооружений магистральных нефтепроводов. В состав магистральных нефтепроводов входят: линейные сооружения, головные и промежуточные перекачивающие насосные станции и конечный пункт (наливные станции и морские терминалы, перерабатывающие заводы).

Схема сооружений магистрального нефтепровода (рисунок 1.7) содержит: 1 – промысел; 2 – нефтесборный пункт; 3 – подводящие трубопроводы; 4 – головные сооружения (резервуары, насосная, электростанция и др.); 5 – узел пуска скребка; 6 – линейный колодец; 7 – переход под железной дорогой; 8 – подводный переход через реку; 9 – наземный переход через овраг (ручей); 10 – конечный распределительный пункт.

Состав магистрального нефтепровода несколько отличается от состава магистрального газопровода. Нефть из скважин по индивидуальным нефтепроводам поступает на нефтесборные пункты, а оттуда по нефтесборным трубопроводам на головные сооружения – установку комплексной подготовки нефти (УКПН), на которых она отстаивается, обезвоживается, отделяется от нефтяного газа и т. д. Отсюда нефть подается на головную насосную станцию (ГНС), а затем в магистральный нефтепровод. Промежуточными насосными станциями (ПНС) нефть перекачивается до

конечной насосной станции (КНС), а затем потребителю. Перекачиваемую нефть замеряют на УКПН и насосных станциях (НС).

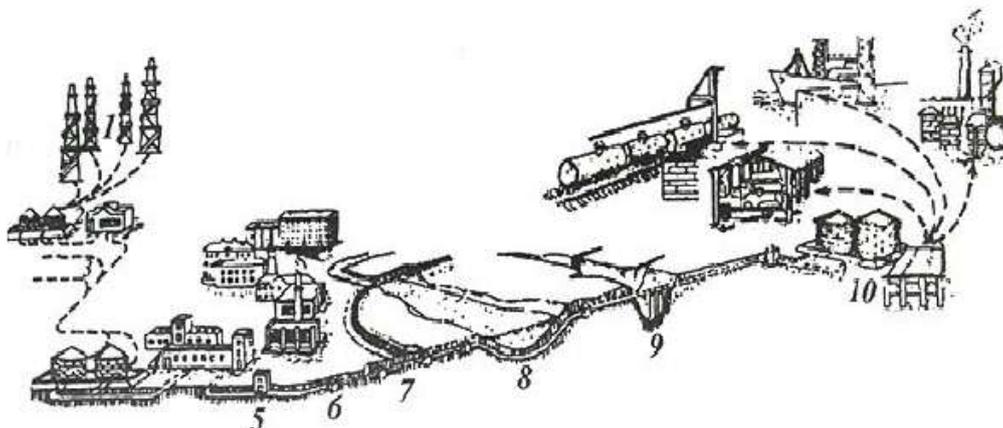


Рисунок 1.7 - Схема сооружений магистрального нефтепровода:

Линейные сооружения согласно СНиП 2.05.06-85* включают:

а) трубопровод (от места выхода с промысла подготовленной к дальнему транспорту товарной нефти) с ответвлениями и лупингами, запорной и регулирующей арматурой, переходами через естественные и искусственные препятствия, узлами подключения нефтеперекачивающих станций, узлами пуска и приема очистных и диагностических устройств и разделителей при последовательной перекачке, узлами автоматического перекрытия трубопроводов (УАПТ);

б) установки электрохимической защиты трубопроводов от коррозии, линии и сооружения технологической связи, средства телемеханики трубопровода;

в) линии электропередачи, предназначенные для обслуживания трубопроводов, и устройства электроснабжения и дистанционного управления запорной арматурой, питания вспомогательных систем и станций катодной защиты;

г) противопожарные средства, противозэрозийные и защитные сооружения трубопровода;

д) емкости для хранения и разгазирования конденсата, пункты подогрева нефти, земляные амбары для аварийного выпуска нефти, здания и сооружения линейной службы эксплуатации трубопроводов (АВП, дома обходчиков, блокпосты);

е) вдольтрассовые проезды и переезды через нефтепроводы, постоянные дороги и вертолетные площадки, расположенные вдоль трассы трубопровода, и подъезды к ним;

ж) опознавательные и сигнальные знаки местонахождения трубопровода и пересечений нефтепроводами судоходных рек; указатели и предупредительные знаки.

Схема состава магистрального нефтепровода приведена на рисунке 1.8.

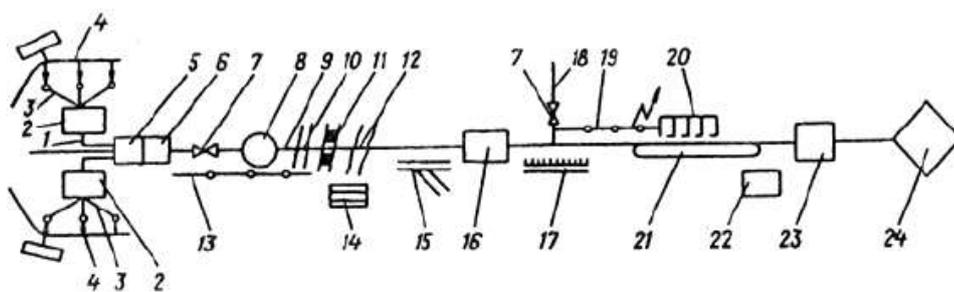


Рисунок 1.8 – Состав магистрального нефтепровода

На рисунке 1.8 обозначено: 1 – нефтесборные промысловые трубопроводы; 2 – нефтесборный пункт; 3 – нефтяная скважина с нефтепроводом от ее устья до нефтесборного пункта; 4 – нефтепроводы с насосными законтурного или внутриконтурного заводнения; 5 – головные сооружения с резервуарным парком; 6 – ГНС; 7 – запорная арматура (отключающая задвижка) в колодце; 8 – камера приема и пуска средств очистки и диагностики; 9 – магистральный нефтепровод; 10 – переход через малую естественную (или искусственную) преграду; 11 – переход через железную (или шоссейную) дорогу; 12 – переход через крупную водную преграду; 13 – линия технологической связи; 14 – аварийный запас труб; 15 – вдольтрассовая эксплуатационная дорога и подъезд к ней; 16 – ПНС с резервуарным парком; 17 – защитное сооружение; 18 – отвод к промежуточному потребителю; 19 – линия электропередачи; 20 – система электрохимической защиты; 21 – лупинг; 22 – вертолетная площадка; 23 – КНС с резервуаром; 24 – потребитель.

Как правило, магистральные трубопроводы заглубляют в грунт обычно на глубину 0,8 м до верхней образующей трубы, если большая или меньшая глубина заложения не диктуется особыми геологическими условиями или необходимостью поддержания температуры перекачиваемого продукта на определенном уровне (например, для исключения возможности замерзания скопившейся воды).

Для магистральных трубопроводов применяют цельнотянутые или сварные трубы диаметром до 1220 мм (для магистральных газопроводов – до 1420 мм). Толщина стенок труб определяется проектным давлением в трубопроводе, которое может достигать 10 МПа.

Трубопровод, прокладываемый по районам с вечномерзлыми грунтами или через болота, можно укладывать на опоры или в искусственные насыпи. На линейной части для переключения и отключения участков трубопровода в процессе эксплуатации и в случае аварии или ремонта устанавливают линейную запорную арматуру.

Размещение запорной арматуры зависит от технологической схемы трубопровода, сложности трассы, но расстояние между арматурой не должно превышать 30 км (обычно линейные задвижки размещают с интервалом

10...30 км в зависимости от рельефа трассы). Запорная арматура диаметром 400 мм и более устанавливается на фундаментные плиты.

Вдоль трассы проходит линия связи (телефонная, радиорелейная), которая в основном имеет диспетчерское назначение, а также для оперативно-производственной связи и связи линейных обходчиков трубопровода. Ее можно использовать для передачи сигналов телеизмерения и телеуправления. Диспетчерская связь должна действовать круглосуточно и все время находиться в распоряжении диспетчера.

Связь обходчиков – линейно-путевая с избирательным вызовом – обеспечивает обходчику возможность связываться с любого пункта трассы трубопровода с оператором перекачивающей станции и с диспетчером районного управления.

Располагаемые вдоль трассы станции катодной и электродренажной защиты, а также протекторы защищают трубопровод от наружной коррозии, являясь дополнением к противокоррозионному изоляционному покрытию трубопровода.

За начальный пункт линейной части магистрального трубопровода принимается выходная задвижка головной перекачивающей станции, а за конечный пункт – входная задвижка сырьевого парка нефтеперерабатывающего завода, нефтебазы или наливной эстакады.

Нефтеперекачивающие станции (НПС) располагаются на нефтепроводах с интервалом 70...150 км. Перекачивающие (насосные) станции нефтепроводов и нефтепродуктопроводов оборудуются, как правило, центробежными насосами с электроприводом.

В начале нефтепровода находится головная нефтеперекачивающая станция (ГНПС), которая располагается вблизи нефтяного промысла или в конце подводящих трубопроводов, если магистральный нефтепровод обслуживают несколько промыслов или один промысел, разбросанный на большой территории. ГНПС отличается от промежуточных наличием резервуарного парка объемом, равным двух-, трехсуточной пропускной способности нефтепровод.

Кроме основных объектов, на каждой насосной станции имеется комплекс вспомогательных сооружений: трансформаторная подстанция, снижающая подаваемое по линии электропередач (ЛЭП) напряжения от 110 или 35 до 6 кВ, котельная, а также системы водоснабжения, канализации, охлаждения и т. д. Если длина нефтепровода превышает 800 км, его разбивают на эксплуатационные участки длиной 100...300 км, в пределах которых возможна независимая работа насосного оборудования.

Промежуточные насосные станции на границах участков должны располагать резервуарным парком объемом, равным 0,3...1,5 суточной пропускной способности трубопровода. Как головная, так и промежуточные насосные станции с резервуарными парками оборудуются подпорными насосами. Аналогично устройство насосных станций магистральных нефтепродуктопроводов.

Тепловые станции устанавливают на трубопроводах, транспортирующих высокозастывающие и высоковязкие нефти и нефтепродукты; иногда их совмещают с насосными станциями. Для подогрева перекачиваемого продукта применяют паровые или огневые подогреватели (печи подогрева). Для снижения тепловых потерь такие трубопроводы могут быть снабжены теплоизоляционным покрытием.

По трассе нефтепровода могут сооружаться наливные пункты для перевалки и налива нефти в железнодорожные или автомобильные цистерны.

Конечный пункт нефтепровода – это либо сырьевой парк нефтеперерабатывающего завода, либо перевалочная нефтебаза, обычно морская, откуда нефть танкерами перевозится к нефтеперерабатывающим заводам или экспортируется за границу.

Эксплуатационное обслуживание линейной части магистрального трубопровода возлагается на перекачивающую станцию.

При наличии на магистральном трубопроводе нескольких перекачивающих станций трубопровод разделяется на участки, расположенные между этими станциями. Границы участков оформляются приказом с указанием станций, к которым они прикреплены.

При отсутствии перекачивающих станций на трубопроводе организуется ремонтно-восстановительный пункт (РВП).

Магистральный нефтепровод входит в состав районного нефтепроводного управления или, в зависимости от протяженности, в состав нескольких районных управлений. Нефтепроводные управления, как правило, имеют службы: диспетчерскую, операторов насосных установок, энергоснабжения, водоснабжения, теплоснабжения, ремонтно-восстановительную, контрольно-измерительных приборов и автоматики, электрической защиты трубопровода от коррозии, связи, эксплуатации переходов трубопроводов через водные преграды, лаборатории и автотранспортный парк.

1.1.5 Подземные хранилища нефти и газа. Согласно СНиП 34-02-99 в состав подземных хранилищ входят:

1. Подземные сооружения, включающие подземные резервуары, вскрывающие и вспомогательные горные выработки, буровые скважины и подземные расслохранилища;

2. Наземные сооружения, включающие здания и сооружения, внутриплощадочные сети, наземные расслохранилища.

В качестве подземных резервуаров используются горные выработки (выработки-емкости), оборудованные для приема, хранения и выдачи продукта. Наряду со специально сооружаемыми выработками допускается использовать выработки, образовавшиеся при добыче полезного ископаемого, после проведения их специального обследования и обустройства.

При размещении подземного хранилища на границе предприятия по добыче полезного ископаемого следует предусматривать барьерные целики, обеспечивающие прочность и герметичность подземных и наземных

сооружений хранилища. Размеры барьерных целиков следует определять расчетом в соответствии с требованиями СНиП 2.01.09.

Здания и наземные сооружения (наземные резервуары и оборудование, железнодорожные и сливноналивные эстакады, причалы и пирсы, расфасовочные и раздаточные пункты, насосные и компрессорные станции, объекты осушки и очистки газа, административно-хозяйственные здания и помещения и др.). Инженерные системы (противопожарный водопровод, факелы и свечи, установки пожаротушения, системы обнаружения и тушения пожаров, канализации, электроснабжения, связи, сигнализации и др.), а также благоустройство территории хранилищ (дорог, подъездов, проездов и др.) следует проектировать в соответствии с действующими нормативными документами, утвержденными в установленном порядке.

При проектировании мероприятий по противопожарной безопасности и при строительстве объектов необходимо руководствоваться противопожарными требованиями всех действующих норм и правил, относящихся к объекту и утвержденных в установленном порядке.

Запорная арматура, устанавливаемая на трубопроводах, должна автоматически отключать отдельные звенья технологического комплекса в случае утечки продукта или понижения давления в трубопроводах.

Крепь вскрывающих выработок и герметичные переключки шахтных резервуаров должны отвечать требованиям по показателям пожарной опасности.

1.1.6 Нагрузки и воздействия. Напряженно-деформированное состояние породного массива, цементного камня, обсадной колонны и крепи выработок следует определять от действия постоянных и временных (длительных, кратковременных, особых) нагрузок.

К постоянным нагрузкам следует относить:

- а) горное давление;
- б) собственный вес конструкций;
- в) давление подземных вод;
- г) воздействие, вызываемое предварительным напряжением элементов крепи.

К длительным нагрузкам следует относить:

- а) давление газа, жидкости в резервуаре;
- б) температурные воздействия.

К кратковременным нагрузкам следует относить:

- а) нагрузки от технологического оборудования;
- б) давление тампонажного раствора, нагнетаемого за крепь.

К особым нагрузкам следует относить:

- а) сейсмические воздействия;
- б) взрывные воздействия.

Расчетное значение нагрузки следует определять как произведение ее нормативного значения на коэффициенты надежности по нагрузке.

При оценке прочности обсадных колонн значения коэффициента надежности принимают по нормам проектирования обсадных колонн.

При определении расчетных нагрузок в расчете выработки-емкости на устойчивость следует учитывать коэффициент надежности по нагрузке.

Коэффициент надежности по ответственности принимается равным единице по ГОСТ 27751.

Величину горного давления следует устанавливать с учетом данных инженерно-геологических изысканий на площадке.

При отсутствии тектонических напряжений в породном массиве горное давление для незакрепленных выработок допускается определять по весу вышележащих пород.

Для закрепленных выработок величину горного давления следует определять в соответствии со СНиП 2.06.09.

Расчет устойчивости подземных выработок-емкостей следует выполнять при наиболее неблагоприятных сочетаниях нагрузок в соответствии с классификацией сочетаний нагрузок и коэффициентами сочетаний, приведенными в СНиП 2.01.07.

1.1.7 Эксплуатационные требования. Подземные и наземные сооружения, оборудование основного и вспомогательного назначения, внутриплощадочные инженерные сети и коммуникации должны обеспечивать надежное и безопасное выполнение технологических операций по приему, хранению и выдаче продуктов в соответствии с заданными режимами эксплуатации.

Подземные резервуары, входящие в состав хранилища, должны быть герметичными, а их выработки-емкости – устойчивыми на весь период эксплуатации.

Сроки хранения товарных нефтепродуктов в подземных резервуарах определяются типом подземных резервуаров и сохранностью товарных качеств топлив определенного вида.

Подземные хранилища должны быть оборудованы централизованными системами контроля и управления технологическими процессами эксплуатации.

Система контроля подземных резервуаров всех типов должна предусматривать измерение следующих эксплуатационных параметров:

- количества поступающего и выдаваемого продукта;
- давления и температуры в линии закачки – отбора продукта;
- качества продукта.

Дополнительно в бесшахтных резервуарах должен осуществляться контроль следующих параметров:

- устьевого давления и температуры продукта;
- давления, температуры, расхода, плотности и химсостава рассола в линии закачки – отбора;
- уровня границы раздела фаз в выработке-емкости;
- формы и размеров выработки-емкости.

Дополнительно в шахтных резервуарах должен осуществляться контроль следующих параметров:

- давления и температуры продукта в резервуаре;
- уровня продукта;
- уровня границы раздела «продукт–вода» и давления в герметичных перемычках (в породах с положительной температурой);
- температуры вмещающих пород, герметичных перемычек и закрепного пространства эксплуатационных скважин и шурфов (в вечномерзлых породах).

1.2 Анализ средств контроля и системы управления трубопроводом на наземной станции

1.2.1 Автоматизация технологических процессов. Характеристика магистрального нефтепровода как объекта автоматизации. Магистральный нефтепровод является весьма удобным объектом для автоматизации, что определяется простотой основного технологического процесса, заключающегося в непрерывной перекачке заданного объема нефти по нефтепроводу с поддержанием в допустимых пределах давлений на нагнетании и всасывании в зависимости от установленного режима при минимальном суммарном расходе энергии на перекачку.

Режим работы магистрального нефтепровода определяется режимом работы перекачивающих станций: «через емкость», «с подключенной емкостью» и «без емкости».

При режиме «через емкость» поступающая на станцию нефть подается в один или несколько резервуаров станции, а закачиваемая в трубопровод нефть забирается в это же время подпорной насосной из другого резервуара или группы резервуаров. Этот режим применяется обычно на головных станциях, где отсутствуют средства измерения объема, массы и качества нефти, вследствие чего количество и качество поступающей и откачиваемой нефти определяются по измерениям в резервуарах.

При режиме «с подключенной емкостью» основной поток нефти, поступающей из трубопровода на прием станции, подается непосредственно на всасывание подпорной насосной, а в резервуары или из них поступает только количество нефти, равное разности между потоками до и после станции.

При режиме «без емкости» («из насоса в насос») весь поток из трубопровода на приеме станции поступает на всасывание основной магистральной насосной. На станции не сооружаются ни резервуары, ни подпорная насосная.

Трубопроводная обвязка предельно упрощается. Этот режим применяется на промежуточных станциях, где не требуется иметь емкость для приема нефти от потребителя при аварийных ситуациях на магистральном трубопроводе или на этой станции.

Недостатком режима «из насоса в насос» является снижение пропускной способности магистрального нефтепровода на участке перед станцией, работающей на этом режиме, по сравнению с работой при наличии емкости, т.к. на всасывании основной насосной нельзя снижать давления ниже минимально допустимого по условиям кавитации насосных агрегатов. Снижение пропускной способности нефтепроводов больших диаметров при этом доходит до 10 процентов по сравнению с работой станций на режиме «через емкость» или «с подключенной емкостью».

Для обеспечения максимальной пропускной способности трубопровода при минимальном объеме емкостей на промежуточной станции могут применяться технологические схемы, обеспечивающие ее работу как в режиме «из насоса в насос», так и «с подключенной емкостью», с автоматическим переключением с одного режима на другой в зависимости от заполнения емкости.

Перекачивающие насосные станции обеспечивают движение нефти по трубопроводу. Число перекачивающих станций (НПС) и расстояние между ними определяются расчетным путем.

В перекачивающих насосных обычно устанавливают 3-4 однотипных магистральных насосных агрегата, один из которых является резервным. Каждый агрегат состоит из центробежного насоса с приводом от высоковольтного электродвигателя.[8]

1.2.2 Система общестанционной автоматики. В соответствии с технологическими требованиями для оборудования МН задаются допустимые значения контролируемых параметров. При выходе параметра за допустимые пределы может наступить аварийная ситуация. В этом случае система автоматической защиты должна обеспечить:

- отключение работающих магистральных насосных агрегатов;
- включение вспомогательных систем, предназначенных для ликвидации повреждения и предупреждения развития аварийной ситуации;
- технологические переключения, имеющие целью сохранить подачи по трубопроводу при аварийной ситуации.

Защитное отключение насосных агрегатов может осуществляться по разным вариантам. Можно отключить одновременно все работающие агрегаты на НПС. Однако в этом случае на приеме НПС резко возрастает давление, это нарастание передается на предыдущую станцию и может нарушить режим работы всего нефтепровода. Можно отключить все агрегаты не одновременно, а последовательно, друг за другом через 20 – 30 секунд. В этом случае давление на приеме будет нарастать медленно и не приведет к неприятным последствиям на других станциях.

Основой безопасной работы нефтепровода является контроль давления. Контроль давления выполняется во всех точках технологической схемы, где возможно возникновение давления, опасного для самого магистрально нефтепровода или его оборудования. Точки измерения давления для

наблюдения за ходом процесса и автоматической защиты, как правило, совпадают между собой. Так, для предотвращения давления в самом МН

выше рабочего определенного по эпюре максимального давления, давление всегда контролируется на выходе насосной.

В логической схеме защита по давлению непрерывно осуществляется контроль всех трех давлений: на приеме, в коллекторе и в трубопроводе. При достижении предельного значения происходит определение номера работающего агрегата, который является первым по ходу нефти, а затем его отключение. При достижении аварийного давления все агрегаты отключаются одновременно. Если отклонение давления происходит на приеме, то включается выдержка времени в пределах 8–10 секунд, после которой вновь проверяется наличие отклонения от допустимых значений, и теперь уже отключаются агрегаты.[9]

1.2.3 Система автоматизации линейного участка. Система автоматизации (СА) линейной части магистрального нефтепровода предназначена для дистанционного контроля и управления линейными задвижками, СКЗ и обеспечивает:

- безопасную эксплуатацию линейной части магистрального нефтепровода и его оборудования;
- обнаружение аварийных ситуаций и создание условий для быстрой ее ликвидации;
- оперативную диагностику КИПиА;
- улучшение и облегчение условий работы обслуживающего персонала, снижение эксплуатационных расходов;
- своевременное представление технологической информации оператору о состоянии оборудования в удобном для анализа виде;
- повышение качества дистанционного управления объектами линейной части МН;
- повышение надежности работы нефтепровода и предотвращение аварийных ситуаций;
- сокращение времени и объема обслуживания, а также ремонта объектов линейной части МН.

Цель создания СА:

- дистанционное и местное управление электроприводными кранами с контролем их положения и состояния;
- контроль давления и температуры нефти по магистральному нефтепроводу;
- контроль прохождения очистного устройства по объектам ЛЧ;
- сигнализация затопления колодцев КИП на линейных крановых узлах;
- сигнализация несанкционированного доступа на объекты;
- контроль параметров СКЗ;
- управление потенциалом СКЗ;
- снижение потерь нефти за счет своевременного обнаружения утечек в

нефтепроводе на 1%;

- прием и передача информации по каналу связи Ethernet.

Ограничения на создание системы являются требованиями, предъявляемые к выполняемым функциям и задачам по:

- надежности;
- безопасности;
- эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и хранению компонентов системы;
- защите информации от несанкционированного доступа;
- сохранности информации при обрыве основного канала связи;
- защите от влияния внешних воздействий.

Данные ограничения существенно влияют на капитальные вложения и сроки окупаемости системы.

Основные принципы построения СА:

- безопасность;
- открытость;
- масштабируемость;
- распределенность;
- многоуровневость.

СА линейной части нефтепровода решает задачи:

- оперативного диспетчерского контроля состояния объектов линейной части нефтепровода;
- дистанционного управления крановыми узлами линейной части нефтепровода из местного диспетчерского пункта НПС МН;
- автоматического управления защитным потенциалом СКЗ;
- автоматическую защиту нефтепровода при превышении предельных давлений и температур нефти.

СА позволяет повысить эффективность транспортировки за счет:

- повышения технологической дисциплины путем увеличения степени информированности персонала и достоверности данных о состоянии объектов линейной части МН;
- получения достоверной информации о состоянии задвижек, СКЗ и ЛКП;
- снижения трудоёмкости управления технологическими процессами;
- повышения безопасности производства, улучшения экологической обстановки.

Информационно-управляющими функциями СА магистральным нефтепроводом являются:

- оперативный контроль состояния задвижек, СКЗ и ЛКП а также контроль давления и температуры нефти по нефтепроводу;
- оперативное архивирование текущих контролируемых параметров, действий оператора, информационных сообщений и возникающих технологических событий;
- оперативно-диспетчерское управление задвижками, УППОУ и СКЗ;

- сбор, первичная обработка, хранение и передача информации на верхний уровень управления.

1.2.4. Системы автоматизации промежуточной нефтеперекачивающей станции, линейного участка и насосных агрегатов. Из РП поток нефти поступает в магистральную НПС, имеющую, как правило, четыре насосных агрегата (НА) (три – рабочих, один – резервуарный), которые работают в основном по схеме «из насоса в насос» (последовательное включение).

Структурная схема нефтеперекачивающей станции представлена на рисунке 1.9, где ЭД - электродвигатели; НА - насосные агрегаты; ДЗ – дросселирующая заслонка. Схема подключения, показанная на рисунке 1.9, позволяет дискретно изменять давление в коллекторе станции путем включения/отключения НА. Давление на выходе НПС представляет собой сумму давлений создаваемых каждым агрегатом.

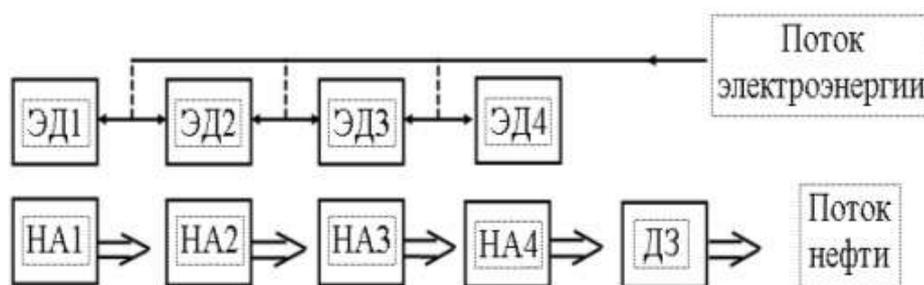


Рисунок 1.9 – Структурная схема нефтеперекачивающей станции

Для непрерывного изменения выходного давления используется дросселирующая заслонка, которая плавно перекрывает сечение трубопровода, изменяя его эффективный диаметр и увеличивая сопротивление потоку нефти. Уменьшение сечения нефтепровода с помощью дросселирующей заслонки приводит к уменьшению давления на выходе НПС и его увеличению на входе. Дросселирующая заслонка является исполнительным механизмом САР давления. САР изменяет положение ДЗ в зависимости от значений установки и давлений на входе, выходе НПС и реализует ПИД – закон регулирования.

Работа НПС возможна только при исправном состоянии, как основного, так и вспомогательного оборудования. Отказ хотя бы одной из них приводит к отключению всей станции.

Управляющими параметрами технологического оборудования НПС являются сигналы на включение/отключение НА; управление положением дросселирующей заслонки (или на смену установки регулятору); на переключение задвижек и т.д. Ограничениями здесь являются: предельные значения давлений на входе, в коллекторе и на выходе НПС; допустимые сочетания включенного оборудования и значения установки регулятора; производительность НА.

В качестве критерия используют минимум затрат электроэнергии на реализацию заданного режима.

После дросселирующей заслонки поток нефти направляется в линейный участок, представляющий собой трубу с секущими задвижками, которые меняют конфигурацию трубы в зависимости от используемого технологического режима в соответствии с рисунком 1.10, где \times - секущая задвижка; СКЗ – станция катодной защиты.

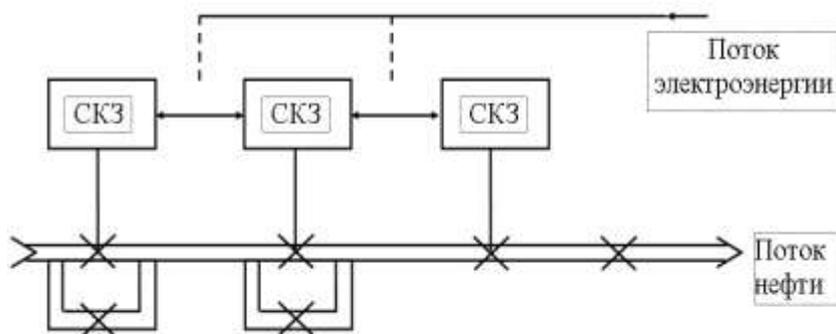


Рисунок 1.10 – Схема линейного участка

Управляющими параметрами здесь являются сигналы: на переключение секущих задвижек, а в качестве ограничения выступают недопустимые сочетания включения/выключения секущих задвижек.

Критерием оценки качества работы линейного участка служит минимум гидравлического сопротивления.[13]

Система автоматизации НА должна обеспечивать выполнение правильной последовательности включения отдельных узлов магистрального насосного агрегата (МНА), а именно, задвижек, электродвигателя вспомогательных систем, средств защиты, а также соблюдения условий, требующихся при пуске этих узлов. Во время работы агрегата система автоматизации должна контролировать исправность агрегата и обеспечивающих его систем. При неисправности каких-либо узлов агрегата должно осуществляться защитное отключение агрегата с соблюдением последовательности операций по остановке агрегата.

В состав каждого МНА входят электроуправляемые задвижки, обеспечивающие перекрытие потоков к насосу. Управление приводом задвижек осуществляется системой автоматики.

На практике бывают случаи, когда работающие МНА по какой-либо причине отключаются системой автоматики. Очевидно, что отключение работающего агрегата приведет к снижению подачи по всему нефтепроводу и изменению режима работы всех НПС. Можно сохранить существовавшие в трубопроводе до отключения неисправного агрегата режим, если в замене него на этой станции включить другой агрегат, не находящийся в работе. Поэтому для сохранения режима работы трубопровода на каждой НПС один

МНА должен всегда находиться в полной готовности к пуску, чтобы резервировать один из работающих агрегатов. Поэтому большое значение приобретает время, за которое может быть произведен запуск резервного агрегата, которое зависит от интервала между командой на отключение неисправного агрегата и командой на включение резервного агрегата и от продолжительности процесса полного пуска МНА. Это время может быть сведено к минимальному за счет использования системы автоматизации.

В процессе работы агрегата непрерывно контролируется:

- давление масла, подаваемого к подшипникам;
- давление охлаждающей воды в обоих подводящих трубопроводах;
- температура подшипников насоса и электродвигателя, корпуса насоса, воды на выходе из электродвигателя;
- утечки из торцевых уплотнителей вибрация переднего подшипника электродвигателя;
- давление воздуха подпора.

При отклонении от заданных параметров происходит автоматическое отключение агрегата. В некоторых случаях достаточно отключить один агрегат, чтобы вернуть технологический режим трубопровода в заданные значения давлений. В этом случае отключают агрегат, первый по ходу нефти, чтобы обеспечить условия пуска этого агрегата в последствии.

Установка агрегата в режим «резервный» состоит в полной подготовке агрегата к пуску. НА должен быть подключен ко всем вспомогательным системам. Системы подачи смазочного масла, охлаждающей воды, воздуха в двигатель должны быть в полной исправности. Если электродвигатель агрегата имеет продуваемое исполнение, то он должен быть продут и находиться под избыточным давлением. Должны быть включены под напряжение пусковые цепи соленоидов масляного выключателя. После завершения подготовки агрегата ключ режимов на щите управления насосного агрегата переводится в положение «резервные». При переводе ключа автоматически открывается задвижки НА, а к пусковым цепям этого НА подключаются контакты реле запуска резервного агрегата. Теперь, если один из работающих агрегатов будет остановлен агрегатной защитой через реле запуска будет включен электродвигатель агрегата, поставленного в резерв. После пуска резервного агрегата ключ режимов следует перевести в положение «дистанционное» и, при возможности, перевести в положение «резервный» один из исправных неработающих агрегатов.[7]

1.2.5 Резервуарные парки. Автоматизация резервуарных парков предусматривает механизацию и автоматизацию операций по приему и выдаче нефти, выполнение товарочетных операций, защиту оборудования от аварий и обеспечивает более эффективное и экономическое использование резервуарных парков.

Объем автоматизации РП предусматривает централизацию контроля и управления, автоматические защиты от перелива резервуаров и высокого

давления в трубопроводах подачи нефти в РП, автоматическое программное переключение резервуаров при наливе или сливе, пожаротушении и пр.

Обработка данных обеспечивает получение результатов измерения непосредственно в необходимой форме для коммерческих расчетов, т.е. в единицах массы объема, приведенных к базисной температуре.

Используя полученные данные для каждого вида продукта, находящегося в резервуаре. Затем, по необходимости, система суммирует эти значения по видам продукта и вычисляет свободный объем резервуаров. Измерения уровня и температуры, а также все виды расчетов периодически производятся автоматически или по запросу повторяются.

Система обеспечивает также прием сигналов предельных и аварийных уровней, температуры, давления в подводящих трубопроводах и, в зависимости от заложенной программы и функциональной возможности, выдает аварийные сигналы в диспетчерский пункт или управляющее воздействие на элементы управления технологическим объектом (задвижки, насосы, клапаны и т.д.). При этом система производит периодический опрос состояния задвижек и выдает сообщение об изменениях их состояния. Результаты опроса сохраняются в памяти и используются в других задачах (программах).

Подсистема учета количества и качества нефти на потоке является составной частью автоматизированной системы управления трубопроводным транспортом нефти, и в частности, автоматизированной системы управления РП.

Подсистема выполняет две основные функции. Первая функция производит, с коммерческой точностью, учет перекачки жидкости (нефти) в единицах объема и массы, что позволяет осуществлять товарно-учетные операции при приеме-сдаче нефти на потоке. Это позволяет, в свою очередь, снизить объем резервуарных емкостей и соответственно сократить потери нефти при наливе и опорожнении резервуаров. Вторая функция системы – контролировать расход в трубопроводе, что необходимо для поддержания заданного режима работы нефтепровода. Количество нефти определяют для данного режима работы нефтепровода при помощи счетчиков, устанавливаемых непосредственно в трубопроводе, или на входе и выходе в резервуарные парки и измеряющих суммарное количество жидкости, пропущенной через них за какой-то интервал времени. Показания счетчиков обычно выражаются в объемных единицах. Очень важным является термин – преобразователь расхода. Он обозначает устройство, непосредственно воспринимающее расход и преобразующее его в другую величину (например, перепад давления, частота), удобную для измерения. К приборам для измерения расхода и количества жидкостей предъявляются много разнообразных и, в некоторых случаях, противоречивых и трудно выполнимых требований.[9]

1.2.6 Функционально-алгоритмическая структура системы. Стандартное построение (исходя из опыта эксплуатируемых систем) РСУ предполагает следующую иерархическую структуру:

- нижний уровень представлен системой сбора, регистрации, первичной обработки, управления технологическим процессом местного диспетчерского пункта (МДП) и передачи оперативной технологической информации с объектов автоматизации (РП, НПС, ЛУ);

- средний уровень основан на вычислительных средствах промежуточного (регионального) диспетчерского пункта (РДП) и предназначен для оперативного контроля и управления участками технологического объекта с законченными технологическими циклами (РНУ);

- верхний уровень включает средства автоматизации центрального диспетчерского пункта (ЦДП) и предназначен для оперативного контроля и управления всем технологическим объектом (УМН).

В зависимости от конкретной задачи и конкретного объекта автоматизации, количество уровней может меняться.

В общем случае нижний (объектный) уровень состоит из подсистем, каждая из которых выполняет роль автономной автоматизированной системы, осуществляющей локальный контроль и управление своими объектами МН. Контроль заключается в отслеживании параметров технологического процесса и в случае выхода этих параметров за заданные границы срабатывают алгоритмы переключения на другой режим или аварийного отключения.

Кроме контролирующих функций, эти подсистемы собирают, предварительно обрабатывают и хранят важные учетные и технологические данные, а затем передают их в вышестоящую систему по запросам. Вышестоящая система на основе этих данных осуществляет контроль, учет и управление ТП на всем участке в соответствии с рисунком 1.11.

Каждый уровень РСУ представляет собой локальную вычислительную сеть (ЛВС), на нижнем уровне - сеть ПЛК (на примере магистрального нефтепровода), связывающую между собой АРМы данного уровня. В свою очередь ЛВС всех уровней объединена по вертикали в распределенную вычислительную сеть (РВС) с программно-технической реализацией единой информационной базы. Центральными звеньями сети ПЛК является станция управления распределенной системой (СУРС), построенной на ПЛК и ПЭВМ и станция контроля и управления объектом (СКУО), построенной на ПЛК.

Использование принципа децентрализации требует перераспределения функций РСУ между уровнями и приводит к распараллеливанию процесса обработки информации и изменению набора параметров передаваемых между программно-техническими комплексами системы. Для реализации РВС каждой прикладной функции требуется выполнение некоторого множества операций обработки данных, причем разные прикладные функции могут иметь отдельные общие операции. Каждой операции требуется множество исходных данных, получаемых вычислительной системой извне или от других

операции; результат выполнения операции передается объектам вне системы или другим операциям.



Рисунок 1.11 - Структура автоматизированного диспетчерского пункта

Для реализации РВС каждой прикладной функции требуется выполнение некоторого множества операций обработки данных, причем разные прикладные функции могут иметь отдельные общие операции. Каждой операции требуется множество исходных данных, получаемых вычислительной системой извне или от других операций; результат выполнения операции передается объектам вне системы или другим объектам.

Неоднозначное соответствие между классами прикладных функций и классами внешних источников и потребителей информации обусловлено тем, что источники информации для прикладной функции РСУ могут принадлежать к нескольким классам, в то время как в классификации прикладных функций указан класс только одного основного источника. Например, измерение или регистрация могут производиться автоматически (в функции времени или при совершении события, связанного с состоянием объекта) или по вызову оператора.

ПЭВМ вышестоящего уровня ЦДП и частично РДП обычно не воздействует на технологический процесс, а лишь вводит задание в операцию прикладной функции класса объект.

Общий алгоритм функционирования РСУ, на примере МДП МН, показанный на рисунке 1.12 состоит из блоков ввода и обработки аналоговой

информации АИ, ввода дискретной информации ДИ, вычисления управляющих воздействий УВ и обращения диспетчера ОД. Первые три блока выполняются циклически. Цикл ввода и вывода могут прерываться блоком обращения диспетчера ОД для запроса некоторой видеопрограммы, а при необходимости – для изменения уставки регулирования, представленной на видеограмме или параметров настройки регулирования. Прерывания при обращении диспетчера выполняются управляющей программой УП.

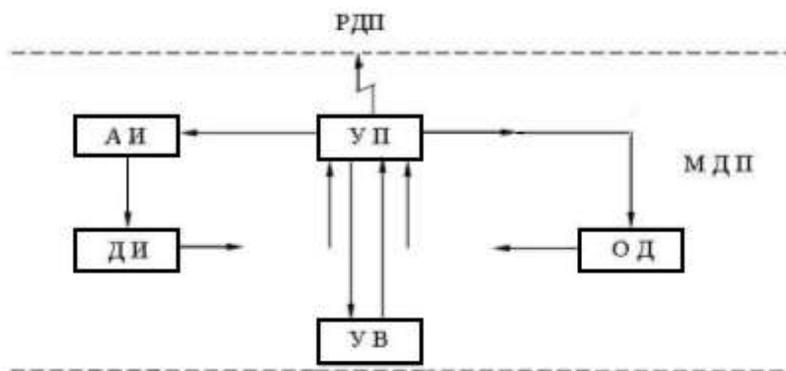


Рисунок 1.12 – Алгоритм функционирования РСУ

Программное обеспечение АСУ ТП НПС работает в реальном масштабе времени. Наиболее жесткие ограничения по времени обработки предъявляет система телемеханики при приеме информации от объекта, находящемся в переходном режиме. Исходя из этого ограничения, обработка информации строится по иерархическому принципу, изображенному на рисунке 1.13. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – станция управления распределенной системой (СУРС) местного диспетчерского пункта; 2 – подсистема предварительной обработки; 3 – подсистема управления; 4 – подсистема отображения; 5 – подсистема оперативной регистрации; 6 – подсистема контроля; 7 – текущий сводный журнал; 8 – подсистема идентификации; 9 – подсистема моделирования; 10 – подсистема диалога.

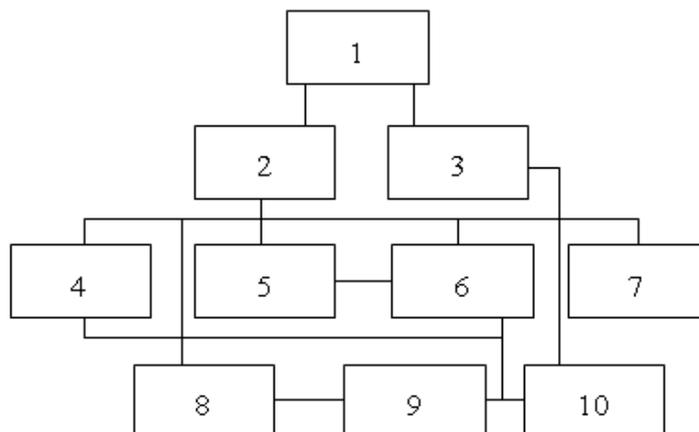


Рисунок 1.13 – Схема принципа обработки информации

Первый уровень (СУРС) осуществляет прием и анализ на достоверность принимаемых сообщений; определение вида программ предварительной обработки информации; передачу из ПЭВМ в телемеханику.

Второй уровень (подсистема предварительной информации) осуществляет первичную обработку информации. Обработка осуществляется по видам информации и заключается в обнаружении изменения состояния объектов или отклонения от заданных значений технологических параметров, обновлении информации в базе данных, дешифровке и масштабировании измеренных параметров, подготовке сообщений для печати и отображения.

Третий уровень (подсистема управления, отображения, регистрации и контроля) – контроль и анализ процессов и давлений с использованием моделей технологического процесса, подготовка информации для решения задач учетного характера и идентификации.

Четвертый уровень (подсистема идентификации, моделирования, диалога) – задачи подготовки рекомендации по управлению технологическим процессом, задачи учетного характера. Эти задачи носят фоновый характер.

Организация последовательности обработки информации осуществляется управляющей программой (супервизором) по анализу наличия или отсутствия запросов, принимаемых в поле супервизора, на решение каждой задачи с учетом их приоритета и по расписанию (прерывания от таймера).

Вывод на печать или дисплей осуществляется специальными подсистемами. Информация для вывода подготавливается другими подсистемами и заносится в буферные массивы, соответствующие устройствам вывода. [11]

Выбранная структура технических средств СА нефтепровода обеспечивает:

- функционирование распределенной системы с возможностью расширения выполняемых функций без изменения структуры программного обеспечения;

- работу систем автоматизации объектов нефтепровода автономно и в составе многоуровневой автоматизированной системы управления транспортом нефти.

Режим функционирования системы

Основные технические решения проекта характеризуют:

- совместимость с программным обеспечением системы контроля, сбора данных и управления;

- распределение технических средств нижнего уровня по ЛКП линейных задвижек;

- использование унифицированных устройств, блоков и узлов;

- обеспечение бесперебойного электропитания;

- высокая надёжность и ремонтпригодность;

Режим функционирования системы – непрерывный.

Технические средства СА

СА включает:

- датчики, измерительные преобразователи, измерительные приборы и системы нижнего уровня КТС;

- промежуточные клеммники для подключения датчиков и измерительных преобразователей к нижнему уровню КТС.

Датчики, измерительные преобразователи, измерительные приборы обеспечивают необходимую точность измерений, надёжность в условиях эксплуатации.

Связь датчиков и измерительных преобразователей со средним уровнем КТС через промежуточные клеммники обеспечивает безопасность, скорость монтажа, надёжность соединений, низкую стоимость технического обслуживания.

Система обеспечивает:

- дистанционный контроль положения линейных задвижек;
- дистанционное управление линейными задвижками;
- дистанционный контроль прохождения скребка через линейный узел;
- дистанционное обнаружение неисправностей средств управления и контроля;

- дистанционное измерение давлений, температуры и защитного потенциала;

- контроль устройств электрохимической защиты;

- передачу информации на верхний уровень управления с использованием событийного протокола по различным каналам связи;

- выбор режима управления: местный или дистанционный;

- резервное питание системы.

Состав функций реализуемых системой

Функции СА подразделяются на следующие основные группы:

1) К информационным функциям относятся:

- сбор и обработка информации;

- представление информации;

- технологическая сигнализация;

- архивирование (регистрация) информации;

- протоколирование информации;

- формирование баз данных;

- администрирование доступа к базам данных.

2) Управляющие функции

В соответствии с РД 39-041-01 «Положение по автоматизации и телемеханизации магистрального нефтепровода» предусмотрено выполнение следующих управляющих функций:

- дистанционное управление работой оборудования;

- стабилизация значения защитного потенциала на каждом участке нефтепровода.

Функции по защите

К функциям по защите относятся:

- технологическая сигнализация по сбою оборудования;

3) Вспомогательные функции

К вспомогательным функциям относятся:

- контроль работоспособности технологического оборудования нефтепровода;

- диагностика состояния линейных задвижек, средств связи и измерительных устройств.

Структурной единицей СА являются:

- источник гарантированного питания;

- средства связи

1.3 Обоснование и выбор линейного участка «Кенкияк-Кумколь». **Реализация и основные этапы исследования**

Сегодня по подтвержденным запасам нефти Казахстан входит в число 15 ведущих стран мира, обладая 3% мирового запаса нефти. Нефтегазоносные районы занимают 62% площади страны, и располагают 172 нефтяными месторождениями, из которых более 80-ти находятся в разработке. Более 90% запасов нефти сосредоточено на 15 крупнейших месторождениях – Тенгиз, Кашаган, Карачаганак, Узень, Жетыбай, Жанажол, Каламкас, Кенкияк, Каражанбас, Кумколь, Северные Бузачи, Алибекмола, Центральная и Восточная Прорва, Кенбай, Королевское. Месторождения находятся на территории шести из четырнадцати областей Казахстана. Это Актюбинская, Атырауская, Западно-Казахстанская, Карагандинская, Кызылординская и Мангистауская области. При этом примерно 70% запасов углеводородов сконцентрировано на западе Казахстана.

Наиболее разведанными запасами нефти обладает Атырауская область, на территории которой открыто более 75 месторождений с запасами промышленных категорий 930 млн. тонн. Крупнейшее месторождение области – Тенгизское (начальные извлекаемые запасы – 781,1 млн. тонн). На долю остальных месторождений области приходится около 150 млн. тонн. Более половины этих запасов сосредоточены на двух месторождениях – Королевское (55,1 млн. тонн) и Кенбай (30,9 млн. тонн).

На территории Мангистауской области открыто свыше 70 месторождений с извлекаемыми запасами нефти промышленной категории 725 млн. тонн, конденсата – 5,6 млн. тонн. В эксплуатации находятся менее половины месторождений. Большинство из них – на поздних стадиях разработки. Подавляющая часть остаточных запасов относится к категории трудноизвлекаемых. Крупнейшие месторождения – Узень, Жетыбай, Каламкас, Каражанбас.

Крупнейшим месторождением в Западно-Казахстанской области является Карачаганакское с извлекаемыми запасами жидкого углеводородного

сырья около 320 млн. тонн и газа более 450 млрд. куб м. В сентябре 2005 года было объявлено об обнаружении углеводородного сырья на соседствующем с Карачаганакком блоке Федоровский; запасы нефтяного и газового конденсата оцениваются в 200 млн. тонн. Еще одним перспективным регионом с точки зрения нефтегазового потенциала является Актюбинская область. Здесь открыто около 25 месторождений. Наиболее значимым геологическим открытием в этом регионе является Жанажольская группа месторождений с извлекаемыми запасами нефти и конденсата около 170 млн. тонн. В 2005 году было объявлено об открытии на центральном блоке восточной части прикаспийской впадины нового месторождения Умит.

Основой нефтедобывающей отрасли Кызылординской и Карагандинской областей является Кумкольская группа месторождений – пятая по значимости нефтегазовая провинция Казахстана. Летом 2005 года работающая в этом регионе компания «ПетроКазахстан» объявила об обнаружении коммерческих запасов нефти на лицензионной территории Кольжан, которая прилегает к северной границе месторождения Кызылкия.

В целом, по данным Министерства нефти и газа РК, подтвержденные запасы углеводородов, как на суше, так и на шельфе, оцениваются в пределах 4,8 млрд. тонн или более 35 млрд. баррелей, в то время как по состоянию на 2001 год разведанные балансовые запасы нефти составляли только 2,9 млрд. тонн. Более того, прогнозные запасы нефти, по оценкам некоторых экспертов, только по месторождениям, расположенным в казахстанском секторе Каспийского моря, могут составлять более 17 млрд. тонн или 124,3 млрд. баррелей. Учитывая запасы нефти и газа, а также постоянно растущие объемы добычи, в обозримой перспективе Казахстан будет продолжать оставаться в эпицентре мировой нефтедобычи.

По информации Министерства нефти и газа, добыча нефти по итогам 2011 года составила 80,1 млн. тонн. Для сравнения, в 1998 году добыча нефти была зафиксирована на уровне 25,93 млн. тонн. По объему добычи природного газа (39,5 млрд. куб м в 2011 году) Казахстан занимает одно из ведущих мест в СНГ.

На нефти - и газоперерабатывающих предприятиях республики в прошлом году произведено 2146,9 тыс. тонн сжиженного углеводородного газа. Объем внутреннего потребления газа составил 10,179 млрд. куб м.

Казахстан экспортирует основную часть добываемой нефти по нефтепроводам. В 2011 году объем экспорта нефти составил 69,61 млн. тонн, в том числе по нефтепроводам: «Атырау-Самара» – 15,43 млн. тонн, КТК – 28,44 млн. тонн, «Атасу-Алашанькоу» – 10,89 млн. тонн. В денежном выражении экспорт нефти составил сумму эквивалентной 55,2 млрд. долларов США, что составляет 62,5% от общего экспорта страны.

Объем экспорта газа из РК в 2011 году составил 8,15 млрд. куб м. При этом объем международного транзита газа через территорию РК за этот же период составил 96,67 млрд. куб м, в том числе: российского – 62 млрд. куб м, туркменского – 26,5 млрд. куб м, узбекского – 8,2 млрд. куб м.

В перспективе объем добычи нефти и газа в Казахстане будет иметь тенденцию к значительному росту.

Увеличение объемов производства казахстанской нефти и газа связывается с тремя факторами.

Во-первых, это обусловлено значительным притоком инвестиций.

Во-вторых, складывающаяся благоприятная конъюнктура мировых рынков углеводородного сырья.

В-третьих, дальнейшему наращиванию ресурсного потенциала отрасли будет способствовать также проводимое широкомасштабное изучение участков недр в акватории Каспийского и Аральского морей.

На рисунках 1.14 и 1.15 приведен общий вид промежуточной насосной станции с резервуарным парком на линейном участке «Кенкияк-Кумколь» и структура нефтепровода соответственно.

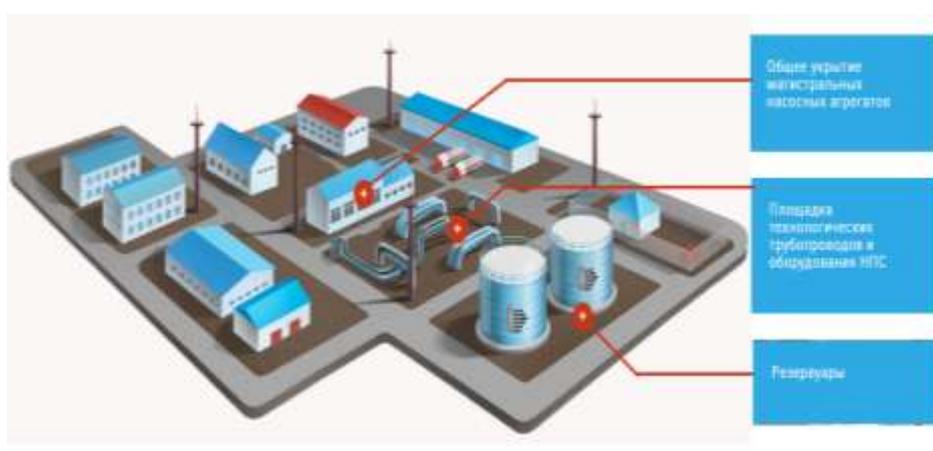


Рисунок 1.14 - Промежуточная насосная станция с резервуарным парком на линейном участке «Кенкияк-Кумколь»



Рисунок 1.15 – Структура нефтепровода на линейном участке «Кенкияк-Кумколь»

Согласно материалам информационно-аналитического центра Нефти и Газа, филиала «Контрактное Агентство» всего в нефтегазовой отрасли задействовано 71 336 человек, из них иностранцев – 2 431 человек.

Нефтепровод Кенкияк – Кумколь проходит по трем областям РК: Актюбинской, Кызылординской и Карагандинской (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Местоположение нефтепровода на карте Республики Казахстан

Пропускная способность нефтепровода Кенкияк-Кумколь на начальном этапе составила 10 млн. тонн нефти в год, с возможностью последующего расширения до 20 млн. тонн в год.

При выборе месторасположения сооружений нефтепровода учитывалось рациональное использование земель, соблюдение технологии транспортировки нефти, инженерное обеспечение, обеспечение безопасности населённых пунктов, промышленных, сельскохозяйственных предприятий и окружающей среды, а также сохранение памятников истории, культуры и природы.

Перед строителями нефтепровода Кенкияк - Кумколь стоял целый ряд сложностей. Трубы приходилось прокладывать по сложной местности (барханные пески, соровые участки, а также орошаемые и пахотные земли). По проекту нефтепровод пересёк Муголжарские горы, известные большим перепадом высот, что потребовало проведения ряда буровзрывных работ.

Согласно прогнозам, только участок Кенкияк-Кумколь за период с 2010 по 2020 год принесет Казахстану доходов на сумму 60 млрд. тенге.

Выводы по разделу и основные задачи исследований

Рассмотрена классификация трубопроводов, а также нагрузки и воздействия, которые оказывают влияние на трубопроводы для лучшего понимания измеряемых параметров.

Выбран линейный участок, который в дальнейшем будет рассматриваться как область исследования. Выбор линейного участка

основывается на его новизне и на том, что данный участок имеет доходные перспективы для экономического развития государства.

Проведен анализ средств контроля и систем управления трубопроводом, который показывает, что существующие методы контроля и управления устарели и требуют модификации. Модификация заключается в полной замене оборудования: предлагается использование беспроводных датчиков, а систему управления осуществить с помощью микроконтроллеров, подключенных к интегрированной компьютерной среде разработки.

В соответствии с выше сказанным необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть существующие прототипы периферийных устройств, программных обеспечений и микроконтроллеров для сбора данных при подземных условиях, где прокладываются магистральные нефтепроводы.

2. Обосновать применение беспроводных датчиков операционной системы управления нефтепроводными сетями, а также осуществить выбор датчиков, микроконтроллера и среды разработки. При этом необходимо контролировать следующие основные параметры:

- давление внутри трубопровода;
- температурные воздействия;
- сейсмические воздействия.

3. Предложить методику выбора рациональных режимов работы нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов, с учетом изменения, частоты вращения роторов насосных агрегатов.

4. Предложить цифровое управление и контроль с использованием соответствующих программных обеспечений для нефтеперекачивающих станций и магистрального нефтепровода на базе беспроводных датчиков, микропроцессорных средств и последних достижений в области телекоммуникационных систем.

5. Разработать математическую модель работы электропривода НПС и магистрального нефтепровода с регулированием частоты вращения роторов насосных агрегатов, при изменяющихся параметрах смеси нефтей и на основе полученных расчетных данных провести экспериментальные исследования в среде программирования MatLab с использованием пакета Simulink.

6. В основу методики проводимых исследований положить системный подход к изучаемому объекту. При решении поставленных задач использовать комплексный метод исследований: обобщение и анализ теоретических и экспериментальных трудов в области автоматизированного электропривода с применением микропроцессорных средств и телекоммуникационных систем. Математическое имитационное моделирование, расчеты и анализ полученных результатов проводить с использованием пакета прикладных программ MatLab и CCS.

2 Цифровая система автоматического управления на базе датчиков SimpliMote

2.1 SimpliMote: Операционная система управления сети беспроводных датчиков для нефтепровода

2.1.1 В течение многих лет беспроводные сенсорные сети широко использовались для сбора данных об окружающей среде из различных структурных развертываний, включая сетчатые, специальные и иерархические макеты. Несколько других применений сенсорных сетей могут включать размещение узлов в линейной топологии, составляющих особый класс сетей, называемых линейными сенсорными сетями. В плотно развернутом линейном сетевом случае проблемы, связанные с оптимальным распределением ресурсов и сетью, могут сохраняться, потому что стандартные сетевые протоколы датчиков пытаются управлять сетью как сеткой или специальной инфраструктурой. Такие проблемы, как восстановление из отверстий, где устройство не может достичь другого устройства в любой из сторон или политики для установления маршрута для распространения данных, должны быть разумно решены для линейных сенсорных сетей.

Для решения таких проблем в данной работе предлагается применение линейного датчика сети для нефтегазового трубопровода с использованием специальной сенсорной платы, с алгоритмами для решения проблемы создания сети, обнаружения прерываний утечки и маршрутизации высокоприоритетных сообщений с надежностью, сохраняя при этом сеть. Предлагаемая система обеспечивает все функции обнаружения утечки, локализации, измерения параметров и приведения в действие при работе с низкой энергией, высокой надежностью данных и низкой задержкой, в то время как сравнительные результаты подтверждают эффективность системы.

Достижения в протоколах беспроводной связи и встроенном дизайне привели к появлению маломощных многофункциональных сенсорных узлов миниатюрного размера для беспроводных сенсорных сетей (WSN), работающих в областях, от поля боя и мониторинга окружающей среды до здоровья и развлечений [1].

Узлы датчиков способны обнаруживать параметры окружающей среды в диапазоне чувствительности и данные маршрутизации по нескольким магазинам к устройствам в пределах своего диапазона связи. Узлы датчиков обычно работают совместно, чтобы контролировать недоступные области. Требования к покрытию WSN могут обеспечивать единообразную компоновку узлов или требуют более плотного развертывания для более высокого наблюдения.

В основном, требование покрытия может быть аппроксимировано конечным набором точек для регулярных структур. После развертывания надежность сети зависит от нескольких параметров, включая подключение, задержку маршрутизации данных и точность обнаружения событий датчика [2].

2.1.2 На рисунке 2.1 в качестве примера приведена схема линейного мониторинга инфраструктуры с реле распространения данных и базовым устройством датчика, где: Basic Sensor Node, Data Dissemination and Aggregator Node, Realy Node, Coordinator Node, Base Station Tower, Monitoring Centre - Основное устройство датчика, устройство распространения данных и устройство агрегатора, устройство ретрансляции, устройство координатора, башня базовой станции, центр мониторинга соответственно.

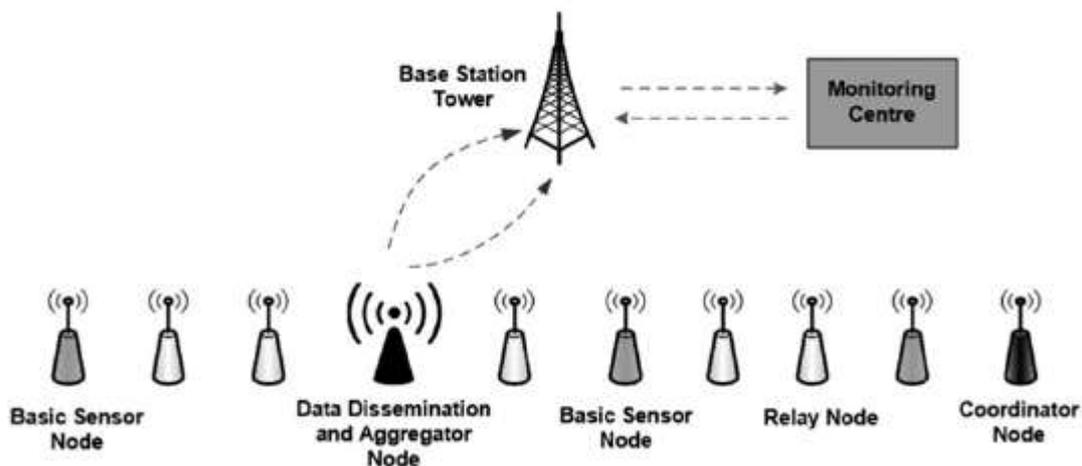


Рисунок 2.1 – Пример линейного мониторинга инфраструктуры с реле распространения данных и базовым устройством датчика

Развертывание WSN включает в себя несколько параметров решения, например, количество развернутых узлов датчиков и скорость обнаружения сбоя устройства, которая может быть легко обнаружена, в то время как активность узлов длится более длительные периоды. Расположение места развертывания и междоменные расстояния также влияют на использование энергии. Частоту обмена данными необходимо тщательно планировать, чтобы улучшить срок службы сети за счет равномерного распределения энергетической нагрузки. Время жизни сети определяется как период времени до тех пор, пока все активные узлы датчиков не смогут обеспечить связность или исчерпаны.

Мониторинг нефтегазопровода, аналогичный мостам и туннелям, не только является сложным из-за большого линейного пролета, но также и из-за критических требований по определению условий жидкости [3]. Неточности в измерениях датчиков с одного устройства могут распространяться по сети, что вызывает искажение в измерениях от других датчиков при агрегировании. Качество обслуживания в линейном WSN требует интеллектуального метода обмена данными в сочетании с циклами сна и активности узлов. Качество связи, определяемое индикатором уровня принимаемого сигнала (RSSI), является основным параметром для подключения к сети. Для приемлемых уровней QoS критическая информация не должна задерживаться или теряться за пределами определенной границы.

Кроме того, топология сети должна быть разработана с учетом нагрузки данных в критических точках и механизма маршрутизации, где могут быть включены обычные параметры маршрутизации, включая расстояние перехода, отметки времени и качество канала [2]. Надежность сети, отказоустойчивость и минимизация задержки во многих случаях связаны с самим решением маршрутизации.

Линейные WSN (LWSN) обеспечивают особый случай, когда многоходовая связь (рисунок 2.1) на больших расстояниях приводит к увеличению времени доставки данных [3]. Сети LWSN могут быть упрощенными в топологии, но решение маршрутизации и развертывания узлов, для экономии ресурсов не простое [4]. Подобные проблемы с сетью были в последнее время, предметом исследования, учитывая несколько применений датчиков.

Существует ряд работ, предлагающих использование беспроводных датчиков для качественного анализа данных. Lin et al. [9] предложили приложение WSN для мониторинга линий электропередач, используя алгоритм кластеризации, чтобы сбалансировать потребление энергии и использовать гибридный контроль доступа к среде (MAC). Однако использование протоколов кросс-уровня для требовательных приложений реального мира делает системный комплекс более реалистичным и менее отзывчивым. Akbar et al. [10], внося свой вклад в LWSN, предлагают мобильные раковины, автономные транспортные средства и курьерские узлы, которые работают под водой в трехмерной линейной формации, что сводит к минимуму потребление энергии, а также точно вычисляет необходимую маршрутную информацию. Такая трехмерная линейная система хотя и точна в маршрутизации, но слишком сложна для реализации в реальном времени зондирования и реализации ответных мер в критически важных приложениях. Аналогично, Jawhar et al. В [11] предложили паромную LWSN, где собранные данные считаются толерантными к задержке. Подвижный автомобиль, робот или любой другой мобильный устройство может перемещаться вперед и назад по линейной сети, собирая данные с базовых узлов. Представлены четыре различные схемы движения узлов, но предположение о переносимых по задержке данных не позволяет использовать систему LWSN, предназначенную для мониторинга состояния нефтегазопроводов.

2.1.3 Аппаратная платформа устройства датчика играет важную роль в производительности сети. Приложение для мультимедийных датчиков требует сравнительно более мощного микроконтроллера, чем простое приложение, такое как мониторинг температуры в помещении. Обзор наиболее популярных платформ WSN приведен в [12,13]. В то время как плоскость восприятия платформы больше ориентирована на выявление проблем и проблем с коммуникацией, более гибкая платформа может предоставлять кросс-уровень разведки для обработки более сложных задач и нескольких сценариев зондирования [14].

Мониторинг нефте- и газопроводов представляет собой проблему с точки зрения чувствительности динамики флюидов, а также для своевременной доставки критической информации [15]. Поэтому подробно рассматривается системное описание специализированной платформы с алгоритмами, которые дополняют ZigBee и аналогичные протоколы, такие как WirelessHART и 6LowPAN [1], чтобы справиться с проблемами мониторинга нефтегазопроводов. Настоящий материал является углубленным расширением первоначальной ограниченной работы, представленной в [15].

В сценарии LWSN, который дополняет протокол ZigBee, предусмотрен алгоритм для настройки сети и управления обменом данными и зондирования. При разработке нашей платформы WSN, которую мы называем SimpliMote, были учтены некоторые программные и аппаратные ограничения, которые присущи стандартным протоколам коммерческого и оффлайнового (COTS) и стандартного WSN. Базовые подходы к маршрутизации для WSN, включая специальный вектор расстояния по требованию, маршрутизацию источника и многолучевую маршрутизацию, используют дополнительные сообщения, которые, если их избежать в линейной конфигурации сети, могут сэкономить время, энергию и размер данных [3]. Подход, представленный в этом материале, работает с базовыми устройствами WSN, включая координатор, маршрутизатор и сенсорные узлы. Настройка сети, а также объединение и удаление узлов осуществляется посредством среды обмена сообщениями приложения вокруг координатора.

Недостатком механизма обнаружения ZigBee является то, что для каждой ширококвещательной передачи стек ZigBee должен резервировать буферное пространство для копии пакета данных для повторной передачи; Поэтому ширококвещательные сообщения должны использоваться экономно для больших размеров пакетов. Кроме того, ширококвещательные сообщения должны управляться через сеть, и вместо них используются одноадресные сеансы массажа, которые дополнительно требуют интеллектуального прогнозирования адресов. Каждая одноадресная передача поддерживает до 84 байт радиочастотной полезной нагрузки, которая дополнительно ограничена при использовании функций безопасности. Фрагментация поддерживается в одноадресной передаче только в том случае, когда переданный кадр размером максимум 255 байт данных разбивается на несколько передач и повторно собирается на принимающей стороне.

Эта фрагментация является прямым результатом ограничения буфера аппаратной платформы. Кроме того, из-за ограничений памяти, только один фрагмент поддерживается одновременно прошивкой ZigBee. Для надежности ZigBee отправляет пакеты подтверждения как на уровне MAC, так и на прикладном уровне, который в некоторых низкоприоритетных сообщениях может вообще не требоваться. Такие программные и аппаратные ограничения были учтены при разработке SimpliMote.

2.1.4 Новизна решения включает в себя метод эффективного обнаружения событий регистрации путем удаления шума на пользовательских

устройствах, маршрутизации информации, маркировки ее по разным приоритетам и постоянного поддержания сети с обеспечением удаленного мониторинга в режиме реального времени. Результаты сравнения с решением COTS доказывают эффективность и необходимость нашей предлагаемой системы.

Основной вклад этой работы состоит в следующем:

1. Предлагается приложение развертывания LWSN для нефтегазопроводов.

2. Внедряется специальная аппаратная платформа WSN, которая может эффективно использовать ресурсы для выполнения обширных задач обнаружения для мониторинга состояния нефтегазопроводов.

3. Описаны алгоритмы беспроводной передачи данных, связанные с установлением сети, маршрутизации периодических и приоритетных данных и восстановлением отключений в LWSN.

4. Детали реализации с техническими проблемами описаны в отношении мониторинга состояния трубопровода и реального развертывания.

5. Методы обработки сигналов обсуждаются для удаления шума из данных датчика, локально и распределенным образом.

6. Объясняется внешнее приложение, позволяющее пользователям дистанционно контролировать систему.

7. Алгоритмы классификации проверяются на большом наборе данных искусственно созданных утечек, чтобы определить точность обнаружения.

8. Энергопотребление, время отклика системы и пропускная способность измеряются для наихудших сценариев для определения возможности системы в реальном приложении.

Также рассматривается аппаратная платформа и периферийные соединения SimpliMote. Описывается процедура создания LWSN и алгоритмы маршрутизации данных. Были рассмотрены и изучены требования к обработке сигналов для алгоритма обнаружения утечки и детали его реализации, удаленное программное приложение SimpliMote.

2.2 Проектирование платформы SimpliMote

SimpliMote включает поддержку нескольких периферийных соединений, включая датчики давления и температуры. Данные о текущей среде трубопровода и события, такие как обнаружение утечки и движения, отправляются с использованием интерфейса ZigBee. Интерфейс LCD обеспечивает взаимодействие пользователя с SimpliMote. Устройство также включает акселерометр. Источник питания SimpliMote - это аккумуляторная батарея. Устройство совместимо с промышленным температурным диапазоном (от -40 до 85 ° C), за исключением ЖК-дисплея.

В SimpliMote встроен мощный микроконтроллер на основе ARM (MCU) для обеспечения поддержки скалярных и мультимедийных данных, к которым интегрированные схемы и интерфейсы подключаются через различные

протоколы (рисунок 2.2, а). Конструкции SimpliMote, а также алгоритмы, которые работают над ним, энергоэффективны для продления времени работы устройства. Интеграция устройств с режимом отключения выбирается для экономии энергии, когда это возможно. На рисунке 2.3 приведена плата датчика SimpliMote после процесса разработки и сборки.

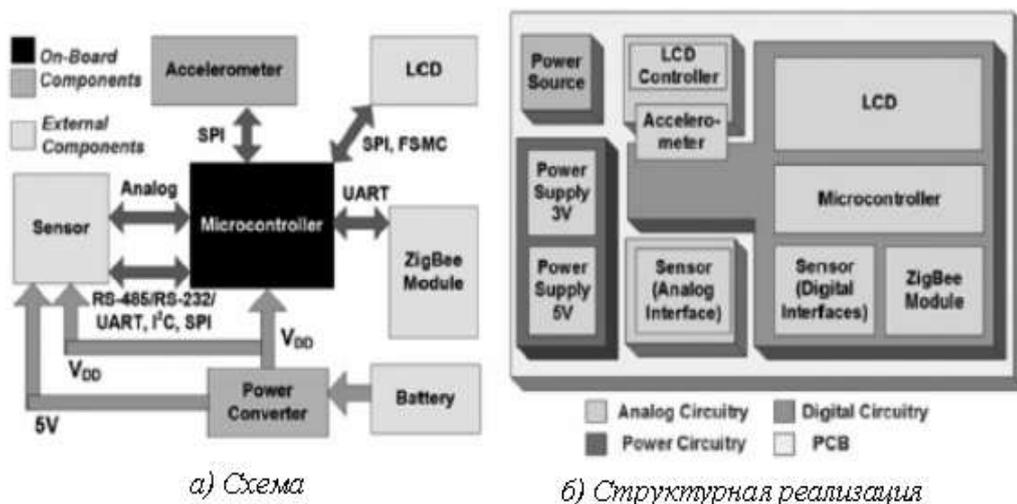


Рисунок 2.2 – Визуализация датчика SimpliMote

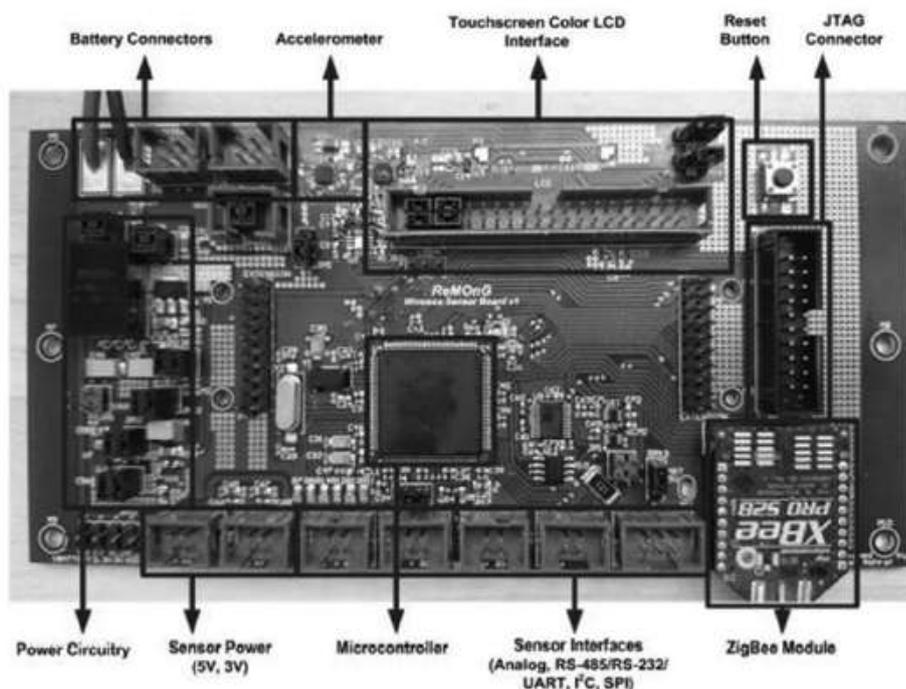


Рисунок 2.3 – Плата датчика SimpliMote после процесса разработки и сборки

Периферийные устройства MCU используются как минимум, например, с использованием одного последовательного периферийного интерфейса для двух разных устройств. Периферийные устройства подключаются как минимум к минимальному числу портов, поскольку MCU может включать или отключать периферийные устройства и отдельные порты ввода / вывода (I/O). Это обеспечивается периферийными устройствами, которые

используются в большинстве случаев. Чтобы сделать плату эффективной при низких токах (SimpliMote работает на низких токах в течение большей части времени), выбирается неизолированный DC-DC-преобразователь, поскольку изолированные DC-DC-преобразователи имеют очень низкую эффективность при низких токах.

Схема SimpliMote реализована на четырехслойной печатной плате (PCB), использующей стратегию проектирования смешанных сигналов для обслуживания как цифровых, так и аналоговых схем (рисунок 2.2, б). Компоненты размещаются для упрощения маршрутизации аналоговых и цифровых трасс таким образом, чтобы они не пересекались друг с другом, избегая высокочастотного содержимого цифрового возвратного тока, проходящего через землю аналоговой схемы. Для достижения этого аналоговые соединительные устройства располагаются близко друг к другу (например, аналоговый сенсорный интерфейс расположен рядом с аналоговыми каналами микроконтроллера, ЖК-сенсорный экран расположен рядом с разъемом ЖК-дисплея и т. д.), чтобы сократить аналоговые трассы и таким образом, позволяет тратить больше места на цифровые трассы. Кроме того, аналоговые схемы размещаются вблизи источника питания и их источников питания (например, интерфейс аналогового датчика размещается близко к источнику питания и т. д.) для уменьшения путей аналоговых возвратных токов низкой частоты и, таким образом, встреченное сопротивление. Аналоговая схема устанавливается намеренно на краях платы и близко к источнику питания, так что, низкочастотные возвратные токи от цифровых компонентов имеют минимальные помехи аналоговой схеме, так как эти токи следуют по пути наименьшего сопротивления, которое является прямой линией от Компонент к источнику питания.

Это особенно обеспечивается для сильноточных цифровых устройств (например, ZigBee-модуль), так как их высокие низкочастотные обратные токи могут значительно загрязнить аналоговое заземление. Кроме того, никакие разрезы не помещаются в заземленную плоскость для разделения аналоговой и цифровой поверхностей.

2.3 Сетевые алгоритмы и алгоритмы связи

2.3.1 Сеть осуществляется для LWSN по принципу, что низкоскоростная связь с несколькими путями является более энергоэффективной, чем передача данных с высокой пропускной способностью с одним ходом [16].

Предлагаемый ниже сетевой алгоритм может более эффективно использовать избыточность узлов, когда максимальный диапазон мощности каждого устройства охватывает как минимум два соседних устройства (рисунок 2.4). Сеть выполняется с использованием мер RSSI, отображающих каждое устройство на переднем и заднем узле с лучшим RSSI вместе с подсчетом переходов для достижения устройства шлюза. Алгоритм начинается с нахождения лучшего прямого устройства RSSI для первого

устройства. Затем первое устройство начинает поиск своего следующего устройства, и процесс продолжается до последнего устройства, после которого другое устройство не будет обнаружено. Затем, последнее устройство создает обратную связь с устройством соединения, направленным назад. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет доступно первое устройство. Обратная ссылка необходима только для того, чтобы получить информацию о состоянии хоста для обеспечения доступности.



Рисунок 2.4 – Эквидистантное размещение узлов, показывающих диапазоны, покрываемые устройством 3 (только) при разных уровнях мощности передачи

Устройство находит своё следующее устройство, широковещательно передавая 1-ходовое сообщение всем устройствам с минимальной мощностью и ожидая ответов. Если ни одно устройство не отвечает, он ретранслирует сообщение, увеличивая уровень мощности передачи до максимума. Все узлы, получающие широковещательное сообщение, проверят свое сетевое состояние и ответят с одноадресным сообщением. Узлы, уже присоединившиеся к сети, не отвечают. Отправляющее устройство будет отслеживать все отвечающие узлы. Чтобы избежать ошибочного измерения RSSI нескольких одновременных ответов, хост-устройство передает одноадресное сообщение один за другим всем устройствам, которые ответили ранее. Каждый принимающий устройство отвечает на одноадресное сообщение, которое позволяет устройству точно измерять RSSI и выбирать устройство с лучшим RSSI.

Затем хост-устройство создает прямое соединение с выбранным RSSI, посылая одноадресное сообщение с информацией о переходе на это устройство (рисунок 2.5). Это одноадресное сообщение, полученное прямым устройством, устанавливает его обратное соединение и также служит индикатором для начала поиска следующего устройства.

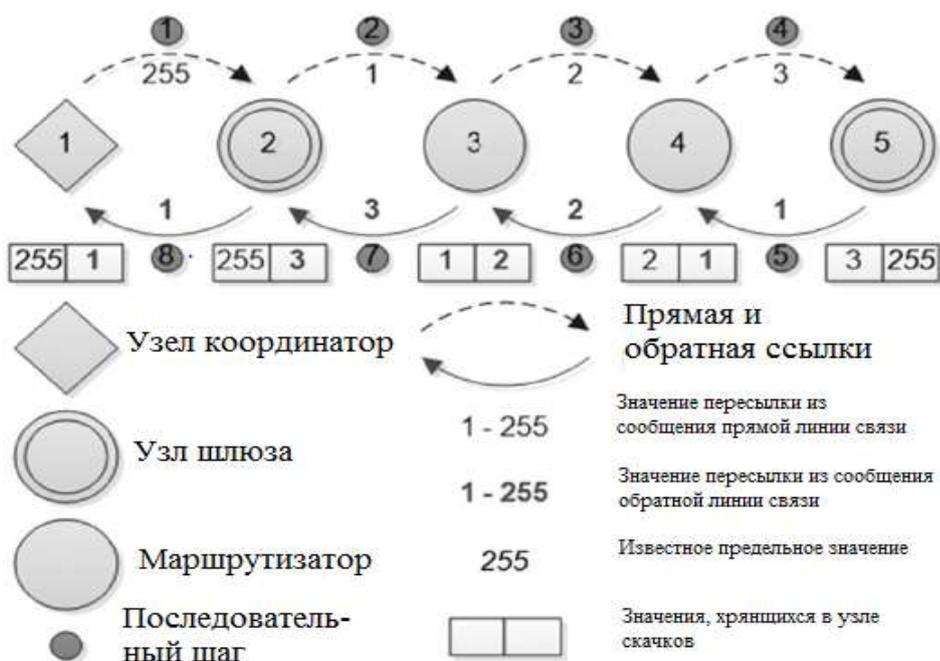


Рисунок 2.5 – Пошаговый сетевой процесс с информацией о переходе

Если максимальный уровень мощности для передачи широковещательного сообщения 1-го уровня достигнут без ответа, устройство-отправитель будет считать, что все прямые ссылки были созданы, и объявить себя последним устройством, после которого начинается процесс создания обратной ссылки.

Процесс создания обратной ссылки включает отправку одноадресного сообщения на обратное устройство вместе с информацией о переходе (рисунок 2.5). Если устройство также действует как шлюз, он отправляет сообщения прямой или обратной линии связи со значением 1 перехода к соседнему устройству. Все остальные узлы просто добавляют 1 к значению пересылки перед пересылкой. Если на каждой стороне устройства нет шлюза, значение перехода устанавливается в 255 (код 0xFF).

Каждое новое устройство без подсети (за исключением координатора) продолжает передавать сообщение, представляющее новое устройство, через каждые 10 секунд, пока не получит широковещательное сообщение с 1-м интервалом от другого устройства. Это сообщение «нового устройства» может перезапустить сетевой процесс только после завершения сетевого процесса, а не между ними, чтобы избежать перезагрузки текущего сетевого процесса.

Предлагаемый сетевой алгоритм, который может более эффективно использовать избыточность узлов, когда максимальный диапазон мощности каждого устройства охватывает, как минимум два соседних устройства приведен на рисунке 2.6.

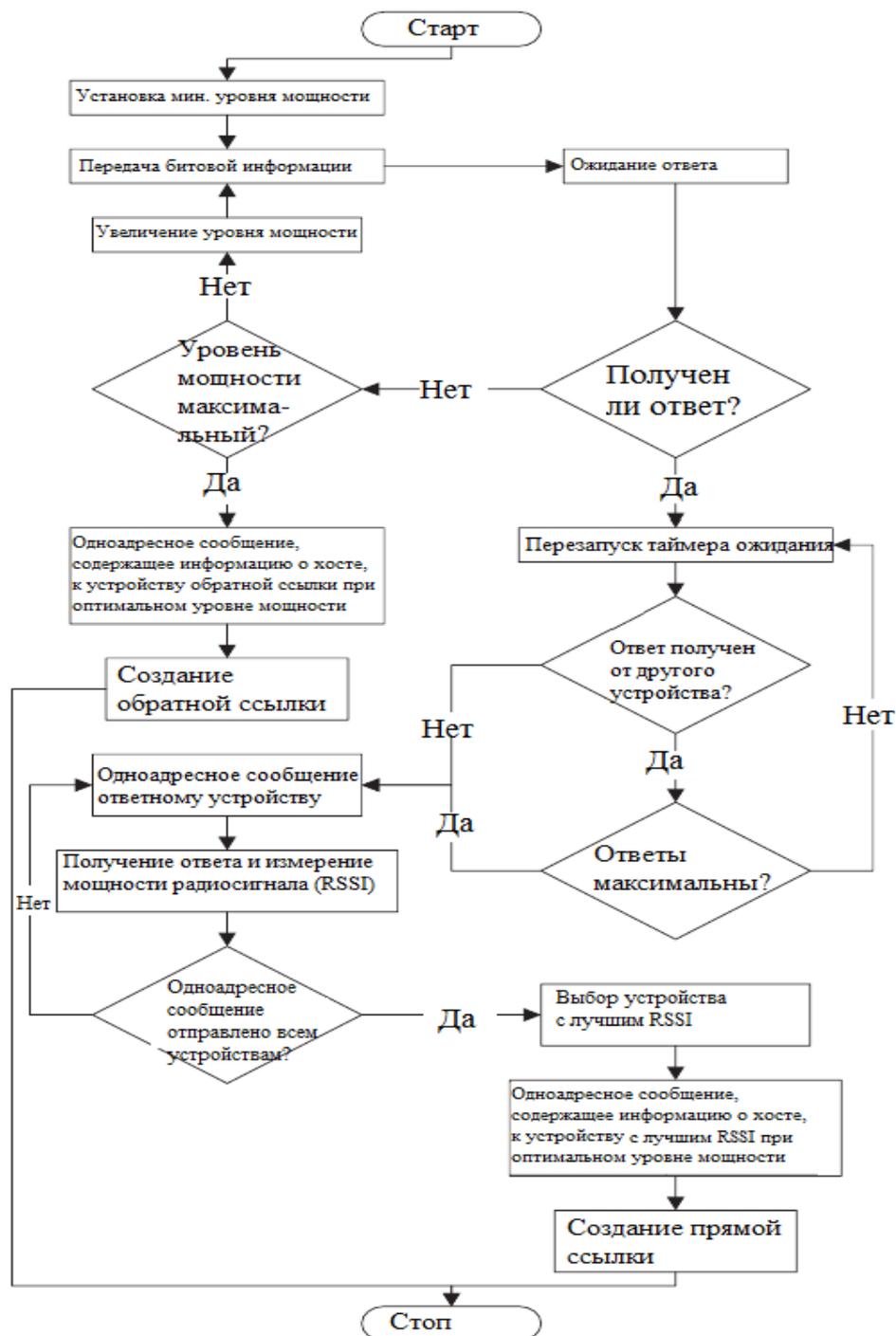


Рисунок 2.6 – Блок-схема сетевого алгоритма

Сеть также может перезапускаться всякий раз, когда устройство рассылает сообщение о сбое сети. Сообщение-маяк (периодические данные) перемещается по сети, начиная с первого до последнего устройства каждые 30 с, что также проверяет состояние сети и, если необходимо, исправляет. Если устройство не принимает сообщение маяка в течение 60 с и более, он отправляет запросы, как на прямом, так и на обратном устройствах. Если ни один из узлов не отвечает, устройство устанавливает свой статус в «несетевой» устройство и передает сообщение «новый устройство».

2.3.2 Протекание основного процесса. Основной процесс на каждом устройстве начинается с проверки, является ли устройство координатором или маршрутизатором. В случае координатора сетевой процесс инициируется координатором (первый устройство в нашем случае). Как только сетевой процесс завершается, координатор инициирует периодический пакет данных, добавляя его периодические данные и передавая его в качестве одноадресной передачи следующему устройству в соответствии с его алгоритмом маршрутизации после периодического временного интервала. Маршрутизаторы, получая пакет данных от своих отсталых узлов, перенаправляют пакет на следующее устройство со своими собственными периодическими данными, добавленными в него. Основной процесс на устройстве будет прерываться всякий раз, когда утечка жидкости или движение устройства обнаруживается на устройстве из-за высокого приоритета данных. Пакеты утечки и перемещения будут отправляться на базовую станцию по приоритету согласно алгоритмам (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Блок-схема основного процесса

2.3.3 Маршрутизация периодических данных. Периодический пакет данных проходит через линейную сеть, в которой собираются данные измерений каждого устройства, включая давление в трубопроводе, температура, напряжение батареи и ускорение устройства. Сообщение пакета данных инициируется устройством-координатором (первым устройством).

Алгоритм маршрутизации пакетов периодических данных приведен на рисунке 2.8.

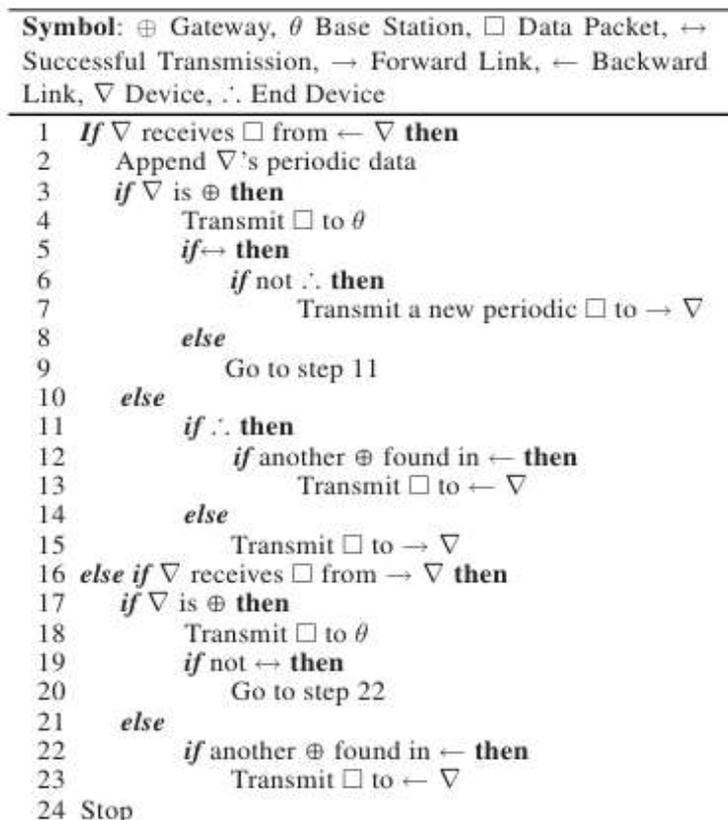


Рисунок 2.8 - Алгоритм маршрутизации пакетов периодических данных

Пакет данных растет в размерах, так как каждое устройство добавляет к нему свои данные. При достижении устройства шлюза пакет данных отправляется на базовую станцию, а новый пакет отправляется следующему устройству. Если последнее устройство не является шлюзом, он отправляет пакет данных назад, чтобы найти устройство шлюза в другой стороне. Таким образом, узлы только добавляют свои данные, когда они принимают пакет данных от своего устройства обратной связи, и просто передают пакет данных следующему устройству, когда они получают его от устройства прямой линии связи.

Алгоритм работает так, что пакет данных проходит каждое устройство, по крайней мере, один раз и два раза. Если устройство не может отправить пакет данных в следующее желательное устройство, он перезапустит сетевой процесс для восстановления сети путем передачи сообщения об ошибке «сбой в сети».

2.3.4 Маршрутизация пакетов данных движения (короткое предупреждение). Пакет данных, связанных с движением, создается всякий раз, когда в устройстве обнаруживается движение. Пакет коротких данных включает ускорение устройства. Будучи предупреждением с высоким приоритетом, оно отправляется на базовую станцию как можно раньше. Если устройство, обнаруживающее движение, является устройством шлюза, пакет отправляется на базовую станцию в виде одноадресной передачи; Иначе пакет будет транслироваться и отправляться на базовую станцию, когда он будет получен устройством шлюза. На рисунке 2.9 приведен алгоритм маршрутизации пакетов данных, связанных с движением.

Symbol: \oplus Gateway, θ Base Station, \square Data Packet, ∇ Device	
1	<i>if</i> ∇ is \oplus then
2	Transmit \square to θ
3	Stop

Рисунок 2.9 - Алгоритм маршрутизации пакетов данных движения

Алгоритму коротких предупреждений не требуется никакой информации о прямых или обратных ссылках; Следовательно, он работает даже во время сетевого процесса, что приводит к немедленной доставке сообщения на базовую станцию.

2.3.5 Маршрутизация пакетов данных утечки (сообщение с длинным предупреждением). Пакет данных утечки создается, когда в устройстве обнаруживается утечка. Пакет утечки состоит из 160 значений давления в трубопроводе, что приводит к одному длинному (~ 250 байтов) пакету данных. Это сообщение считается предупреждением с высоким приоритетом, но поскольку пакет данных утечки является длинным сообщением, он не может быть передан. Вместо этого отправляется фрагментированное одноадресное сообщение.

Если устройство, обнаруживающее утечку, является устройством шлюза, он передает одноадресный пакет в базовую станцию; Иначе пакет будет перенаправлен на ближайший шлюз и отправлен на базовую станцию, когда он будет получен устройством шлюза. Ниже на рисунке 2.10 приведен алгоритм маршрутизации пакетов данных утечки.

Алгоритм маршрутизации пакетов данных утечки гарантирует, что пакет не будет пропущен и немедленно отправлен на базовую станцию. Чтобы гарантировать это, если устройство, принимающий пакет утечки, не распознает отправителя пакета как свой обратный или прямой устройство, он все равно пересылает пакет ближайшему шлюзу. Кроме того, каждое устройство создает запись для пакета утечки и, если неудачно отправляет пакет в нужное устройство, он добавляет один счет в качестве повтора против этой записи и направляет пакет на противоположную сторону. Точно так же

устройство шлюза также отслеживает, свои неудачные попытки отправить пакет на базовую станцию и перенаправляет пакет на другой шлюз. Когда количество повторных попыток устройства достигает своего максимума, сообщение «сбой сети» отправляется для восстановления сети, и пакет снова маршрутизируется после установки, а когда счетчик неудачной отправки базовой станции достигает своего максимума, пакет просто отбрасывается. Даже при проблемах с конфигурацией сети не нужен ремонт сети, этим экономится время, и выполняется доставка пакетов по нескольким маршрутам.

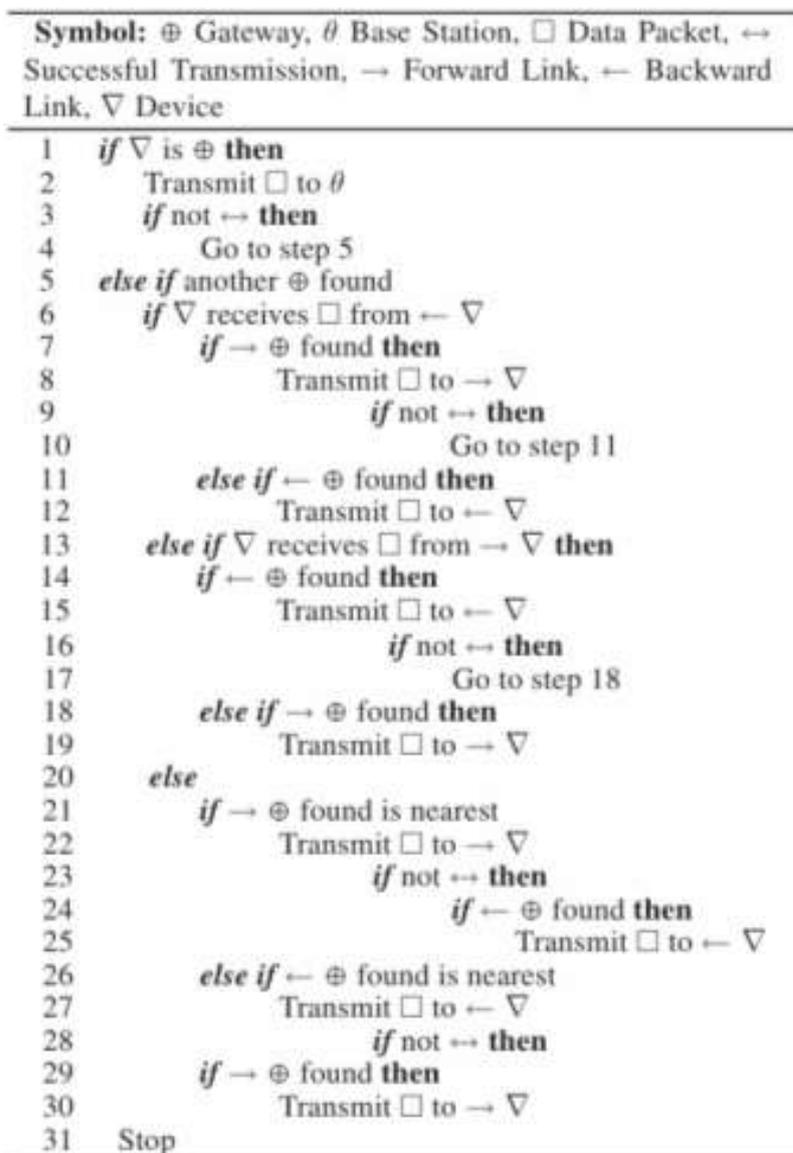


Рисунок 2.10 - Алгоритм маршрутизации пакетов данных утечки

Кроме того, перед сообщением об утечке отправляется широковещательное сообщение «обнаружение утечки», которое служит индикацией для всех узлов для входа в специальный режим. В этом режиме узлы не инициируют периодический пакет данных и ждут доставки пакета

утечки. Более того, запись новых узлов отключена во время этого режима, и сообщение «новое устройство» просто отбрасывается.

Время, затрачиваемое на создание пакета утечки при обнаружении утечки (сбор ~ 160 значений давления), составляет около 3-5 с. Таким образом, все узлы после получения сообщения «обнаружение утечки» будут пытаться завершить свои текущие задачи за это время и ждать доставки пакета утечки. Как только пакет данных утечки доставляется на базовую станцию, сообщение «сообщение о доставке утечки» передается устройством шлюза. Затем все узлы очищают запись повторных попыток для этого конкретного пакета утечки и выходят из специального режима.

Алгоритм позволяет одновременно передавать несколько пакетов данных утечки из нескольких узлов. Однако одному устройству разрешено отправлять только один пакет утечки за один раз до его доставки. В сценарии одновременных множественных потоков утечки узлы, пакеты утечек которых еще не доставлены, после получения сообщения «пакет утечки пакета» для некоторого другого устройства, повторно отправляют сообщение «обнаружено утечка», чтобы заставить все узлы снова войти в специальный режим. Сообщение «Clear Clear Packets» передается в качестве меры безопасности после значительного времени бездействия в специальном режиме, чтобы избежать зависания узлов в специальном режиме.

2.3.6 Реализация алгоритма и замечания. Алгоритмы реализованы с использованием программных прерываний с использованием приоритетных программных прерываний. Способность микроконтроллера динамически изменять приоритет прерывания, в подпрограмме обслуживания прерывания полезна при реализации алгоритмов. Энергоэффективность достигается за счет использования режима ARM Cortex M4 «Sleep-on-Exit», который требует, чтобы процессор работал только при возникновении прерывания. Кроме того, периферийные устройства микроконтроллера включены во время работы и отключены после выполнения желаемой задачи.

Приемопередающие модули Xbee [17], используемые в экспериментах, могут быть довольно энергоемкими, поскольку реализация ZigBee [18] не позволяет засыпать их в режиме координатора или маршрутизатора. Кроме того, сообщается, что значения RSSI в Xbee могут вводить в заблуждение, так как они указывают только качество RSSI или качества связи последнего прыжка, даже если передача охватывает несколько переходов. Вполне возможно, что ответ сообщения охватывает несколько переходов, в то время как отправка устройства получает неточную интерпретацию RSSI, влияющую на сетевой процесс.

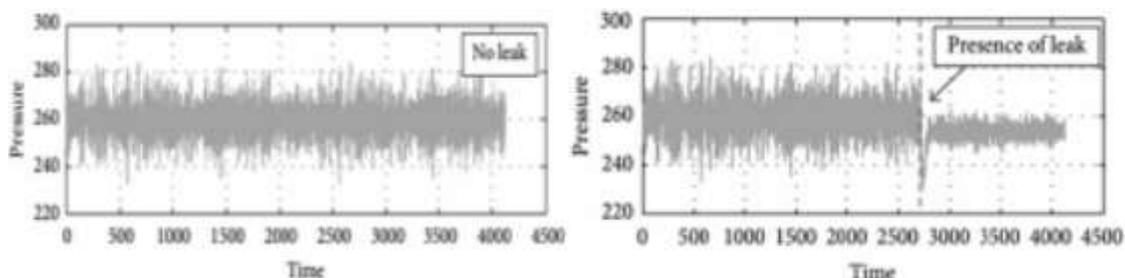
Обсуждаемые сетевые методы отвечают требованиям LWSN. Хотя они построены на микроконтроллере SimpliMote, эти функции могут быть легко включены в более низкие уровни стандартных протоколов WSN, таких как ZigBee. Для проектирования протокола LWSN периодические данные в нашем приложении могут служить маяковым сообщением, данные движения могут служить в качестве короткого предупреждающего сообщения, а утечка - как

длинное предупреждающее сообщение. Чтобы экономить энергию, устройства могут войти в спящий режим и периодически просыпаться каждую секунду. Синхронизация времени может быть достигнута с помощью маяковых сообщений (например, каждые 30 секунд). Все устройства синхронизируют свои таймеры, когда они получают сообщение маяка, затем просыпаются на долю секунды после каждой секунды и остаются активными после заданного интервала (28/29 с) до момента, когда они получают сообщение маяка и повторно синхронизируют их таймер. Узлы могут оставаться активными в специальном режиме и повторно синхронизировать свои таймеры при выходе из специального режима.

2.4 Обработка сигналов для обнаружения утечки. Обнаружение утечки на основе давления

2.4.1 Существуют различные методы обнаружения и локализации утечки на основе давления. Некоторые из этих методов были обобщены в [19] и [20] при анализе вейвлетов и преобразований. Централизованный подход для обнаружения утечек в WSN имеет гораздо более высокую скорость передачи данных и плотность узлов по сравнению с диспетчерским управлением и сбором данных в дополнение к более низким затратам на внедрение [19]. В нашей системе мы используем распределенную реализацию волны отрицательного давления (NPW) в сочетании с машинным обучением (ML) для обнаружения утечки [21]. Распределенные вычисления для обнаружения утечек обеспечивают надежность, повышенную производительность и эффективность работы, поскольку снижают требования к отдельным устройствам и сетевым ресурсам. Основные этапы включают сбор, обработку и распространение критически важных данных в режиме реального времени.

Утечки и всплески в трубопроводе приводят к переходу в волне давления, проходящей вдоль жидкости внутри трубопровода (рисунок 2.11). Точка утечки генерирует две волны переходных процессов одинаковой величины в противоположных направлениях. Из-за высокого давления жидкости утечка вызывает затухание в переходном сигнале, тем самым, вызывая NPW.



а) Давление при отсутствии утечки б) Профиль давления при наличии 60% утечки

Рисунок 2.11 – Давление утечки вдоль трубопровода в зависимости от времени

Медленные и меньшие утечки оказываются более сложными из-за очень небольшой разности давлений между нормальным и аномальным случаем. Положение возмущения указывает время прихода отраженных от утечки сигналов, которые могут быть использованы для измерения времени прохождения сигнала переходного процесса от его источника путем деления трубопровода на зоны. Смежные сенсорные узлы сгруппированы для формирования сообществ узлов, которые приобретают функции NPW и передают в головку кластера (шлюз).

Обнаружение утечки связано с двумя основными аспектами ML. Первая - это проблема классификации шаблона, в которой трассе присваивается определенный класс, основанный на его характеристиках. Второй аспект - подготовка признаков для классификации. В этой статье проблема двоичной классификации находится в фокусе, в котором сигнал давления классифицируется в один из двух классов. Первый класс состоит из «нелеящих» или доброкачественных объектов, которые представляют собой нормальный поток. Второй класс - это «утечка» или недоброкачественный объект, который указывает на наличие ошибки. Для оценки размера утечки решена проблема классификации многоклассов. Полная архитектурная диаграмма, включающая основные модули предлагаемой системы, показана на рисунке 2.12.

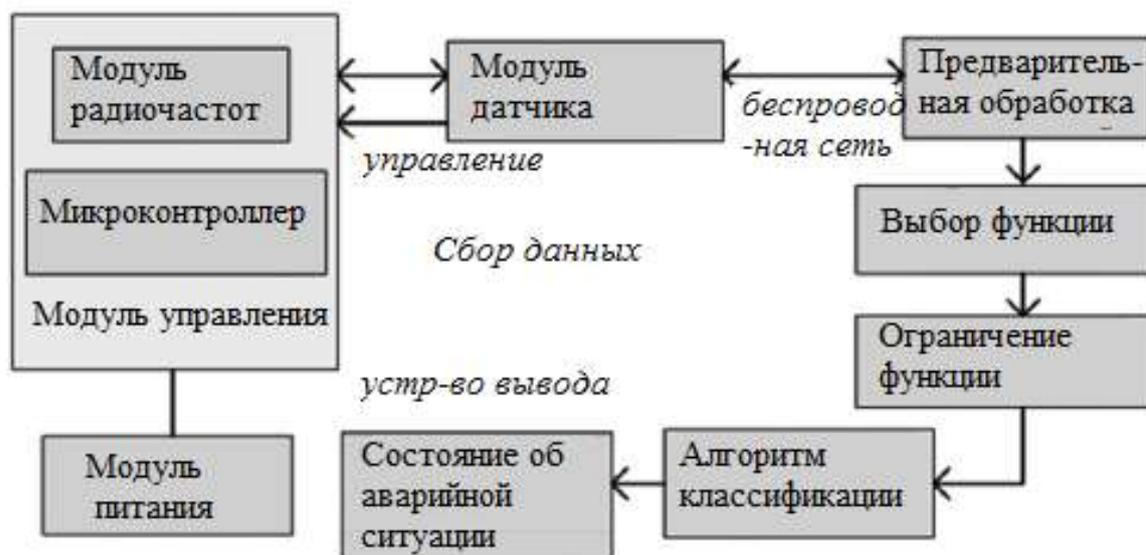


Рисунок 2.12 – Система обнаружения утечки для LWSN

2.4.2 Применение удаленного мониторинга SimpliMote. Удаленное пользовательское приложение контролирует состояние конвейера для своевременного уведомления о тревоге. Приложение также может быть доступно из разных географических мест через Интернет-протокол (IP). Приложение состоит из графического пользовательского интерфейса (рисунок 2.13), серверной базы данных и промежуточного ПО [25]. Панель управления может быть запущена на платформе Windows или Linux, в то время как урезанное приложение работает на смартфоне Android.

С помощью IP экземпляра приложения можно запускать в любой точке мира, а главная панель управления работает в другом удаленном месте. Различные решения принимаются из четырех измерений датчика, а именно: ускорение, заряд батареи, температура и давление.

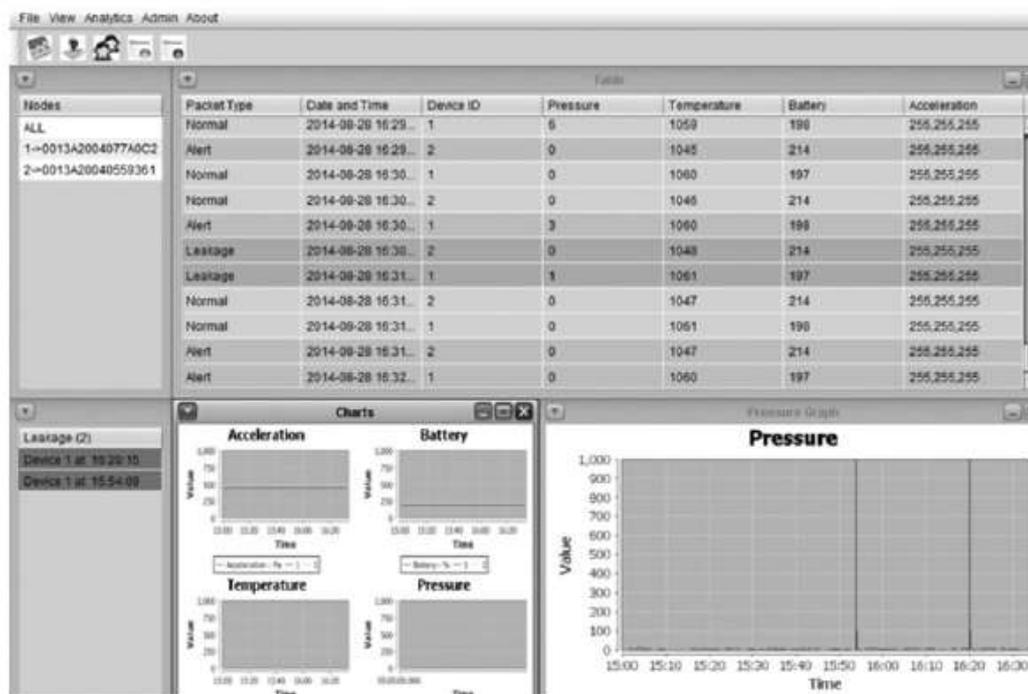


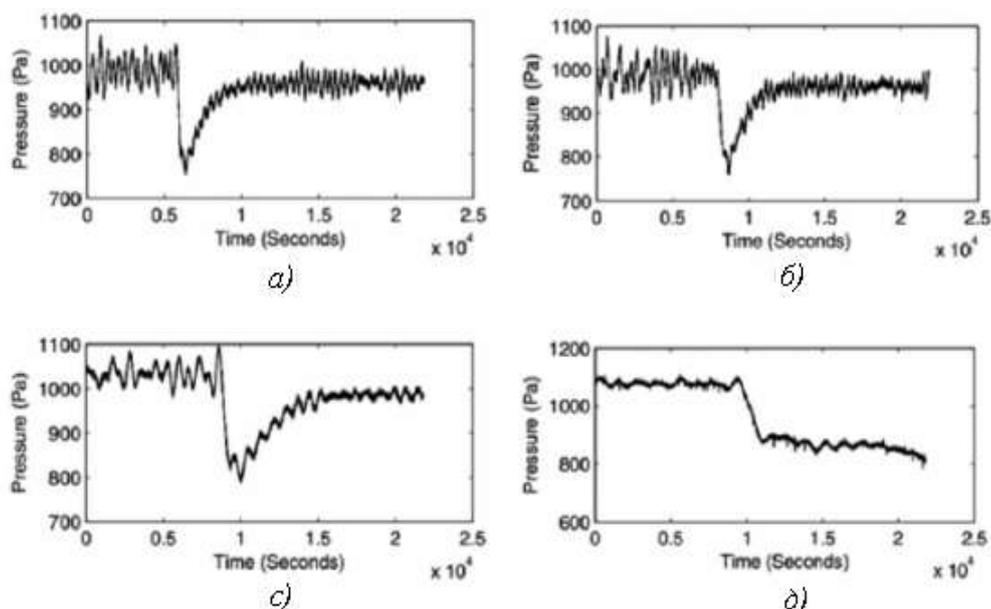
Рисунок 2.13 – Интерфейс приложения SimpliMote

В случае падения давления большие объемы данных, отправленных с устройства, напрямую направляются в экземпляр алгоритма распределенного обнаружения утечки, выполняемый в MATLAB. Также контролируются аномалии температуры от -40 до $+80$ °C. Карты включены в приложение. Карты могут быть легко интегрированы в приложение, где координаты предоставляются с помощью первоначальной первоначальной глобальной системы позиционирования, которая сопоставляет ее идентификатору устройства по конвейеру.

2.4.3 Для проверки предложенной системы обнаружения утечки размещен испытательный стенд, состоящий из трубопровода диаметром 3 дюйма. Двигатель и резервуар резервуара используются для подачи сжатой текучей среды в трубопровод. Пять отдельных клапанов (0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 дюйма) в макете используются для создания искусственных утечек. Датчики Honeywell [26] используются в качестве датчиков давления, отправляющих данные с двумя устройствами шлюза и единым устройством распространения данных.

В качестве первого шага, декомпозиция третьего уровня выполняется с использованием daubechies wavelet для удаления шума.

С увеличением размера утечки прогиб кривой давления становится заметным, поэтому большие утечки сравнительно легко обнаружить, чем меньше. Профили давления для клапанов создания искусственной утечки показаны на рисунке 2.14.



При утечке давления в процентном соотношении: а) 25%, б) 50%, в) 75%, г) 100%

Рисунок 2.14 – Графики утечки по классификации

Всего было проведено 10 экспериментов с 350 пробными временными сигналами утечки давления, собранными для каждого клапана. Образец каждого класса помечен соответствующим образом. Каждое устройство в сети контролирует уменьшенные функции (среднее значение, дисперсию, энтропию и PSD), необходимые для обнаружения утечки и оценки размера. В любое время сборщик данных каждого устройства вычисляет измерение каждой функции в течение 1 мин с интервалом утечки 30 с. Затем трассы делятся на тренировки (y_i target label) и тестовые наборы (x_i input feature vector).

2.5 Программное обеспечение сигнальных микроконтроллеров TMS320 в интегрированной среде CCS для цифрового управления системы ПЧ-АД

2.5.1 Структура аппаратной части системы ПЧ-АД. Аппаратная структура системы преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ—АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР), построенная на базе классического мостового шестиключевого инвертора напряжения на IGBT-транзисторах или интеллектуальных силовых модулях, представлена на рисунке 2.15.

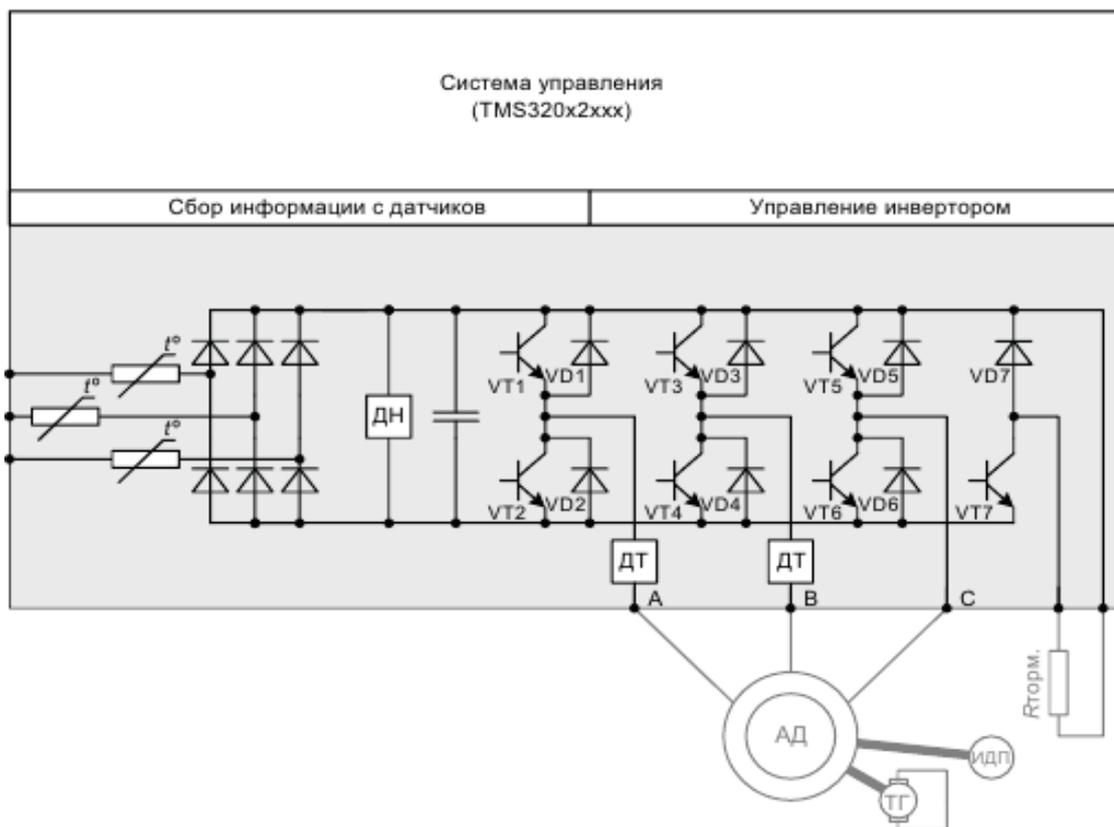


Рисунок 2.15 – Структурная система ПЧ-АД

Система управления реализуется на сигнальном микроконтроллере и обеспечивает формирование ШИМ-сигналов управления шестью ключами на базе многоканального ШИМ-генератора менеджера событий с высокой несущей частотой — до 5—10 кГц. Обратные связи по току фазы А и В и напряжению на звене постоянного тока (ЗПТ) реализуются с помощью датчиков электрических величин (например, на элементах Холла компенсационного типа), выходные сигналы которых вводятся в контроллер через АЦП. Ток в фазе С измерять не требуется, так как его можно вычислить по первому закону Кирхгофа из уравнения:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.1)$$

Информация о скорости двигателя заводится с тахогенератора или с квадратурного импульсного датчика положения ротора.

Все расчеты в системе управления должны выполняться за один период ШИМ, который является интервалом дискретизации системы управления с периодом $T_{ШИМ}$. Работоспособность системы управления в отсутствие реального преобразователя частоты и двигателя будем обрабатывать на математической модели асинхронного двигателя, запущенной на этом же контроллере. Математическая модель объекта управления (асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором) будет иметь тот же самый интервал квантования.

2.5.2 Математическая модель асинхронного двигателя. Асинхронный двигатель удобно описывать уравнениями двухфазной обобщенной машины.

Статор двигателя представлен двумя ортогонально расположенными обмотками в стационарных координатах α, β с активным сопротивлением R_s и индуктивностью L_s , которая в свою очередь разделяется на индуктивность рассеяния статора $L_s\sigma$ и взаимную индуктивность L_m , связывающую статорную и роторную обмотки. Роторные обмотки имеют активное сопротивление R_r и полную индуктивность L_r и в системе роторных координат d, q описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \\ u_{rd} &= i_{rd} R_r + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ u_{sq} &= i_{rq} R_r + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $u_{rd} = u_{rq} = 0$, так как рассматриваем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Здесь и далее все роторные величины являются приведенными к статору.

Если роторные уравнения представить не во вращающихся со скоростью ротора координатах, а в стационарных — α, β , воспользовавшись координатными преобразованиями $d, q \rightarrow \alpha, \beta$:

$$\begin{aligned} \alpha &= d\cos\theta - q\sin\theta; \\ \beta &= d\sin\theta + q\cos\theta, \end{aligned} \quad (2.3)$$

то уравнения АД запишутся в виде:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \\ 0 &= i_{r\alpha} R_r + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \psi_{r\beta} \omega; \\ 0 &= i_{r\beta} R_r + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \psi_{r\alpha} \omega, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где ω — электрическая скорость вращения ротора.

Необходимо добавить уравнения связи токов и потокосцеплений:

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha};$$

$$\begin{aligned}
\psi_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\
\psi_{r\alpha} &= L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\
\psi_{r\beta} &= L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta},
\end{aligned}
\tag{2.5}$$

и уравнение электромагнитного электрического момента двухфазной машины:

$$M_{\perp} = \psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}. \tag{2.6}$$

Чтобы связать электромагнитный электрический момент двухфазной машины с реальным моментом для уравнения движения, необходимо ввести коэффициенты: преобразования $3/2$, учитывающий переход к трехфазной машине, и p_p — число пар полюсов как коэффициент редукции между электрическими и механическими параметрами. Тогда недостающие уравнения запишем в виде:

$$\begin{aligned}
M_{\text{мех}} &= \frac{3}{2} p_p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}); \\
M_{\text{мех}} - M_c &= J \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt},
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

где J — момент инерции двигателя с механизмом; $\omega_{\text{мех}}$ — механическая скорость вращения вала двигателя.

Данные уравнения определяют поведение АД в физических единицах, однако при создании систем управления удобно переходить к относительным единицам, так как в этом случае система легко представляется математически в микроконтроллерах, оперирующих с числами с фиксированной точкой, поскольку диапазон изменения параметров не сильно зависит от мощности конкретной системы.

Выбор систем относительных единиц производят по-разному в зависимости от типа двигателя. Для асинхронного двигателя в мировой практике устоялась система относительных единиц, связанная с амплитудными значениями фазных величин. Она имеет следующие основные преимущества:

- все сопротивления и индуктивности в двухфазной и трехфазной системах совпадают;
- совпадают значения фазных токов и напряжений двухфазной и трехфазной систем;
- мощность или момент легко переводятся от двухфазной системы в трехфазную и обратно через коэффициент $3/2$.

Запишем выражения для базовых величин. Базовое напряжение равно амплитуде фазного напряжения двигателя:

$$U_{\delta} = U_{\phi.\text{НОМ}}\sqrt{2}. \quad (2.8)$$

Базовое значение тока вычисляется по формуле:

$$I_{\delta} = I_{\phi.\text{НОМ}}\sqrt{2}. \quad (2.9)$$

Базовая электрическая скорость равна синхронной круговой частоте:

$$\omega_{\delta} = 2\pi f_{\text{НОМ}}. \quad (2.10)$$

Из указанных величин можно рассчитать производные базовые величины сопротивление:

$$R_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{I_{\delta}}, \quad (2.11)$$

индуктивность:

$$L_{\delta} = \frac{R_{\delta}}{\omega_{\delta}}, \quad (2.12)$$

потокосцепление:

$$\psi_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\omega_{\delta}}, \quad (2.13)$$

МОМЕНТ:

$$M_{\delta} = \psi_{\delta} I_{\delta} = \frac{U_{\delta} I_{\delta}}{\omega_{\delta}}, \quad (2.14)$$

МОЩНОСТЬ:

$$P_{\delta} = U_{\delta} I_{\delta}. \quad (2.15)$$

Переведем последовательно уравнения асинхронного двигателя в относительные единицы. Для (2.4) необходимо разделить обе части уравнения на $U_{\delta} = I_{\delta} R_{\delta} = \psi_{\delta} \omega_{\delta}$, а потом заменить переменные в физических единицах на переменные в относительных:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha}^* &= i_{s\alpha}^* R_s^* + \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{s\alpha}^*}{dt}; \\ u_{s\beta}^* &= i_{s\beta}^* R_s^* + \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{s\beta}^*}{dt}; \\ 0 &= i_{r\alpha}^* R_r^* + \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{r\alpha}^*}{dt} + \psi_{r\beta}^* \omega^*; \\ 0 &= i_{r\beta}^* R_r^* + \frac{1}{\omega_{\delta}} \frac{d\psi_{r\beta}^*}{dt} - \psi_{r\alpha}^* \omega^*. \end{aligned} \quad (2.16)$$

В уравнениях (1.5) следует разделить обе части на базовое потокосцепление $\Psi_{\delta} = L_{\delta} I_{\delta}$, и можно произвести замену переменных на относительные:

$$\begin{aligned}
\psi_{s\alpha}^* &= L_s^* i_{s\alpha}^* + L_m^* i_{s\alpha}^*; \\
\psi_{s\beta}^* &= L_s^* i_{s\beta}^* + L_m^* i_{s\beta}^*; \\
\psi_{r\alpha}^* &= L_r^* i_{r\alpha}^* + L_m^* i_{r\alpha}^*; \\
\psi_{r\beta}^* &= L_r^* i_{r\beta}^* + L_m^* i_{r\beta}^*.
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

Уравнение момента:

$$M_{\perp}^* = \psi_{s\alpha}^* i_{s\beta}^* - \psi_{s\beta}^* i_{s\alpha}^*. \tag{2.18}$$

Уравнения механики (2.7) запишем через электрические величины. Для этого сначала определим понятие базовой механической скорости, равной скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{\text{мех.б}} = \frac{2\pi f_{\text{НОМ}}}{p_p}. \tag{2.18}$$

Электрическая и механическая скорости связаны, через число пар полюсов, производя преобразования получим:

$$\omega^* = \omega_{\text{мех}}^*, \tag{2.19}$$

т.е. в относительных величинах электрическая скорость равна механической. Это логично, так как 100 % номинальной электрической скорости всегда будет соответствовать 100 % номинальной механической.

Преобразуем уравнение второго закона Ньютона, заменив все механические величины электрическими. В выражении после преобразований появится электрический момент инерции, т.е. момент инерции механизма, приведенный к электрической скорости двухфазной машины.

Если теперь заменить физические электрические момент и скорость на момент и скорость в относительных единицах, можно получить выражение, разделив которое на ω_6^2 можно получить результирующее выражение второго закона Ньютона в относительных единицах для электрических величин:

$$M_{\perp}^* = j^* \frac{1}{\omega_6} \frac{d\omega^*}{dt}. \tag{2.20}$$

Во всех уравнениях перед операцией дифференцирования встречается коэффициент $\frac{1}{\omega_6} = T_6$, являющийся базовым временем. Он представлен в физических единицах и является согласующим между величинами, представленными в относительных единицах, и физическим временем — dt, в котором записаны приведенные уравнения.

Для того чтобы решать уравнения (2.16), (2.17), (2.18) и (2.20) в микроконтроллере и имитировать тем самым работу асинхронного двигателя для создания вокруг работающей модели системы управления двигателем, необходимо записать эти уравнения в форме Коши, когда все производные переносятся в левую часть:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{s\alpha}^*}{dt} &= \omega_6(u_{s\alpha}^* - i_{s\alpha}^* R_s^*); \\
 \frac{d\psi_{s\beta}^*}{dt} &= \omega_6(u_{s\beta}^* - i_{s\beta}^* R_s^*); \\
 \frac{d\psi_{r\alpha}^*}{dt} &= \omega_6(-i_{r\alpha}^* R_r^* - \psi_{r\beta}^* \omega^*); \\
 \frac{d\psi_{r\beta}^*}{dt} &= \omega_6(-i_{r\beta}^* R_r^* + \psi_{r\alpha}^* \omega^*).
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

По известным потокосцеплениям после преобразования системы (2.17) производится расчет токов по известным потокосцеплениям:

$$\begin{aligned}
 i_{s\alpha} &= -\frac{L_r}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{r\alpha}; \\
 i_{s\beta} &= -\frac{L_r}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{s\beta} + \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{r\beta}; \\
 i_{r\alpha} &= -\frac{L_s}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{s\alpha}; \\
 i_{r\beta} &= -\frac{L_s}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{r\beta} + \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \psi_{s\beta}.
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Полученные уравнения можно решать, заменив dt на $\Delta t = T_{ШИМ}$, тогда для любого периода ШИМ (интервала квантования для разрабатываемой системы управления) можно рассчитать изменения переменных состояния, а новое их значение рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \psi_{s\alpha}^{*k} &= \psi_{s\alpha}^{*k-1} + \Delta\psi_{s\alpha}^{*k}(u_{s\alpha}^{*k}, i_{s\alpha}^{*k}, \psi_{s\alpha}^{*k}); \\
 \psi_{s\beta}^{*k} &= \psi_{s\beta}^{*k-1} + \Delta\psi_{s\beta}^{*k}(u_{s\beta}^{*k}, i_{s\beta}^{*k}, \psi_{s\beta}^{*k}); \\
 \psi_{r\alpha}^{*k} &= \psi_{r\alpha}^{*k-1} + \Delta\psi_{r\alpha}^{*k}(\omega^{*k}, i_{r\alpha}^{*k}, \psi_{r\alpha}^{*k}); \\
 \psi_{r\beta}^{*k} &= \psi_{r\beta}^{*k-1} + \Delta\psi_{r\beta}^{*k}(\omega^{*k}, i_{r\beta}^{*k}, \psi_{r\beta}^{*k}).
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Texas Instruments предлагает воспользоваться готовыми моделями двигателя, которые можно загрузить с их сайта в Интернете www.ti.com. ac11 — модель асинхронного двигателя, работающая по описанным выше выражениям. По входным напряжениям и моменту нагрузки позволяет рассчитать поведение реального двигателя — его скорость, положение вала, токи статора. Для более точного решения дифференциальных уравнений АД в

модуле АСІ используется метод «предиктора-корректора», суть которого заключается в предварительном расчете переменных состояния асинхронного двигателя по уравнениям и последующей их коррекцией, позволяющей снизить влияние погрешности расчетов, возникающих из-за квантования по времени.

В системе дифференциальных уравнений АД в модуле АСІ используются коэффициенты $K1—K10$, которые учитывают время дискретизации системы и преобразуют параметры АД из абсолютных значений в относительные.

Расчет этих коэффициентов представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчет коэффициентов

$K_1 = T_s \alpha; \quad K_2 = T_s \omega_\delta; \quad K_3 = T_s \alpha L_m \frac{I_\delta}{\Psi_\delta};$
$K_4 = T_s \alpha \beta \frac{\Psi_\delta}{I_\delta}; \quad K_5 = T_s \beta \frac{\Psi_\delta \omega_\delta}{I_\delta}; \quad K_6 = T_s \gamma;$
$K_7 = T_s \frac{1}{\sigma L_s} \frac{U_\delta}{I_\delta}; \quad K_8 = \frac{3}{2} p \frac{L_m \Psi_\delta I_\delta}{L_r M_\delta}; \quad K_9 = T_s \frac{B}{J}; \quad K_{10} = T_s \frac{p}{J \omega_\delta}.$

Блок АСІ и, его входные и выходные данные представлены на рисунке 2.16 и в таблице 2.2.

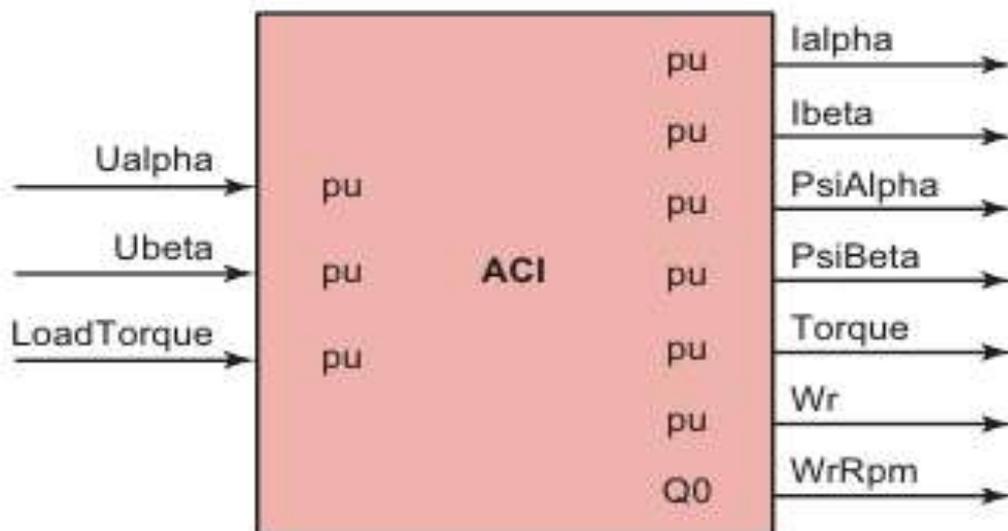


Рисунок 2.16 – Входные и выходные данные модуля АСІ

Таблица 2.2 – Данные модуля АСІ модели АД с короткозамкнутым ротором

Параметр	Параметр АД	Параметр АД в программе
Напряжение статора: По оси α По оси β	$u_{s\alpha}^*$ $u_{s\beta}^*$	Ualpha Ubeta
Момент нагрузки (сопротивление)	M_c^*	LoadTorque
Ток статора: По оси α По оси β	$i_{s\alpha}^*$ $i_{s\beta}^*$	Ialpha Ibeta
Потокосцепление ротора: По оси α По оси β	$\psi_{r\alpha}^*$ $\psi_{r\beta}^*$	PsiAlpha PsiBeta
Момент двигателя	M_{\perp}^*	Torque
Скорость ротора двигателя	ω^*	Wr

Кроме того, требуется задать в качестве параметров сопротивления, индуктивности, число пар полюсов, момент инерции и значения всех базовых величин.

2.5.3 Принципы частотного регулирования. В современных преобразователях частоты системы управления строятся на контроллерах, программно реализующих различные способы управления. Законы управления являются интеллектуальной собственностью фирм— производителей преобразовательной техники и в каждом конкретном случае реализуются по-разному. Детали реализации не разглашаются. В настоящее время устоялось четыре основных способа частотного регулирования, каждый из которых может быть реализован во множестве вариантов.

Различают скалярное управление, векторное управление по потокосцеплению ротора, частотно-токовое управление и прямое управление моментом.

Скалярное управление реализуется во всех современных преобразователях как базовая структура системы управления. В этом случае на двигатель подается напряжение заданной частоты, при этом преобразователь не регулирует значения токов фаз или момент двигателя в динамике. Существуют скалярные системы управления, которые имеют положительную связь по току фазы (с компенсацией скольжения) или замкнутые по скорости, что в статике при плавном изменении момента нагрузки позволяет получать характеристики, подобные имеющимся у систем векторного управления асинхронного двигателя.

В системах векторного управления (СВУ), построенного на базе известной системы «Трансвектор» [7], разработанной фирмой Siemens,

система управления вычисляет положение потокосцепления ротора двигателя и контролирует в статоре две составляющие тока: одну для поддержания потокосцепления ротора, а другую для создания момента. В этом режиме АД становится похож на машину постоянного тока, для которого можно, применяя методы последовательной коррекции и подчиненного регулирования, создать контур момента и контур скорости.

Существуют датчиковые и бездатчиковые СВУ. Здесь и далее эти термины определяют наличие или отсутствие датчика положения вала двигателя или тахогенератора. Вычисление положения потокосцепления ротора системой управления проще, когда известна скорость или угловое положение ротора, но его можно вычислить и ограничившись показаниями токов фаз и фазных напряжений (так работают бездатчиковые системы). Однако при существенном снижении частоты уменьшается фазное напряжение и ЭДС двигателя, и при частоте ниже 5 Гц система управления уже не может вычислить все необходимые ей параметры. Систему управления размыкают и переходят к частотно-токовому управлению.

На малых частотах в бездатчиковых системах применяют частотно-токовое регулирование, когда с помощью инвертора напряжения формируют в фазах двигателя не напряжение, а ток. Значение тока контролируют посредством обратных связей.

Характеристики АД при питании от источника тока (инвертора напряжения с обратными связями по току) получаются жесткими, двигатель нельзя перегрузить по току увеличением нагрузки, так как независимо от скольжения ток двигателя поддерживается постоянным. В частотно-токовом режиме бездатчиковые системы работают на частотах ниже 5 Гц, а при увеличении скорости, когда ЭДС двигателя становится различной, снова переходят к структуре векторного бездатчикового управления.

Особняком стоит метод прямого управления моментом, который активно противопоставляется векторному управлению фирмой АВВ. В отличие от СВУ прямое управление момента работает со статорными уравнениями двигателя. По модели двигателя каждый раз рассчитывается требуемое состояние вектора напряжения статора, необходимое для поддержания заданного момента.

В развитии теории векторного управления большую роль сыграла разработка фирмой Siemens системы «Трансвектор». Эта система построена напрямую измерении вектора потока в воздушном зазоре датчиками Холла.

С помощью математических преобразований, используя измеренный поток и токи статора, вычисляют потокосцепление ротора и его угловое положение. Контроль тока статора ведется по двум составляющим, одна из которых задает потокосцепление, а другая — момент.

Для описания асинхронного двигателя используются уравнения в ортогональной системе координат x , y , вращающихся со скоростью ω_k , которые запишутся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
u_{sx} &= i_{sx}R_s + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_k\psi_{sy}; \\
u_{sy} &= i_{sy}R_s + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_k\psi_{sx}; \\
0 &= i_{rx}R_r + \frac{d\psi_{rx}}{dt} - (\omega_k - \omega)\psi_{ry}; \\
0 &= i_{ry}R_r + \frac{d\psi_{ry}}{dt} + (\omega_k - \omega)\psi_{rx}; \\
M_{\perp} &= \frac{L_m}{L_r}(\psi_{rx}i_{sy} - \psi_{ry}i_{sx}),
\end{aligned} \tag{2.24}$$

где ω_k и ω – электрические скорости вращения координатной системы x, y и ротора двигателя.

Координаты x, y следует расположить так, чтобы ось x была сонаправлена с вектором потокосцепления ротора (при этом $\psi_{ry} = 0$), а регулирование следует производить при $\psi_r = const$, тогда уравнения роторной цепи упростятся:

$$\begin{aligned}
0 &= i_{rx}R_r; \\
0 &= i_{ry}R_r + (\omega_k - \omega)\psi_{rx}.
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Для анализа полученного результата следует записать выражения потокосцеплений ротора асинхронного двигателя:

$$\begin{aligned}
\psi_{rx} &= L_r i_{rx} + L_m i_{sx}; \\
\psi_{ry} &= L_r i_{ry} + L_m i_{sy}.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Согласно (2.25) $i_{rx} = 0$, при этом с учетом $\psi_{ry} = 0$ выражения (2.26) упрощаются:

$$\begin{aligned}
\psi_{rx} &= L_m i_{sx}; \\
i_{ry} &= -\frac{L_m}{L_r} i_{sy}.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Ток статора по оси x однозначно определяет потокосцепление. Тогда уравнение момента двигателя при $\Psi_{ry} = 0$ примет вид:

$$M = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rx} i_{sy}. \tag{2.28}$$

Это формулируется таким образом основной принцип векторного управления: с помощью тока статора по оси x необходимо установить поле

ротора, а по оси y задавать ток, определяющий момент, развиваемый двигателем. Результирующая структура СВУ показана на рисунке 2.17.

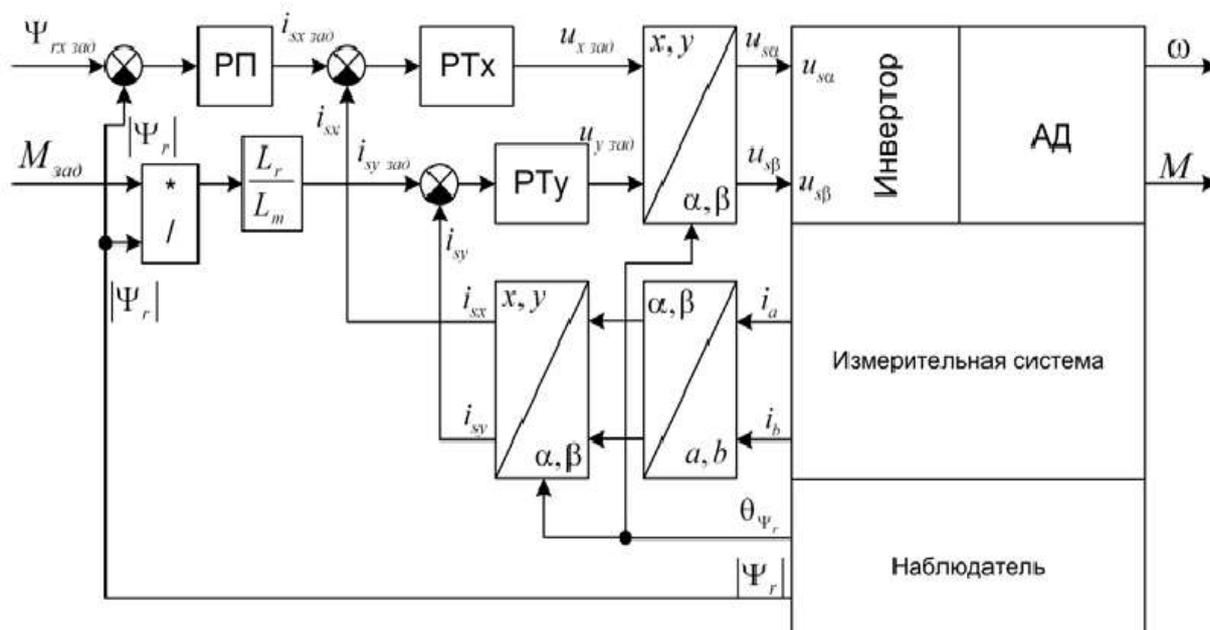


Рисунок 2.17 – Структура системы векторного управления

В рамках данной диссертационной работы будет исследоваться упрощенная структура, изображенная на рисунке 2.18, из которой будет исключен регулятор потока, а регулятор момента представлен регулятором тока по оси y .

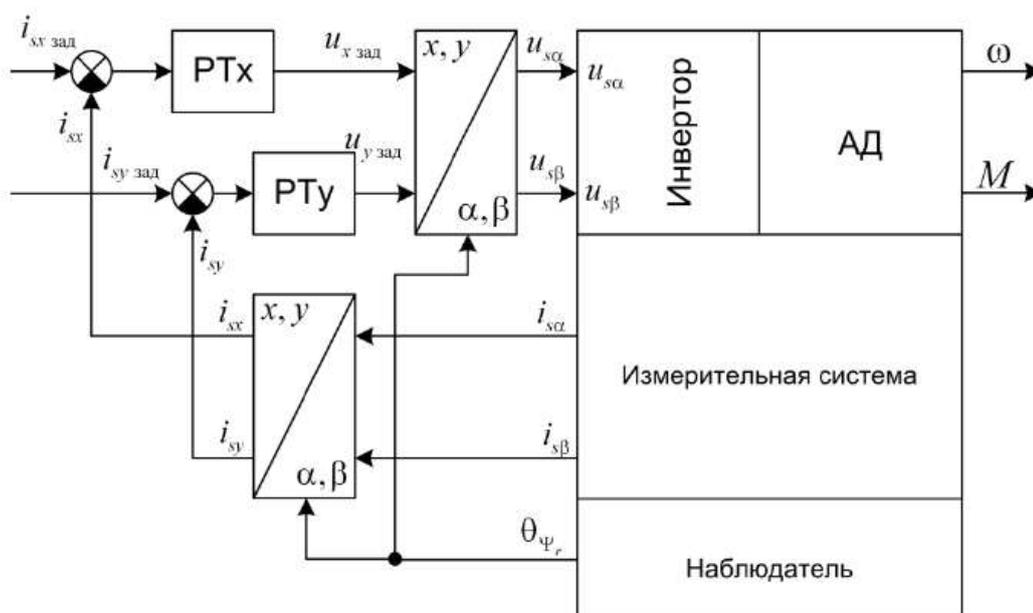


Рисунок 2.18 – Упрощенная структура системы векторного управления

Структурная схема (рисунок 2.17) содержит регуляторы потокосцепления, момента (тока статора по оси y) и тока статора по оси x ; блок координатных преобразований из x, y , связанных с потокосцеплением ротора, в неподвижные координаты α, β , связанные со статором; инвертор, работающий с заданиями напряжений в координатах α, β ; АД; измерительную систему; наблюдатель, который по измеренным значениям электрических, механических и термических величин производит вычисление амплитуды $|\psi_r|$ и положения θ_{ψ_r} потокосцепления ротора АД; блоки координатных и фазных преобразований.

Блок фазных преобразований позволяет по измеренным токам двух фаз определить токи двухфазной эквивалентной машины в стационарных координатах α, β . Блоки координатных преобразований осуществляют перерасчет ортогональных составляющих вектора тока из одних координатных осей в другие.

Как было отмечено выше будет исследоваться упрощенная структура, изображенная на рисунке 2.18, из которой будет исключен регулятор потока, а регулятор момента представлен регулятором тока по оси y . В этом случае получим уравнения и структуру простейшего наблюдателя положения потокосцепления ротора по измеренным токам статора и скорости вращения ротора.

Уравнения роторной цепи в координатах α, β описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} 0 &= i_{r\alpha} R_r + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \psi_{r\beta} \omega, \\ 0 &= i_{r\beta} R_r + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \psi_{r\alpha} \omega. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Запишем ток ротора через потокосцепление ротора и ток статора:

$$\begin{aligned} i_{r\alpha} &= \frac{\psi_{r\alpha}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{s\alpha}, \\ i_{r\beta} &= \frac{\psi_{r\beta}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{s\beta}, \end{aligned} \quad (2.30)$$

Подставляя (2.30) в (2.29), находим математическое описание наблюдателя потокосцепления ротора в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_r \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \psi_{r\alpha} &= L_m i_{s\alpha} - T_r \omega \psi_{r\beta}, \\ T_r \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \psi_{r\beta} &= L_m i_{s\beta} + T_r \omega \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Структура наблюдателя потокосцепления ротора в датчиковой системе векторного управления приведена на рисунке 2.19.

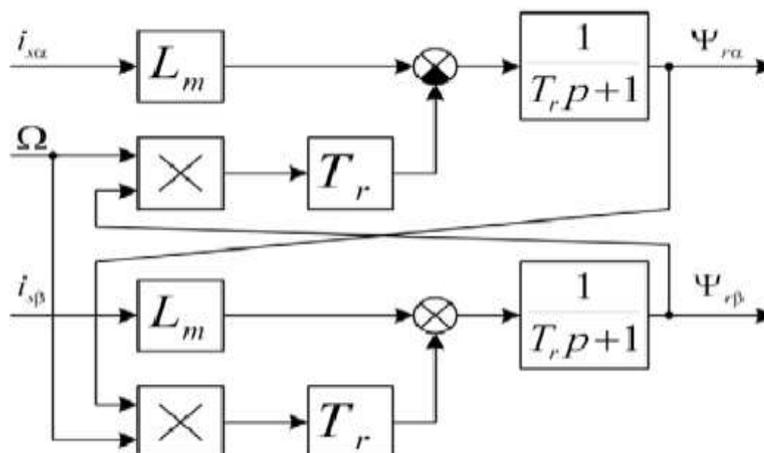


Рисунок 2.19 – Структура наблюдателя потокосцепления ротора в датчиковой системе векторного управления

2.5.4 В данном проекте исследуется датчиковый вариант системы векторного управления (СВУ) асинхронным двигателем. Так как некоторые процессы меняются быстрее, чем ССС успевают передавать и отображать их (например, ток статора, положение), будем использовать специальные модули для быстрого сбора и отображения данных. В проекте используются два модуля:

специальный буфер для хранения данных и модуль вывода данных на ножки микроконтроллера в виде ШИМ:

- быстро меняющиеся данные собираются в специальный программный модуль — DATALOG, и могут быть быстро визуализированы пользователем;
- в случае использования платформы на базе eZdsp™ TMS320x281x, которая имеет два менеджера событий (EVMA, EVMB), возможно применение модуля PWM DAC, который использует таймер № 3 второго менеджера событий (EVMB), и данные, переданные в этот модуль, могут быть выведены на соответствующие выходы микроконтроллера в виде ШИМ с частотой 30 кГц для наблюдения с помощью осциллографа.

Программа состоит из двух основных потоков. В фоновом потоке происходит инициализация программных модулей, периферийных модулей, а также конфигурация и разрешение прерывания от таймера 1. После этого фоновый поток попадает в бесконечный цикл и не выполняет никаких действий. Запущенное прерывание от первого таймера содержит несколько программных шаблонов, которые можно подключать с использованием команд условной компиляции. В файле build.h определяется уровень компиляции проекта.

На первом этапе система управления будет представлена достаточно просто и будет исследована только модель асинхронного двигателя.

Рабочая область workspace (*.wks) и файл проекта (*.pjt) для исследования поведения системы с применением библиотеки «виртуальной» плавающей точки IQmath находится в папке .. \aci3_3sim_281x\cIQmath\build. для быстрого доступа к демо-версии с использованием предустановленного рабочего пространства необходимо загрузить файл 3sim_281x_CCS2x.wks.

Необходимо иметь в виду, что хотя драйверы «F28xx XDS510USB Emulator (Spectrum Digital)>> и «sdgo2812eZdsp» для TMS320F2812 eZdsp не отличаются друг от друга, при открытии рабочего пространства может появиться предупреждающее сообщение о том, что производится попытка загрузить рабочее пространство с отличным от исходного драйвером. Данное сообщение можно игнорировать.

Загружается рабочее пространство. Файл рабочей области содержит начальную информацию всего проекта и его окружения, такую как графические окна, окно просмотра переменных, точки останова и пр. Это облегчает действия пользователя при переходе от одного этапа к другому. Например, после перекомпиляции проекта, вместо того чтобы создавать новый набор переменных каждый раз между отладками, можно просто переключать вкладку в окне просмотра watch window на соответствующий уровень.

Загрузившееся пространство автоматически открывает нужный проект и показывает все файлы, относящиеся к проекту на вкладке FileView. Обратите внимание на наличие графиков справа и на наличие окна просмотра переменных, предварительно сконфигурированных для исследования системы на каждом уровне компиляции.

В файле build.h должен быть установлен первый уровень компиляции рисунок 2.20.

```
#define BUILDLEVEL LEVEL1
```

Рисунок 2.20 – Определение первого уровня построения проекта

Из меню Project выбираем «Rebuild aH» или воспользуемся соответствующим ярлыком на панели инструментов, чтобы откомпилировать программу и загрузить ее память eZdsp. Выполните команду из меню «Debug -> Go Main». Установите точку останова на любой строке внутри первого уровня компиляции. Запустите программу командой Run из меню Debug или используя кнопку быстрого доступа.

2.6 Исследование модели асинхронного двигателя в режиме скалярного управления

2.6.1 Предложенная для исследования программа содержит флаг разрешения работы системы — EnableFlag. Пока этот флаг не будет установлен, программа не сможет преодолеть приведенный на рисунке 2.21

участок кода. Для запуска расчета системы необходимо установить значение EnableFlag=1, что можно сделать, используя окно «watch window».

```
while (EnableFlag==FALSE)
{
    BackTicker++;
}
```

Рисунок 2.21 – Программная ловушка — флаг на разрешение работы

На первом уровне компиляции исследуется поведение модели асинхронного двигателя, структура системы которой показано в табл. 3.1. Вы можете задавать скорость вращения вектора напряжения и значение его компонент в координатах d и q .

Все модули фазных и координатных преобразований разработаны в осях (d,q) , что в действительности означает вращающуюся систему координат и это никак не связано с общепринятой терминологией. Асинхронный двигатель в данной работе регулируется в осях (x,y) , а от реальной системы координат (d,q) отличается только фазовым сдвигом.

В скалярной системе управления основным регулируемым параметром является скорость поля статора $\omega_{0эл}$, которая определяет скорость вращения ротора ω_r машины. Скорость поля $\omega_{0эл}$ пропорциональна частоте напряжения f_s , питающего обмотку статора. Поэтому для изменения скорости поля необходимо изменить f_s . При этом следует заботиться об амплитуде напряжения: при уменьшении f_s для сохранения магнитного потока на некотором, например, номинальном уровне следует изменять $E_s \approx U_s$ так, чтобы:

$$U_s/f_s = const.$$

Структура проекта на первом уровне компиляции приведена на рисунке 2.22.

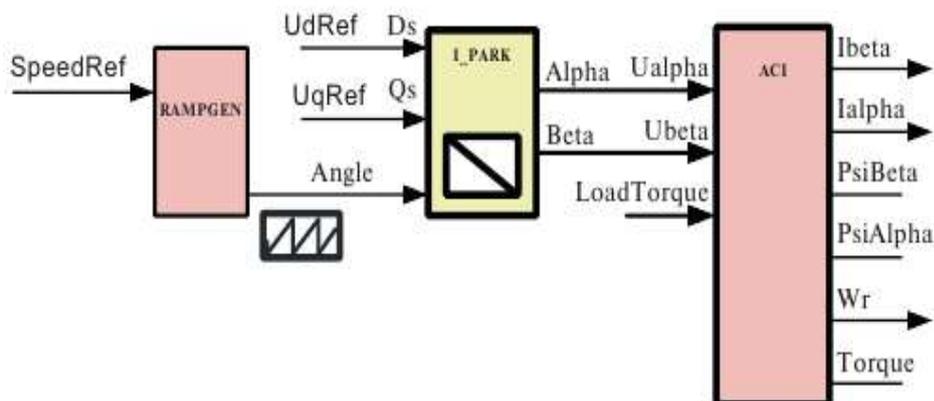


Рисунок 2.22 – Структура проекта на первом уровне компиляции

Для реализации данного закона управления используется модуль vhzprof (рисунок 2.23).

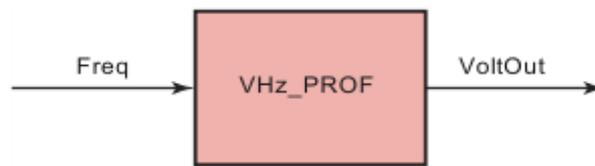


Рисунок 2.23 – Модуль VHzPROF

Поскольку система управления реализована в осях (x, y) , то задание по оси y равно нулю $U_y = 0$, а по оси x равно амплитуде питающего напряжения и определяется по формуле:

$$U_x = U_{max} = VoltOut, \quad (2.31)$$

где *VoltOut* — выход модуля vhzprof.

Поскольку дискретная математическая модель асинхронного двигателя реализована в неподвижных осях (α, β) , необходимо преобразовать систему в осях (x, y) в систему в осях (α, β) . Для данного преобразования служит модуль I park (рисунок 2.24, обратное преобразование координат).

Данный модуль позволяет переходить из вращающейся системы векторов, например (x, y) , с заданным углом в неподвижную, например (α, β) .

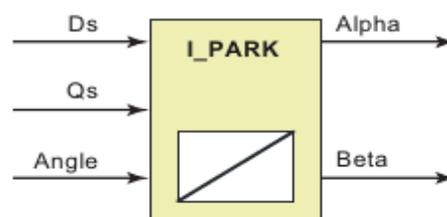


Рисунок 2.24 - Модуль I PARK

Задавая компоненты двух векторов напряжений по осям x и y и угол поворота системы относительно стационарной системы координат α и β , получаем два вектора напряжения α и β , которые определяют положение системы (x, y) . Причем напряжение по оси y устанавливаем в нуль, поскольку ось x системы сонаправлена с потокосцеплением ротора, а напряжение по оси x устанавливаем постоянной величиной, значение которой определяется по заданию скорости двигателя исходя из закона управления. Таким образом, векторы напряжения α и β определяют амплитуду и положение вектора напряжения по оси x в данный момент времени и передаются в модель двигателя в качестве задания.

Текущее положение вектора напряжения по оси x определяется заданием угла положения. Если угол изменяется по линейному закону, то вектор напряжения по оси x вращается относительно неподвижной системы координат, причем скорость изменения угла определяет скорость вращения вектора напряжения. Вспомним, что вектор напряжения сонаправлен с потокосцеплением ротора и определяет его положение в данный момент времени, поэтому скорость изменения угла определяет скорость ротора АД. Поэтому скорость изменения угла положения вектора напряжения по оси x определяется заданием скорости вращения ротора.

Для задания угла и скорости его изменения используется модуль `rg1` (`RAMPGEN`) — модуль опорного пилообразного сигнала с задаваемой частотой (рисунок 2.25). Задание скорости `SpeedRef` определяет частоту генерируемого сигнала, который поступает в модуль `Ipark` в качестве угла вектора напряжения.

Далее векторы напряжения `alfa` и `beta`, полученные из модуля `Ipark`, передаются в модуль `aci1` — модель асинхронного двигателя. По входным напряжениям и моменту нагрузки можно рассчитать поведение реального двигателя — его скорость, положение вала, токи статора. Для расчета параметров в системе координат (α, β) в модуле `ACI` используется метод «предиктора-корректора» для решения дифференциальных уравнений.

Чтобы исследовать работу модели двигателя, следует переключить вкладку окна просмотра переменных на `BUILD1`. Для того чтобы можно было наблюдать поведение двигателя на графиках в режиме реального времени, необходимо включить этот режим.

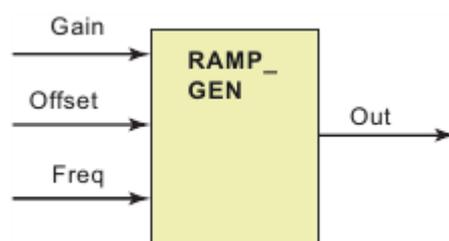


Рисунок 2.25 – Модуль `RAMPGEN`

Для этого нужно снять все точки останова, в меню `debug` выбрать команду `reset CPU`, загрузить программу в микроконтроллер, затем выбрать команду из меню «`Debug -> Real time mode`». Появится диалоговое окно с предупреждением «`Do you want to allow realtime mode switching?: Can't enter realtime mode unless debug events are enabled. Bit 1 of ST1 must be 0`».

Необходимо нажать подтверждение «`Yes`».

После того как выбран режим реального времени, запустите программу командой `Run` из меню `Debug` или используя кнопку быстрого запуска. Для

автоматического обновления графиков в контекстном меню графиков выберите «Continues refresh».

В данной работе все расчеты произведены с использованием библиотеки IQmath. Все физические величины, такие как напряжение, потокосцепление, положение вектора потокосцепления, скорость и момент, приведены в относительных единицах.

Номинальные параметры двигателя задаются в файле parameter.h

Теперь, когда вычисления запущены, можно начинать исследование модели асинхронного двигателя. Задавая величину вектора напряжения и его частоту, имеем возможность имитировать скалярное управление. Вы можете управлять моделью двигателя через окно просмотра переменных, где:

Speed_ref — задание скорости;

VdTesting — тестовое задание напряжения по оси d (x);

VqTesting — тестовое задание напряжения по оси q (y).

Установите нулевое задание скорости. Задайте напряжение по оси $U_d = 0,05$; $U_q = 0$ — помните, что все переменные рассчитываются в относительных величинах, задав число 0,05 о.е., вы задали 5 % номинального напряжения двигателя, что в режиме, когда скорость равна нулю, является достаточным. На графиках можно наблюдать изменение токов статора.

Окно графиков будет автоматически обновляться каждый раз, когда интерфейс JTAG способен запросить данные (рисунок 2.26). Буфер может быть захвачен CCS в любой момент времени, поэтому очевидно появление разорванных участков. Для работы осциллографа (изучите его работу самостоятельно) в продолжительном режиме установите значение `dlog.mode_reset = 2`, для остановки или однократной записи используйте `dlog.mode_reset = 1`.

```
// Define the Induction motor parameters
#define RS 1.723 // Stator resistance (ohm)
#define RR 2.011 // Rotor resistance (ohm)
#define LS 0.166619 // Stator inductance (H)
#define LR 0.168964 // Rotor inductance (H)
#define LM 0.159232 // Rotor inductance (H)
#define P 4 // Number of poles
// Define the mechanical parameters
#define BB 0.0001 //Damping coefficient (N.m.sec/rad)
#define JJ 0.1 //Moment of inertia of rotor mass (kg.m^2)
#define TL 0 // Load torque (N.m)
// Define the base quantites
#define BASE_VOLTAGE 325.269
// Base peak phase voltage (volt)
#define BASE_CURRENT 5 // Base peak phase current (amp)
#define BASE_TORQUE 7.35105194 // Base torque (N.m)
#define BASE_FLUX 0.79616
// Base flux linkage (volt.sec/rad)
#define BASE_FREQ 50 // Base electrical frequency (Hz)
```

Рисунок 2.26 – Определение номинальных параметров двигателя

Период прерывания установлен таким образом, что все необходимые вычисления укладываются в один период. Параметры АД, базовые значения, механические параметры и время дискретизации (частота обчета модели двигателя) можно удобно изменять через заголовочный файл `parameter.h`.

Общая для всех символьная константа для работы с библиотекой «виртуальной» плавающей точки `IQmath GLOBAL_Q` установлена в файле `IQmathLib.h` и равна 24. Таким образом, все переменные в проекте используют формат 8.24.

Задайте напряжение по оси $d = 0,1$ и скорости — 0,5. Наблюдаете на графиках изменение скорости вала двигателя и момента на валу.

Обратите внимание на то, что качественного наблюдения момента двигателя не получается.

График момента, изображенный на рисунке 2.27, содержит разрывные значения. Это связано с тем, что график скорости и момента рисуется по точкам, а не через единый запрос буфера значений, часть точек теряется и не отображается на графике.

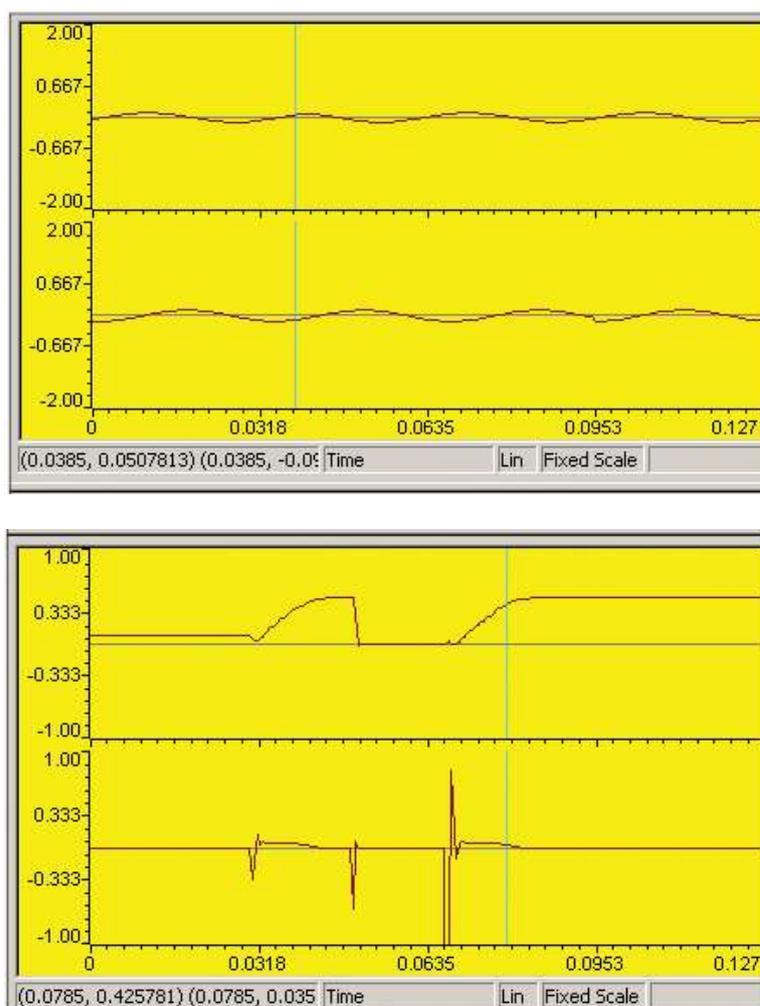


Рисунок 2.27 – Изменение напряжения, тока, скорости и момента

2.6.2 Исследование частотно-токовой системы управления асинхронного двигателя. Настройка ПИ-регулятора тока. В предыдущем пункте исследовали поведение модели двигателя при скалярном управлении. Полученная в результате исследования механическая характеристика представлена на рисунке 2.28.

График механической характеристики построен с использованием средств «View->Graph->Constellation» с соответствующими настройками (рисунок 2.29).

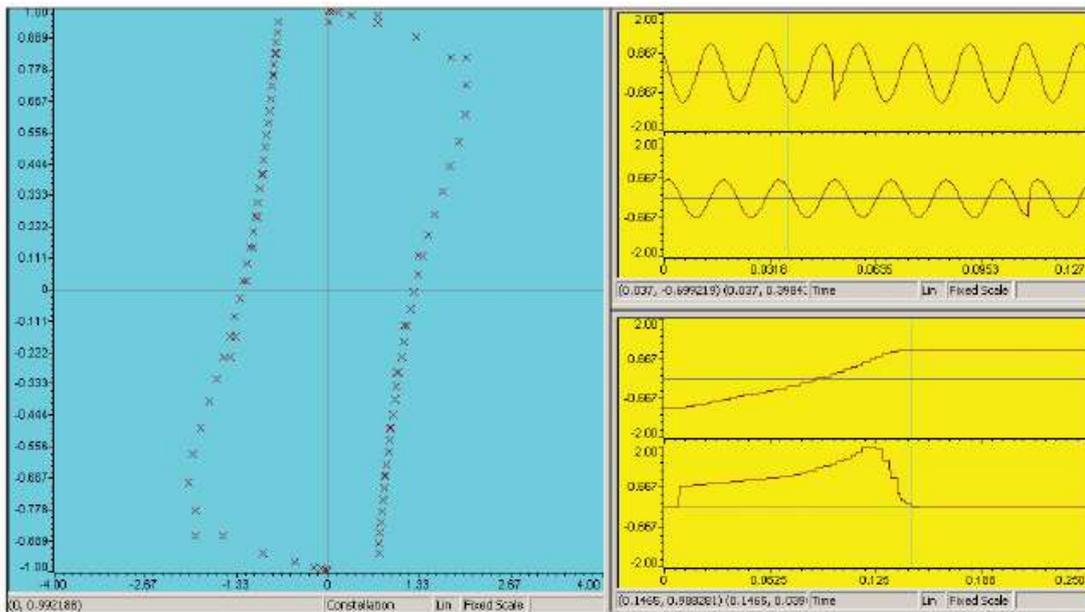


Рисунок 2.28 – Механическая характеристика двигателя

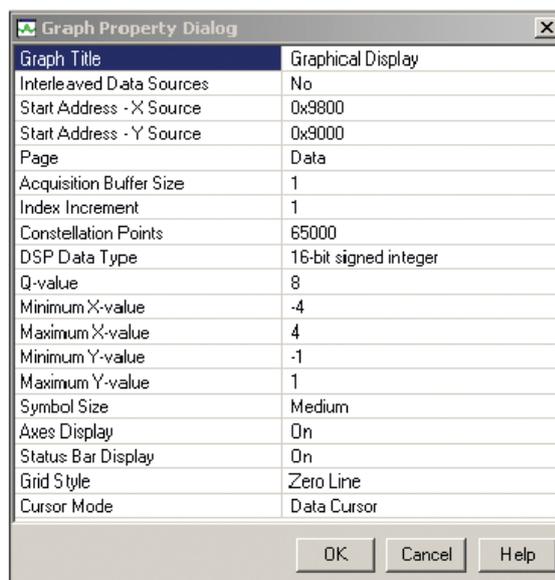


Рисунок 2.29 – Настройки графика для построения механической характеристики

Для перехода к изучению векторной системы управления обратимся к описанию принципов этой системы.

Известно, что при поддержании потокосцепления ротора постоянным, можно управлять моментом машины, задавая ортогональную компоненту тока статора. При реализации этого принципа используют систему, ориентированную по вектору потокосцепления ротора. Для этого используют регулятора тока — один по оси d формирует задание тока так, чтобы потокосцепление ротора оставалось неизменным, и другой по оси q — для формирования моментобразующего тока статора. Для задания ограничения момента и поддержания скорости используют ПИ-регулятор скорости. Общая структурная схема представлена на рисунке 2.30.

Разомкнув систему по углу и заданию токов, можно производить настройку ПИД-регуляторов тока.

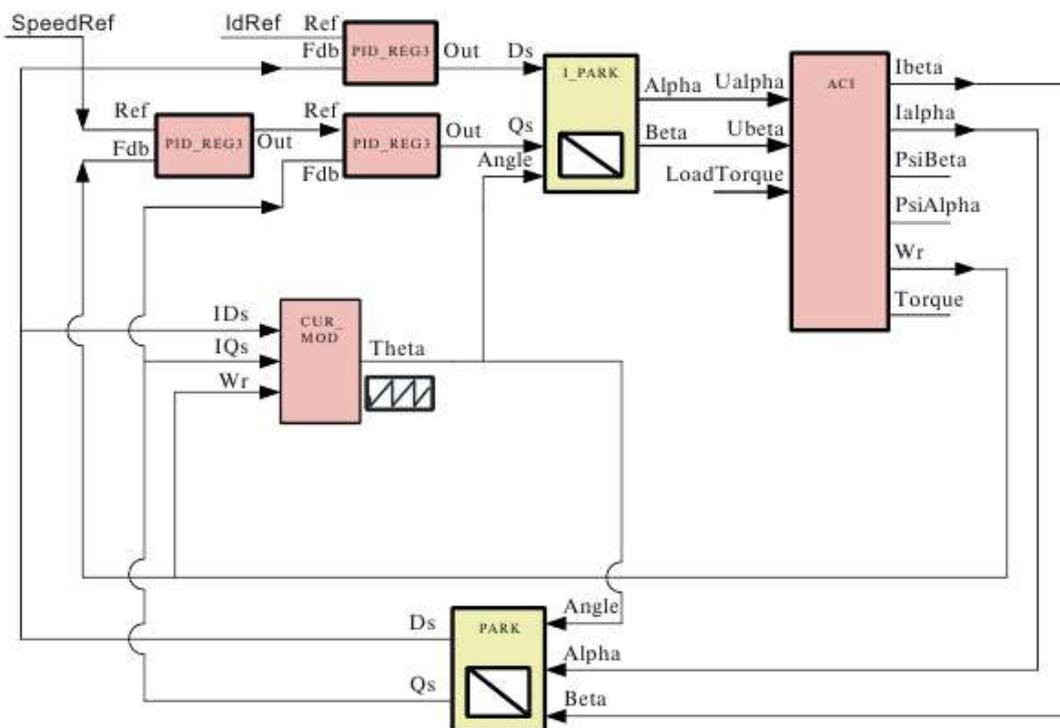


Рисунок 2.30 – Общая структурная схема системы векторного управления

2.6.3 Практическая часть. Программа была скомпилирована с уровнем компиляции 2 (рисунок 2.31). На данном этапе структурная схема соответствует разомкнутой по скорости и положению. Задачей текущего этапа является настройка ПИ-регуляторов тока.

```
#define BUILDLEVEL LEVEL2
```

Рисунок 2.31 – Определение второго уровня построения проекта

Обратите внимание на то, что по флагу EnableFlag запускается осциллограф. Это позволит синхронизировать момент подачи напряжения на статор двигателя с моментом начала записи осциллографа.

Изменяйте значение флага разрешения работы с 0 на 1 и наблюдайте переходный процесс в контуре тока, изображенном на рисунке 2.32. Настраивать ПИД-регулятор тока можно с помощью окна редактирования переменных WatchWindow (рисунок 2.33).

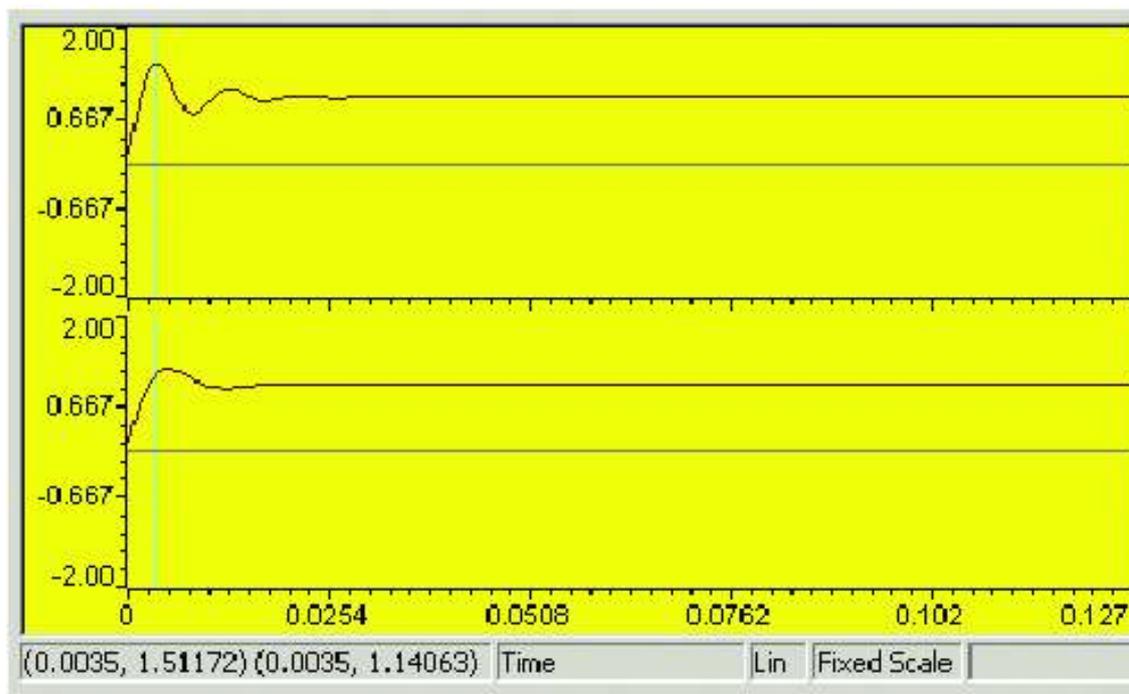


Рисунок 2.32 – Переходный процесс в контуре тока

Name	Value	Type	Radix
EnableFlag	1	unsigned int	unsigned
IsrTicker	377805	unsigned long	unsigned
BackTicker	3488331405	unsigned long	unsigned
SpeedRef	0.0	float	float
IdRef	1.0	float	float
IqRef	1.0	float	float
pid1_id.Kp	0x000B0000	long	hex
pid1_id.Ki	0x02800000	long	hex
pid1_iq.Kp	0x001B0000	long	hex
pid1_iq.Ki	0x00800000	long	hex

Watch Locals Build 1 **Build 2** Build 4 Build 5

Рисунок 2.33 – Процесс настройки ПИД-регуляторов тока

Пример части программы второго уровня построения проекта представлен на рисунке 2.34.

```
if (EnableFlag!=EnableFlag_prev)
{
    dlog.graph_ptr1=(type_data *)dlog.dl_buffer1_adr;
    dlog.graph_ptr2=(type_data *)dlog.dl_buffer2_adr;
    dlog.graph_ptr3=(type_data *)dlog.dl_buffer3_adr;
    dlog.graph_ptr4=(type_data *)dlog.dl_buffer4_adr;
}
if (EnableFlag==0)
{
    pid1_id.Ui=0;
    pid1_iq.Ui=0;
    acil.Ualpha = 0;
    acil.Ubeta = 0;
}
else
{
    acil.Ualpha = ipark1.Alpha;
    acil.Ubeta = ipark1.Beta;
}
```

Рисунок 2.34 – Пример части программы второго уровня построения проекта

Выводы по разделу

Предложено приложение развертывания LWSN для нефтепровода с использованием специальной сенсорной платы SimpliMote с алгоритмами для решения задач создания сетей обнаружения прерываний утечек и маршрутизации высокоприоритетных сообщений с надежной линейной топологией.

Предложен метод эффективного обнаружения событий путем удаления шума на пользовательских узлах, маршрутизации информации при маркировке ее в разные приоритеты и постоянного поддержания сети при обеспечении удаленного мониторинга в реальном времени.

Система управления на базе SimpliMote построена на более мощном микроконтроллере с открытыми периферийными датчиками, а встроенное программное обеспечение может выполнять сложные алгоритмы более эффективно, чем простой узел датчика общего назначения. При этом встроенное приложение включает необходимые функции, включая синхронизацию времени и программные прерывания, необходимые для обработки плавного потока данных и реагирования на критические ситуации.

Исследования системы векторного управления электроприводом по схеме ПЧ-АД в интегрированной компьютерной среде разработки Code Composer Studio на базе сигнального микроконтроллера семейства TMS320x28xxx показывает хорошее качество регулирования.

3 Экспериментальные исследования системы управления магистрального нефтепровода методом регулирования частоты вращения двигателей насосных агрегатов

3.1 Выбор двигателя с помощью упрощенной нагрузочной диаграммы. Построение уточненной диаграммы. Проверка выбора двигателя

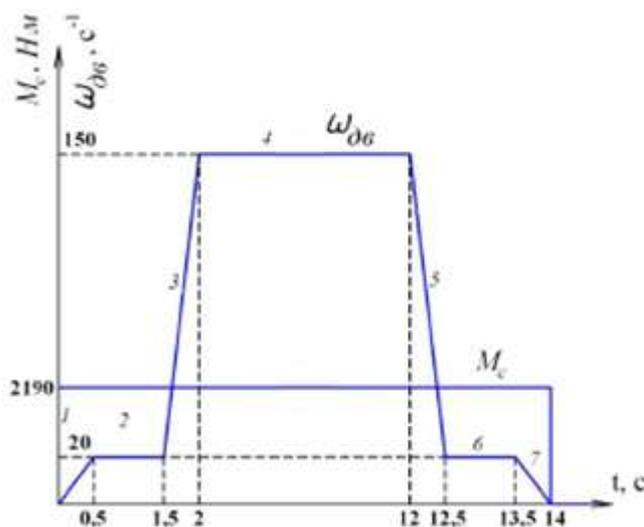


Рисунок 3.1 – Исходная тахограмма и нагрузочная диаграмма

t_1 – время разгона до пониженной скорости (0,5 с)

t_2 – время работы на пониженной скорости (1 с)

t_3 – время разгона с пониженной до повышенной скорости (0,5 с)

t_4 – время работы на повышенной скорости (10 с)

t_5 – время торможения до рабочей скорости (0,5 с)

t_6 – время работы на рабочей скорости (1 с)

t_7 – время торможения (0,5 с)

t_8 – время паузы (15 с)

$t_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^7 t_i + \sum_{i=9}^{15} t_i + t_8$ – время цикла (43 с)

$t_{\text{р}} = \sum_{i=1}^7 t_i + \sum_{i=9}^{15} t_i$ – время работы механизма (28 с)

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{28}{43} = 0,65 \quad (3.1)$$

На главной нефтеперекачивающей станции среднеквадратичный момент двигателей насосных агрегатов варьируется $M_{\text{ср.кв}} = 6 - 10$ кНм. Для дальнейшего расчета установим $M_{\text{ср.кв}} = 7$ кНм.

Установившаяся скорость работы:

$$\omega_{max} = 150 \text{ рад/с}$$

Расчётная требуемая мощность:

$$P_{\text{треб}} = k_3 \cdot \omega_{max} \cdot M_{\text{ср.кв}} = 1,3 \cdot 150 \cdot 7000 = 1,365 \text{ МВт} \quad (3.2)$$

где $k_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса.

На станции функционируют четыре двигателя, один из которых находится в резерве. Распределив, таким образом, мощность между функционирующими двигателями, выберем по условиям выбора: $P_H \geq P_{\text{треб}}$, $\omega_H \geq \omega_{max}$.

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4АН355М4У3. Данные двигателя представлены в табл. 3.1.-3.2.

Таблица 3.1 – Паспортные данные двигателя 4АН355М4У3

P_H , кВт	S_H , %	η_H , кВт	$\cos\varphi_H$	λ_{max}	$\lambda_{п}$	λ_{min}	k_I	$J_{дв}$, кг · м ²
400	1,2	94,5	0,91	2	1,2	0,9	6,5	7

Таблица 3.2 – Параметры схемы замещения

X_μ	В номинальном режиме				При коротком замыкании		
	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	$R''_{2п}$	$X_{кп}$	$R_{кп}$
5,4	0,019	0,11	0,013	0,14	0,039	0,058	0,14

Номинальная скорость вращения двигателя:

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1482}{60} = 155 \text{ рад/с}, \quad (3.4)$$

где $n_H = (1 - S_H) \cdot n_0 = (1 - 0,0012) \cdot 1500 = 1482$ об/мин – номинальная частота вращения двигателя.

$n_0 = 1500$ об/мин – синхронная частота вращения двигателя, при $2p=4$.

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{400 \cdot 10^3}{155} = 2581 \text{ Нм} \quad (3.5)$$

Используя уравнение движения, найдем моменты, развиваемые двигателем на разных участках тахограммы (табл.3.3):

$$M = M_c + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Таблица 3.3 – Моменты на разных участках тахограммы

№ участка	Временной интервал	Расчет моментов
1	$0 \leq t \leq 0,5 \text{ с}$	$M_1 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{20 - 0}{0,5 - 0} = 2542 \text{ Нм}$
2	$0,5 \leq t \leq 1,5 \text{ с}$	$M_2 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{20 - 20}{1,5 - 0,5} = 2190 \text{ Нм}$
3	$1,5 \leq t \leq 2 \text{ с}$	$M_3 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{150 - 20}{2 - 1,5} = 4478 \text{ Нм}$
4	$2 \leq t \leq 12 \text{ с}$	$M_4 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{150 - 150}{12 - 2} = 2190 \text{ Нм}$
5	$12 \leq t \leq 12,5 \text{ с}$	$M_5 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{20 - 150}{12,5 - 12} = -98 \text{ Нм}$
6	$12,5 \leq t \leq 13,5 \text{ с}$	$M_6 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{20 - 20}{13,5 - 12,5} = 2190 \text{ Нм}$
7	$13,5 \leq t \leq 14 \text{ с}$	$M_7 = 2190 + 8,8 \cdot \frac{0 - 20}{14 - 13,5} = 1838 \text{ Нм}$

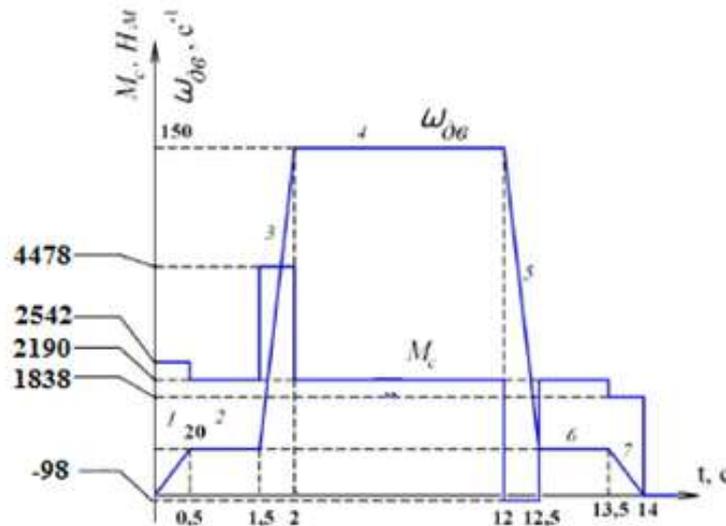


Рисунок 3.2 – Уточненная нагрузочная диаграмма

Для проверки двигателя по нагреву будем использовать метод эквивалентного момента по условию:

$$M_{\text{экв.ст}} \leq M_{\text{н}}$$

Так как в цикле выбранный двигатель с самовентиляцией работает на разных скоростях, то необходимо учитывать ухудшение теплоотдачи:

При переходных режимах (разгон и торможение): $\beta_{\text{пп}} = 0,6$

При работе на пониженной скорости: $\beta_{\text{п.ск}} = 0,3$

При остановленном двигателе (пауза): $\beta_{\text{п}} = 0,2$

При установившейся скорости: $\beta_{\text{уст}} = 1$

Рассчитаем эквивалентный момент $M_{\text{ЭКВ.СТ}}$ для ПВ=65%:

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot t_i}}$$

$$= \sqrt{\frac{2542^2 \cdot 0,5 + 2190^2 \cdot 1 + 4478^2 \cdot 0,5 + 2190^2 \cdot 10 + 98^2 \cdot 0,5 + 2190^2 \cdot 1 + 1838^2 \cdot 0,5}{0,6 \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 1 + 0,6 \cdot 0,5 + 1 \cdot 10 + 0,6 \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 1 + 0,6 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 15}}$$

$$= 2213,35 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{ЭКВ.СТ}} = M_{\text{ЭКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_H}} = 2213,35 \cdot \sqrt{\frac{65}{100}} = 1784,46 \text{ Нм}$$

Двигатель подходит, так как условие выполняется:

$$M_{\text{ЭКВ.СТ}} \leq M_H$$

$$1784,46 \text{ Нм} \leq 2581 \text{ Нм}$$

Проверка двигателя по перегрузочной способности проверяется по условию:

$$M_K \geq M_{\text{max } i}$$

где $M_{\text{max } i}$ – максимальное значение момента на нагрузочной диаграмме.

$$M_K = \lambda_{\text{max}} \cdot M_H = 2 \cdot 2581 = 5162 \text{ Нм}$$

По диаграмме видно, что

$$M_{\text{max}} = M_{\text{III-уч}} = 4478 \text{ Нм}$$

Двигатель подходит, так как условие выполняется:

$$M_K \geq M_{\text{max } i}$$

$$5162 \text{ Нм} \geq 4478 \text{ Нм}$$

3.2 Представление двигателя в виде обобщенной электрической машины; Уравнения в координатах, определение параметров обобщенной электрической машины в номинальном режиме работы

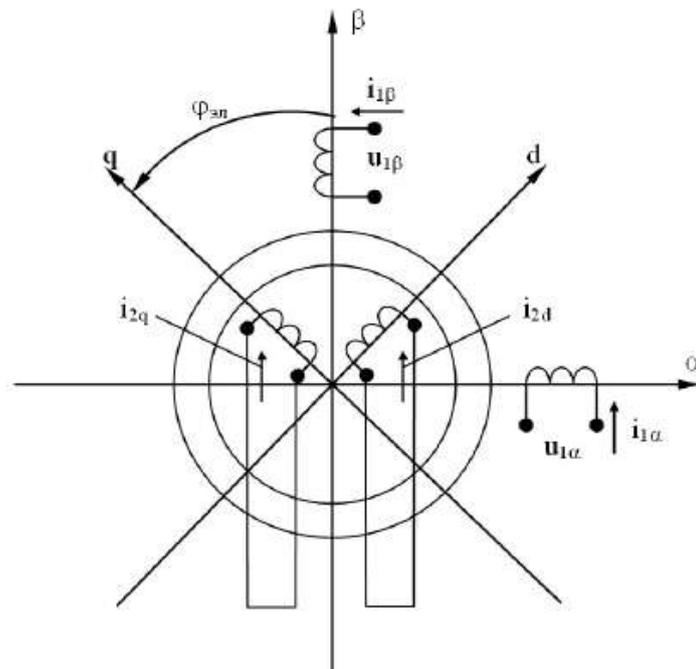


Рисунок 3.3 – Схема обобщенной машины

Уравнения обобщенной машины

Если положить $\omega_k = \omega_{0эл} = 2\pi \cdot f_c = p_n \cdot \omega_0 = 314$ рад/с, можно осуществить преобразование x, y – выражение всех переменных системы в осях x, y , вращающихся с синхронной скоростью поля машины, при этом уравнения электромеханической характеристики запишутся так:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1x} = i_{1x} R_1 + \frac{d\Psi_{1x}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1y} \\ u_{1y} = i_{1y} R_1 + \frac{d\Psi_{1y}}{dt} + \omega_{0эл} \cdot \Psi_{1x} \\ 0 = i'_{2x} R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \cdot \Psi_{2y} \\ 0 = i'_{2y} R'_2 + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \cdot \Psi_{2x} \\ M = p_n L_{12} (i_{1y} i'_{2x} - i_{1x} i'_{2y}) \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega_{ром}}{dt}, \text{ где } \omega_{эл} = p_n \cdot \omega_{ром} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Уравнения потокосцеплений:

$$\begin{cases} \psi_{1x} = L_1 \cdot i_{1x} + L_{12} \cdot i'_{2x} \\ \psi_{1y} = L_1 \cdot i_{1y} + L_{12} \cdot i'_{2y} \\ \psi_{2x} = L_{12} \cdot i_{1x} + L_2 \cdot i'_{2x} \\ \psi_{2y} = L_{12} \cdot i_{1y} + L_2 \cdot i'_{2y} \end{cases} \quad (3.7)$$

Выражения токов через потокосцепления:

$$\begin{cases} i_{1x} = \frac{L_2 \cdot \psi_{1x} - L_{12} \cdot \psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \\ i_{1y} = \frac{L_2 \cdot \psi_{1y} - L_{12} \cdot \psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \\ i'_{2x} = \frac{L_1 \cdot \psi_{2x} - L_{12} \cdot \psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \\ i'_{2y} = \frac{L_1 \cdot \psi_{2y} - L_{12} \cdot \psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2} \end{cases} \quad (3.8)$$

Определим напряжение, подаваемое на обмотки обобщенной машины.

Проведем преобразования А,В,С → α,β:

$$\begin{cases} u_a(t) = U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t) \\ u_b(t) = U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c(t) = U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = k_c \cdot \frac{3}{2} U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t) \\ U_{1\beta} = k_c [\frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\omega_{\text{оэл}} t + \frac{2\pi}{3})] \end{cases} \quad (3.10)$$

Для выполнения условия инвариантности мощности, расчетный коэффициент k_c должен быть равен $\sqrt{\frac{2}{3}}$:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t) = 381 \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t) \\ U_{1\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 \cdot [\sin(\omega_{\text{оэл}} t - \frac{2\pi}{3}) - \sin(\omega_{\text{оэл}} t + \frac{2\pi}{3})] = -381 \cdot \cos(\omega_{\text{оэл}} t) \end{cases}$$

Проведем преобразования $\alpha, \beta \rightarrow x, y$:

$$\begin{cases} U_{1x} = U_{1\alpha} \cos(\omega_{\text{оэл}} t) + U_{1\beta} \sin(\omega_{\text{оэл}} t) = \\ = 381 \cos(\omega_{\text{оэл}} t) \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t) + (-381 \cos(\omega_{\text{оэл}} t) \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t)) = 0 \\ U_{1y} = -U_{1\alpha} \sin(\omega_{\text{оэл}} t) + U_{1\beta} \cos(\omega_{\text{оэл}} t) = \\ = -381 \sin(\omega_{\text{оэл}} t) \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t) - 381 \cos(\omega_{\text{оэл}} t) \cdot \sin(\omega_{\text{оэл}} t) = -381 \end{cases} \quad (3.11)$$

Расчет основных параметров схемы замещения АД

Номинальный ток статора:

$$I_{1\text{фн}} = \frac{P_{\text{н}}}{3U_{1\text{фн}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}}} = \frac{400 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,945 \cdot 0,91} = 704,7 \text{ A} \quad (3.12)$$

Базисное сопротивление:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{1\text{фн}}}{I_{1\text{фн}}} = \frac{220}{704,7} = 0,312 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Переход от относительных величин к реальным:

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_1 \cdot Z_{\text{баз}} = 0,019 \cdot 0,312 = 0,0059 \text{ Ом} \\ X_1 &= X'_1 \cdot Z_{\text{баз}} = 0,11 \cdot 0,312 = 0,034 \text{ Ом} \\ R'_2 &= R''_2 \cdot Z_{\text{баз}} = 0,013 \cdot 0,312 = 0,00406 \text{ Ом} \\ X'_2 &= X''_2 \cdot Z_{\text{баз}} = 0,14 \cdot 0,312 = 0,044 \text{ Ом} \\ X_{\mu} &= X'_{\mu} \cdot Z_{\text{баз}} = 5,4 \cdot 0,312 = 1,686 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Расчет индуктивностей:

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{X_{\mu}}{2\pi f_c} = \frac{1,686}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,369 \text{ мГн} \\ L_{1\sigma} &= \frac{X_1}{2\pi f_c} = \frac{0,034}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,108 \text{ мГн} \\ L_{2\sigma} &= \frac{X'_2}{2\pi f_c} = \frac{0,044}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,14 \text{ мГн} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{12} = 0,108 + 5,369 = 5,477 \text{ мГн}$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_{12} = 0,14 + 5,369 = 5,509 \text{ мГн}$$

Критический момент двигателя:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3U_{1\text{фн}}^2}{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]} \\ &= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot [0,0059 + \sqrt{0,0059^2 + (0,034 + 0,044)^2}]} \\ &= 5492 \text{ Нм} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Критическое скольжение:

$$S_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{0,0041}{\sqrt{0,0041^2 + (0,034 + 0,044)^2}} = 0,052 \quad (3.17)$$

$$a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0,0059}{0,0041} = 1,44$$

Формула Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1 + aS_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2aS_k}, \quad (3.18)$$

где $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$.

Построим механическую характеристику двигателя в MathCAD:

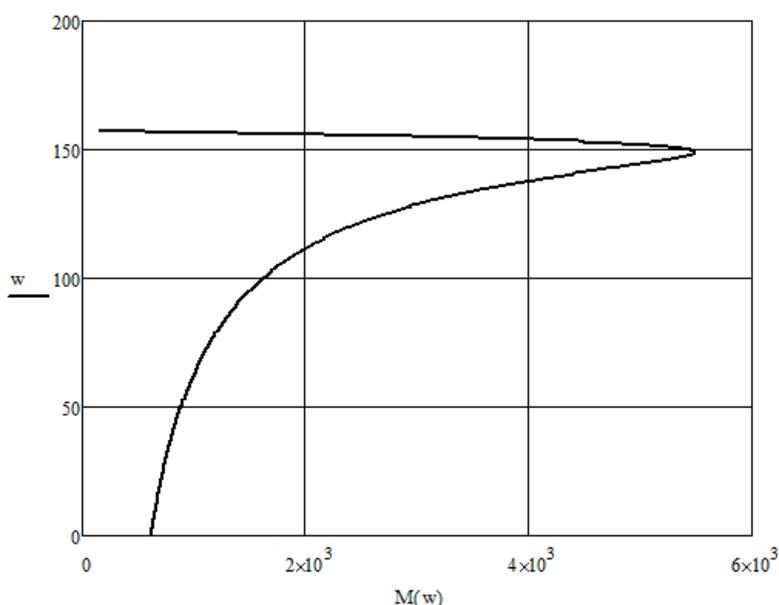


Рисунок 3.4 – Механическая характеристика АД, построенная по формуле Клосса

3.3 Расчет с помощью ЭВМ переходного процесса пуска обобщенной электрической машины и сравнение его с переходным процессом, полученным при линеаризации механической характеристики выбранного двигателя.

Для моделирования модели обобщенной электрической машины воспользуемся средой Matlab 7.11. Модель составлена по уравнениям систем (3.7) и (3.8), для большей наглядности модели структура была представлена в блочном виде (в виде вложенных подсистем). Модель представлена в приложении А.

Результаты моделирования:

- Графики пуска двигателя (в координатах ω (с^{-1}) от M ($\text{Н}\cdot\text{м}$))

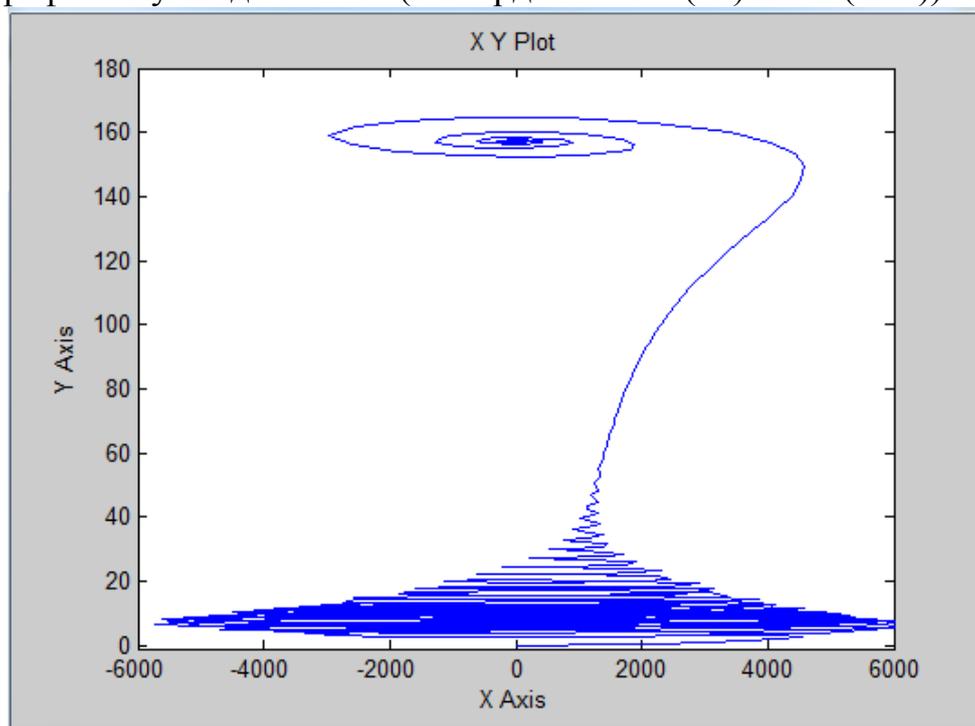


Рисунок 3.5 – Динамическая механическая характеристика при пуске электрической обобщенной машины без момента сопротивления

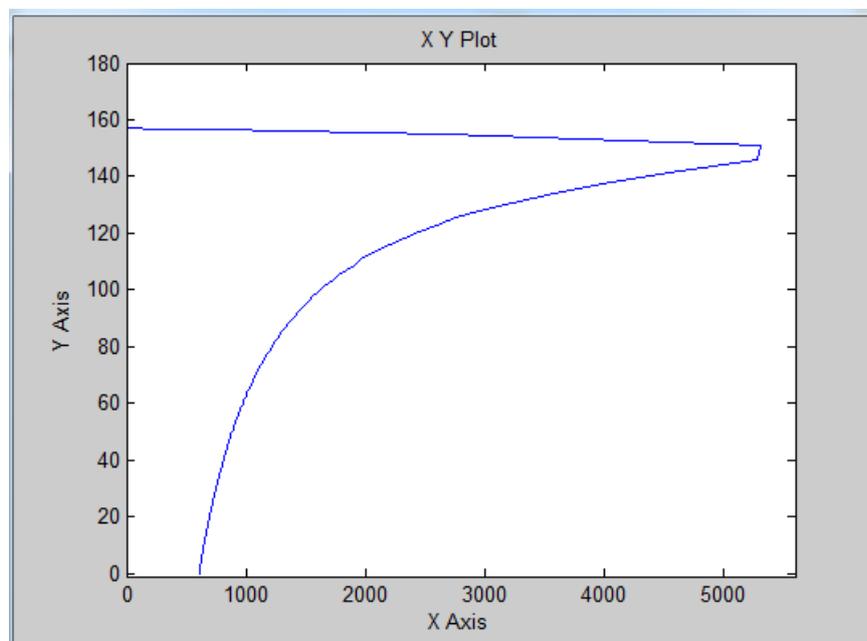


Рисунок 3.6 – Статическая механическая характеристика АД по формуле Клосса

Средний момент двигателя для статической характеристики:

$$M_{cp} = \frac{M_{max} + M_{min}}{2} = \frac{2 \cdot 2581 + 0,9 \cdot 2581}{2} = 3742,45 \text{ Нм}$$

При этом привод разгонится за:

$$t = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_n}{M_{cp}} = \frac{8,8 \cdot 155}{3542,5} = 0,385 \text{ с}$$

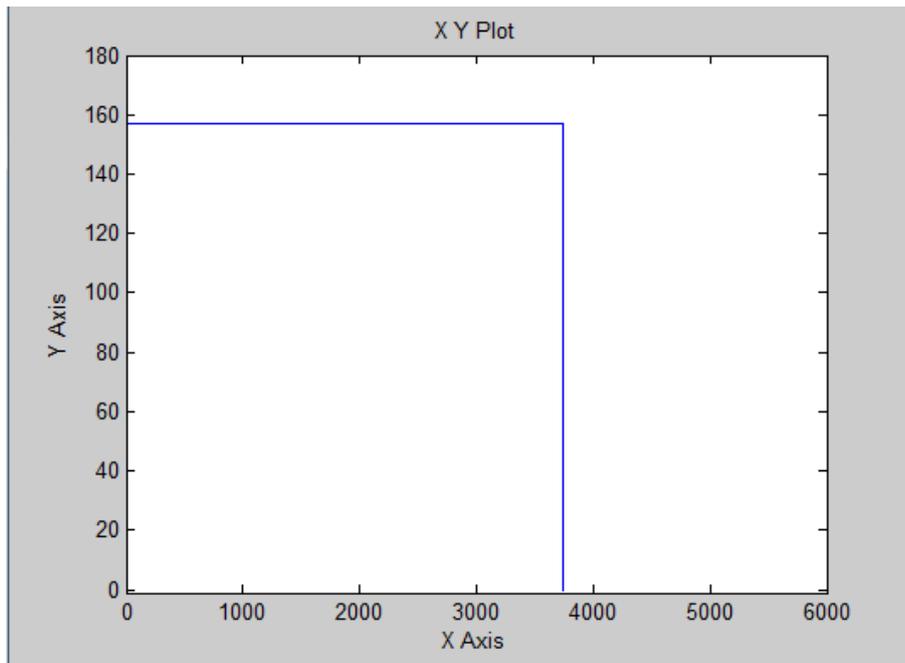


Рисунок 3.7 – Линеаризация по среднему моменту

- Переходные процессы пуска обобщенной машины без нагрузки ($M_c=0$)

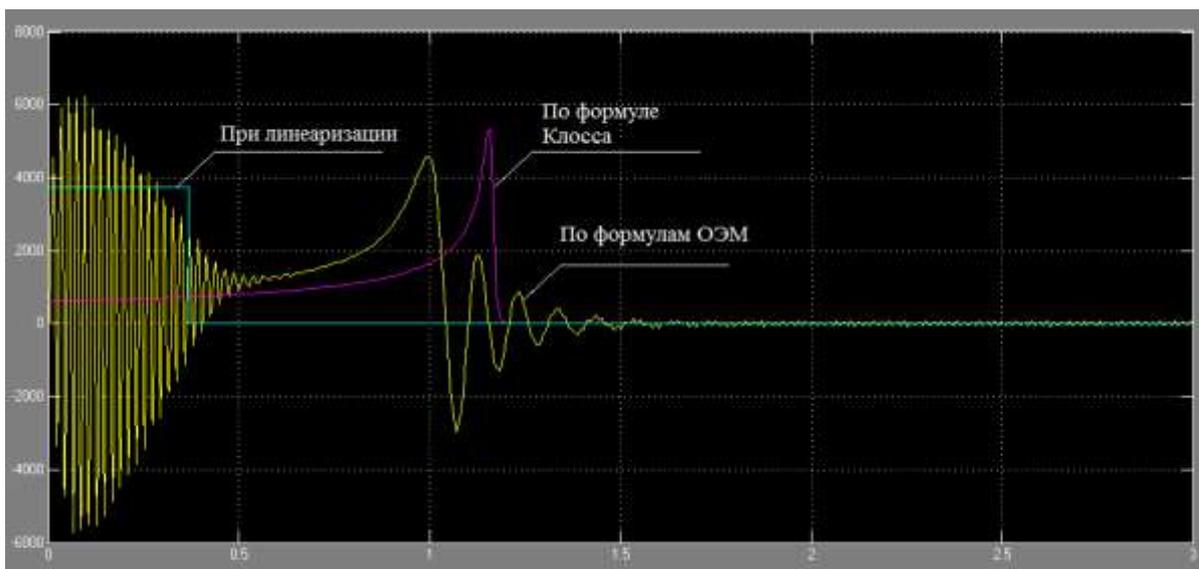


Рисунок 3.8 – Графики момента (в координатах M (Н·м) от t (с))

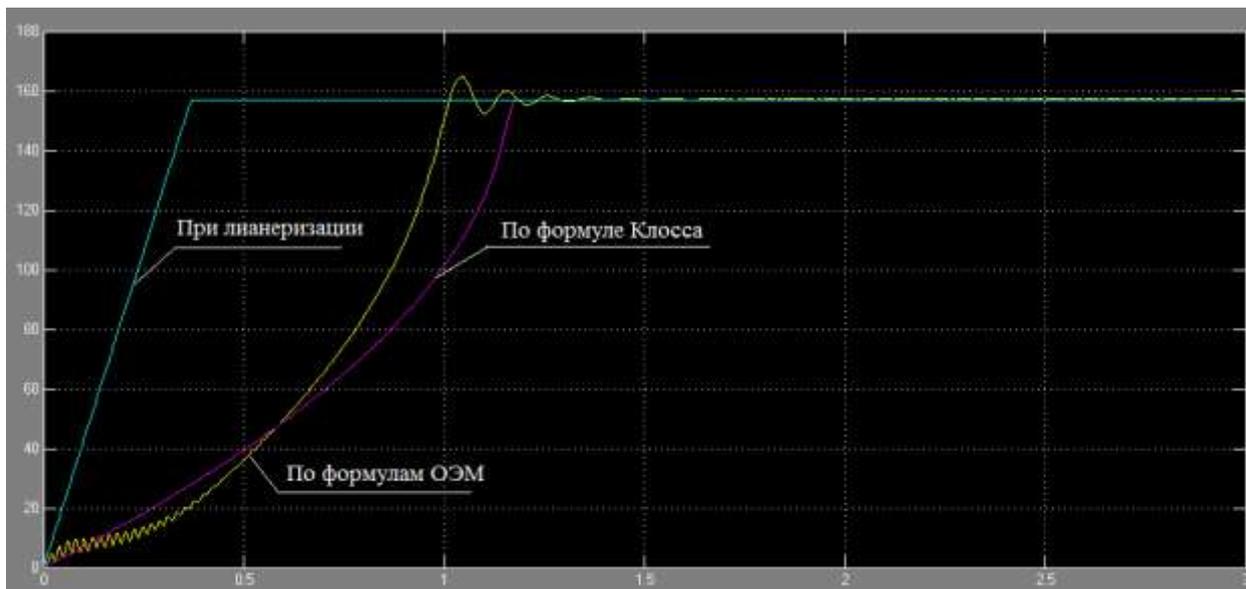


Рисунок 3.9 – Графики скорости (в координатах ω (с-1) от t (с))

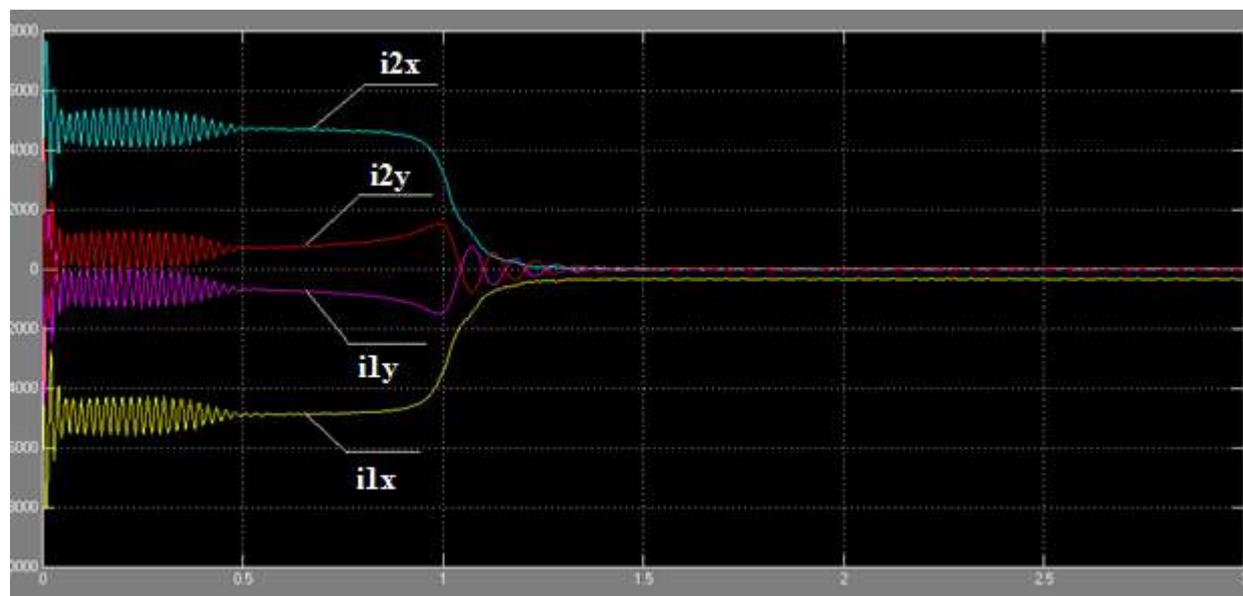


Рисунок 3.10 – Графики токов (в координатах I (А) от t (с))

3.4 Выбор необходимого силового преобразователя; построение механических характеристик в разомкнутой системе. Оценка диапазона регулирования скорости

Преобразователь частоты выбирается исходя из следующих условий:

$$I_{н.ПЧ} \geq I_{н.дв}$$

$$P_{н.ПЧ} \geq P_{н.дв}$$

Номинальное напряжение: $U_n = 220/380$ В

Выбираем преобразователь частоты компании Schneider Electric серия Altivar 61, модель ATV 61HC40N4 (табл.3.4).

Таблица 3.4 – Паспортные данные ПЧ ATV 61HC40N4

$P_{\text{ном}}$, кВт	$I_{\text{н}}$, А	$U_{\text{н}}$, В
400	759	380

ПЧ подходит, условия выполняются:

$$759 \text{ А} \geq 704,7 \text{ А}$$

$$400 \text{ кВт} = 400 \text{ кВт}$$

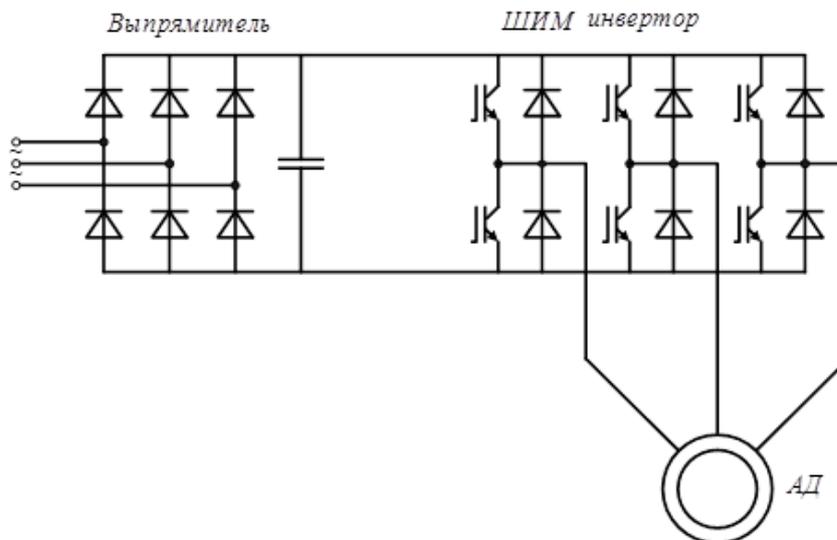


Рисунок 3.11 – Силовая схема ПЧ-АД

Определим внутренне сопротивление ПЧ и его влияние на механическую характеристику. Считаем, что падение напряжения на ключах инвертора составляет 2В, а на диодах инвертора 1,5В. Тогда внутреннее сопротивление:

$$R_{\text{ПЧ}} = \frac{2 \cdot \Delta U_D + 2 \cdot \Delta U_{VT}}{I_{\text{н}}} = \frac{2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 2}{759} = 0,0092 \text{ Ом}$$

Суммарное сопротивление статора:

$$R_{\Sigma 1} = R_1 + R_{\text{ПЧ}} = 0,0059 + 0,0092 = 0,0151 \text{ Ом}$$

Построение механических характеристик при регулировании от ПЧ в MathCAD (без IR-компенсации)

Даны величины:

$$X_{\mu} := 1.6 \quad R_1 := 0.0059$$

$$X_1 := 0.03 \quad R_{\Sigma 1} := 0.0151 \quad f_{\text{н}} := 50$$

$$X_2 := 0.04 \quad R_2' := 0.004 \quad w := 0,0.1..157 \quad p := 2$$

Формулы для построения характеристик при разных значениях частоты:

$$U_1(f) := 220 \frac{f}{50} \quad \omega_0(f) := \frac{2 \cdot \pi f}{p}$$

$$S'(w, f) := \frac{\omega_0(f) - w}{\omega_0(f)} \quad S_k(f) := \frac{R'_2}{\sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_2 \cdot \frac{f}{50}\right)^2}}$$

$$M_k(f) := \frac{3 \cdot U_1(f)^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_{\Sigma 1} + \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_2 \cdot \frac{f}{50}\right)^2} \right]}$$

$$M'(w, f) := \frac{2 \cdot M_k(f) \cdot \left(1 + \frac{R_{\Sigma 1} \cdot S_k(f)}{R'_2} \right)}{\frac{S'(w, f)}{S_k(f)} + \frac{S_k(f)}{S'(w, f)} + 2 \cdot \frac{R_{\Sigma 1} \cdot S_k(f)}{R'_2}}$$

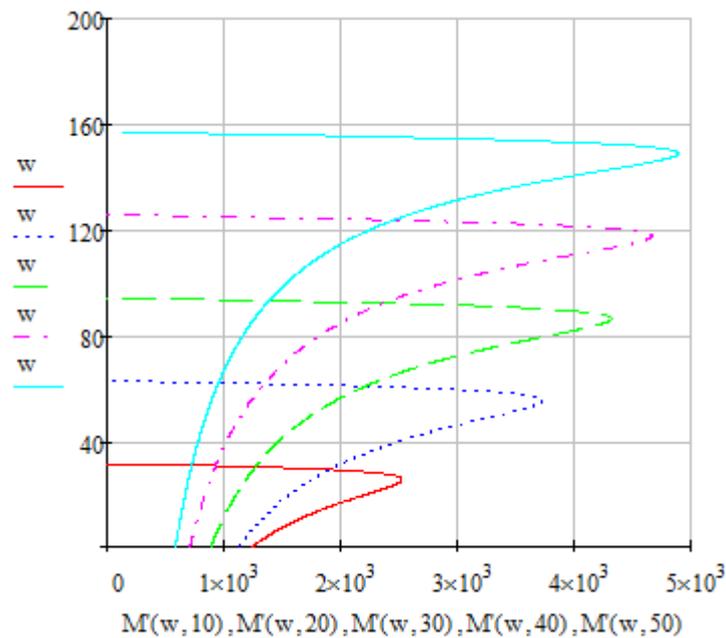


Рисунок 3.12 – Семейство механических характеристик регулирования координат АД, при питании от ПЧ (без IR-компенсации)

В результате отсутствия IR-компенсации, при уменьшении частоты все больше становится заметным падение напряжения на обмотках статора – как следствие, сильное уменьшение критического момента.

Построение механических характеристик при регулировании от ПЧ в MathCAD (с IR-компенсацией)

Введем закон регулирования $U(f)$, с условием постоянства критического момента:

$$U_{1\phi.\text{треб}}(f) := \sqrt{\frac{2 \cdot M_k(f_c) \cdot \omega_0(f) \cdot R_{\Sigma 1} + \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_2 \cdot \frac{f}{50}\right)^2}}{3}}$$

Выражение напряжения, при котором ток намагничивания не превышает допустимого значения:

$$I_n := 704.7 \quad I_\mu := 0.3 \cdot I_n = 211.41$$

$$U_{\text{доп}}(f) := I_\mu \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_\mu \cdot \frac{f}{50}\right)^2}$$

Результирующий закон регулирования $U(f)$ выбираем, как минимальную характеристику из двух (рис.6.3):

$$U_{\text{рег}}(f) := \min(U_{1\phi.\text{треб}}(f), U_{\text{доп}}(f))$$

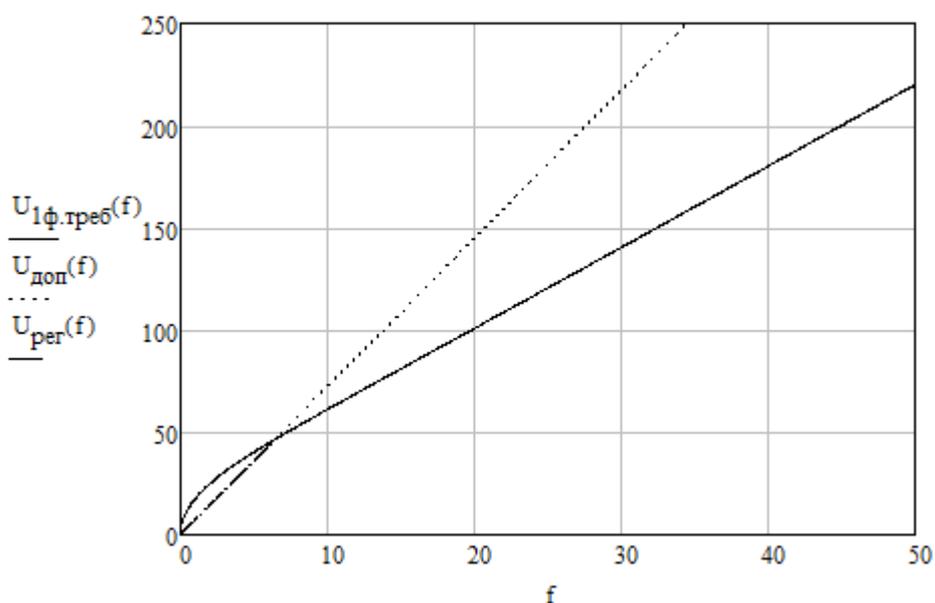


Рисунок 3.13 – Требуемый ($U_{1\phi.\text{треб}}$), допустимый ($U_{\text{доп}}$) и результирующий ($U_{\text{рег}}$) законы изменения напряжения

Тогда:

$$M_k(f) := \frac{3 \cdot U_{per}(f)^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_{\Sigma 1} + \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_2 \cdot \frac{f}{50} \right)^2} \right]}$$

$$S_k(f) := \frac{R'_2}{\sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + \left(X_1 \cdot \frac{f}{50} + X_2 \cdot \frac{f}{50} \right)^2}}$$

$$M_{ПЧ}(\omega, f) := \frac{2 \cdot M_k(f) \cdot \left(1 + \frac{R_{\Sigma 1}}{R'_2} \cdot S_k(f) \right)}{\frac{S'(\omega, f)}{S_k(f)} + \frac{S_k(f)}{S'(\omega, f)} + 2 \cdot \left(\frac{R_{\Sigma 1}}{R'_2} \cdot S_k(f) \right)}$$

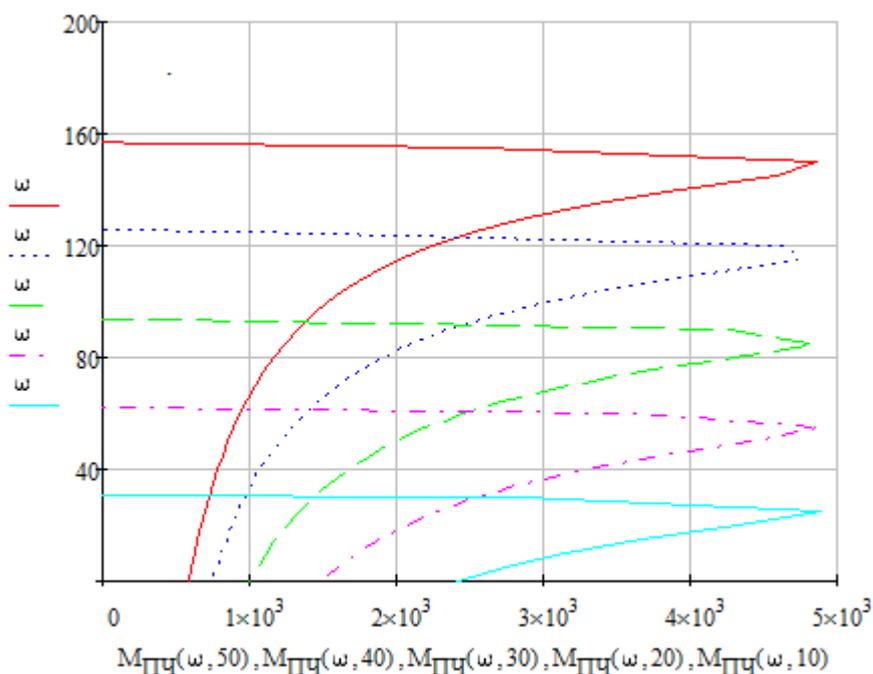


Рисунок 3.14 – Семейство механических характеристик регулирования координат АД, при питании от ПЧ (с IR-компенсацией)

Определение диапазона регулирования

Погрешность регулирования скорости принимается не более 10%:

$$\delta = \frac{\Delta \omega_c}{\omega_{cp}} < 10\%$$

Для определения диапазона регулирования определим среднюю скорость при изменении нагрузки от M_{min} до M_{max} :

$$M_{min} = 0,5 \cdot M_c = 0,5 \cdot 2190 = 1080 \text{ Нм}$$

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot (1 - S) = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{S_H \cdot M_{min}}{M_H}\right) = 157 \cdot \left(1 - \frac{0,012 \cdot 1080}{2581}\right) = 156,2 \text{ рад/с}$$

$$\omega_2 = \omega_0 \cdot (1 - S) = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{S_H \cdot M_{max}}{M_H}\right) = 157 \cdot \left(1 - \frac{0,012 \cdot 2190}{2581}\right) = 155,4 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{cp.min} = \frac{\Delta\omega_c}{\sigma} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\sigma} = \frac{156,2 - 155,4}{0,1} = 8 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{cp.max} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \frac{156,2 + 155,4}{2} = 155,8 \text{ рад/с}$$

Диапазон регулирования:

$$D = \frac{\omega_{cp.max}}{\omega_{cp.min}} = \frac{155,8}{8} = 20$$

3.5 Переходный процесс в разомкнутой системе, оценка динамических показателей электропривода. Анализ возможности электропривода по демпфированию упругих колебаний в механической системе.

Демпфирующую способность электропривода оцениваем по астатическому регулированию скорости:

$$\beta_{дин}(p) = \frac{\beta_c(T_2p + 1)}{p(T_1p + 1)}$$

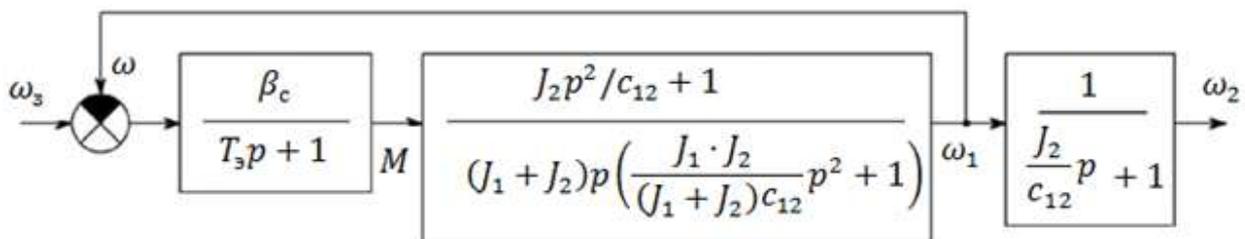


Рисунок 3.15 – Нормированная структурная схема двухмассовой упругой системы

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_3(p) = \frac{\frac{\beta_c}{c_{12}} \cdot J_2 p^2 + \beta_c}{\frac{T_3 \cdot J_1 J_2}{c_{12}} p^4 + \frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + (T_3 \cdot (J_1 + J_2) + \frac{\beta_c J_2}{c_{12}}) p^2 + (J_1 + J_2) p + \beta_c}$$

Входным воздействием является задание на скорость, которое имеет значение скорости идеального холостого хода ($\omega_3 = \omega_0$). Преобразователь представляем инерционным звеном.

Критическое скольжение:

$$S_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_k^2}} = \frac{0,0041}{\sqrt{0,0151^2 + (0,034 + 0,044)^2}} = 0,051$$

Жесткость разомкнутой системы:

$$\beta_c = \frac{2M_k}{\omega_0 \cdot S_k} = \frac{2 \cdot 4886}{157 \cdot 0,051} = 1220 \text{ Нм} \cdot \text{с}$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_э = \frac{1}{\omega_{0\text{эл.н}} \cdot S_k} = \frac{1}{314 \cdot 0,051} = 0,062 \text{ с}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_m = \frac{J_\Sigma}{\beta_c} = \frac{8,8}{1220} = 0,0072 \text{ с}$$

Найдем корни характеристического уравнения (знаменатель передаточной функции) с помощью функции polyroots в среде MathCAD:

$$c12 := 444.4 \quad J_{1\Sigma} := 7.1 \quad J_2 := 1.7 \quad T_e := 0.06 \quad B_c := 1220$$

$$f(p) := \left(\frac{T_e \cdot J_1 \cdot J_2}{c12} \right) \cdot p^4 + \frac{J_1 \cdot J_2}{c12} \cdot p^3 + \left[T_e \cdot (J_1 + J_2) + \frac{B_c \cdot J_2}{c12} \right] \cdot p^2 + (J_1 + J_2) \cdot p + B_c$$

$$v := f(p) \text{ coeffs} \rightarrow \begin{pmatrix} 1220 \\ 8.8 \\ 5.2121466654666546665 \\ 0.027157771577715777157 \\ 0.001683781837818378183 \end{pmatrix}$$

$$\text{polyroots}(v) = \begin{pmatrix} -7.851 - 52.644i \\ -7.851 + 52.644i \\ -0.214 + 15.991i \\ -0.214 - 15.991i \end{pmatrix}$$

Наличие двух пар комплексно сопряженных корней свидетельствует о присутствии в системе двух видов колебаний, частота гармонической составляющей которых определяется мнимой частью найденных корней. Корни имеют вид:

$$\begin{cases} p_{12} = -\alpha_1 \pm \Omega_1 i \\ p_{12} = -\alpha_2 \pm \Omega_2 i \end{cases}$$

Прямой оценкой колебательности системы при этом может служить логарифмический декремент:

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot \alpha}{\Omega}$$

Найдем его значение для каждой пары корней:

$$\lambda_{12} = \frac{2\pi \cdot 7,851}{52,644} = 0,94$$

$$\lambda_{34} = \frac{2\pi \cdot 0,214}{15,991} = 0,08$$

$$\lambda_{min} = 0,08$$

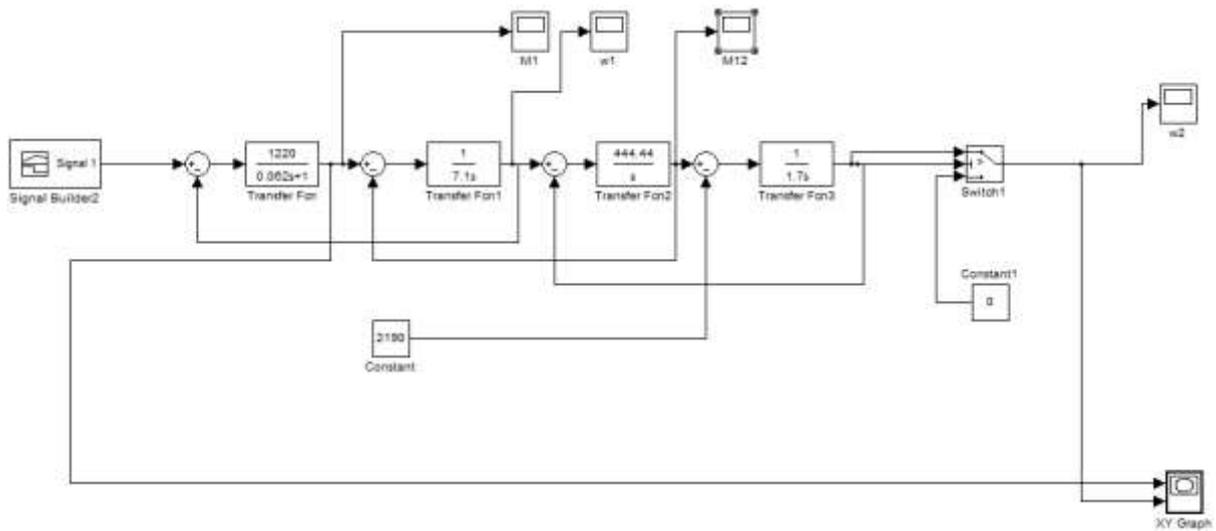


Рисунок 3.16 – Структура модели в Matlab

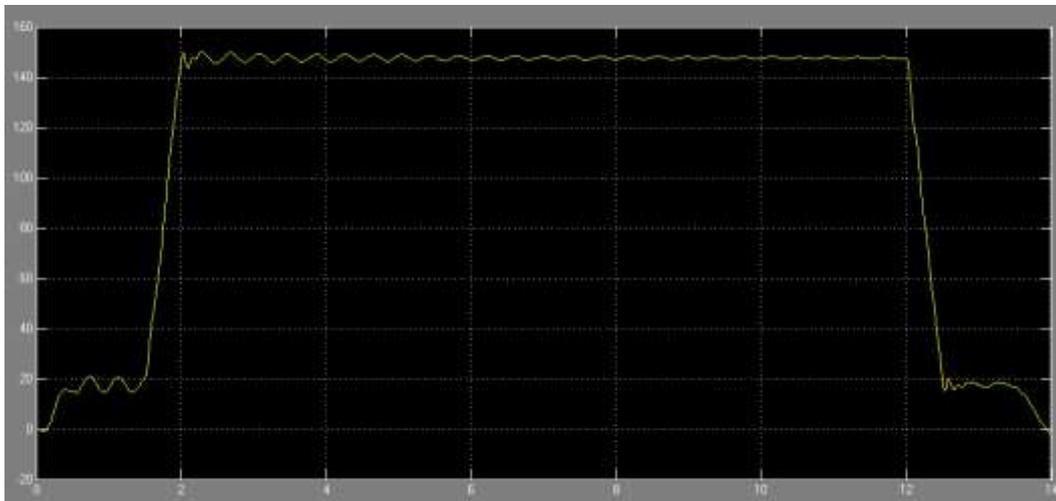


Рисунок 3.17 – Зависимость $\omega_1(t)$

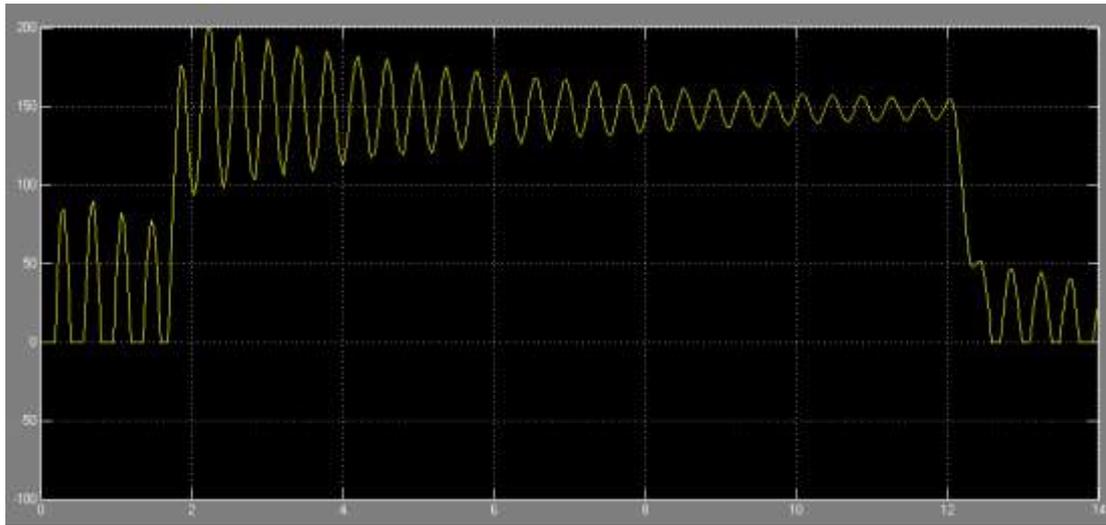


Рисунок 3.18 – Зависимость $\omega_2(t)$

3.6 Расчет энергетических показателей

В случае рассматриваемого электропривода, основным и наиболее полезным является цикловой КПД.

Для расчета циклового КПД необходимо определить полезную работу, совершаемую за цикл и соотнести ее к затраченной энергии из сети:

$$\eta_{\text{цикл}} = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\%$$

При его расчете как полезную работу рассматриваем движение приводом нагрузки (M_c), а как затраченную, момент, создаваемый двигателем для вращения нагрузки.

Расчет зависимости КПД от величины момента двигателя в MathCAD

Рассчитаем значения КПД двигателя для различных моментов:

$$x(M) := \frac{M}{M_n}$$

$$\Delta P_{\text{sum}} := \frac{P}{\eta} - P = 2.328 \times 10^4$$

$$\Delta P_{\text{vn}} := M_n \cdot \omega_0 \cdot S_n \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 1.197 \times 10^4$$

$$\Delta P_c := \Delta P_{\text{sum}} - \Delta P_{\text{vn}} = 1.131 \times 10^4$$

$$\eta_{\text{ww}}(M) := \frac{P \cdot x(M)}{P \cdot x(M) + \Delta P_c + \Delta P_{\text{vn}} \cdot x(M)^2}$$

где $x(M)$ – коэффициент загрузки двигателя по моменту;

ΔP_{sum} – суммарные потери энергии в двигателе;

ΔP_{vn} – доля переменных потерь;

ΔP_c – постоянные потери в двигателе;

$\eta(M)$ – зависимость КПД двигателя от момента (рис.3.19).

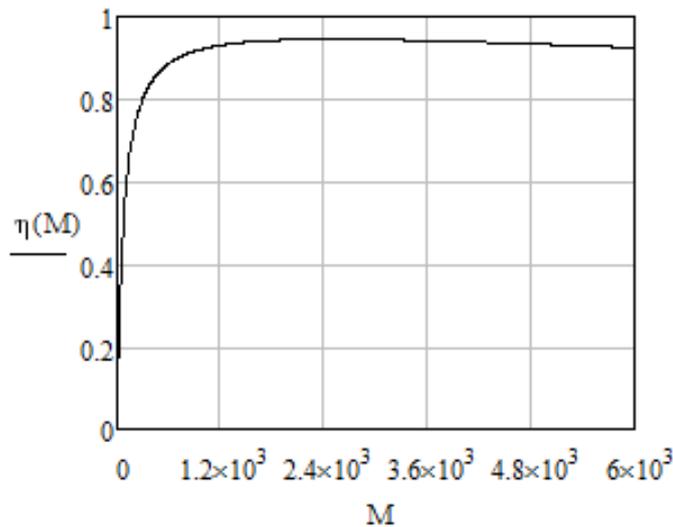


Рисунок 3.19 – Зависимость КПД двигателя от момента

Расчет потерь энергии в переходных процессах
 ЭП работает на двух установившихся скоростях:

$$\omega_{уст.1} = 20 \text{ рад/с}; \omega_{уст.2} = 150 \text{ рад/с}$$

Полезная работа за время разгонов:

$$\begin{aligned} A_{пуск} &= \frac{1}{2} (M_c \cdot \omega_{уст.1} \cdot t_{0-1} + M_c \cdot \omega_{уст.2} \cdot t_{2-3}) \\ &= \frac{1}{2} (2190 \cdot 20 \cdot 0,5 + 2190 \cdot 150 \cdot 0,5) = 93,07 \text{ кДж} \end{aligned}$$

Полезная работа за время торможений:

$$\begin{aligned} A_{торм} &= \frac{1}{2} (M_c \cdot \omega_{уст.2} \cdot t_{10-12} + M_c \cdot \omega_{уст.1} \cdot t_{13-14}) \\ &= \frac{1}{2} (2190 \cdot 150 \cdot 0,5 + 2190 \cdot 20 \cdot 0,5) = 93,07 \text{ кДж} \end{aligned}$$

Полезная работа за время работы на установившейся скорости:

$$\begin{aligned} A_{уст} &= M_c \cdot \omega_{уст.1} \cdot t_{1-2} + M_c \cdot \omega_{уст.2} \cdot t_{4-10} + M_c \cdot \omega_{уст.1} \cdot t_{12-13} \\ &= 2190 \cdot 20 \cdot 1 + 2190 \cdot 150 \cdot 10 + 2190 \cdot 20 \cdot 1 = 3372,6 \text{ кДж} \end{aligned}$$

Полная полезная работа:

$$A_{п} = A_{пуск} + A_{торм} + A_{уст} = 93,07 + 93,07 + 3372,6 = 3559 \text{ кДж}$$

Затраченная энергия:

$$A_3 = \frac{M_{\text{пуск1}} \cdot \omega_{\text{уст.1}} \cdot t_{0-1}}{\eta(M_{\text{пуск1}})} + \frac{M_c \cdot \omega_{\text{уст.1}} \cdot t_{1-2}}{\eta(M_c)} + \frac{M_{\text{пуск2}} \cdot \omega_{\text{уст.2}} \cdot t_{2-4}}{\eta(M_{\text{пуск2}})} + \frac{M_c \cdot \omega_{\text{уст.2}} \cdot t_{4-10}}{\eta(M_c)} + \frac{M_{\text{торм2}} \cdot \omega_{\text{уст.2}} \cdot t_{10-12}}{\eta(M_{\text{торм.2}})} + \frac{M_c \cdot \omega_{\text{уст.1}} \cdot t_{12-13}}{\eta(M_c)} + \frac{M_{\text{торм1}} \cdot \omega_{\text{уст.1}} \cdot t_{13-14}}{\eta(M_{\text{торм.1}})}$$

$$A_3 = \frac{2542 \cdot 20 \cdot 0,5}{0,945} + \frac{2190 \cdot 20 \cdot 1}{0,945} + \frac{4478 \cdot 150 \cdot 0,5}{0,936} + \frac{2190 \cdot 150 \cdot 10}{0,945} + \frac{98 \cdot 150 \cdot 0,5}{0,573} + \frac{2190 \cdot 20 \cdot 1}{0,945} + \frac{1838 \cdot 20 \cdot 0,5}{0,942} = 3971 \text{ кДж}$$

КПД за цикл:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{п}}}{A_3} \cdot 100\% = \frac{3559}{3971} \cdot 100\% = 89,6\%$$

Выводы по разделу

В заключительном разделе диссертационной работы были проведены экспериментальные исследования с помощью использования программ MathCAD и MatLab.

Была построена упрощенная нагрузочная диаграмма и тахограмма для выбора двигателя. С помощью параметров выбранного двигателя далее была построены уточненные диаграммы. Проверка выбора двигателя по перегрузочной способности и по нагреву показала, что двигатель выбран верно.

Проведено представление двигателя в виде обобщенной электрической машины, записаны уравнения в координатах и с помощью этого произведено определение параметров обобщенной электрической машины в номинальном режиме работы.

Был произведен расчет переходного процесса пуска обобщенной электрической машины и сравнение его с переходным процессом, полученным при линеаризации механической характеристики выбранного двигателя.

Выбран преобразователь частоты компании Schneider Electric серия Altivar 61, модель ATV 61HC40N4. С помощью вычисления логарифмического дикремента, можно сделать вывод, что демпфирующий эффект незначителен.

С помощью расчета энергетических показателей был определен КПД работы механизма за цикл. КПД составляет $\eta_{\text{ц}} = 89,6\%$.

Заключение

В проделанной диссертационной работе было проведено обеспечение соответствующим режимом работы системы управления привода транспортировки нефти на основе разработки системы регулирования режимов транспортирования нефти с применением частотно-регулируемого привода на нефтеперекачивающих станциях в условиях постоянно изменяющихся характеристик перекачиваемой смеси нефти.

Было заключено, что применение в сетях нефтеперекачивающих трубопроводов выгодно использование беспроводных датчиков SimpliMote, проводимость данных к микроконтроллеру обеспечивается путем использования протокола ZigBee, что повышает надежность и значительно упрощает механические составляющие системы управления, избавляя от всевозможных оптоволоконных проводов и дополнительных устройств для передачи данных.

Несколько приложений WSN для нефтегазопроводов связаны с размещением узлов в линейной топологии. Плотное линейное размещение относится к вопросам, связанным с оптимальным распределением ресурсов и сетью, такими как восстановление из дырок и политик несовместимости для создания быстрого маршрута для распространения данных утечки. Для преодоления этих проблем в данной работе было предложено приложение для развертывания LWSN для нефтегазопровода с использованием специальной сенсорной платы SimpliMote с алгоритмами для решения задач создания сетей, обнаружения прерываний утечек и маршрутизации высокоприоритетных сообщений с линейной топологией.

Сравнивая производительность системного уровня решения с основанной на Arduino Libelium Waspmote. Поскольку SimpliMote построен на более мощном микроконтроллере с открытыми периферийными датчиками, встроенное программное обеспечение может выполнять сложные алгоритмы более эффективно, чем простой узел датчика общего назначения. Что еще более важно, встроенное приложение включает функции, включая синхронизацию времени и программные прерывания, необходимые для обработки плавного потока данных и реагирования на критические ситуации.

Результаты показывают, что предлагаемые алгоритмы маршрутизации и подход обнаружения утечки в два раза более энергосберегающие, надежные и своевременные, когда они внедряются на платформе SimpliMote, интенсивно используемой на миссии, по сравнению с общим узлом Arduino.

Были проведены экспериментальные исследования в интегрированной компьютерной среде разработки Code Composer Studio на базе сигнального микроконтроллера из семейства TMS320x28xxx.

Используя полученный материал и данные были проведены экспериментальные исследования в среде программирования MatLab с использованием пакета Simulink.

Список использованной литературы

1. Ключев В.И. «Теория электропривода. 2-е издание, переработанное и дополненное», – М.: Энергоатомиздат, 1998.
2. Терехов В.М., Осипов О.И. «Система управления электроприводов», – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
3. Кравчик А.Э. «Асинхронные двигатели серии 4А», Справочник, М, 1982.
4. Лукпанов Ж.К. Электропривод нефтеперекачивающих станций с преобразователями частоты // Монография, Алматы, ТОО «Гига трейд», 2006., 158с.
5. Мустафин М.А. Мустафин Е.М. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосов. // Монография, –Алматы, ТОО «Гига трейд», 2009.-248с.
6. Сипайлов В.А., Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю. Способы повышения энергоэффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – Казань. - №7-8/1, 2008. – С. 31-41.
7. TMS320F2810, TMS320F2812 Digital Signal Processors. Data Manual. Literature Numger: SPRS174H. Texas Instruments Inc., 2003. 168с.
8. TMS320C28x Optimizing C/C++ Compiler User’s Guide. Preliminary. Literature Numger: SPRU514. Texas Instruments Inc., 1997. 351 с.
9. An Easy Way of Creating a C-callable Assembly Function for the TMS320C28x DSP. Literature Numger: SPRA806. Texas Instruments Inc., 2001. 16 с.
10. Filter Library. Module user’s Guide C28x. Foundation Software. Texas Instruments Inc., 2002. 23 с.
11. Clarke & Park. Transforms on the TMS320C2xx. Application Report. Literature Numger: BRPA048. Texas Instruments Inc., 1996.
12. Анучин А.С., Козаченко В.Ф. Архитектура, система команд, технология проектирования и отладки специализированных сигнальных микроконтроллеров для управления двигателями: Лабораторный практикум. М.: Издательство МЭИ, 2001. 96 с.
13. Анучин А.С., Козаченко В.Ф. Архитектура и программирование DSP-микроконтроллеров TMS320x24xx для управления двигателями в среде Code Composer: Лабораторный практикум. М.: Издательство МЭИ, 2003. 96 с.
14. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: учебное пособие / А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева, А.В. Жилин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 238 с.
15. J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” Elsevier, Comput. Netw., vol. 52, no. 12, pp. 2292–330, Aug. 2008.
16. S. H. Yang, Wireless Sensor Networks. Principles, Design and Applications. New York, NY, USA: Springer, Oct. 2013.

17. C. W. Chen and Y. Wang, "Chain-type wireless sensor network for monitoring long range infrastructures: Architecture and protocols," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 287–314, 2008.
18. I. Jawhar, N. Mohamed, M. M. Mohamed, and J. Aziz, "A routing protocol and addressing scheme for oil, gas, and water pipeline monitoring using wireless sensor networks," in *Proc. 5th IFIP Conf. Wireless Opt. Commun Netw.*, May 2008, pp. 1–5.
19. I. Jawhar and N. Mohamed, "A hierarchical and topological classification of linear sensor networks," in *Proc. IEEE Symp. Wireless Telecomm.*, Apr. 2009
20. N. Mohamed, J. A. Jaroodi, I. Jawhar, and A. Eid, "Reliability analysis of linear wireless sensor networks," in *Proc. IEEE 12th Symp. Netw. Comput Appl.*, Aug. 2013, pp. 11–16.
21. Salman Ali, Adnan Ashraf, Saad Bin Qaisar. *SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines*. In *Proc. IEEE Symp. Wireless Telecomm.*, Apr. 2016

Приложение А

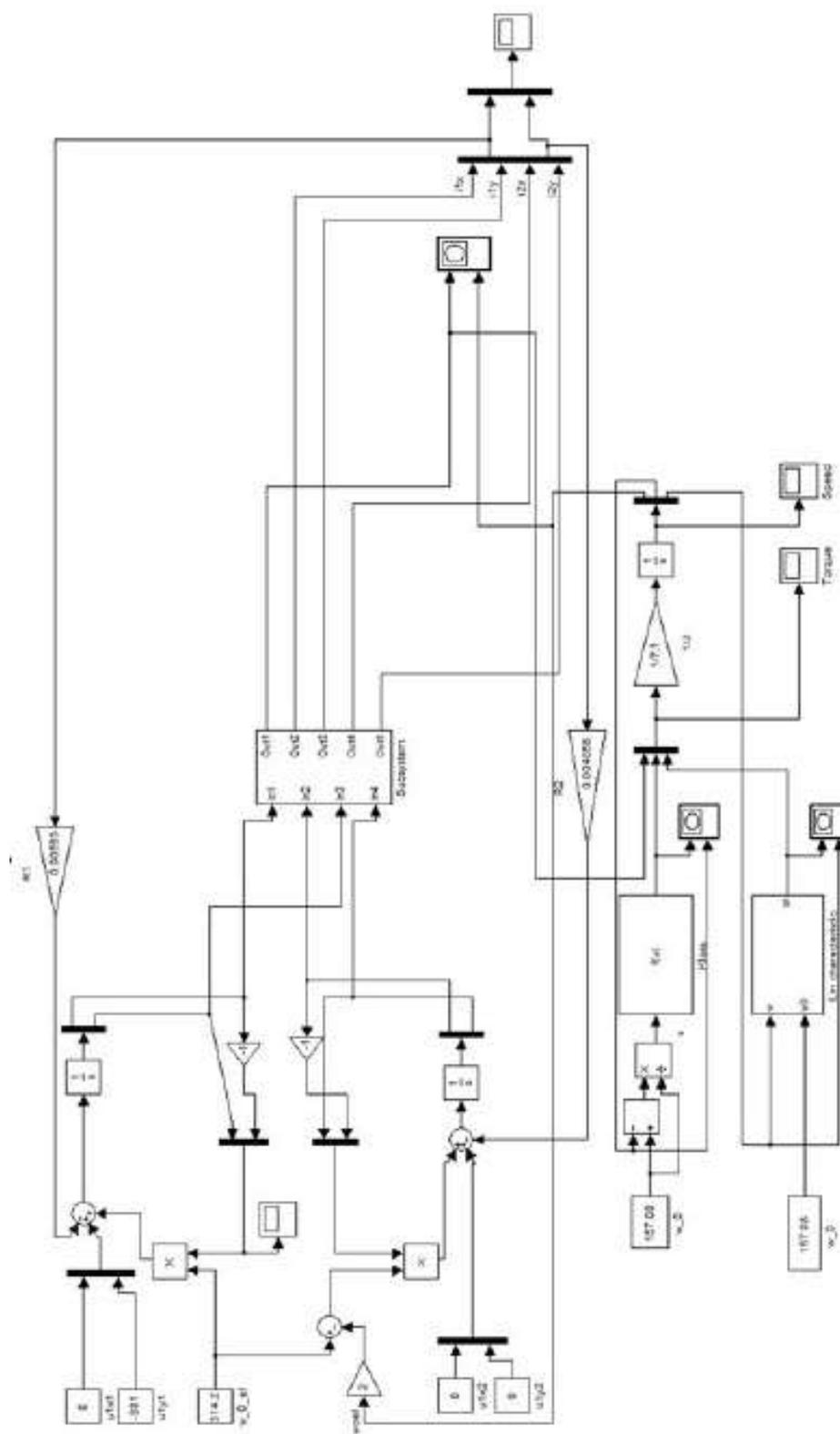


Рис. 1. Модель АД, включенная в себя модель АД по уравнениям обобщенной машины, линеаризацию формулой Кюсса и с линеаризованной механической характеристикой в Simulink MATLAB

Приложение Б

- 1) Датчики температуры компании ABB SensyTemp TSP111, TSP121, TSP131



Рисунок П.1 – Датчики SensyTemp TSP111, TSP121, TSP131

Исполнение по стандарту:

DIN 43772

Модульная конструкция:

- Измерительная вставка;
- Защитная трубка;
- Шейка;
- Соединительная головка;
- Измерительный преобразователь.

Сменная измерительная насадка:

- Сменная измерительная вставка.

Измерительный преобразователь в соединительной головке

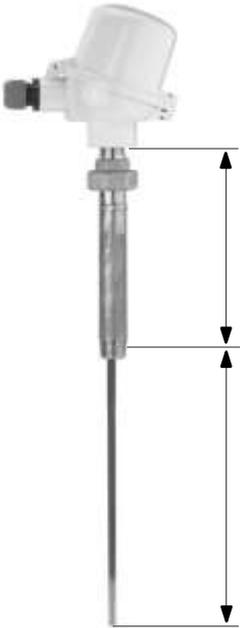
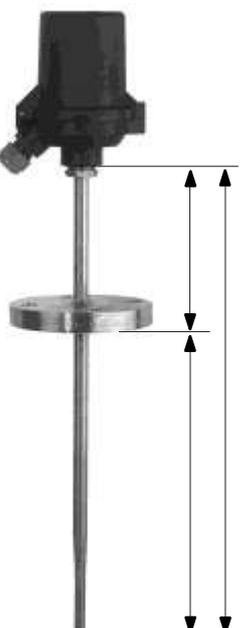
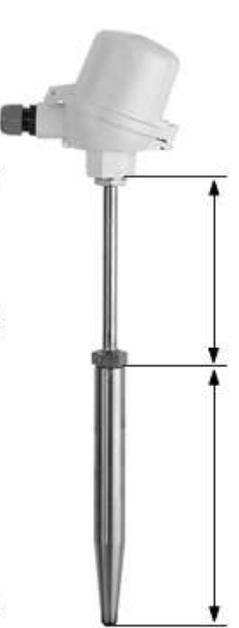
- Опциональный ЖК-индикатор;
- На выбор: только индикация (тип AS) или индикация и настроечные функции (тип A)

- Уровень безопасности преобразователя соответствует SIL2

Область применения:

- Химическая промышленность;
- Энергетическая промышленность;
- Общая техника процессов;
- Производство резервуаров и трубопроводов;
- Машино- и приборостроение.

Таблица П.1 - Обзор датчиков температуры стандарта DIN 43772 со сменной измерительной вставкой

Тип	TSP111	TSP121	TSP131
<p>Легенда</p> <p>K = длина шейки U = монтажная длина N = ном. длина F = длина защитной трубки</p>			
Конструкция	без защитной трубки, для установки в имеющуюся защитную трубку	трубчатая защитная арматура, сварная	защитная трубка из цельного материала, перфорированная
	измерительная вставка, шейка с соединением для защитной трубки, соединительная головка, измерительный преобразователь, опциональный ЖК-индикатор		
Тип присоединения	Установка в уже существующую защитную трубку. Функциональная безопасность обеспечивается только с дополнительной защитной трубкой	Резьба для ввинчивания, фланец, зажимное резьбовое соединение	Патрубок под приварку, резьба для ввинчивания, фланец
Температура транспортировки / хранения	-20 ... 70 °C (-4 ... 158 °F)		
Предельная максимальная температура	(предельная температура для материала или установленного сенсора, приоритет имеет наименьшее из этих двух значений)		
Сенсор	Пленочное измерительное сопротивление: 500 °C (932 °F) Проволочное измерительное сопротивление: 600 °C (1112 °F) Термоэлементы типа K, N, J, E: 1250 °C (2282 °F)		

Установка измерительного преобразователя

Преимущества установки измерительного преобразователя:

- экономия расходов за счет уменьшения количества кабелей;
- усиление сигнала датчика непосредственно в точке измерения и преобразование его в стандартный сигнал (за счет этого повышается помехоустойчивость сигнала);
- возможность установки ДК-индикатора в соединительную головку;
- SIL2 с соответствующим образом классифицированным измерительным преобразователем.

Выходной сигнал датчика температуры определяется выбранным измерительным преобразователем. При использовании преобразователей АВВ собственный нагрев настолько незначителен, что им можно пренебречь.

Таблица П.2 – Виды выходных сигналов

Тип	
TR04 4 ... 20 мА	
TTH200 HART 4 ... 20 мА, HART	
TTH300 HART 4 ... 20 мА, HART	
TTH300 PA PROFIBUS PA	
TTH300 FF FOUNDATION Fieldbus H1	

2) Датчики 266SH для измерения дифференциального давления компании АБВ



Рисунок П.2 – Датчик давления 266SH

Преобразователи разности давления АБВ располагают широким диапазоном возможных вариантов коммуникации. Наилучшая точность измерений преобразователя- 0.025 %.

Надежная сенсорная система в сочетании с новейшими цифровыми технологиями:

- обеспечивает большой диапазон измерения: до 100:1.

Широкий выбор сенсоров:

- позволяет оптимизировать все эксплуатационные характеристики и обеспечить стабильность измерений.

Гибкие возможности конфигурирования:

- обеспечиваются локально через клавиатуру на ЖК-дисплее

Новая технология клавиатуры TTG («через стекло»):

- позволяет быстро и просто осуществлять конфигурирование без необходимости открытия крышки, даже во взрывоопасных условиях окружающей среды

Таблица П.3 – Пределы диапазона измерения

Сенсор Код	Верхний предел диапазона (ВПИ)	Нижний предел измерений (НПИ)			Минимальный диапазон измерения	
		266DSH для измерения дифф. давления	266PSH для измерения изб. давления	266VSH для измерения абс. давления	266DSH для измерения дифференциального давления 266PSH для измерения избыточного давления	266VSH для измерения абс. давления
А	1 кПа	-1 кПа	-1 кПа		0,05 кПа	
	10 мбар	-10 мбар	-10 мбар		0,5 мбар	
	4 дюйм. вод.ст.	-4 дюйм. вод.ст.	-4 дюйм. вод.ст.		0,2 дюйм. вод.ст.	
В	4 кПа	-4 кПа	-4 кПа		0,2 кПа	
	40 мбар	-40 мбар	-40 мбар		2 мбар	
	16 дюйм. вод.ст.	-16 дюйм. вод.ст.	-16 дюйм. вод.ст.		0,8 дюйм. вод.ст.	
Е	16 кПа	-16 кПа	-16 кПа	0,07 кПа абс. (§)	0,54 кПа	0,54 кПа
	160 мбар	-160 мбар	-160 мбар	0,07 мбар абс. (§)	5,4 мбар	5,4 мбар
	64 дюйм. вод.ст.	-64 дюйм. вод.ст.	-64 дюйм. вод.ст.	0,5 мм ртутн.ст. (§)	2,16 дюйм. вод.ст.	4 мм ртутн.ст.

F	40 кПа 400 мбар 160 дюйм. вод.ст.	-40 кПа -400 мбар -160 дюйм. вод.ст.	-40 кПа -400 мбар -160 дюйм. вод.ст.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	0,4 кПа 4 мбар 1,6 дюйм. вод.ст.	0,67 кПа 6,7 мбар 5 мм ртутн.ст.
G	65 кПа 650 мбар 260 дюйм. вод.ст.	-65 кПа -650 мбар -260 дюйм. вод.ст.	-65 кПа -650 мбар -260 дюйм. вод.ст.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	0,65 кПа 6,5 мбар 2,6 дюйм. вод.ст.	1,1 кПа 11 мбар 8 мм ртутн.ст.
H	160 кПа 1600 мбар 642 дюйм. вод.ст.	-160 кПа -1600 мбар -642 дюйм. вод.ст.	1 кПа абс. 10 мбар абс. 0,15 фунтов на кв. дюйм абс.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	1,6 кПа 16 мбар 6,4 дюйм. вод.ст.	2,67 кПа 26,7 мбар 20 мм ртутн.ст.
M	600 кПа 6 бар 87 фунтов на кв. дюйм	-600 кПа -6 бар -87 фунтов на кв. дюйм	1 кПа абс. 10 мбар абс. 0,15 фунтов на кв. дюйм абс.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	6 кПа 0,06 бар 0,87 фунтов на кв. дюйм	10 кПа 0,1 бар 1,45 фунтов на кв. дюйм
P	2400 кПа 24 бар 348 фунтов на кв. дюйм	-2400 кПа -24 бар -348 фунтов на кв. дюйм	1 кПа абс. 10 мбар абс. 0,15 фунтов на кв. дюйм абс.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	24 кПа 0,24 бар 3,5 фунтов на кв. дюйм	40 кПа 0,4 бар 5,8 фунтов на кв. дюйм
Q	8000 кПа 80 бар 1160 фунтов на кв. дюйм	-8000 кПа -80 бар -1160 фунтов на кв. дюйм	1 кПа абс. 10 мбар абс. 0,15 фунтов на кв. дюйм абс.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	80 кПа 0,8 бар 11,6 фунтов на кв. дюйм	134 кПа 1,34 бар 19,4 фунтов на кв. дюйм
S	16000 кПа 160 бар 2320 фунтов на кв. дюйм	-16000 кПа -160 бар -2320 фунтов на кв. дюйм	1 кПа абс. 10 мбар абс. 0,15 фунтов на кв. дюйм абс.	0,07 кПа абс. (\$) 0,07 мбар абс. (\$) 0.5 мм ртутн.ст. (\$)	160 кПа 1,6 бар 23,2 фунтов на кв. дюйм	267 кПа 2,67 бар 38,7 фунтов на кв. дюйм

Выходной сигнал:

- Двухканальный от 4 до 20 мА; линейная или квадратичная функция выходного сигнала (по выбору пользователя), степень 3/2 или 5/2, квадратичная для реверсивного потока, таблица линеаризации на 22 пункта (т.е. для измерения уровня в горизонтальном или сферическом резервуаре);

- Связь через протокол HART® позволяет накладывать на сигнал от 4 до 20 мА переменную дискретного процесса, с протоколом на основе стандарта Veil 202 FSK.

- 3) LD290 серия: Интеллектуальные преобразователи избыточного давления и уровня компании Esma-WirelessHART
4)



Рисунок П.3 – Преобразователь давления LD290

Серия LD290 – это преобразователи избыточного давления среднего ценового диапазона. В основе преобразователей применяется проверенная емкостная сенсорная ячейка, гарантирующая надежность работы и высокие технические характеристики.

Для всех датчиков серии LD290 по требованию заказчика доступны муфтовые выносные мембраны и типы присоединений для применения в санитарных условиях.

Модель LD291 - это HART® датчик давления, оснащенный цифровым протоколом HART, значительно упрощающим процедуру настройки и удаленной диагностики датчиков давления. В основе преобразователя находится современный микропроцессорный электронный блок обработки сигнала и надежный емкостной сенсор. Блок обработки сигнала давления учитывает “на лету” и корректирует измеренные значения с учетом возможных колебаний температуры и других параметров.

Настройка и диагностика датчиков

LD291 - HART датчик давления может настраиваться через:

- Программу SMAR CONF401 для Windows;
- Универсальный комплекс настройки оборудования HART SMAR DDCON100 для Windows;
- Оборудование и ПО других производителей, поддерживающих технологии DD (Device Description) или DTM (Device Type Manager), например AMS, FieldCare, PACTware, HART коммутаторы ННТ275 и ННТ375, PRM Device Viewer.



Рисунок П.4 – LD291 Датчик давления HART

Для постоянной диагностики и управления преобразователями HART LD291 используются различные программные обеспечения, работающие в режиме реального времени.

Таблица П.4 – Основные характеристики датчика давления

Выходной сигнал	Двухпроводная схема, 4-20 мА с интегрированным цифровым протоколом HART (опция - датчик LD291)
Диапазон	от 0 до 25 МПа (3600 psi)
Диапазон	Настройка в диапазоне 1:40
Погрешность	± 0.075% для калиброванного диапазона
Питание	12-45 В пост. тока
Время реакция (демпфирования) на выходном сигнале	100 мс
Взрывозащищенность	взрывонепроницаемая оболочка Exida
Наработка на отказ (MTBF)	239 лет
Защита от несанкционированного доступа	Да, на аппаратном уровне
Диагностика	Да через ЖКИ
Индикация	Опционально 41/2 индикатор значения и 5-символьный цифробуквенный ЖКИ дисплей меню
Электронный блок	Только цифровые схемы. Математический со-процессор.
Цифровые протоколы FOUNDATION fieldbus и PROFIBUS PA	Возможность расширения путем замены основной электронной платы.
Температура окружающей среды	от -40 до 85 °С
Температура измеряемой среды	от -40 до 100 °С (силиконовое масло)
Влажность окружающей среды	от 0 до 100%
Корпус электронного блока	Алюминий с порошковой покраской или нержавеющей сталь 316. Пылевлагозащита IP66.
Материалы, контактирующие с измеряемой средой	нержавеющая сталь 316L SST, сплав Hastelloy C276
Масса	не более 2 кг

5) LD400WH Беспроводные датчики давления, уровня и расхода WirelessHART

Серия LD400WH представляет собой линейку интеллектуальных беспроводных датчиков перепада давления, абсолютного и избыточного давления, дифференциального давления для измерения расхода и уровня, включая погружные преобразователи уровня и преобразователи пищевого (санитарного) исполнения. LD400WH является прекрасным решением для высокоточных промышленных измерений и беспроводной передачи данных.

Серия преобразователей LD400WH - это надежные и безопасные решения для измерения давления, уровня и расхода.



Рисунок П.5 - Беспроводной преобразователь LD400WH

Основные характеристики беспроводных преобразователей LD400WH:

- Погрешность $\pm 0,045\%$.
- Стабильность $\pm 0,2\%$ - 12-летняя гарантия.
- Диапазон измерений 200:1.
- Расширенные средства диагностики.
- Возможность работы с оборудованием и ПО для настройки других производителей через открытые библиотеки DD, EDDL и FDT / DTM.
- Простая настройка по месту эксплуатации, включая калибровку и установку нуля.
- Выполнение функции повторителя/роутера в беспроводной сети.
- Функция повторителя / маршрутизаторов на сеть.
- Поддержка монополюсного режима работы (Burst Mode) в сети HART.
- Питание от встроенной батареи с большим ресурсом.
- WirelessHART протокол, HART версия 7.

6) ТТ400 Интеллектуальный датчик температуры WirelessHART



Рисунок П.6 – Беспроводной датчик температуры ТТ400WH

Преобразователь температуры ТТ400 разработан для возможности установки в самых тяжелых полевых условиях. Он имеет высокий уровень пылевлагозащитности, а также может применяться во взрывоопасных зонах, благодаря взрывонепроницаемой оболочке и искробезопасной цепи.



Рисунок П.7 – Интеллектуальный преобразователь температуры ТТ400 SIS

Надежность и высокое качество изготовления ТТ400 SIS, а также ряд встроенных алгоритмов защиты и предупреждения опасности делают преобразователь отличным прибором в процессах, выход из-под контроля которых может привести к риску для людей или окружающей среды.

ТТ400WH используется в измерениях, требуемых при беспроводной передаче данных. Используется главным образом для измерения температуры, с применением термометра сопротивления или термопары.

ТТ400WH может обрабатывать сигнал от двух сенсоров и функционирует одним из следующих способов:

- Простое измерение с одним сенсором обеспечивает токовый выход или коммуникацию;

Дифференциальное измерение с двумя сенсорами одного типа обеспечивает токовый выход или коммуникацию;

- Резервное измерение с двумя сенсорами одного типа обеспечивает токовый выход или коммуникацию;

- Максимальное, минимальное или среднее измерение с двумя сенсорами одного типа обеспечивает токовый выход (только HART);

- Основная погрешность $\pm 0,02\%$;

- Различные виды сенсоров и соединений в одном устройстве;

- Усовершенствованная диагностика;

- Поддержка DD/EDDL и FDT/DTM;

- Запасной сенсор;

- Протокол HART версия 7;

- Питание литиевые аккумуляторы (Li-SOC12) 3,6 V, всего 7,2 V.



Рисунок П.8– Варианты подключения датчиков температуры