

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
« ___ » _____ 2024 г.

Система мониторинга усилий на основе анализа мгновенных энергетических
преобразований в асинхронном электроприводе

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Руководитель работы,
к.т.н., доцент каф. ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
« ___ » _____ 2024 г.

Автор работы,
студент группы КЭ-406
_____ А.А. Войнов
« ___ » _____ 2024 г.

Нормоконтролёр,
ст. преп. каф. ЭВМ
_____ С.В. Сяськов
« ___ » _____ 2024 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭВМ

_____ Д.В. Топольский

«__» _____ 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу бакалавра
студенту группы КЭ-406

Войнову Артёму Александровичу

обучающемуся по направлению

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

Тема работы: «Система мониторинга усилий на основе анализа мгновенных
энергетических преобразований в асинхронном электроприводе»
утверждена приказом по университету от «__» _____ 2024 г. №

Срок сдачи студентом законченной работы: 01 июня 2024 г.

Исходные данные к работе:

- SCADA-система MasterSCADA версии 3.12;
- MasterOPC Universal Multi-Protocol Server версии 5.0.34;
- MathWorks MATLAB R2023a версии (9.14.0).

Перечень подлежащих разработке вопросов:

1. Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по тематике работы.
2. Построение математической модели мониторинга усилий.
3. Формирование архитектуры системы.
4. Программная реализация.

Дата выдачи задания: 1 декабря 2023 г.

Руководитель работы _____ / *Д.В. Топольский* /

Студент _____ / *А.А. Войнов* /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Этап	Срок сдачи	Подпись руководителя
Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы по тематике работы	01.03.2024	
Построение математической модели мониторинга усилий	24.03.2024	
Формирование архитектуры системы	07.04.2024	
Программная реализация	15.05.2024	
Компоновка текста работы и сдача на нормоконтроль	24.05.2024	
Подготовка презентации и доклада	30.05.2024	

Руководитель работы _____ / *Д.В. Топольский* /

Студент _____ / *А.А. Войнов* /

Аннотация

А.А. Войнов. Система мониторинга усилий на основе анализа мгновенных энергетических преобразований в асинхронном электроприводе. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ВШ ЭКН; 2024, 61 с., 23 ил., библиогр. список – 21 наим.

В данной выпускной квалификационной работе была разработана система мониторинга усилий асинхронного электропривода, которая обеспечивает сбор исходных данных для расчёта усилий на основе анализа мгновенных энергетических преобразований и его графическое представление при помощи SCADA – системы.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был произведён анализ различных методов и решений мониторинга усилий асинхронного электропривода, построена математическая модель для мониторинга усилий, произведена выборка компонентов для реализации системы мониторинга, смоделирован асинхронный электропривод в программном пакете MATLAB для проверки работоспособности системы, реализован проект в MasterSCADA для визуализации и представления информации о крутящем моменте электропривода, а также произведены демонстрационные испытания, отображающие возможности системы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ЗАТРАГИВАЮЩЕЙ ИССЛЕДУЕМУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОБЛЕМУ	9
1.1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	9
1.2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА УСИЛИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	12
1.3 АРХИТЕКТУРА SCADA-СИСТЕМЫ.....	16
1.3.1 НИЖНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ.....	17
1.3.2 СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ	18
1.3.3 ВЕРХНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ	19
1.3.4 КОММУНИКАЦИОННАЯ СИСТЕМА.....	20
1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	27
1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ.....	29
2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА УСИЛИЙ	33
3. ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ	38
3.1 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ	38
3.2 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ	39
3.3 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ SCADA-СИСТЕМЫ.....	40
3.3.1 ВЫБОР ДАТЧИКОВ	40
3.3.2 ВЫБОР ШЛЮЗА ПРОТОКОЛОВ	41
3.3.3 ВЫБОР SCADA-КЛИЕНТА	45
4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	49
4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	49
4.2 СОЗДАНИЕ СЕРВЕРА ОРС	52
4.3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ В MASTERSCADA	54
4.4 ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	59

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире электропривод выступает в качестве неотъемлемой и ключевой составляющей большинства технологических процессов, обеспечивая эффективную передачу механической энергии, необходимой для функционирования разнообразных рабочих машин и механизмов. Наиболее ресурсосберегательный и энергоэффективный из всех видов электромеханических преобразователей признан регулируемый асинхронный электропривод, за счёт оптимизации работы электродвигателей и исключения непроизводительного потребления энергии, а также относительной дешевизны [1]. Внезапные сбои и отказы в работе такого оборудования могут повлечь за собой значительные экономические потери для предприятий. В связи с этим, в рамках концепции "Индустрия 4.0", на современных производственных площадках активно внедряются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Важнейшую роль в составе АСУ ТП играют системы мониторинга и сигнализации, предназначенные для непрерывного контроля параметров и состояния оборудования, а также своевременного оповещения об отклонениях от заданных режимов работы или о возникновении нештатных ситуаций. Это позволяет предотвратить серьезные инциденты, минимизировать убытки от простоев, а также повысить оперативность и качество работы сотрудников за счет автоматизации рутинных операций по сбору и анализу данных.

Одним из ключевых факторов, определяющих интенсивность износа элементов привода и оборудования, являются усилия, передаваемые вращающимися частями привода [2]. Для осуществления мониторинга этих усилий необходимо производить расчёт крутящего момента электродвигателя.

Существующие системы мониторинга усилий в АСУ ТП зачастую применяют прямой метод измерения механического момента. Данный подход предполагает интеграцию в систему электропривода специализированных датчиков момента, что сопряжено с рядом недостатков, таких как высокая

сложность внедрения таких систем, значительные финансовые затраты, потенциальная ненадёжность, особенно при высокочастотном вращении вала.

Данная работа посвящена разработке бездатчиковой системы мониторинга усилий, использующий косвенный метод определения вращающего момента, основанный на анализе мгновенных энергетических преобразований, происходящих в электроприводе. Для расчёта крутящего момента исходными данными являются измеренные мгновенные значения токов, напряжений и скорости вращения, получаемых с датчиков, уже непосредственно интегрированных в систему электропривода. Мониторинг усилий электропривода предлагается осуществлять удаленно с использованием технологии диспетчеризации. Данные с датчиков будут передаваться по каналам связи на сервер, а затем на диспетчерские пульта, производиться расчёт момента и отображаться наглядно.

Важной особенностью системы является её универсальность, низкая стоимость, простота в использовании и возможность интеграции в различные виды современных производственных процессов, что позволит существенно повысить эффективность мониторинга состояния приводного оборудования.

Целью данной работы является создание эффективной системы мониторинга усилий асинхронного электропривода, способной отображать текущие значения крутящего момента и своевременно оповещать оператора системы при обнаружении отклонений от нормы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Подбор элементов системы мониторинга.
2. Создание проекта в SCADA-системе.
3. Создание сервера OPC.
4. Создание модели асинхронного электропривода в программной среде MATLAB Simulink.
5. Настройка взаимодействия между моделью и SCADA-системой.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ЗАТРАГИВАЮЩЕЙ ИССЛЕДУЕМУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ ПРОБЛЕМУ

1.1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Существующие методы мониторинга технического состояния электроприводов можно классифицировать в зависимости от контролируемых параметров на следующие группы: виброакустический, термический и электромагнитный мониторинг [3]. Каждый метод применяет уникальные алгоритмы для обработки и анализа данных.

Виброакустический метод мониторинга основан на анализе параметров вибрации электроприводов. В его рамках исследуются низкочастотные спектры и функции когерентности, связанные со скоростью вращения ротора. Сравнение полученных характеристик с эталонными спектрами позволяет выявлять такие дефекты, как деформация корпусных деталей и разбалансировка роторов. Однако данный метод сопряжен с рядом недостатков, таких как необходимость использования датчиков вибрации, жесткие требования к их креплению и сложность обеспечения надежной связи с устройствами обработки информации.

Методы контроля теплового состояния электроприводов базируются на измерении температуры в пазах статора и стержнях ротора. Они применяются для диагностики нарушений нормальных режимов работы электродвигателей, а также для оценки степени старения конструкционных материалов. К основным недостаткам этого метода относятся необходимость использования дорогостоящих датчиков температуры и сложность их установки на вращающиеся части электрических машин.

Электромагнитный метод мониторинга основан на анализе отклонений токов и напряжений от номинальных значений по амплитуде, частоте и фазе,

а также на исследовании появления высших гармоник в спектре токов и напряжений. Преимуществом данного метода является возможность контроля большинства диагностических параметров без использования дополнительных датчиков, поскольку необходимые данные поступают непосредственно от источника питания привода. Однако существенным недостатком является сложность алгоритмов преобразования и обработки получаемой информации.

Рассмотренные выше методы безусловно, имеют свои достоинства и эффективно применяются для диагностики различных дефектов и отклонений. Однако ни один из этих методов не дает прямой информации о крутящем моменте, развиваемом электродвигателем и являющемся ключевым фактором, определяющим нагрузку и износ привода в процессе эксплуатации. Именно поэтому актуальной задачей является разработка систем мониторинга крутящего момента для электроприводов.

На данный момент существует два способа измерения крутящего момента: прямой и косвенный. Прямой метод предполагает применение специализированных датчиков крутящего момента, называемых динамометрами, которые, в общем случае, непосредственно регистрируют величину крутящего момента на валу и отображают его на цифровом дисплее.

В современной практике применяются различные типы динамометров, которые классифицируются по нескольким критериям (рисунок 1.1).

Во-первых, они различаются по принципу измерения, лежащему в основе их функционирования [4]. Так, существуют оптические, фотоэлектрические, индукционные, тензометрические динамометры, основанные на эффекте сопротивления деформации, а также ёмкостные датчики.

Во-вторых, динамометры различают по способу их монтажа на вращающийся вал машины. Наиболее распространенными являются установка путем приклеивания на тщательно подготовленную поверхность

вала, зажимное крепление на обойме и приварка к валу специальной пластины с датчиками.

Третьим классификационным признаком выступает источник питания динамометра - автономные батареи или самозарядка от вращения.



Рисунок 1.1 — классификация измерителей крутящего момента

Использование современных динамометров зачастую позволяет достичь высокой точности измерения крутящего момента. Однако размещение измерительного устройства непосредственно на валу двигателя сопряжено с рядом трудностей и недостатков. В частности, это усложняет монтажные работы, операции замены и обслуживание оборудования, а также влечет за собой увеличение общей стоимости системы. Более того, в определенных условиях технологического процесса установка датчика на вал может быть попросту нецелесообразной ввиду указанных недостатков или даже принципиально невозможной. Следовательно, в подобных ситуациях предпочтительным является использование второго метода измерения – косвенного метода.

Одним из перспективных косвенных методов определения крутящего момента электрических машин является подход, основанный на анализе мгновенных энергетических преобразований, происходящих в электромеханическом преобразователе. Данная методика, представленная в работах [5, 6, 7], ориентирована на применение измерительных средств, интегрированных в систему электропривода между преобразователем частоты и электродвигателем.

Методика базируется на законе сохранения энергии и примечательна от других косвенных методов тем, что позволяет с высокой точностью рассчитывать крутящий момент за счет вычисления адаптационных коэффициентов применяемых для вычисления потерь мощности, неизбежно возникающих в асинхронном электроприводе [8].

Использование такого метода позволяет отказаться от установки потенциально ненадежных датчиков непосредственно на валу двигателя. Кроме того, применение указанного подхода открывает возможность существенно расширить информационные возможности системы электропривода за счет получения дополнительных диагностических данных. Важным преимуществом является также снижение общей стоимости разработки и внедрения подобных систем мониторинга крутящего момента.

1.2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА УСИЛИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Перед началом разработки системы рассмотрим уже готовые решения систем мониторинга крутящего момента. Одним из примеров существующих систем мониторинга крутящего момента на основе прямого метода измерения крутящего момента является система, разработанная отечественной компанией "ZETLAB" [9]. Ее основным элементом является тензометрический датчик крутящего момента, состоящий из четырех тензорезисторов, наклеенных на упругий элемент датчика (рисунок 1.2). При приложении крутящего момента к валу происходит деформация упругого элемента, что

приводит к изменению электрического сопротивления тензорезисторов. Выходной сигнал датчика поступает в измерительный модуль, где происходит его усиление, фильтрация и аналого-цифровое преобразование.

Далее цифровые данные передаются в SCADA-клиент для дальнейшей обработки, визуализации и архивирования. SCADA-клиент интегрирует функции сбора данных, их обработки и визуализации через человеко-машинный интерфейс.

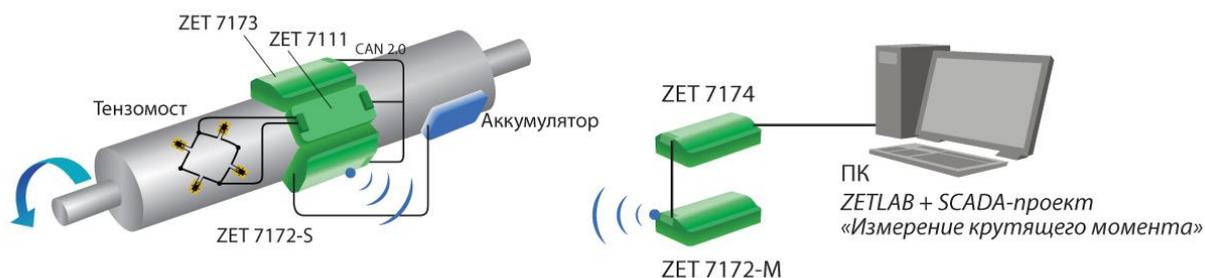


Рисунок 1.2 — Система мониторинга крутящего момента ZETLAB

Таким образом, данная система мониторинга крутящего момента электропривода представляет собой комплексное решение, которое объединяет датчики, измерительные модули и SCADA-клиент для обеспечения непрерывного контроля крутящего момента и своевременного выявления аномалий или отклонений от нормального режима работы.

Еще одним примером коммерческого решения для мониторинга крутящего момента является система MetaPower Quad, разработанная норвежской компанией "Kongsberg Maritime" [10]. Принцип ее работы основан на бесконтактном оптическом методе измерения угловых перемещений вращающегося вала.

Конструктивно система включает две кодированные кольцевые шкалы с прорезями, устанавливаемые на вал на определенном расстоянии друг от друга (рисунок 1.3). Два оптических датчика, закрепленные на жестких опорных каркасах, производят считывание краев прорезей на шкалах, формируя цифровые сигналы для последующих расчетов.

Полученные с датчиков данные передаются по протоколу TCP/IP в процессорный модуль обработки, где на их основе происходит вычисление текущих значений крутящего момента и мощности на валу с использованием алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Рассчитанные параметры крутящего момента и мощности затем поступают в человеко-машинный интерфейс для удобной визуализации и наблюдения за ними оперативным персоналом. Дополнительно предусмотрена возможность передачи данных в облачные системы для расширенной аналитики.



Рисунок 1.3 — Система мониторинга крутящего момента MetaPower Quad

Японская компания "SUGAWARA Laboratories Inc" предлагает собственное решение для мониторинга и измерения крутящего момента [11]. Их система включает в себя специализированный контроллер, работающий совместно с динамометрическими датчиками, основанными на принципе гистерезисного торможения.

Принцип действия датчиков крутящего момента базируется на эффекте магнитного гистерезиса при вращении ферромагнитного вала внутри тормозного устройства. Возникающий при этом крутящий момент пропорционален подаваемому на тормоз управляющему току, что позволяет производить прецизионные измерения момента.

Контроллер системы осуществляет оцифровку аналоговых сигналов с динамометрических датчиков и их дальнейшую обработку посредством специализированного программного обеспечения. Алгоритмы программы позволяют не только определять текущие значения крутящего момента, но и проводить диагностику возможных неисправностей и сбоев в работе системы. Рассчитанные данные крутящего момента визуализируются в удобном для оператора интерфейсе, обеспечивая возможность мониторинга параметров привода в реальном времени (рисунок 1.4).

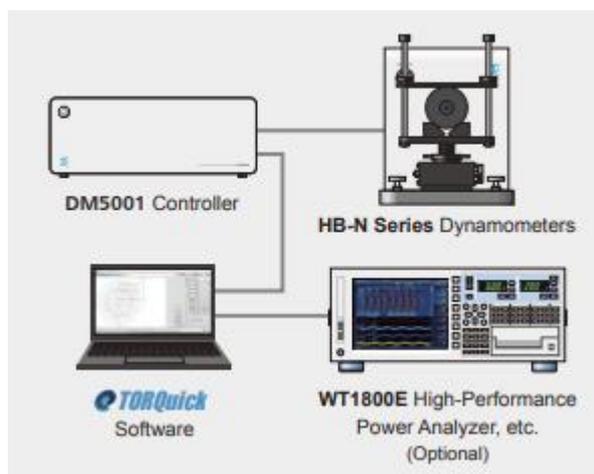


Рисунок 1.4 — Система мониторинга крутящего момента SUGAWARA

Проведенный обзор существующих коммерческих систем мониторинга крутящего момента позволяет выделить базовый перечень функций, являющихся обязательными для полноценной работы подобных систем. Это:

- сбор информации с датчиков и контроллеров;
- прием и передача команд оператора/диспетчера на исполнительные устройства;
- взаимодействие с информационной системой предприятия по сетевым каналам;
- отображение в удобной для восприятия форме параметров технологического процесса и состояния оборудования с помощью мнемосхем, таблиц, трендов и т.п.;
- оповещение об аварийных ситуациях и событиях, связанных с управляемым технологическим процессом.

При этом каждое конкретное предприятие может иметь дополнительные специфические требования, определяющие необходимость реализации расширенного функционала в программно-аппаратном комплексе системы мониторинга.

1.3 АРХИТЕКТУРА SCADA-СИСТЕМЫ

Для разрабатываемой системы мониторинга наиболее оптимальным решением будет использование SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition). Она представляет собой систему диспетчерского управления и сбора данных, состоящая из различных аппаратных компонентов, а также программного обеспечения [12]. Аппаратное и программное обеспечение в системе SCADA работают совместно для управления и мониторинга оборудования в промышленном процессе. SCADA-системы повышают эффективность рабочего процесса за счет сбора данных о процессе в режиме мягкого реального времени. В дополнение уже указанным функциям SCADA-системы обеспечивают:

- хранение получаемой информации в архивах;
- формирование сведений и отчетных документов по созданным на этапе проектирования шаблонам;
- вторичная обработка необходимой информации;

Архитектура SCADA-системы состоит из нескольких ключевых компонентов и уровней, обеспечивающих её функционирование (рисунок 1.5):

- полевые устройства, входящие в нижний уровень;
- удалённые терминалы, программируемые логические контроллеры, составляющие средний уровень;
- человеко-машинный интерфейс (HMI) и персонал, находящиеся на верхнем уровне;
- коммуникационную систему.

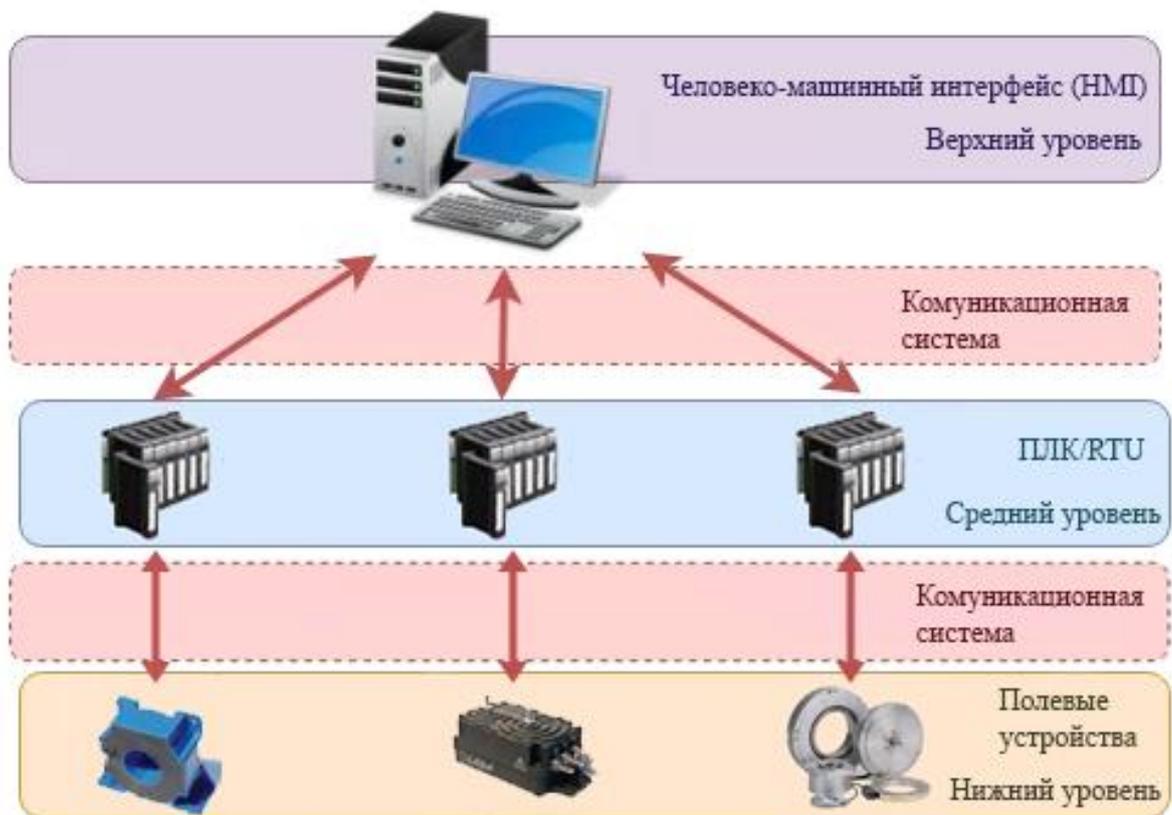


Рисунок 1.5 — Типичная архитектура системы SCADA

Разберём подробнее каждый уровень системы.

1.3.1 НИЖНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ

К нижнему уровню системы относятся устройства, предназначенные для мониторинга и управления определёнными параметрами технологического процесса. К ним относятся, в первую очередь, датчики и исполнительные механизмы. Элементы нижнего уровня выполняют следующие задачи:

- измерение контролируемого параметра и преобразование его в форму сигнала, пригодную для передачи по физическим каналам связи на средний уровень с целью регистрации и мониторинга состояния технологического процесса;
- воздействие на технологический процесс посредством управления исполнительными механизмами для изменения режимов функционирования системы в соответствии с заданными требованиями.

1.3.2 СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ

Средний уровень системы включает удалённые терминалы и программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые выполняют функции мониторинга и управления одним или несколькими полевыми устройствами одновременно, обеспечивая передачу информации в главный диспетчерский пункт в реальном времени.

Компоненты среднего уровня выполняют следующие функции:

- измерение входных аналоговых и цифровых сигналов, поступающих по каналам связи с объектами управления;
- опрос состояния датчиков и считывание их показаний;
- отслеживание нарушений пороговых и аварийных значений контролируемых технологических параметров;
- прием команд от оператора и систем противоаварийной защиты, формирование команд управления исполнительными механизмами;
- формирование команд срабатывания систем противоаварийной защиты и блокировок при нарушении технологических параметров или некорректных действиях оператора;
- реализация алгоритмов программно-логического управления объектом в соответствии с заданной логикой;
- формирование команд для управления исполнительными механизмами и контроль их состояния.

Следует отметить, что для систем мониторинга задачи управления полевыми устройствами не являются обязательными. В таких случаях ПЛК может быть исключен из системы для снижения ее стоимости, а в качестве терминала может использоваться аппаратный шлюз. Этот шлюз обеспечивает базовую функциональность связи и передачи данных.

Кроме того, вместо шлюза может быть применен модуль ввода-вывода для обеспечения коммуникации элементов SCADA-системы по проводному каналу связи.

1.3.3 ВЕРХНИЙ УРОВЕНЬ СИСТЕМЫ

Верхний уровень системы включает главный диспетчерский пункт со SCADA-клиентом и диспетчером. Главный диспетчерский пункт может быть представлен как одиночным компьютером с дополнительными устройствами для подключения к каналам связи, так и крупной вычислительной системой или локальной сетью рабочих станций и серверов. Наличие оператора или диспетчера, осуществляющего контроль над работой системы является обязательным. В нормальных условиях эксплуатации роль оператора заключается в периодическом мониторинге отображаемой информации и корректировке параметров для обеспечения оптимального функционирования системы. Большую часть времени диспетчер пассивно наблюдает за визуализированными данными о ходе технологических процессов.

На этом уровне осуществляется сбор, обработка и хранение информации, полученной на нижних уровнях, для её последующей визуализации и представления диспетчеру через НМІ. Визуализация включает мнемосхемы, графики, тренды и журналы сообщений, что позволяет оперативному персоналу эффективно мониторить и управлять технологическим процессом.

Компоненты верхнего уровня обеспечивают:

- мониторинг состояния технологического процесса, контроль текущих значений технологических параметров, состояния оборудования и работоспособности средств системы автоматизации;
- управление техническими средствами и настройка параметров компонентов системы автоматизации;
- вывод диагностической информации об ошибках, сбоях и предупреждениях в работе контроллеров и других компонентов;
- световая и звуковая сигнализация при отклонении контролируемых параметров от заданных пороговых значений;

- экспорт/импорт данных в стандартных промышленных форматах (Modbus, PROFIBUS, CAN, EtherCAT, EtherNet/IP и др.) для интеграции с внешними системами;
- представление оперативному персоналу информации о ходе процессов посредством визуализации в виде мнемосхем, графиков, трендов и т.д.

1.3.4 КОММУНИКАЦИОННАЯ СИСТЕМА

В коммуникационную систему входят различные интерфейсы и протоколы связи, которые обеспечивают коммуникацию среди всех компонентов SCADA-систем. Рассмотрим детально различные интерфейсы и протоколы связи, используемые на каждом из уровней SCADA-системы.

1.3.4.1 НИЗКОУРОВНЕВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

Один из наиболее широко применяемых протоколов для передачи данных между устройствами на промышленном уровне — это коммуникационный протокол Modbus, основанный на клиент-серверной архитектуре ведущий-ведомый «master – slave» [13]. Устройство со статусом «master» выступает в роли клиента, инициируя команды управления и запросы на передачу информации двух типов: запросы на чтение данных и запросы на запись/изменение данных. Устройство со статусом «slave» функционирует как сервер, принимая команды от ведущего устройства и отвечая путем передачи соответствующих данных. В типичной сетевой конфигурации существует одно ведущее устройство и несколько ведомых устройств, реагирующих на запросы от ведущего.

Протокол Modbus предназначен для передачи данных на нижние уровни через последовательные линии связи, такие как RS-485, RS-232 и Ethernet. Изначально, компания Modicon, разработавшая протокол Modbus, использовала интерфейс RS-232 в своих программируемых логических контроллерах для передачи данных. Однако, ограничение RS-232, позволяющее подключать только два устройства, затрудняло интеграцию

нескольких систем. Поэтому был разработан более функциональный интерфейс RS-485, который позволяет подключать до 32 устройств к одной линии связи и увеличивает максимальную дистанцию передачи данных. При скорости 9600 бит/с дальность для RS-232 составляет 15 метров, в то время как для RS-485 она достигает 1200 метров на той же скорости.

Интерфейс RS-485 также ввел концепцию «master»-устройства, которое опрашивает и получает данные от «slave»-устройств, что облегчило взаимодействие с протоколом Modbus. Для работы поверх интерфейсов RS используются две версии протокола: Modbus RTU и Modbus ASCII.

Modbus ASCII кодирует данные в символы таблицы ASCII, представленные в шестнадцатеричном формате. Пакет данных начинается символом двоеточия и заканчивается символами возврата каретки и перевода строки. Этот формат позволяет использовать протокол в каналах связи с высокими задержками и на оборудовании с низкой точностью таймеров. В отличие от него, Modbus RTU кодирует данные в двоичном формате и использует временной интервал тишины в качестве разделителя пакетов. Хотя Modbus RTU чувствителен к задержкам и не может работать на модемных линиях, он обеспечивает более компактные сообщения по сравнению с Modbus ASCII, что позволяет передавать меньший объем данных.

Для передачи данных по физическому каналу с использованием Ethernet-интерфейсов применяется Modbus TCP, который использует стек протоколов TCP/IP. Структура пакетов в Modbus TCP аналогична Modbus RTU, где двоично закодированные данные инкапсулируются в стандартные TCP-пакеты для передачи по IP-сетям.

Протокол Modbus отличается своей открытостью и широким распространением. Практически все производители промышленных систем управления и контроля включают поддержку Modbus в виде программных драйверов. Однако у протокола есть несколько существенных недостатков:

1. Modbus поддерживает передачу только двух типов запросов.

2. Modbus не включает процедуру начальной настройки системы. Сетевые адреса и параметры конфигурируются вручную для каждого устройства на этапе программирования.
3. Modbus не поддерживает передачу сообщений по инициативе ведомого устройства. Ведущее устройство должно постоянно опрашивать ведомые устройства для получения данных.
4. Длина запроса ограничена, и данные могут быть запрошены только из последовательно расположенных регистров.
5. Ведомые устройства не способны самостоятельно обнаружить потерю связи с ведущим устройством.

1.3.4.2 ВЫСОКОУРОВНЕВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

Для обеспечения коммуникации между верхним и средним уровнями существует множество вариантов. Ранее рассмотренный протокол Modbus TCP также может использоваться для этой цели, однако данный способ не всегда удобен. Поскольку с ПЛК и удалённого терминала могут поступать различные типы данных, обработка информационных пакетов через этот протокол занимает значительный объем времени. Кроме того, если автоматизированные рабочие места территориально удалены как друг от друга, так и от шкафа управления, то потребуются развертывание обширной сети с большим количеством кабелей, что является нецелесообразным и неудобным решением.

Более популярными решениями на сегодняшний день являются протоколы OPC. Стоит упомянуть протокол DDE появился еще в 1991 году и активно использовался для целей коммуникации между SCADA-клиентами и ПЛК, но в данный момент всё более вытесняется OLE и COM технологиями, на которых и основан OPC.

OPC завоевал широкое признание в качестве отраслевого стандарта среди разработчиков, системных интеграторов и конечных пользователей АСУ ТП. В настоящее время практически все производители программно-

аппаратных средств для АСУ ТП включают поддержку данного стандарта для своих разрабатываемых продуктов [14].

Стандарт OPC базируется на объектной модели COM/DCOM. Его разработка преследовала цель предоставить промышленным предприятиям универсальный интерфейс для обмена данными с любыми устройствами. До появления OPC каждый SCADA-клиент требовал индивидуальной адаптации к новому оборудованию. После внедрения данного стандарта подавляющее большинство SCADA-клиентов было переработано для использования в качестве OPC-клиентов. Параллельно производители аппаратного обеспечения стали оснащать свои контроллеры, модули ввода-вывода, удалённые терминалы стандартным OPC-протоколом для взаимодействия с OPC-сервером (рисунок 1.6).

Стандартизация интерфейса позволила подключать любое физическое устройство к любой SCADA при условии их соответствия стандарту OPC. Это дало разработчикам возможность создавать единый драйвер для всех SCADA-пакетов, а пользователям - свободу выбора оборудования и программного обеспечения без ограничений по совместимости. Стандарт OPC объединяет набор спецификаций, определяющих функциональность для различных областей применения. Широко используемые текущие стандарты, используемые в АСУ ТП: OPC DA, OPC HDA, OPC UA. Рассмотрим каждый подробнее.

Спецификация OPC DA (Data Access) является наиболее распространенной в промышленной автоматизации. Она реализует функциональность обмена данными между клиентскими приложениями и устройствами. Клиент и сервер OPC DA могут быть размещены, как на одном компьютере, так и на разных машинах, соединенных сетью Ethernet, обеспечивая чтение/запись тегов данных благодаря технологии DCOM.

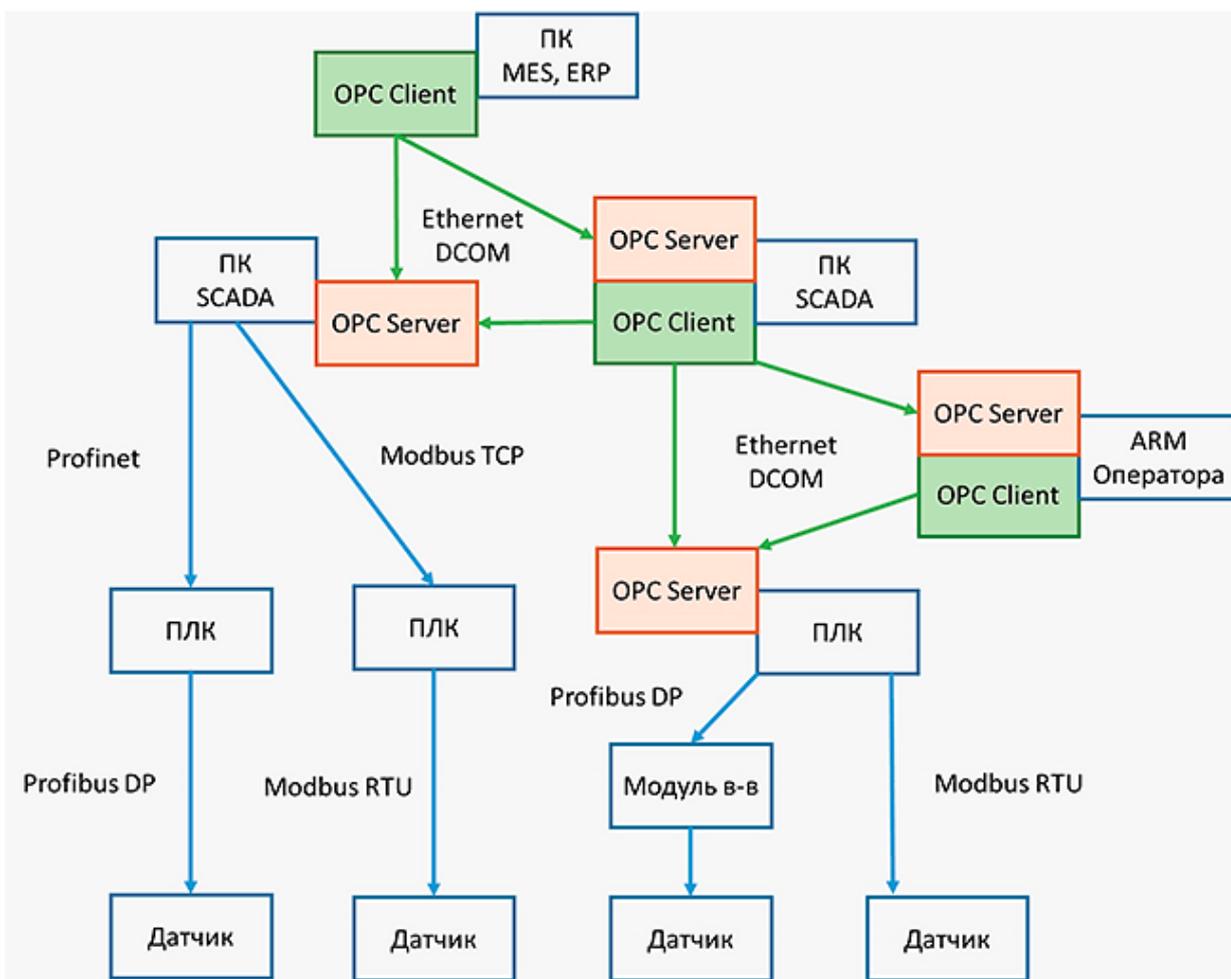


Рисунок 1.6 — Структурная схема системы промышленной автоматизации с использованием стандарта OPC

Для чтения данных из OPC-сервера предусмотрены 4 стандартных режима:

- синхронный: клиент блокируется в ожидании ответа сервера на запрос данных;
- асинхронный: после запроса клиент продолжает работу, сервер асинхронно уведомляет о готовности данных;
- режим подписки: клиент отправляет список тегов, сервер рассылает обновления с учетом порога "мертвой зоны";
- режим обновления данных: клиент получает данные всех активных тегов одновременно для оптимизации.

Источником данных может выступать как кэш OPC, так и непосредственно устройство. Для поддержания актуальности сервер

циклически опрашивает данные с максимальной частотой. Возможна индивидуальная настройка частот опроса для групп тегов, а также исключение пассивных тегов из обновления.

Запись в устройство происходит синхронно (с ожиданием подтверждения) или асинхронно (клиент продолжает работу) без промежуточного буферирования данных.

OPC DA сервер может поставляться в качестве программного обеспечения с пользовательским интерфейсом, который позволяет выполнять дополнительные функции для облегчения работы с оборудованием. Основные функции сервера с пользовательским интерфейсом, помимо обмена данными со SCADA-клиентом:

OPC DA сервер может иметь пользовательский интерфейс для дополнительных функций:

- обнаружение оборудования в промышленной сети;
- настройка параметров устройств (имени, адреса, скорости обмена данными, периода сторожевого таймера, наличие контрольной суммы и др.);
- создание иерархической структуры имен тегов;
- мониторинг значений тегов;
- управление правами доступа к OPC серверу.

Основная цель OPC HDA (Historical Data Access) сервера заключается в предоставлении клиентским приложениям унифицированного интерфейса для доступа к данным из различных источников хранения, таких как нестандартные файлы, СУБД, OPC DA серверы или другие OPC HDA серверы. Спецификация OPC HDA стандартизирует исключительно интерфейсы взаимодействия сервера с клиентскими программами, не регламентируя способы получения или хранения самих данных сервером. Она определяет стандарт на COM-объекты интерфейсов и методы их использования.

Архитектура сервера и принципы взаимодействия с клиентами полностью соответствуют общей концепции OPC и аналогичны ранее

рассмотренной спецификации OPC DA. К примеру, OPC-клиент может одновременно взаимодействовать с множеством OPC HDA серверов различных производителей, размещенных на разных компьютерах сети Ethernet. Выделяются два типа HDA серверов:

- простой сервер исторических данных, ориентированный на построение трендов (графиков изменения параметров);
- сервер для хранения упакованных данных с возможностью их дальнейшей обработки и анализа, включая вычисление средних, минимальных, максимальных значений и другой аналитики.

OPC UA (Unified Architecture) - современный стандарт, описывающий передачу данных в промышленных сетях и обеспечивающий защищенную и надежную коммуникацию между устройствами вне зависимости от аппаратной платформы и операционной системы, что позволяет реализовать обмен данными между разнородным оборудованием.

Ключевыми преимуществами OPC UA являются объектно-ориентированная информационная модель, позволяющая просматривать данные подобно веб-браузеру, и сервис-ориентированная архитектура (SOA).

В отличие от предыдущих версий OPC, когда требовались отдельные серверы для данных реального времени (DA), истории (HDA), в OPC UA все это объединено в рамках одного стандарта. Вместо древовидной структуры тегов вводится концепция узлов или объектов, каждый из которых инкапсулирует переменные, методы и другие структуры данных, соответствующие реальному объекту.

Обмен данными осуществляется через бинарные структуры и XML-документы. Наряду с моделью клиент-сервер становится доступна модель издатель-подписчик. Спецификация определяет механизмы резервирования (замещение недоступного клиента) и быстрого восстановления связи. Транспортным слоем для передачи данных служат TCP, HTTP/SOAP или HTTPS. Вместо механизмов контроля доступа Windows в OPC UA реализована поддержка цифровых сертификатов и шифрования передаваемых данных.

Обеспечена обратная совместимость с OPC DA через специальные обертки и прокси-модули. В отличие от OPC DA, требовавшего промежуточного ПО для передачи данных через маршрутизаторы и межсетевые экраны, OPC UA работает без дополнительных прослоек.

Несмотря на свои многочисленные преимущества и широкое распространение в сфере промышленной автоматизации, стандарт OPC не лишен определенных недостатков. Одним из них является дополнительная нагрузка на вычислительные ресурсы компьютера, связанная с необходимостью конвертации промышленных протоколов, таких как Modbus и другие, для взаимодействия с OPC-сервером. Так, при непосредственно взаимодействии с промышленными протоколами без использования промежуточного OPC-сервера позволяют работать SCADA-системе в два раза быстрее. Еще одним недостатком является трудоемкость настройки OPC-сервера, в частности ручной привязки потенциально тысяч тегов, что усложняет развертывание решений на базе данного стандарта. Кроме того, OPC-серверы, как правило, не распространяются бесплатно, а требуют приобретения отдельных лицензий для каждого компьютера, что влечет за собой дополнительные финансовые издержки.

Тем не менее, благодаря таким ключевым преимуществам, как открытость стандарта, объектно-ориентированная информационная модель, сервис-ориентированная архитектура и обратная совместимость с предыдущими версиями, OPC по-прежнему широко используется в промышленной автоматизации.

1.4 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о необходимости выбора SCADA-клиента и создания в нем соответствующего проекта для мониторинга усилий. Кроме того, требуется произвести подбор других компонентов для построения SCADA-системы и реализовать OPC сервер. Вместо использования реального асинхронного электропривода предлагается

создать его математическую модель и обеспечить передачу в SCADA-проект мгновенных значений тока, напряжения и скорости вращения вала электродвигателя. На основе этих данных и разработанной математической модели будет производиться расчет крутящего момента с последующей визуализацией его трендов в SCADA-клиенте.

Для построения математической модели наблюдаемого объекта мониторинга – электропривода, существуют различные пакеты прикладных программ со своими преимуществами и недостатками. Приведём возможные методы построения модели электропривода в популярной программной среде MATLAB:

- метод построения моделей через передаточные функции, если исходными данными являются понятиями классической теории автоматического управления;
- метод построения моделей через классические блоки Simulink, если имеются дифференциальные уравнения, которые описывают поведение системы;
- метод построения моделей с использованием специальных библиотек блоков более сложных моделей приводов, который содержит систему управления и электродвигатель с возможностью редактирования конфигурации. Требуются только технические параметры объекта моделирования.

Исходя из вышесказанного более предпочтительным является метод с использованием специальных библиотек блоков комплексных объектов, так как это позволит не вдаваться в математическую модель объекта и позволит качественно симулировать электродвигатель.

Для решения задачи моделирования электропривода была выбрана программная среда MATLAB Simulink, поскольку ее ключевым преимуществом является наличие специализированной библиотеки SimPowerSystems, содержащей готовые модельные компоненты различных электроприводных систем. Использование данной библиотеки позволяет

существенно сократить трудозатраты на начальном этапе создания аналитической модели электропривода, обеспечивая при этом высокую точность и адекватность получаемых моделей.

В качестве альтернативы проприетарному программному обеспечению MATLAB может быть рассмотрена бесплатная и открытая среда Scilab. В работе [15] приводится сравнительный анализ данных программных продуктов, результаты которого свидетельствуют о более высокой производительности MATLAB при моделировании. Однако, несмотря на ряд преимуществ MATLAB, Scilab является бесплатным программным обеспечением с открытым исходным кодом, что делает его привлекательным с экономической точки зрения. Тем не менее, отсутствие в Scilab специализированных библиотек для моделирования электроэнергетических систем представляет собой существенный недостаток при выборе данной среды для решения задач, связанных с моделированием электроприводов.

1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ

Для определения требований к системе рассмотрим ряд нормативно-технических документов, которые используются при проектировании систем мониторинга.

ГОСТ 24.104-2023 [16] регламентирует общие требования, предъявляемые к автоматизированным системам управления в целом. Основные ключевые требования, устанавливаемые данным нормативным документом для систем мониторинга, были изложены ранее.

Общие требования к спецификации программного обеспечения, используемого в целях контроля состояния в связи с обработкой, передачей и представлением данных приводятся в стандарте ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011 [17].

Для автоматизированной или ручной обработки данных, получаемых в ходе процедур контроля состояния, стандарт рекомендует придерживаться

схемы (рисунок 1.7). Это поможет выявить причины неисправностей, принять решения об дальнейшей эксплуатации и техобслуживании машины.

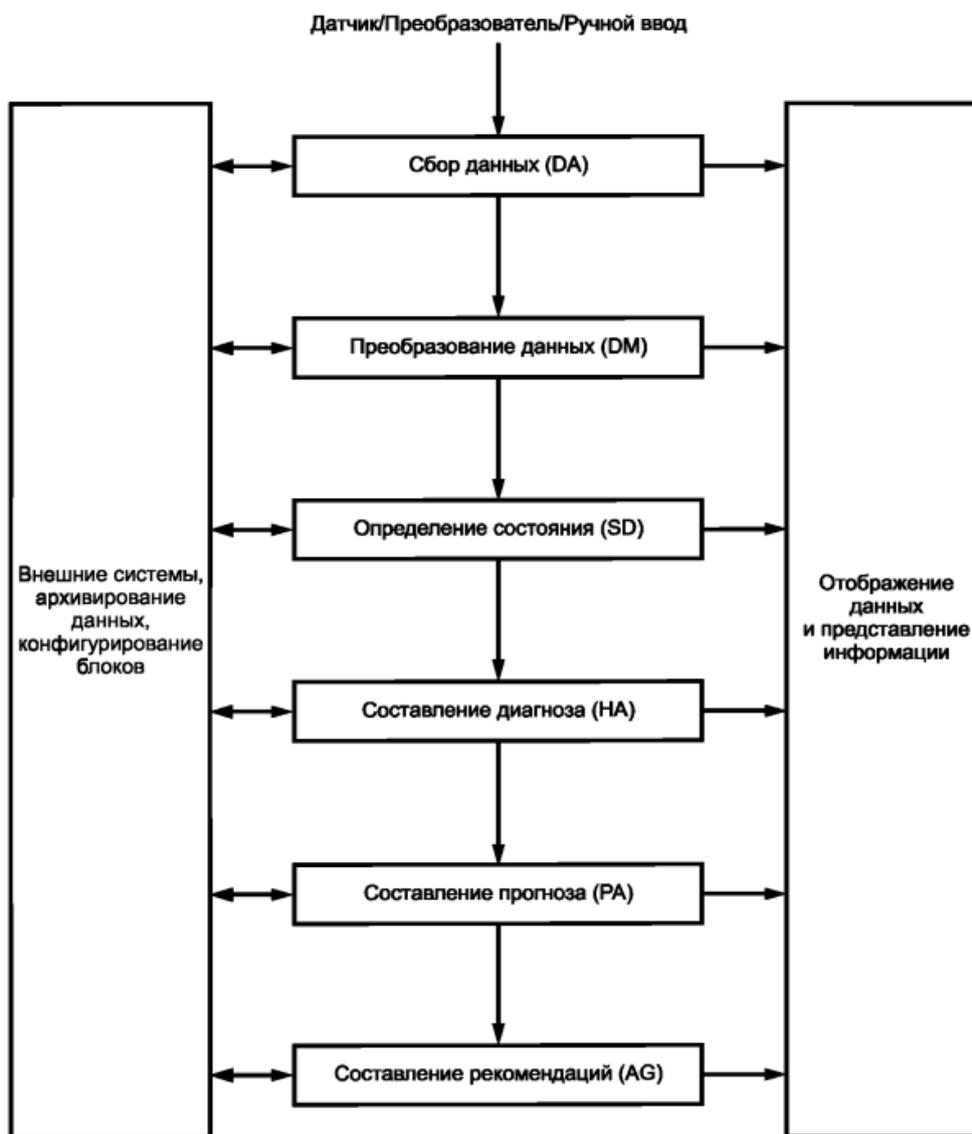


Рисунок 1.7 — Блок-схема потока информации и этапов обработки данных

Поток информации проходит от блока сбора данных до блока информации о действиях, предпринимаемое персоналом. На каждом этапе данные передаются на следующий блок обработки, взаимодействуют с внешними системами и требуют стандартного отображения и графического представления.

Можно сказать, что каждая стратегия мониторинга будет содержать три общих блока, а именно: сбор данных (DA), преобразование данных (DM) и определение состояния (SD). Другими словами, откуда-то должна быть получена некоторая информация, например: датчики, преобразователи и т.д.

Далее, эта информация обычно должна быть предварительно обработана для оптимизации ценности знаний. После этого определяется текущее состояние объекта мониторинга на основе обработанных данных и заданных критериев.

Блоки (AG), (HA) и (PA) в значительной степени зависят от выбранной методики контроля. Это означает, что модульная архитектура и, следовательно, стратегия мониторинга могут быть ограничены только задачами обнаружения. Она может быть частично расширена до задач диагностики или быть полностью расширена до уровня прогнозирования и составления рекомендаций.

Также из стандарта следует, что для облегчения анализа обработанных данных мониторинга они должны отображаться в виде трендов на фоне соответствующих зон состояния, позволяя персоналу идентифицировать отклонения и понимать их природу. Представление данных следует преобразовывать в форму, облегчающую извлечение информации для принятия решений о корректирующих действиях, включая сообщения, числовые характеристики, графики и т.д. Пользовательский интерфейс системы мониторинга машин должен обеспечивать интуитивный доступ к информации из различных источников и поддерживать настройки. Для операторов и менеджеров необходимо представление информации, способствующее принятию оптимальных решений по функционированию машин и их обслуживанию.

В ГОСТ 21480-76 [18] человеко-машинному интерфейсу предъявляются несколько фундаментальных требований:

- мнемосхема должна содержать только необходимые для мониторинга и управления элементы;
- мнемосхема должна быть интуитивно понятной и удобной для персонала системы;
- сигналы об изменениях состояния объекта должны различаться особенно четко цветом, формой или другими признаками;

- наиболее важные элементы или группы элементов должны выделяться размером, формой, цветом или иными средствами;
- специальные сигналы (предупредительные, аварийные, неплановой смены состояния и т.п.) должны отличаться большей интенсивностью (на 30–40%) по сравнению с сигналами нормального режима или быть прерывистыми (с частотой мигания 3–5 Гц и длительностью сигнала не менее 0,05 с);
- сигналы об изменениях состояния объекта должны различаться особенно четко цветом, формой или другими признаками.

Кроме того, крайне важно использовать корректную цветовую палитру для предотвращения утомляемости зрения оператора вследствие воздействия ярких цветов [19].

Исходя из анализа всей литературы можно привести следующие конкретные требования для разрабатываемой системы мониторинга.

Функциональные требования:

- непрерывный сбор, обработка, хранение и передача собранных мгновенных значений токов, напряжений и частоты вращения вала в электроприводе;
- расчёт крутящего момента на основе полученных данных;
- построение графиков (трендов) изменения крутящего момента;
- диагностика крутящего момента на основе сигнала;
- генерация аварийных оповещений при выявлении отклонений крутящего момента от нормального значения.

Нефункциональные требования:

- работа системы мониторинга в режиме мягкого реального времени;
- высокая точность вычисления крутящего момента;
- использование интуитивно понятной мнемосхемы с правильной цветовой палитрой.

2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА УСИЛИЙ

В разрабатываемой системе мониторинга усилий используется принцип обратимости электромеханического преобразования, который учитывает преобразование электрической энергии в механическую (двигательный режим работы) или механической в электрическую (генераторный режим работы). Таким образом, мониторинг вращающего момента можно осуществлять, контролируя преобразования энергии в электрических машинах.

Соотношение между входной электрической мощностью и выходной механической мощностью определяется коэффициентом полезного действия η вычисляется по формуле (1)

$$\eta = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \times 100\% , \quad (1)$$

где η – КПД;

P_1 – входная (электрическая) мощность;

P_2 – выходная (механическая) мощность.

Во время электромеханического преобразования энергии неизбежно происходят потери мощности ΔP , обусловленные преобразованием части электрической или механической энергии в другие формы энергии. Следовательно, для электрической машины справедливо частное выражение закона сохранения энергии (2)

$$P_2 = P_1 \pm \sum \Delta P_i , \quad (2)$$

где $\sum \Delta P_i$ – сумма потерь мощности.

Механическая мощность, передаваемая вращающимся валом, может быть выражена аналитически формулой (3)

$$P_2 = \omega M , \quad (3)$$

где ω – угловая скорость ротора электрической машины

M – механический (вращательный) момент на валу.

Таким образом, уравнение для определения мгновенного вращающего момента принимает вид (4)

$$M(t) = \frac{P_1(t) \pm \sum \Delta P_i(t)}{\omega(t)} \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой удобную математическую модель для определения крутящего момента. Это обусловлено тем, что два наиболее значимые параметра P_1 и ω , входящие в (4), могут контролироваться с высокой точностью в технологическом процессе. Третья составляющая $\sum \Delta P_i(t)$ вносит лишь незначительный вклад в общую мощность и с ростом КПД двигателя её составляющая часть снижается. Поскольку доля потерь мощности в высокоэффективных интеллектуальных приводах значительно меньше, чем полная мощность, такой точности будет вполне достаточно для проведения мониторинга усилия электропривода.

Частотный преобразователь, используемый в электроприводе, использует широтно-импульсную модуляцию в трехфазной системе питания для управления выходным напряжением, что приводит к образованию энергетических составляющих в виде высших гармоник. Чтобы их учитывать, целесообразно контролировать мгновенную электрическую мощность P_1 асинхронного двигателя путем численного интегрирования мгновенной мощности (5)

$$P_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u_{AB}(k)i_A(k) - u_{BC}(k)i_C(k)), \quad (5)$$

где $u_{AB}(k)$, $u_{BC}(k)$, $i_A(k)$, $i_C(k)$ — мгновенные значения линейных напряжений и токов асинхронного двигателя, соответствующие k -му их измерению на данном временном интервале;

N - количество измерений за данный период времени.

Для достижения лучшей точности измерения крутящего момента, требуется измерять ещё и суммарные потери мощности $\sum \Delta P$, происходящие в электрической машине. Они различаются по своей физической природе, режиму работы, при котором они возникают, а также месту их локализации.

Учитывая, что асинхронный электродвигатель в обычном исполнении является вращающимся электромагнитным преобразователем энергии, в нем возникают механические $\Delta P_{\text{мех}}$, электрические $\Delta P_{\text{эл}}$ и магнитные потери $\Delta P_{\text{магн}}$ (6)

$$\sum \Delta P_i = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{эл}}$ — электрические потери мощности;

$\Delta P_{\text{магн}}$ — потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи;

$\Delta P_{\text{мех}}$ — механические потери на трение и вентиляцию.

Более подробная энергетическая диаграмма, показывающая составляющие потери мощности, представлена на рисунке 2.1.

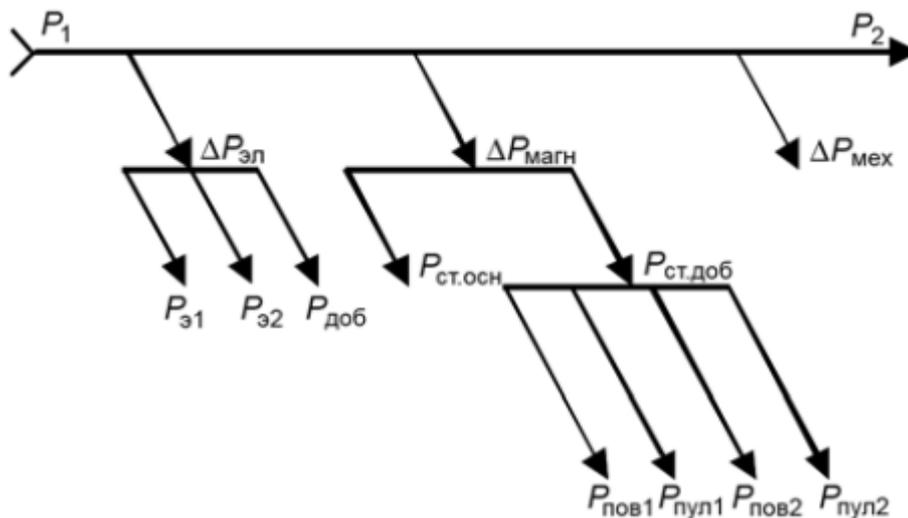


Рисунок 2.1 — Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Проведенные исследования показывают [20], что существует возможность вычислять потери мощности следующим образом:

$$\Delta P_{\text{эл}} = c_1 I^2 (1 + \alpha(t - t_{\text{ном}})) + \Delta U_{\text{щ}} I; \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{магн}} = c_2 U^2 \omega^2; \quad (8)$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = \omega(c_3 + c_4 \omega), \quad (9)$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты потерь мощности.

С помощью их устройство адаптируется к конкретному типу электрической машины. Коэффициенты потерь мощности можно приближенно вычислить, применив алгоритм, изображенный на рисунке 2.2.

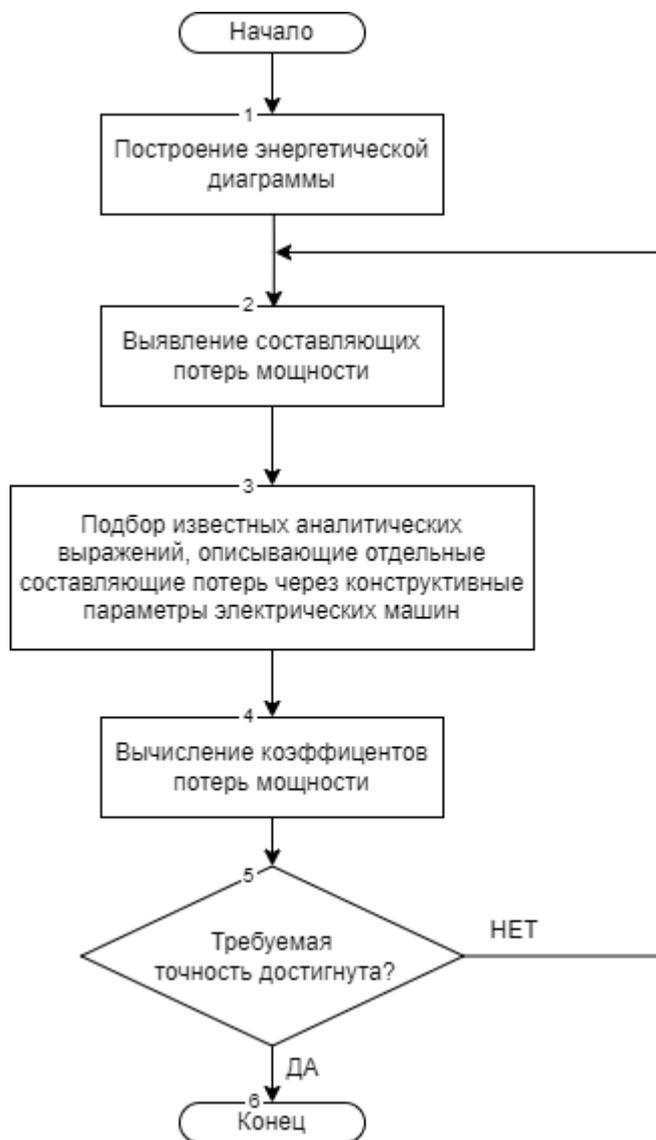


Рисунок 2.2 — Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Аналитические выражения, описывающие составляющие потерь мощности для различных типов машин через их конструктивные параметры, подбираются с использованием специальной литературы по отдельным типам электрических машин. Так, для типичного асинхронного электродвигателя аналитические выражения представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Аналитические выражения, описывающие потери мощности в асинхронном двигателе

Виды потерь		Асинхронный двигатель	
электр-ие	в обмотках статора	$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 r_1$	
	в обмотках ротора	$P_{\varepsilon 2} = m_1 I_2'^2 r_2'$	
	добавочные при нагрузке	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.ном}} \left(I_1 / I_{1\text{ном}} \right)^2$	
магнитные	основные потери в стали статора	$P_{\text{ст.осн}} =$ $= p_{1,0/50} (f_1/50)^\beta \left(k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{\text{зср}}^2 m_{z1} \right)$	
		поверхностные потери статора	$P_{\text{пов1}} = P_{\text{пов1}} (t_{z1} - b_{\text{ш1}}) Z_1 l_{\text{ст1}}$
	поверхностные потери ротора	$P_{\text{пов2}} = P_{\text{пов2}} (t_{z2} - b_{\text{ш2}}) Z_2 l_{\text{ст2}}$	
	добавочные	пульсационные потери в стали зубцов статора	$P_{\text{пул1}} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{\text{пул1}} \right)^2 m_{z1}$
		пульсационные потери в стали зубцов ротора	$P_{\text{пул2}} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{z2}$
механические		$\Delta P_{\text{мех}} \approx K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D)^3$	

Интерпретация результатов расчетов производится путем вычисления приведенной погрешности потерь мощности. В том случае, если погрешность определения коэффициентов оказывается неприемлемой для технической реализации устройства, то аналитическое описание потерь необходимо уточнить. По вычисленным значениям потерь определяются константы c_1, c_2, c_3, c_4 . В соответствии с полученным набором констант проводится оценка точности предлагаемого метода измерения вращающего момента для асинхронного двигателя путем сравнения результатов вычисления потерь по известным выражениям и по предлагаемой методике. С помощью этих расчётов, даётся возможность вычислять вращающий момент с погрешностью, не превышающей 3% [8].

3. ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ

3.1 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ

На начальном этапе проектирования архитектуры системы мониторинга необходимо определить архитектуру технологической системы и её основные компоненты, которые должны быть включены в разрабатываемую систему.

В качестве базовой архитектуры целесообразно выбрать модель клиент-сервер, реализация которой возможна с использованием стандарта OPC, описанного ранее. Преимущество клиент-серверной архитектуры заключается в способности OPC сервера подключаться к нескольким OPC клиентам одновременно для обмена и сбора данных, что значительно упрощает процесс снятия информации с операторских станций.

Для реализации протокола связи был выбран стандарт OPC UA, благодаря его кроссплатформенности, позволяющей работать на различных операционных системах, в отличие от стандарта OPC DA, работающего только на Windows.

Для компонента среднего уровня, ответственного за передачу данных с нижнего уровня на верхний, рационально применить шлюз протоколов со встроенным OPC UA сервером. Такой подход позволит оптимизировать затраты на разработку системы мониторинга.

Шлюз обеспечивает преобразование данных с различных промышленных интерфейсов и протоколов в формат OPC UA. Для передачи данных в SCADA-клиент шлюз может использовать различные каналы связи, в частности, Ethernet.

Так, разработанная функциональная схема изображена на рисунке 3.1. На ней показаны ключевые элементы проектируемой системы и с помощью каких интерфейсов они взаимодействуют.

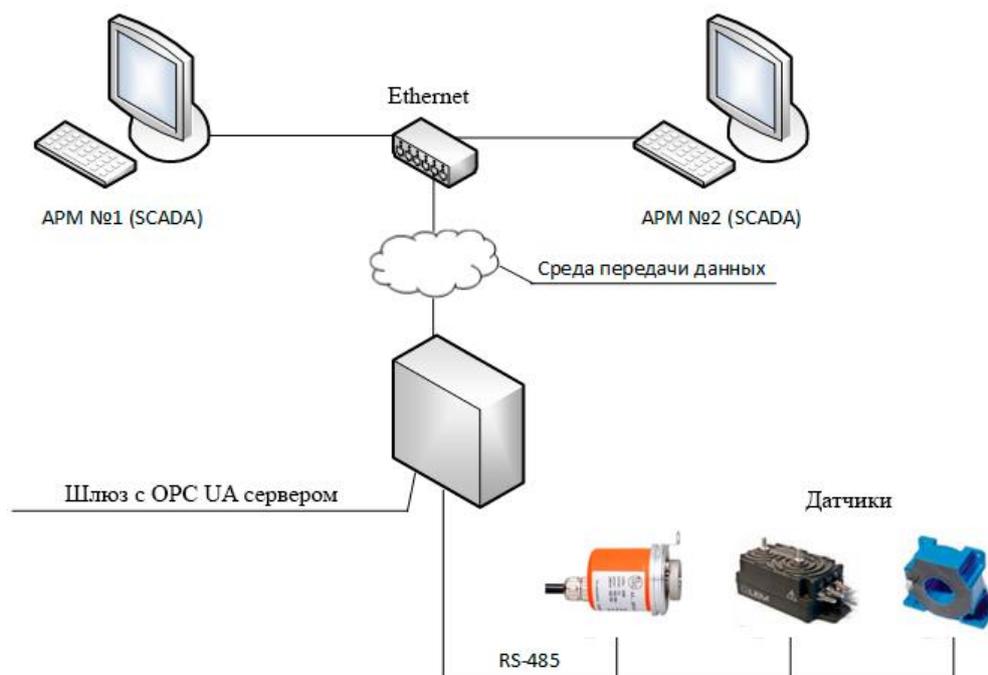


Рисунок 3.1 — Функциональная схема разрабатываемой системы

3.2 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ

Объектом мониторинга является асинхронный электропривод, оснащённый интегрированными датчиками тока, напряжения и частоты вращения. Эти датчики подключены к аппаратному шлюзу посредством популярного промышленного протокола — RS-485.

Аппаратный шлюз выполняет функции сбора данных с датчиков и передачи их на встроенный OPC UA сервер.

По мере поступления данных с шлюза, OPC-сервер архивирует их в соответствующие объектно-ориентированные переменные. Процесс архивирования данных играет важную роль, позволяя восстанавливать информацию в случае возникновения аварийных ситуаций или сбоев в передаче данных.

После архивации данные передаются в SCADA-клиент по сетевым каналам, такими как Ethernet. Перед передачей данных в SCADA-клиент, необходимо настроить проект SCADA. В процессе конфигурирования клиента SCADA необходимо выполнить ряд последовательных действий для

обеспечения корректного взаимодействия с сервером OPC UA. Первоначально требуется сформировать иерархическую структуру системы в интерфейсе SCADA-клиента и произвести согласование идентификаторов и адресного пространства переменных, поступающих с OPC-сервера, с внутренними переменными, предварительно подготовленными в клиентском приложении. Благодаря данной процедуре обеспечивается автоматическое распознавание и интерпретация потока данных, передаваемых от OPC-сервера в SCADA-клиент.

На следующем этапе осуществляется построение объектной модели, включающей в себя как переменные, содержащие информацию об измеренных параметрах от OPC-сервера, так и вычисляемые переменные, значения которых будут определяться на основе алгоритмов обработки входных данных. После завершения формирования объектной модели, клиентское приложение SCADA устанавливает соединение с OPC-сервером. После этого оно принимает данные измерений, которые в дальнейшем используются для мониторинга усилий электропривода.

3.3 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ SCADA-СИСТЕМЫ

На данном этапе проектирования системы мониторинга требуется выбрать необходимые компоненты для ее реализации.

Для реализации данной системы необходимы следующие компоненты системы:

1. Датчики тока, напряжения и скорости вращения вала для сбора значений.
2. Шлюз протоколов для передачи данных на верхний уровень.
3. SCADA-клиент для расчёта и визуализации крутящего момента.

3.3.1 ВЫБОР ДАТЧИКОВ

Как правило, в асинхронных электроприводах с интегрированным частотным преобразователем используется система управления с замкнутым

контуром для достижения высоких эксплуатационных характеристик. Для командных сигналов силового преобразователя требуются трехфазные токи и напряжения, и сигналы положения ротора, получаемые от внутренних датчиков. На рисунке 3.3 показана общая архитектура системы электропривода. Применение этих датчиков позволит существенно сэкономить на разрабатываемой системе.

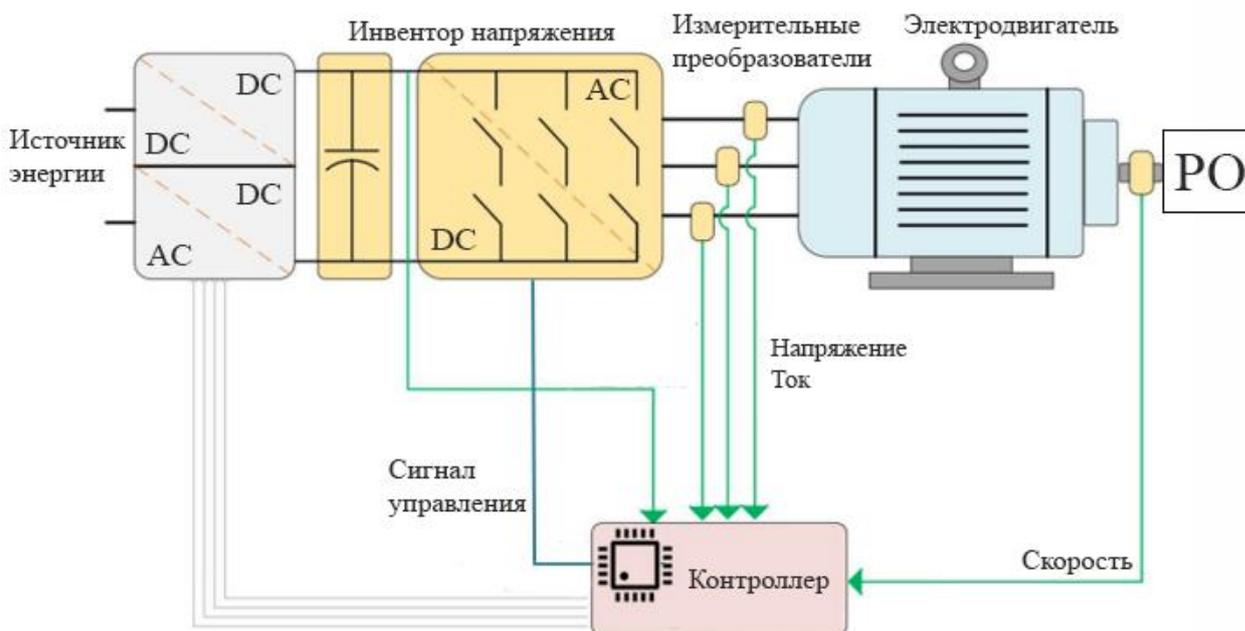


Рисунок 3.3 — Функциональная схема системы электропривода.

3.3.2 ВЫБОР ШЛЮЗА ПРОТОКОЛОВ

Шлюз протоколов — это аппаратное средство, которое обеспечивает трансляцию данных между двумя и более различными протоколами коммуникации. Это позволяет устройствам и системам, работающим на основе разных протоколов, успешно обмениваться информацией, несмотря на их изначальную несовместимость.

Основные функции шлюза протоколов:

1. Трансляция протоколов — основная задача шлюза - конвертировать сообщения из одного протокола в другой. Это включает изменение формата данных, адаптацию структуры сообщений, а также соответствие скоростей передачи данных и других параметров.

2. Обеспечение безопасности — шлюзы также могут выполнять функции защиты данных, такие как шифрование и аутентификация, для безопасного обмена информацией между разными сетями.
3. Интеграция систем — шлюзы протоколов часто используются для интеграции новых устройств или систем в существующую инфраструктуру АСУ ТП без необходимости полной замены оборудования.

Перед началом выбора шлюза для системы приведём ключевые критерии:

1. Совместимость с протоколами — шлюз должен поддерживать все необходимые протоколы, используемые в системе мониторинга, включая OPC UA, RS-485 и другие интерфейсы, имеющиеся у датчиков.
2. Производительность — необходимо оценить количество устройств и объем данных, которые шлюз должен обрабатывать, чтобы обеспечить адекватную производительность.
3. Надежность и устойчивость — важно, чтобы шлюз был надежным и устойчивым к сбоям, обеспечивая стабильную круглосуточную работу системы.
4. Интеграция и конфигурация — шлюз должен быть легко настраиваемым и интегрируемым в существующую систему, с понятным интерфейсом управления.

На сегодняшний день на рынке имеется большое разнообразие протоколов шлюзов, которые можно использовать в системы мониторинга. Некоторые из них это: SIMATIC IOT2040 (SIEMENS), Anybus X-gateway (HMS Networks), UA-5231 (ICP DAS), UC-8100 (MOXA), и другие.

С учётом факторов, таких как стоимость, доступность на рынке Российской Федерации, технические характеристики и предоставляемый функционал, шлюзы протоколов производства компании ICP DAS представляют собой оптимальный выбор.

Серия UA-5231 от компании ICP DAS представляет собой высокотехнологичные шлюзы, предназначенные для интеграции и управления промышленными системами в рамках концепции интернета вещей. Эти устройства выполняют функцию объединения различных протоколов и интерфейсов, обеспечивая взаимодействие между оборудованием на уровне производственных процессов и IT-системами.

Основная модель серии UA-5231 обладает мощностью и универсальностью, оснащена встроенным сервером OPC UA и поддерживает различные промышленные протоколы, включая Modbus TCP, Modbus RTU/ASCII, MQTT и EtherNet/IP и одновременную отправку данных в SCADA, ERP, MES и в облачные сервисы.

Модель UA-5231M, усовершенствованная версия UA-5231, оснащена ARM процессором с тактовой частотой 1.0 ГГц, 512 МБ оперативной памяти DDR3 и 512 МБ флеш-памяти. Она поддерживает microSD карты памяти объёмом до 32 ГБ и адаптирована для работы в широком диапазоне температур, что делает её пригодной для использования в различных промышленных условиях.

Модели UA-5231M-3GWA и UA-5231M-4GE/4GC предназначены для беспроводной связи, поддерживают стандарты 3G и 4G соответственно. UA-5231M-3GWA оснащена модулями WCDMA для международной 3G-связи, в то время как UA-5231M-4GE/4GC обеспечивает поддержку различных стандартов 4G LTE, что гарантирует высокоскоростную передачу данных и глобальное покрытие.

Для существующий требований к системе достаточно будет использование базовой версии UA-5231 (рисунок 3.4). Основные программно-аппаратные характеристики предоставлены в таблице 3.1. Стоимость на сегодняшний момент составляет \$823.93.



Рисунок 3.4 — Шлюз протоколов UA-5231.

Таблица 3.1 – Программно-аппаратные характеристики шлюза UA-5231

Параметр	Значение
Реализация корпуса	Металл
Вес, г	350
Габаритные размеры (ШxВxГ), мм	117x58x126
Диапазон рабочих температур, °C	-25...+75
Напряжение питания, В	12..48
Потребляемый ток, мА	до 400
Всего последовательных портов	3
Количество разъемов RS-485	2
Количество разъемов RS-232	1
Установленный процессор	ARM Cortex A8 TI AM3354
Тактовая частота, ГГц	1
Тип ОЗУ	DDR3 1066
Размер ОЗУ, Мб	512
Предустановленная ОС	Linux Kernel 3.2.14

3.3.3 ВЫБОР SCADA-КЛИЕНТА

Прежде чем приступить к выбору клиента SCADA для реализации системы, необходимо сформулировать набор требований, которым должно соответствовать выбранное программное обеспечение.

SCADA-система должна обеспечивать выполнение следующих функций:

1. Реализация человеко-машинного интерфейса — в SCADA-клиенте HMI реализован через мнемосхемы, представляющие собой графическое отображение технологического процесса. Требования к мнемосхемам были представлены в главе 1. Клиент должен поддерживать создание мнемосхем и отображение данных в виде трендов, графиков, диаграмм и таблиц.
2. Сбор и архивирование данных — клиент осуществляет обмен данными с контроллерами в мягком реальном времени, используя различные интерфейсы и протоколы. Система должна хранить собранные данные для дальнейшего анализа и обработки.
3. Журнал действий диспетчера — клиент должен обеспечивать ведение журнала действий диспетчера, фиксируя все события и операции, происходящие в системе для анализа и выявления причинно-следственных связей при возникновении аномальных или непредвиденных событий в системе.
4. Контроль прав доступа — клиент должен обеспечивать разграничение доступа к информации и функционалу на основе ролей и обязанностей пользователей, предоставляя каждому сотруднику только те данные и инструменты, которые необходимы для выполнения его задач, одновременно защищая систему от несанкционированного доступа и позволяя вести учет времени работы операторов.
5. Система отчетов — клиент должен предоставлять гибкие и мощные инструменты для формирования отчетов, включая возможность

генерации графиков, таблиц и диаграмм на основе автоматически собираемых данных, что обеспечивает их достоверность и исключает влияние человеческого фактора.

После определения требований следует проведём анализ наиболее популярных клиентов SCADA.

Так, на российском рынке наиболее популярными решениями для разработки АСУ ТП являются:

- Trace Mode;
- Master-SCADA;
- SIMATIC WinCC.

Для сравнения приведённых SCADA-систем сведём основные данные из источника [21] в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнительная характеристика SCADA-систем

SCADA-пакет	MasterSCADA	SIMATIC WinCC	Trace Mode
Архитектура	клиент-сервер	клиент-сервер	клиент-сервер
Среда разработки	Windows, Linux	Linux, MacOS, Windows	Windows
Масштабируемость	Неограниченно	до 246000 точек	до 64000 точек
Веб-сервер	Есть	Есть	Есть
База данных	MS SQL, Oracle, InterBase, Sybase, MySQL, MS Access	MSSQL	ODBC
Отчеты	Есть	Есть	Есть
Тревоги	Есть	Есть	Есть
Механизмы обмена	OPC, OLE, DCOM, ActiveX, OLE DB	OPC DA/HDA, OLE DB, XML-DA	OPC
Мнемосхемы	Динамизация любого свойства любого элемента, ActiveX, редактор мультимедиа, библиотеки объемных элементов, импорт изображений	Удобный, объектно-ориентированный графический редактор, обширные библиотеки, эффективная модульная технология	Свыше 1000 графических изображений; свыше 600 анимационных объектов;

Продолжение таблицы 3.2

Используемые языки программирования	FBD, ST, C#	VBScript ANSI-C	или ST, FBD, IL, LD, SFC
Тренды	Есть	Есть	Есть
Цена	32 точки - 0\$, 100 точек - 270\$, 500 точек - 540\$, 1000 точек - 810\$	128К точек- 3427\$, 256К точек - 16434\$	1024 точек - 31744руб

На основании анализа данных, представленных в таблице, можно заключить, что наиболее подходящей SCADA-системой является MasterSCADA, главным образом из-за наличия бесплатной версии с неограниченным сроком действия. Помимо этого, она обеспечивает высокую масштабируемость и поддержку различных баз данных и интеграционных механизмов, что делает её экономически выгодным и гибким решением для различных промышленных приложений.

Однако, стоит отметить, что SCADA-системы SIMATIC WinCC и Trace Mode незначительно уступают MasterSCADA по функциональным возможностям. Обе системы остаются популярными решениями в своём сегменте благодаря своим мощным инструментам для создания мнемосхем, программирования и поддержки промышленного стандарта OPC. Эти особенности делают их также привлекательными вариантами для различных задач автоматизации.

SCADA-пакет MasterSCADA, относительно недавно появившийся на рынке, уже зарекомендовал себя как система, которая по своим характеристикам не уступает конкурентам и при этом обладает весьма привлекательной ценой. MasterSCADA представляет собой передовую платформу для создания информационных систем, готовых к интеграции в контексте Четвертой промышленной революции.

Интерфейс MasterSCADA изображён на рисунке 3.5.

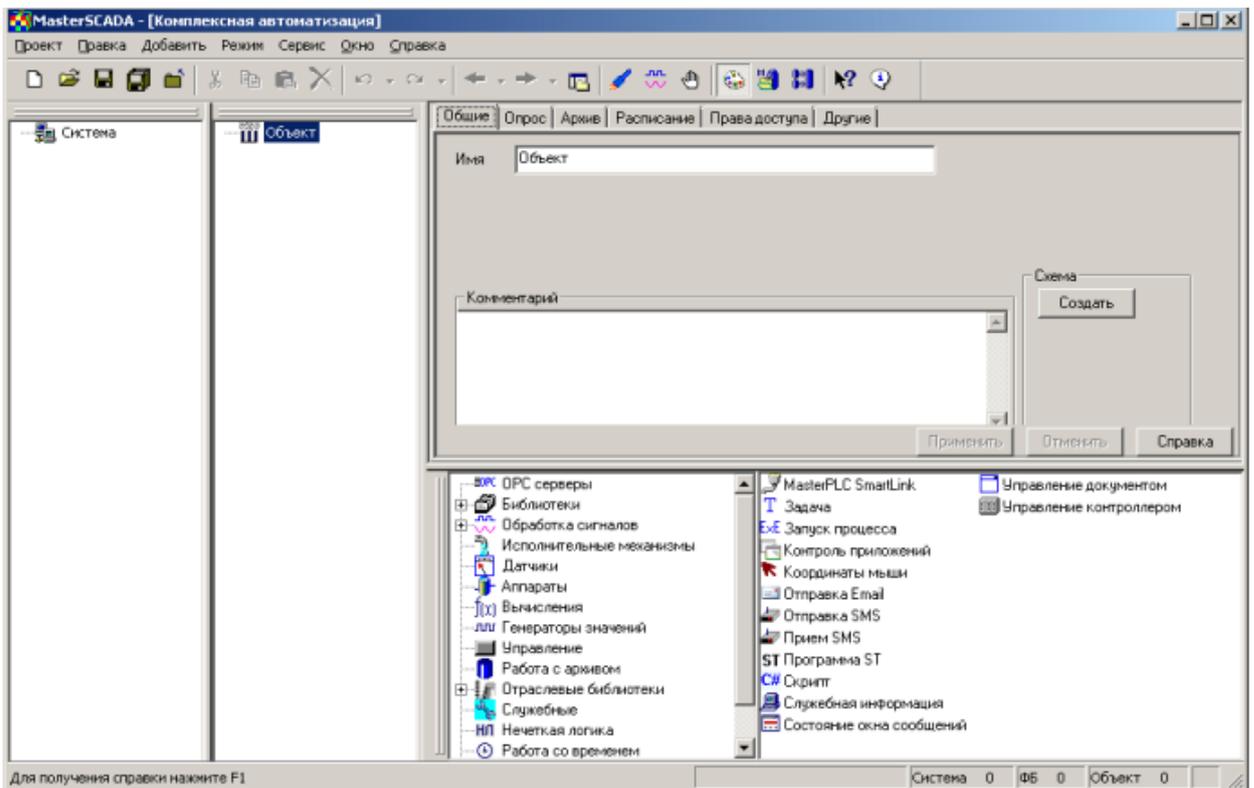


Рисунок 3.5 — Интерфейс MasterSCADA

4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для проверки работоспособности системы SCADA смоделируем асинхронный электропривод с потоком данных из датчиков трёхфазной системы в программе MATLAB.

Математический пакет MATLAB представляет собой мощную интегрированную среду для выполнения инженерных и научных расчетов, моделирования и визуализации данных. В состав этого программного комплекса входит ядро компьютерной алгебры Maple, а также пакет расширений Simulink, предназначенный для визуального моделирования динамических систем и устройств.

Simulink, в свою очередь, включает в себя множество дополнительных библиотек, ориентированных на моделирование различных областей, в том числе электромеханических и электроэнергетических систем. Одной из таких библиотек является SimPowerSystems, содержащая модели пассивных и активных электротехнических компонентов, источников питания, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и другого оборудования.

В рамках моделирования системы также необходимо обеспечить интеграцию с сервером OPC для передачи вычисленных значений переменных в соответствующее клиентское приложение. Данная функциональность реализуется с помощью специализированного программного модуля OPC Toolbox, который представляет собой библиотеку блоков для среды Simulink, позволяющих моделировать интерактивное диспетчерское управление и выполнять тестирование алгоритмов в режиме "оборудование в контуре".

Библиотека обеспечивает прямой доступ к оперативным и архивным данным OPC из сред MATLAB и Simulink, что позволяет осуществлять чтение, запись и регистрацию данных, поступающих от различных устройств, таких как распределенные системы управления, системы диспетчерского

управления и сбора данных, а также программируемые логические контроллеры. При этом поддерживаются стандарты OPC DA, OPC HDA и OPC UA.

В рамках моделирования ставится задача симуляции работы электропривода с нагрузкой и сбор данных с датчиков в режиме мягкого реального времени.

В качестве примера для моделирования выбирается асинхронный двигатель с высоким коэффициентом полезного действия, что позволяет пренебречь вычислениями потерь мощности. Модель асинхронного электропривода представлена на рисунке 4.1.

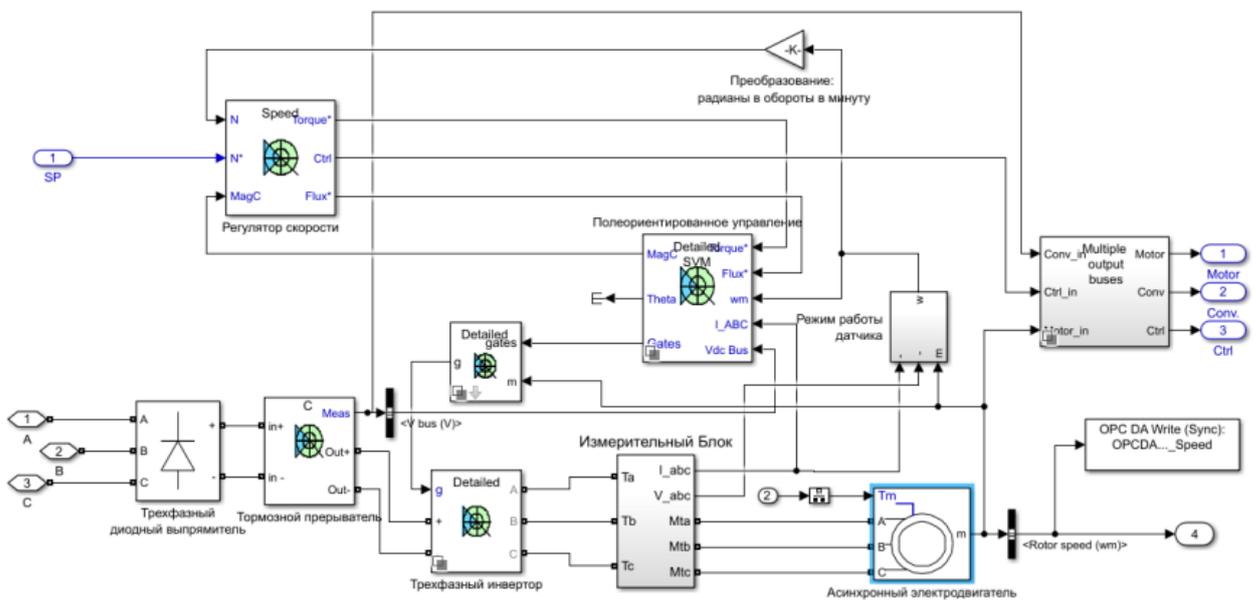


Рисунок 4.1 — Модель асинхронного электропривода

Рассмотрим состав модели системы электропривода с описанием блоков. Данная модель включает в себя следующие основные компоненты: регулятор скорости, тормозной прерыватель, диодный выпрямитель, инвертор напряжения, измеритель блок, регулятор тока и сам асинхронный двигатель с высоким КПД.

Структура измерительного блока представлена на рисунке 4.2.

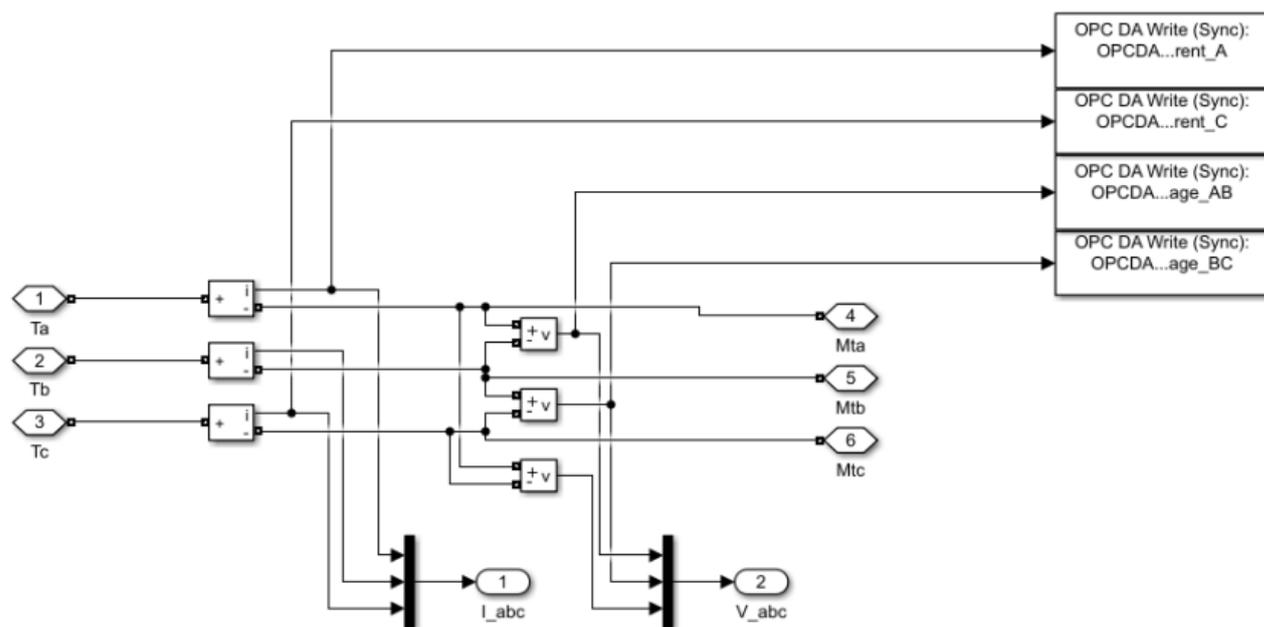


Рисунок 4.2 — Модель измерительного блока

В измерительном блоке модели присутствуют шесть датчиков: три датчика тока и три датчика напряжения, предназначенные для считывания соответствующих значений с целью реализации обратной связи в системе управления. Однако для расчета крутящего момента требуются данные только двух датчиков. К выходам этих датчиков подключен OPC-блок, который выполняет считывание измеренных значений и передачу их на OPC-сервер для дальнейшей обработки. Кроме того, OPC-блок также подсоединен к выходу блока "Bus selector", осуществляющего измерение частоты вращения вала двигателя.

Для моделирования момента сопротивления на валу двигателя в зависимости от времени используется блок "Torque reference" из библиотеки SimPowerSystems, позволяющий задавать и изменять значение крутящего момента нагрузки, приложенного к валу. Результаты измерения крутящего момента, полученные с помощью осциллографа, представлены на рисунке 4.3. На этом рисунке отмечены следующие характерные моменты времени:

1. Момент ускорения двигателя без нагрузки.
2. Момент приложения номинального крутящего момента нагрузки.
3. Установившийся режим работы двигателя под нагрузкой.

4. Момент снижения нагрузки.

Крутящий момент

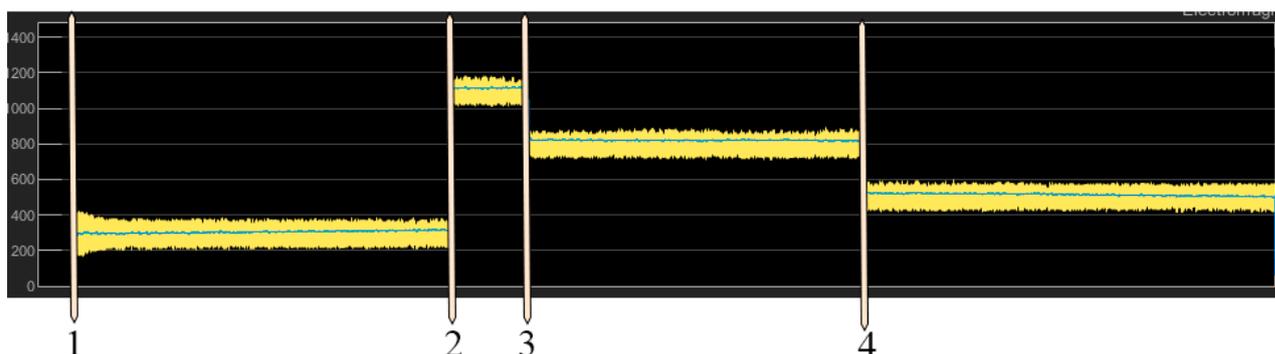


Рисунок 4.3 — Тренд крутящего момента

4.2 СОЗДАНИЕ СЕРВЕРА OPC

Для проведения испытаний работы разработанной системы необходимо создать и настроить OPC-сервер. В рамках данной работы была выбрана платформа MasterOPC Universal Multi-Protocol Server, поддерживающая до 32 тегов (переменных) для обмена данными.

На рисунке 4.4 представлен созданный OPC-сервер с добавленными OPC-переменными, включающими значения тока, напряжения и скорости вращения, которые являются ключевыми параметрами для расчёта момента электропривода.

Для организации потока данных с модели электропривода в среде Simulink необходимо перейти в блок "OPC Configuration" и установить соединение с созданным OPC-сервером (рисунок 4.5).

Далее, в каждом блоке OPC следует назначить соответствующую OPC-переменную сервера, которая будет связана с этим блоком для обмена данными.

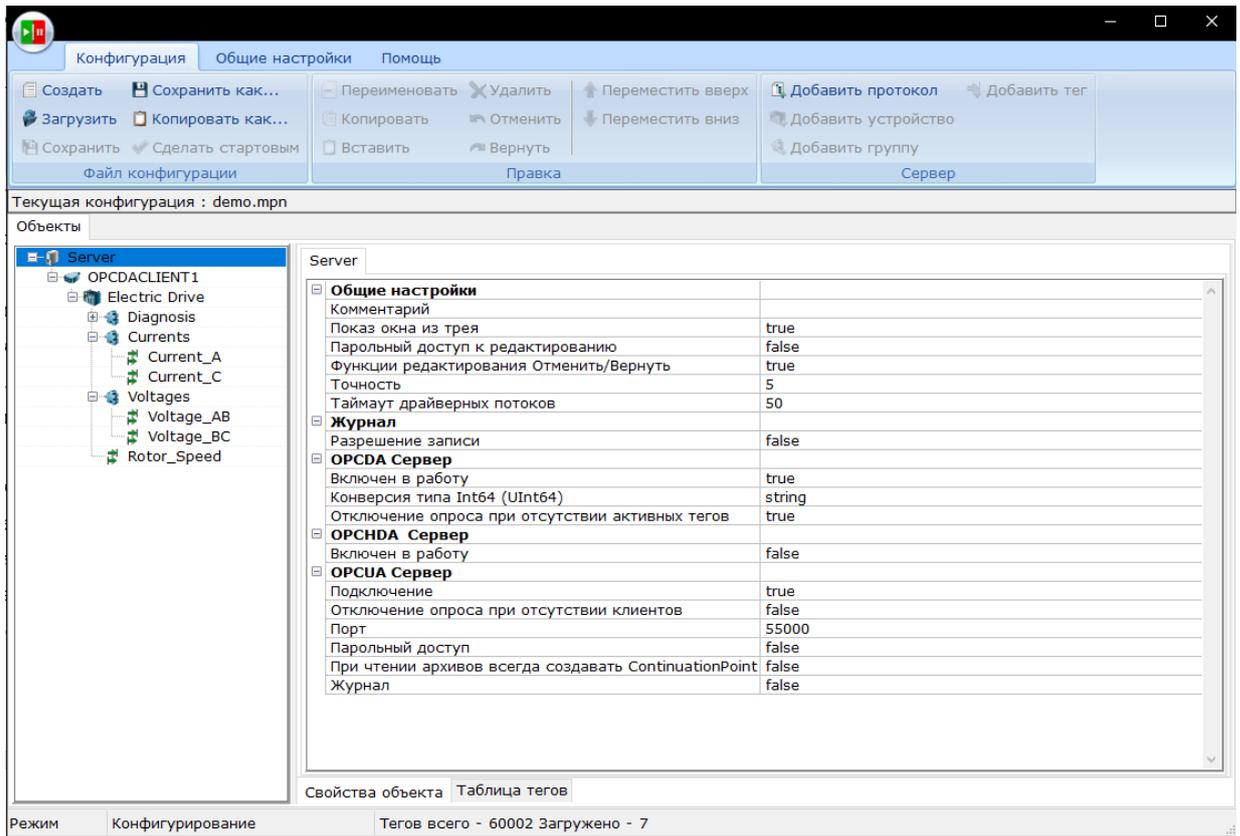


Рисунок 4.4 — Сервер OPC с OPC-переменными

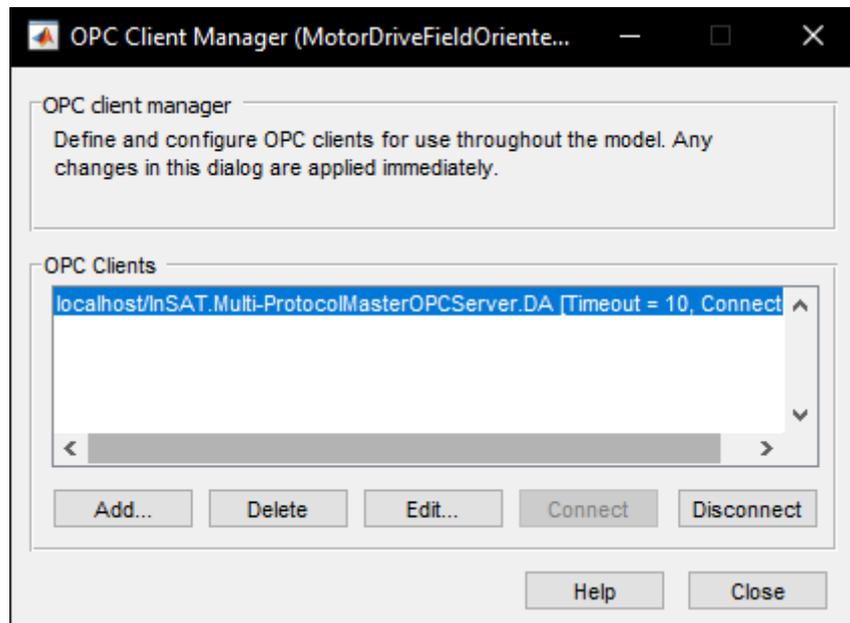


Рисунок 4.5 — Подключение к серверу OPC.

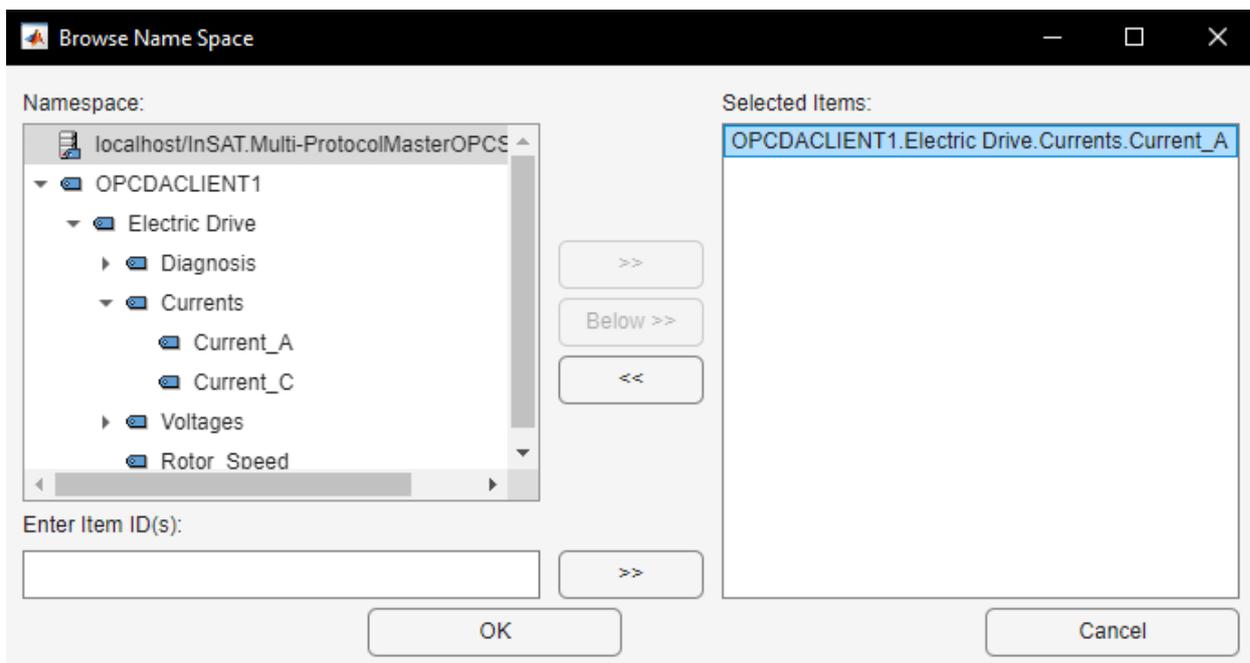


Рисунок 4.6 — Подключение к серверу OPC.

4.3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ В MASTERSCADA

Разработка системы в среде MasterSCADA предполагает выполнение ряда этапов, включающих создание иерархической структуры проекта, настройку подключения к источникам данных, а также конфигурирование объектов и элементов пользовательского интерфейса.

На начальном этапе необходимо создать дерево системы, которое представляет собой иерархическую структуру, описывающую компоненты проекта. В данном случае в дерево системы входит объект, отвечающий за создание автоматизированного рабочего места оператора с подключаемым протоколом OPC DA. При вызове протокола OPC DA происходит поиск доступных OPC-серверов, после чего требуется выбрать необходимые теги и подключить их к проекту. Созданное дерево системы проекта представлено на рисунке 4.4.

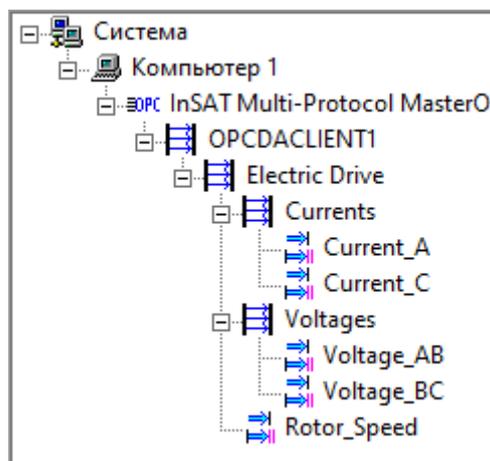


Рисунок 4.4 — Дерево системы проекта

Следующим шагом является работа с деревом объектов, которое служит для управления данными тегов, элементами визуализации и другими доступными компонентами системы. Дерево объектов позволяет добавлять требуемые параметры, блоки программ, окна мнемосхем и прочие элементы, необходимые для разработки системы. Установление связи между тегам и объектами осуществляется с помощью механизма перетаскивания, после чего тег параметра привязывается к соответствующему объекту и автоматически принимает тип используемых значений. Дерево объектов проекта представлено на рисунке 4.5.

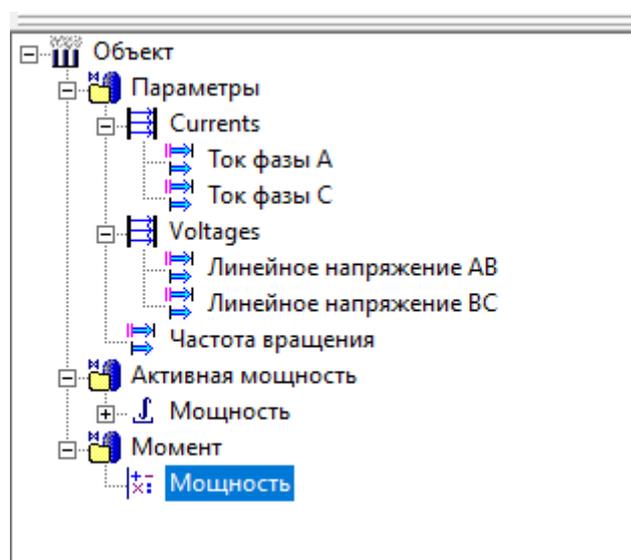


Рисунок 4.5 — Дерево объектов проекта

Далее для расчёта требуемых значений требуется реализовать разработанную математическую модель в проект. На рисунке 4.6 представлен расчёт крутящего момента.

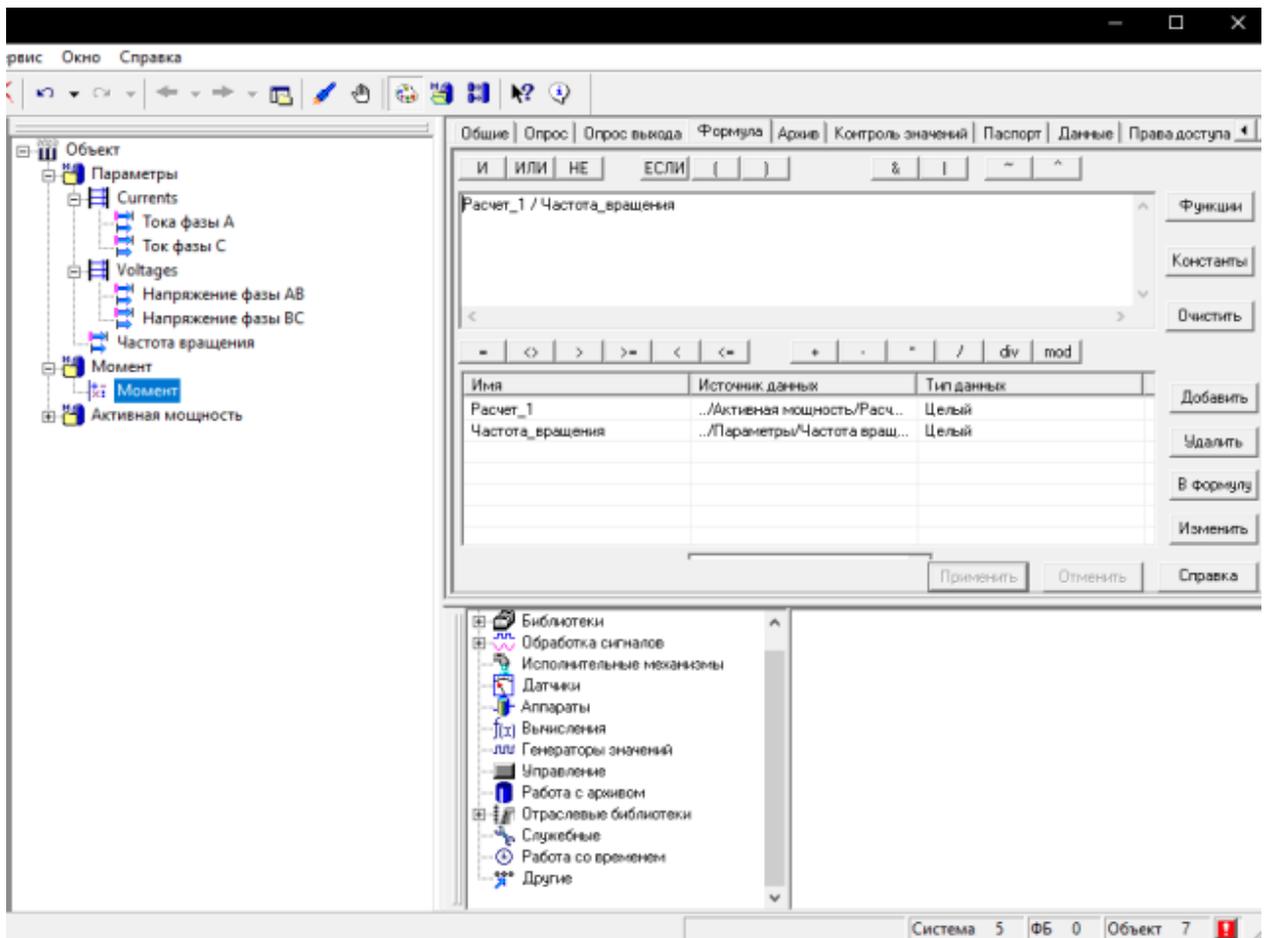


Рисунок 4.6 — Расчёт крутящего момента

4.4 ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ

После завершения этапа настройки необходимо провести проверку работоспособности разработанной системы. На рисунке 4.7 показано дерево объектов проекта, созданного в среде MasterSCADA.

На рисунке 4.7 представлена готовая мнемосхема, разработанная в системе MasterSCADA.

Для повышения наглядности и улучшения визуализации процесса, рассчитанное значение крутящего момента представлено в виде трендовой кривой, отображающей зависимость крутящего момента от времени.

Помимо этого, все измеряемые и рассчитанные параметры системы выводятся в виде численных значений.

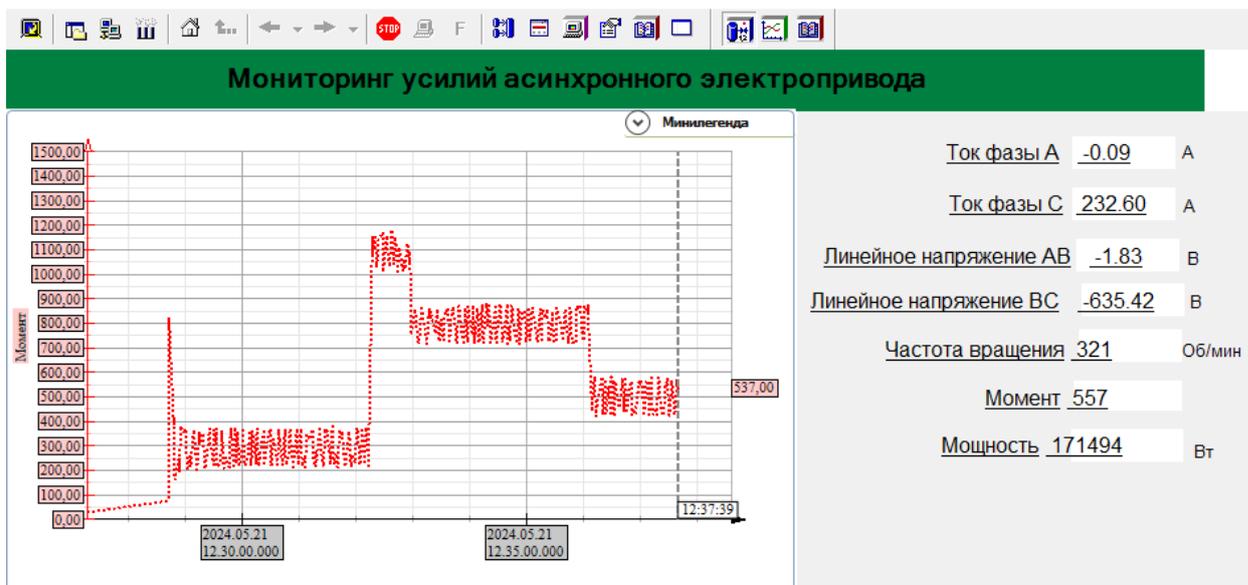


Рисунок 4.7 — Проект в MasterSCADA

Таким образом, на данный момент разработанная система в MasterSCADA позволяет осуществлять сбор данных с OPC-сервера, производить необходимые расчеты на основе полученных значений в соответствии с реализованной математической моделью, а также визуализировать результаты в удобном для оператора виде. Проверка работоспособности системы подтверждает корректность выполненных настроек и открывает возможность для дальнейшей модернизации системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе была разработана система мониторинга крутящего момента. Сначала были рассмотрены существующие аналоги, затем разработана математическая модель и подобраны необходимые компоненты, и в конечном итоге реализована программная часть системы.

На стадии разработки и реализации использовалось проприетарное и свободное ПО: MasterSCADA, MasterOPC и MATLAB.

По итогам работы, можно сделать следующий вывод:

- создан проект в SCADA-системе;
- подобраны компоненты системы;
- проведённое компьютерное моделирование показало возможность в реальном времени производить контроль состояния электропривода.

В настоящее время разработанная система мониторинга усилий подготовлена к опытной эксплуатации.

Возможными путями развития разработанной системы являются:

- добавление полноценной диагностики электропривода;
- разработка облачного решения клиента высокого уровня;
- улучшение интерфейса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сахарнов Ю. В. Регулируемый электропривод - эффективное энергосберегающее оборудование / Ю. В. Сахарнов // Вестник Федеральной энергетической комиссии России. – 2001. – № 4-6. – С. 114-126.
2. Попеско А. И. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости: Учебное пособие / А. И. Попеско, А. В. Ступин, С. А. Чесноков. – М.: ООО "Российское общество оценщиков", 2002. – 241 с.
3. Топольская И. Г., Топольский Д.В. Анализ методов и средств измерения момента асинхронного двигателя // НАУКА ЮУрГУ. СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК: Материалы 75-й научной конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. - С. 329-332.
4. Ziętek Bartłomiej, Krot Pavlo, Borkowski, Przemysław An overview of torque meters and new devices development for condition monitoring of mining machines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021 - №684 – 9 p.
5. Смолин В.И. Об одном методе определения вращающего момента электрических машин / В.И. Смолин, Д.В. Топольский, Н.Н. Гудаев // Электричество. – 1999. – № 7. – С.27–30.
6. Смолин В. И. Основы теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей / В. И. Смолин, И. Г. Топольская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 128-136.
7. В.И. Смолин, В.А. Яковлев Метод оценки мгновенного состояния электромагнитной системы трехфазных электромеханических преобразователей // Наука ЮУрГУ: материалы 69-й научной

- конференции: секции технических наук. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 333-336.
8. Топольская И.Г. Топольский Д.В. Смолин В.И. Методика определения адаптационных коэффициентов потерь мощности для измерителя вращающего момента генератора ветроэнергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. - 2010. - №1. - С. 20-24.
 9. ZETLAB. Система измерения крутящего момента. - <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/datchiki-krutyashhego-momenta/sistema-izmereniya-krutyashchego-momenta/> (дата обращения: 24.04.2024).
 10. Kongsberg Maritime. MetaPower Quad. -<https://www.kongsberg.com/maritime/products/engines-engine-room-and-automation-systems/Machinery-Instrumentation/engine-monitoring-systems/metapower-quad/> (дата обращения: 24.04.2024).
 11. SUGAWARA Laboratories Inc. Motor Torque Meter System. - https://www.sugawara-labs.co.jp/en/motor/torque/motor_torque_meter_system (дата обращения: 24.04.2024).
 12. Алексеев, Д. А. Основные понятия и структура системы SCADA / Д. А. Алексеев // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". – 2023. – № 13. – С. 110-114.
 13. Давлетов Р.Р., Семёнов О.Ю. Организация связи передачи данных в SCADA – системе с нижним уровнем в автоматизированной системе управления технологического процесса // Роль физико-математического и инженерного образования в современном обществе материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Сургут: Сургутский государственный университет, 2017. - С. 22-25.
 14. Давыдов В. Г. SCADA - системы в управлении. Введение (SCADA - система GeniDAQ). Издательство: Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, 2010г. – 247 с.

15. Matija Mikac, Robert Logozar Performance Comparison of Open Source and Commercial Computing Tools in Educational and Other Use — Scilab vs. MATLAB // Tehnički glasnik. - 2022. - №16. - p. 509-518.
16. ГОСТ 24.104-2023 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования - М.: Стандартинформ, 2024. - 20 с.
17. ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011 Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство - М.: Стандартинформ, 2012. - 14 с.
18. ГОСТ 21480-76 Система "Человек-машина". Мнемосхемы. Общие эргономические требования - М.: Стандартинформ, 1977. - 6 с.
19. Т. Рахымбердіқызы, А. Т. Апсеметов, Б. М. Джаналиев, С. Б. Мерекеев Разработка графического интерфейса автоматизированной системы управления процессом газирования напитков // Вестник науки Южного Казахстана. - 2019. - №1. - С. 265-270.
20. Копылова И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2002.
21. Справочник по существующим SCADA системам, сравнение функциональных возможностей, цены // SCADAnet.ru URL: <https://scadanews.ru/catalog2.php> (дата обращения: 21.05.2024).