

На правах рукописи



Муженко Александр Сергеевич

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ СБОРА И
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность: 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Плотников Дмитрий Александрович,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (ЮРГПУ (НПИ)), профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» (г. Новочеркасск)

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Мельник Эдуард Всеволодович,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ), профессор кафедры «Вычислительная техника», ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института робототехники и процессов управления (г. Ростов-на-Дону)

кандидат технических наук
Абидова Елена Александровна,
Волгодонский инженерно-технический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» (ВИТИ НИЯУ МИФИ), доцент кафедры «Информационные и управляющие системы» (г. Волгодонск)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ, г. Самара)

Защита диссертации состоится «30» октября 2025 г. в 10:00 на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 99.2.107.02 на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» и ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корп. «Г», ауд. Г-439.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, а также на библиотечном портале ЮФУ: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338737/>.

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю объединенного диссертационного совета 99.2.107.02 по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Автореферат разослан «___» июля 2025 г.

Ученый секретарь объединенного диссертационного совета 99.2.107.02,
доктор технических наук, доцент



Ю.А. Кравченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Модульные системы сбора, обработки информации и управления получают всё более широкое распространение в различных областях промышленности, медицины, обороны, энергетики и т.д., открывая новые возможности для оптимизации и масштабирования производственных процессов. Этот подход позволяет предприятиям создавать адаптивные решения, которые легко изменяются в зависимости от производственных задач или технологических требований.

Модульная система отличается от традиционных монолитных конструкций своей гибкостью. Каждый компонент представляет собой самостоятельный модуль, который может быть добавлен, заменён или модернизирован без необходимости полной перестройки системы.

Одним из примеров успешного внедрения модульных управляющих систем является автомобильная промышленность. Современные заводы используют модульные производственные линии для сборки автомобилей различных моделей на одной платформе. Это позволяет значительно сократить издержки и быстро адаптироваться к изменениям в спросе. Другой пример – фармацевтическая отрасль, где модульные производственные системы используются для выпуска различных лекарственных форм на одной линии. Это особенно важно для компаний, работающих с небольшими партиями продукции или адаптирующихся к изменениям нормативных требований. Также можно упомянуть системы управления морского и военно-морского флота РФ, в которых применяется интегрированная система управления платформой технических средств корабля. Это единый интегрированный цифровой вычислительно-управляющий комплекс, который обеспечивает контроль и управление главной энергетической установкой, электроэнергетической системой, общекорабельными системами, движением и маневрированием корабля. Аппаратные и программные средства системы имеют модульную структуру для обеспечения максимальной эксплуатационной надёжности и функциональной гибкости.

Ярким примером области промышленности, в которой от параметров используемых модульных систем сбора и обработки информации зависит эффективность отрасли в целом, является электроэнергетика. Российская Федерация по данным отчета Системного оператора о функционировании Единой Энергетической Системы (ЕЭС) РФ за 2024 год является одним из крупнейших мировых производителей электроэнергии. Вследствие существенного объёма производства, передачи и потребления электроэнергии особое значение приобретает обеспечение технико-экономической эффективности функционирования электрических подстанций (ПС), являющихся ключевым звеном в системе энергораспределения.

Электрические подстанции (ПС) – это связующие элементы между электростанциями и конечными потребителями. Объекты такого типа должны принимать электроэнергию от электростанций и распределять её с высокой надёжностью и эффективностью между потребителями. Для обеспечения надёжности и эффективности функционирования ПС используются автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), одним из ключевых элементов которых является контроллер присоединения (КП).

Стандартом организации ЕЭС определено более 60 типовых схем подстанций, различающихся сложностью организации, но содержащих однотипное оборудование:

трансформаторы, выключатели, разъединители, заземляющие ножи, однако количество этих элементов в зависимости от сложности схемы может существенно различаться. КП выполняет сбор и предварительную обработку информации, поступающей с оборудования ПС, а также формирует сигналы управления им, т.е. является микропроцессорной системой сбора и обработки информации (ССОИ) ПС.

Ввиду большого разнообразия возможных конфигураций ПС и, следовательно, разного количества измеряемых значений и нуждающихся в управлении узлов, возникают существенно различающиеся требования к информационной ёмкости ССОИ ПС. Обеспечить необходимую информационную ёмкость можно различными способами, один из которых – применение модульной структуры. Однако, при использовании модульной структуры важно иметь средства оценки параметров межмодульного взаимодействия, чтобы обеспечить надежную и безотказную работу модульной системы. Следует отметить, что эта проблема актуальна не только для электроэнергетики, но и для любой другой области применения модульных систем.

В процессе анализа предметной области выяснилось, что существуют решения для узко направленных задач, но нет универсальных средств оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ. Поэтому обеспечение необходимой информационной ёмкости для каждой конкретной подстанции и разработка универсальных средств оценки параметров межмодульного взаимодействия в системах сбора и обработки информации является актуальной задачей и имеет существенное значение для развития электроэнергетической отрасли страны.

Исследования выполнялись в соответствии с Перечнем критических технологий Российской Федерации, утверждённым Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 (разделы «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»), в рамках научного направления «Теория, принципы, моделирование и технологии проектирования информационных, измерительных и управляющих систем», утвержденного Учёным советом ЮРГПУ(НПИ) 29 декабря 2021 года, протокол №5.

Степень разработанности темы диссертационного исследования. Оценка эффективности процессов межмодульного взаимодействия в ССОИ на начальных этапах проектирования обычно выполняется с помощью математического и имитационного моделирования, в том числе с использованием стохастических моделей, теории массового обслуживания, цифровых двойников.

Вопросы математического моделирования процессов в ССОИ и оценки эффективности их функционирования подробно рассмотрены в работах Глазунова Ю.В., Скурихина В.А., Масселя Л.В., Ротанова Е.Г., Шаховского А.В., Родионовой С.Н., Аллакулиева Ю.Б., Боровкова А.И., однако, несмотря на разнообразие подходов к оценке эффективности ССОИ, многие исследования обладают общими недостатками, такими как весьма узкая область применения и недостаточность эмпирических данных, подтверждающих эффективность предложенных методов в смежных областях.

Известны общие методологические подходы к моделированию информационных процессов в модульных системах, однако их авторы подчеркивают, что, несмотря на наличие унифицированных концептуальных основ, создание адекватной модели для конкретной системы представляет собой весьма сложную задачу, требующую учёта

множества разнообразных аспектов. При создании модели необходимо учитывать особенности среды передачи данных, используемых протоколов, служб, также необходимо принимать во внимание специфику объекта, для которого разрабатывается модель.

Известны готовые программные средства моделирования взаимодействия для широко распространённых технологий проводной (*Ethernet*) и беспроводной (*GSM, UMTS, Wi-Fi, Bluetooth*) связи. Для этих технологий существуют доступные и готовые к использованию библиотеки, содержащие описания стандартных протоколов и типовых устройств. Однако менее распространённые промышленные интерфейсы межмодульного взаимодействия, такие, как *CAN, CAN FD, RS-485, SPI*, имеют свою специфику и требуют разработки отдельных библиотек для упомянутых средств моделирования, что по сложности сопоставимо с созданием новой модели.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования систем сбора и обработки информации электрических подстанций (ССОИ ПС) за счёт улучшения их технических и эксплуатационных характеристик путём организации надёжного межмодульного взаимодействия в ССОИ ПС с применением современных методов получения, анализа и обработки информации.

Для достижения поставленной цели в представленной работе решены **следующие задачи:**

- выполнен обзор и анализ публикаций, научных трудов и других источников по теме исследования;
- обоснована необходимость использования модульной структуры ССОИ в составе АСУТП ПС;
- обоснованы критерии эффективности процессов межмодульного взаимодействия в ССОИ ПС;
- обоснована целесообразность использования современного интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD* для организации межмодульного взаимодействия в ССОИ;
- разработан метод описания модульной ССОИ, использующей протокол *CANopen FD* и интерфейс *CAN FD*, с учетом межмодульных информационных связей;
- разработан метод оценки времени передачи сообщений в ССОИ, использующих интерфейс *CAN FD*, позволяющий определить верхнюю и нижнюю границы времени передачи;
- разработаны вероятностные метод и модель для предварительной оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ, использующих протокол *CANopen FD*;
- разработана имитационная модель для детального исследования процессов межмодульного взаимодействия в ССОИ, использующих протокол *CANopen FD*;
- разработано программное обеспечение, реализующее вероятностную и имитационную модели и позволяющее исследовать параметры межмодульного взаимодействия, оценить степень их влияния на качество связи, а также устройства, использующие предложенные методы.

Объектом исследования являются модульные системы сбора и обработки информации электрических подстанций (ССОИ ПС).

Предметом исследования является межмодульное взаимодействие в ССОИ ПС, методы его описания и оценки его параметров.

Методы исследования. Методология исследования базируется на комплексном применении теоретического анализа, компьютерного моделирования и физического эксперимента. Для решения задач исследования используются методы математического и системного анализа, статистики, обобщённого и объектно-ориентированного программирования. Для практической реализации результатов работы использованы программные продукты *Microsoft Visual Studio*, *Matlab*, язык программирования *C#*, язык разметки и инициализации объектов в топологиях платформы *.NET XAML*, расширяемый язык разметки *XML* и язык описания структуры документа *XSD*.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается обоснованностью принятых допущений, корректным применением методов математического и системного анализа, теории алгоритмов и программ; корректным применением математического аппарата при получении аналитических выражений, подтверждением теоретических положений результатами имитационного компьютерного моделирования и физических экспериментов.

Тема работы соответствует технической отрасли науки паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по направлениям исследований п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов», п. 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации» и п.15 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик».

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработано формализованное описание модульной ССОИ на базе интерфейса *CAN FD*, отличающееся явным представлением межмодульных информационных связей и предоствращающее возможность возникновения основных ошибок конфигурирования системы (соответствует направлению исследования п.3 паспорта специальности 2.3.1, страницы 76–86 диссертации).

2. Разработан метод оценки времени передачи сообщений *CAN FD*, формируемых в процессе функционирования модулей ССОИ, отличающийся тем, что он позволяет определить верхнюю, нижнюю и среднюю оценки времени передачи с учетом структуры сообщений, и обеспечивающий более высокую точность оценки по сравнению с известными методами (соответствует направлению исследования п.4 паспорта специальности 2.3.1, страницы 89–95 диссертации).

3. Разработаны вероятностные метод и модель для предварительной оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ, построенных на базе интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD*, отличающиеся использованием информации о вероятности изменения контролируемых сигналов и позволяющие оперативно оценить

зависимость критически важных параметров межмодульного взаимодействия от конфигурации конкретной системы (соответствует направлениям исследования п. 11 и п.15 паспорта специальности 2.3.1, страницы 95–107 диссертации).

4. Разработана имитационная модель для детального исследования процессов межмодульного взаимодействия в ССОИ, построенных на базе интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD*, отличающаяся тем, что на основе обобщенного описания системы формирует параметры конфигурации входящих в неё модулей и путём имитационного моделирования позволяет с высокой точностью оценить основные параметры процессов межмодульного взаимодействия (соответствует направлениям исследования п.12 и п.15 паспорта специальности 2.3.1, страницы 107–113 диссертации).

5. Показана универсальность разработанных методов и моделей, обеспечивающая возможность их использования для конфигурирования и оценки параметров не только ССОИ ПС, но и других модульных систем (страницы 129–136 диссертации).

На защиту выносятся:

1. метод описания модульной ССОИ, использующей протокол *CANopen FD* и интерфейс *CAN FD*, с учетом межмодульных информационных связей;

2. метод оценки времени передачи сообщений *CAN FD* для моделирования межмодульного взаимодействия в ССОИ, позволяющий оценить верхнюю и нижнюю границы времени передачи с учетом длины сообщения и возможной вставки бит;

3. вероятностные метод и модель для предварительной оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ, позволяющие на ранних этапах проектирования модульных систем оперативно оценить критически важные параметры межмодульного взаимодействия, определяющие эффективность работы этих систем;

4. имитационная модель для детального исследования межмодульного взаимодействия в ССОИ на базе интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD*, позволяющая с учётом параметров настройки каждого модуля системы оценить параметры межмодульного взаимодействия с целью выявления перегрузки сети и недопустимых задержек доставки сообщений, влияющих на эффективность функционирования системы;

5. устройства и программное обеспечение, реализующие разработанные методы и модели.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке методов описания модульных систем и оценки эффективности процессов межмодульного взаимодействия в ССОИ ПС.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанных методов, моделей и программного обеспечения при проектировании современных ССОИ ПС, эксплуатируемых в энергосетях Российской Федерации. Перечисленные средства позволяют существенно повысить эффективность, надёжность и качество ССОИ ПС путём уменьшения сроков проектирования, исключения ошибок при формировании внутрисистемных информационных связей и, как следствие, повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации ПС.

Реализация результатов работы. Разработанные в процессе подготовки диссертации методы и модели использованы в ООО «СКБ Электронного приборостроения» (г. Черноголовка) при проектировании универсального модульного контроллера присоединения, находящегося в стадии подготовки серийного производства.

Разработанные вероятностная и имитационная модель внедрены в учебный про-

цесс ЮРГПУ (НПИ) и используются в курсах «Проектирование цифровых вычислительных (управляющих) устройств», «Микроконтроллеры и микропроцессоры», «Отладочные средства микропроцессорных систем».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых учёных БТГУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород, 2023 г.; 19-я международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск, 2023 г.; 20-я международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск, 2024 г.; 46-я международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем» на базе ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск, 2024 г.

Публикации по теме диссертации. По результатам исследований опубликовано 13 печатных работ, из них 5 – в журналах, рекомендованных ВАК (в том числе, 1 работа принадлежит лично автору), получено 2 свидетельства о регистрации программного обеспечения.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Она содержит 156 страниц основного текста, 46 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 95 наименований и 5 приложений на 29 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения о структуре работы, апробации и реализации научных результатов.

В первой главе «Обзор и анализ существующих методов и технических средств контроля электрических подстанций» выполнен анализ электрических подстанций (ПС), показавший, что они являются сложными техническими объектами с множеством нуждающихся в контроле и управлении элементов, приведена общая характеристика и классификация ПС. В ходе анализа рассмотрено основное технологическое оборудование ПС (трансформаторы, выключатели, разъединители, заземляющие ножи), определены задачи контроля и управления этим оборудованием. Описаны функции и задачи, типовые структуры, архитектуры построения и оборудование автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) ПС, рассмотрены основные структуры информационного взаимодействия в АСУТП ПС.

В ходе анализа структурных схем и информационных связей было выявлено, что контроллер присоединения (КП) является одним из ключевых элементов АСУТП ПС и представляет из себя систему сбора и обработки информации (ССОИ) ПС; сформулированы основные нормативные и дополнительные требования к таким системам.

Показано, что использование ССОИ ПС способствует решению следующих критически важных задач: обеспечение надёжности электроснабжения, обеспечение безопасности, продление срока службы оборудования ПС и снижение потерь энергии, и как следствие, повышение экономической эффективности, соответствие нормативным требованиям и защита окружающей среды.

В ходе анализа типовых схем организации ПС было выявлено, что состав основного оборудования каждой ПС во многом одинаков, но количество элементов различных типов в зависимости от сложности схемы может существенно различаться.

На основе проведенного анализа выполнена оценка возможного минимального и максимального количества элементов для рассмотренных типовых схем ПС, а также количества информационных сигналов (ТИ – телеизмерение, ТС – телесигнализация, ТУ - телеуправление), необходимых для передачи результатов измерений, состояний коммутационных аппаратов и для управления ими (таблица 1).

Рассмотрены возможные варианты реализации ССОИ ПС и на основе анализа сведений из таблицы 1 сделан вывод, что из-за большого разброса количества входных и выходных сигналов целесообразно использовать модульную структуру системы, адаптируя её под конкретную подстанцию путём установки необходимого количества модулей различного типа. Модульная структура ССОИ обеспечивает возможность изменения информационной ёмкости в широких пределах, повышение отказоустойчивости, облегчение обслуживания и модернизации, упрощение интеграции и совместимости.

Таблица 1 – Результат оценки необходимого количества элементов и информационных сигналов для типовых схем №330-3Н, №330-6Н и №330-17

Типовая схема	Измерительные трансформаторы				Выключатели, разъединители				Заземляющие ножи			
	Кол-во	Тип сигнала			Кол-во	Тип сигнала			Кол-во	Тип сигнала		
		ТИ	ТС	ТУ		ТИ	ТС	ТУ		ТИ	ТС	ТУ
№330-3Н	2	8	-	-	2	-	2-4	2-4	4	-	4-8	-
№330-6Н	8	32	-	-	10	-	10-20	10-20	17	-	17-34	-
№330-17	30	120	-	-	37	-	37-74	37-74	60	-	60-120	-

Сформулированы задачи исследований, направленные на достижение поставленной цели.

Во второй главе «Разработка модульной структуры системы сбора и обработки информации электрической подстанции и метода её описания», исходя из конструктивных особенностей ССОИ ПС, разработана номенклатура модулей, обеспечивающая адаптацию системы к различным типовым схемам ПС. Обосновано использование модулей шести основных типов: процессорный модуль (ПМ), коммуникационный модуль (КМ), модуль прямого ввода (МПВ), модуль аналогового ввода (МАНВ), модуль дискретного ввода (МДВв), модуль дискретного вывода (МДВыв). На основе подсчитанного числа элементов схем ПС и информационных сигналов выполнена оценка количества необходимых модулей ввода-вывода для получения полной информации о состоянии коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей, заземляющих ножей), измеряемых величинах (токи, напряжения) и для передачи сигналов телеуправления (таблица 2).

Для организации эффективного межмодульного взаимодействия в ССОИ ПС, являющегося залогом успешного функционирования всей АСУТП, обосновано использование в качестве сети передачи данных (СПД) интерфейса *CAN FD*, обеспечивающего достаточное быстродействие и надежность при невысокой стоимости реализации. Разработана модульная структура ССОИ на базе выбранного интерфейса (рис. 1).

Таблица 2 – Количество необходимых модулей ввода-вывода ССОИ ПС

Типовая схема	Модуль прямого ввода (4xI, 4xU), шт.	Модуль аналогового ввода (8xAI), шт.	Модуль дискретного ввода (20xDI), шт.	Модуль дискретного вывода (8xDO), шт.
Схема №330-3Н	1	1	2	1
Схема №330-6Н	3	2	4	3
Схема №330-17	6	10	12	10

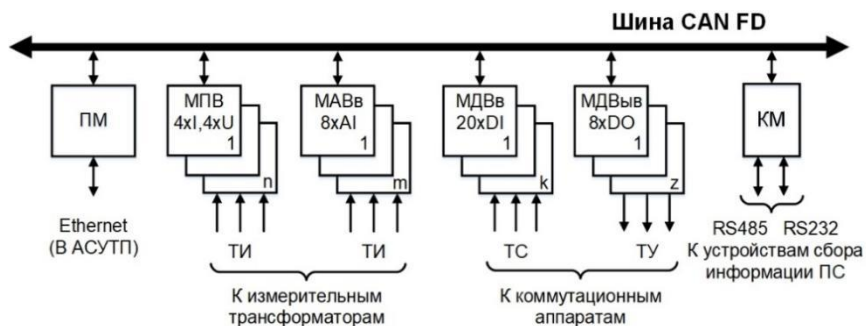


Рисунок 1 – Модульная структура ССОИ на базе интерфейса CAN FD:

ПМ – процессорный модуль; МПВ – модуль прямого ввода;
 МАВв – модуль аналогового ввода; МДВв – модуль дискретного ввода;
 МДВыв – модуль дискретного вывода; КМ – коммутационный модуль

Выполнен анализ информационных потоков в ССОИ, выявлено, что для модулей системы характерен обмен сообщениями с сильно отличающимися требованиями к срокам и надёжности доставки. Рассмотрены информационные потоки в порядке убывания их важности для функционирования ССОИ. Показано, что критерием эффективности передачи высокоприоритетных данных является их гарантированная и своевременная доставка, а низкоприоритетных данных – скорость их передачи.

На основе анализа возможностей распространённых протоколов сетевого взаимодействия предложено использование протокола общего назначения *CANopen FD*, обеспечивающего эффективное взаимодействие большого числа модулей в системах реального времени. Рассмотрены основные службы протокола: обмена текущими данными *PDO*, синхронизации *SYNC*, контроля состояния модулей *Heartbeat*, передачи низкоприоритетных данных *USDO*.

Показано, что устройства в сети *CANopen FD* взаимодействуют друг с другом путём обращений к так называемому объектному словарию своего контрагента, представляющему собой таблицу, содержащую параметры конфигурации и текущие данные устройства или процесса – объекты. Для приёма / передачи содержимого объектов в рабочем режиме используется служба *Process Data Objects (PDO)*; соответствие между объектами и содержимым сообщений задаётся разметками *TPDO* для передатчика и *RPDO* для приёмника.

Выявлено, что *CANopen FD* предоставляет метод описания отдельных модулей, однако стандартные средства описания системы в целом отсутствуют. Из-за этого возможны проблемы согласования разметок *TPDO* и *RPDO* взаимодействующих модулей,

приводящие к неправильной интерпретации модулями полученных данных. Для поиска путей решения этой проблемы разработана схема информационных потоков (рис. 2). В соответствии с ней ССОИ представлена в виде множества модулей $\{m_k\}$: $k = \{1, 2, \dots, M\}$, где M – общее количество модулей. Параметры, измеряемые или вычисляемые k -м модулем, образуют множество X_k , параметры, получаемые от других модулей – множество Y_k . Каждый k -й модуль с помощью сообщений *PDO* передаёт другим модулям параметры из собственного множества X_k , а принимающие модули с номерами $i = \{1, 2, \dots, M\}$, $i \neq k$ в соответствии со своими настройками могут записать полученные данные в множества Y_i . Каждое сообщение имеет приоритет, определяемый классом сообщения $h \in \{1 \dots H\}$, где H – количество классов. Приоритет тем выше, чем меньше номер класса. Сообщения с высшим приоритетом передаются и, соответственно, доставляются в первую очередь.

Таким образом, сообщение $l_{h,k}$, передаваемое по СПД k -м модулем и относящееся к классу h , можно описать информационным объектом, включающим следующие сведения:

- номер модуля-источника сообщения Src ($Src = k$);
- множество параметров $X^{(l)}_k \subset X_k$, содержащихся в сообщении;
- список модулей-приёмников, в котором для каждого r -го модуля в поле Dst указан его номер в системе n_r , а также задано соответствие $f^{(l)}_{nr}: X^{(l)}_k \rightarrow Y_{nr}$, отображающее полученные в сообщении данные на множество Y_{nr} .

Следовательно, дополнив описание системы описанием сообщений с явным указанием их содержимого, источников и приемников, можно решить проблему согласованной настройки модулей.

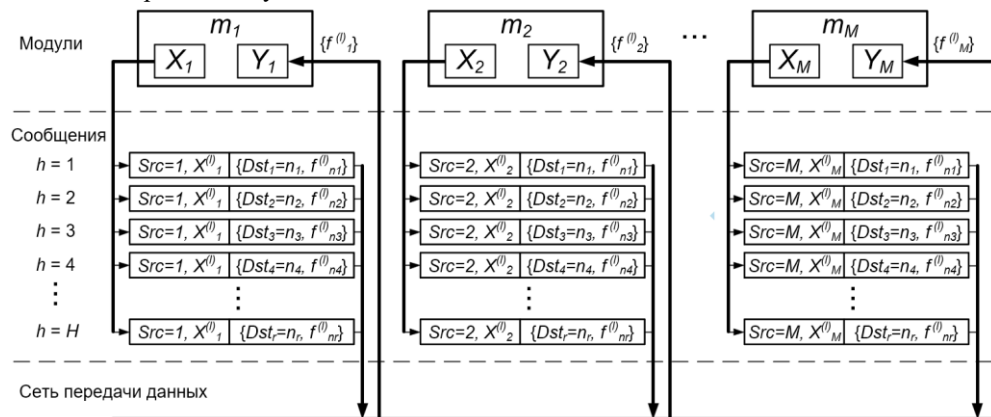


Рисунок 2 - Схема информационных потоков в модульной ССОИ

В соответствии с этим создан метод описания ССОИ, рассматривающий систему как совокупность модулей, взаимодействующих по СПД путём обмена сообщениями. На верхнем уровне описания определены две группы параметров (рис. 3): параметры модулей (*Nodes*) и параметры сообщений (*Messages*). На более низких уровнях разработаны детальные структуры описания отдельных модулей и сообщений ССОИ.

С использованием метода разработана схема *XML*-описания ССОИ, обеспечивающая автоматическое выявление следующих ошибок и потенциальных проблем

настройки межмодульного взаимодействия: сообщения, не имеющие источника; сообщения, не имеющие получателей; сообщения без содержимого (пустые); передача одних и тех же параметров в нескольких сообщениях; несоответствие типов передаваемого и принимаемого параметров, а также некоторые другие. Применение языка *XML* даёт преимущество над стандартными средствами описания *CANopen FD*, а именно: простота модификации, расширяемость, универсальность, целостность.

На схему *XML*-описания получено свидетельство о регистрации ПО.

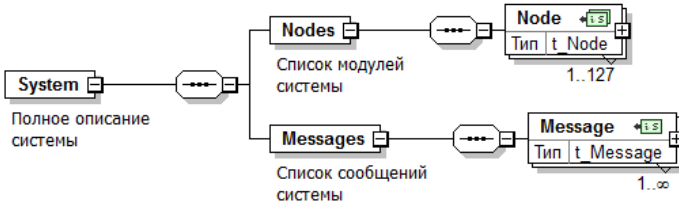


Рисунок 3 - Общая структура описания ССОИ

В третьей главе «Разработка методов и моделей для оценки параметров межмодульного взаимодействия в системах сбора и обработки информации» разработаны методы и модели, позволяющие на самых ранних этапах проектирования модульных систем оценить параметры взаимодействия модулей по СПД с разной степенью детализации и разными временными затратами.

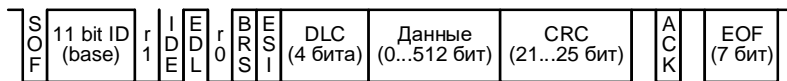
Показано, что при проектировании модульных систем одним из важнейших факторов, влияющих на возможность корректного функционирования таких систем, является нагрузка СПД y , которая определяется интенсивностями λ_i потоков сообщений от N модулей ССОИ и интенсивностью их обслуживания (передачи) μ :

$$y = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^N \lambda_i .$$

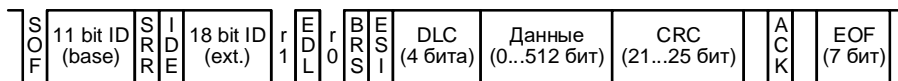
В случае, если нагрузка превысит единицу, то есть суммарная интенсивность потоков сообщений от модулей станет больше интенсивности их передачи по СПД, возможна несвоевременная доставка или потеря некоторой части сообщений и, как следствие, некорректная работа ССОИ.

Интенсивности λ_i потоков сообщений от каждого модуля существенно зависят от задач, решаемых конкретной ССОИ, и от особенностей объекта наблюдения (управления). Интенсивность передачи сообщений μ определяется выбранным интерфейсом и протоколом взаимодействия и для шинной топологии сети обычно может быть вычислена как $\mu = 1 / b$, где b – среднее время передачи одного сообщения. Таким образом, наличие возможности определения величины b позволяет на самых ранних этапах проектирования ССОИ оценить нагрузку СПД и обоснованно выбрать параметры интерфейса, обеспечивающие его работу без перегрузки. Для этого был разработан метод оценки времени передачи сообщений по шине *CAN FD*.

В ходе разработки метода с целью получения зависимостей, позволяющих определить время T_{DF} передачи сообщения *CAN FD*, был выполнен анализ структуры сообщений интерфейса. Для оценки T_{DF} проанализированы следующие форматы сообщений: стандартный (*Standard*, рис. 4а) и расширенный (*Extended*, рис. 4б). Как видно из рисунка, сообщения содержат определенный набор полей.



а) - стандартный формат



б) - расширенный формат

Рисунок 4 - Форматы сообщений CAN FD типа Data Frame

В результате анализа выявлено, что формат сообщения задается полем *IDE*: для стандартного формата его значение равно нулю, для расширенного – единице. Все поля, за исключением полей данных и контрольного кода (*CRC*), имеют фиксированную длину, показанную на рис. 4 (по умолчанию подразумевается длина 1 бит). Размер поля данных определяется содержимым поля *DLC*, которое может принимать значения от 0 до 15. Получена кусочно-линейная функция $N_{DATA}(DLC)$, связывающая количество бит в поле данных с целочисленным значением поля *DLC*:

$$N_{DATA}(DLC) = \begin{cases} 8DLC, & 0 \leq DLC \leq 8 \\ 32DLC - 192, & 9 \leq DLC \leq 12 \\ 128DLC - 1408, & 13 \leq DLC \leq 15 \end{cases} \quad (1)$$

Размер поля *CRC* зависит от размера поля данных, в связи с чем составлена функция $N_{CRC}(DLC)$, позволяющая определить количество бит поля контрольного кода при известном *DLC*:

$$N_{CRC}(DLC) = \begin{cases} 28, & DLC \leq 10 \\ 33, & DLC > 10 \end{cases} \quad (2)$$

Выявлено, что отдельные поля сообщения *CAN FD* передаются на различной скорости: номинальная скорость $Baud_N$ (до 1 Мбит/с) и альтернативная скорость (скорость данных) $Baud_D$ (до 12 Мбит/с).

Составлено выражение для вычисления количества битов N_0 , передающихся на номинальной скорости:

$$N_0(IDE) = 29 + 19 \cdot IDE \quad (3)$$

С учетом (1) и (2) составлено выражение для вычисления количества битов N_1 , передающихся на альтернативной скорости:

$$N_1(DLC) = 5 + N_{DATA}(DLC) + N_{CRC}(DLC) \quad (4)$$

Суммарное время передачи указанных битов равно $N_0T_N + N_1T_D$, где $T_N = 1 / Baud_N$, $T_D = 1 / Baud_D$ – время передачи одного бита на номинальной скорости и на скорости данных соответственно.

В ходе анализа было выявлено, что в случае передачи пяти последовательных битов с одинаковыми значениями передатчик автоматически вставляет в поток дополнительный бит с противоположным значением для синхронизации шины, а приёмник так же автоматически его удаляет. Следовательно, добавление дополнительных битов не влияет на содержимое сообщений, но увеличивает время передачи на некоторую величину, зависящую от содержания сообщения, что необходимо учитывать при составлении выражений, позволяющих вычислить время передачи сообщения.

С учетом (3), (4) и значения поля *BRS* (0 – передача на номинальной скорости, 1 – передача на альтернативной скорости) составлено выражение для вычисления минимального времени передачи сообщения для наиболее благоприятного случая (число дополнительных битов равно нулю):

$$T_{DF_MIN} = N_0 T_N + N_1 (T_N + (T_D - T_N) BRS) \cdot \quad (5)$$

Далее составлены выражения для вычисления максимального количества дополнительных битов в полях, передающихся на номинальной скорости и скорости данных.

Для полей, передающихся на номинальной скорости:

$$N_{0S} (IDE) = 2 + 4 \cdot IDE \cdot \quad (6)$$

Для полей, передающихся на альтернативной скорости:

$$N'_{1S} = \lfloor N_{DATA} (DLC) / 5 \rfloor + A \cdot \quad (7)$$

где $A=1$ при $DLC \in \{3, 8, 14, 15\}$; иначе $A=0$.

Если вариант использования для передачи только номинальной скорости ($BRS = 0$) не исключается, то в общем виде максимальное количество дополнительных битов N_{1S} с учётом (7) можно определить так:

$$N_{1S} = \lfloor N_{DATA} (DLC) / 5 \rfloor + A + (1 - BRS) B \cdot \quad (8)$$

где $B=1$ при $DLC < 4$; иначе $B=0$.

Обобщая приведённые рассуждения, с учётом (5), (6) и (8) составлено выражение для оценки максимального времени передачи сообщения T_{DF_MAX} :

$$T_{DF_MAX} = (N_0 + N_{0S}) T_N + (N_1 + N_{1S}) (T_N + (T_D - T_N) BRS) \cdot \quad (9)$$

Для упрощённой оценки времени передачи в некоторых случаях (например, в разработанной вероятностной модели) можно не вычислять количество дополнительных битов в каждом сообщении, а использовать некий коэффициент η , полученный в результате статистического анализа потока сообщений в реальных системах и позволяющий добавить к сообщению усреднённое число дополнительных битов в зависимости от длины этого сообщения. Составлено выражение для вычисления среднего времени передачи с учётом коэффициента η ($\eta \in [0, 1]$):

$$T_{DF_AVG} = (N_0 + N_{0S} \eta) T_N + (N_1 + N_{1S} \eta) (T_N + (T_D - T_N) BRS) \cdot \quad (10)$$

Разработанный метод оценки времени передачи сообщений *CAN FD* для моделирования междомдульного взаимодействия в ССОИ позволяет исключить погрешность оценки времени передачи сообщений, связанную с наличием дополнительных битов. У известных методов данная погрешность может достигать 18%.

С использованием метода оценки времени передачи сообщений интерфейса *CAN FD* были разработаны вероятностные метод и модель для оперативной оценки критически важных параметров междомдульного взаимодействия.

При разработке вероятностного метода ССОИ рассматривалась как система массового обслуживания (СМО) (рис. 5) с неоднородным потоком заявок (сообщений). Для таких СМО определены две группы характеристик:

- характеристики по каждому потоку заявок одного класса;
- характеристики суммарного потока заявок.

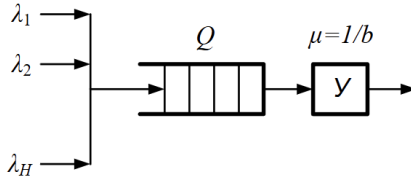


Рисунок 5 – Модель ССОИ: λ_h – интенсивность h -го потока заявок; H – число классов заявок; Q – накопитель; Y – обрабатывающее устройство; μ – интенсивность обслуживания заявок; b – время обслуживания заявки

Для каждой из перечисленных групп составлены выражения для вычисления интенсивности потока сообщений, кроме того, получено выражение, описывающее интенсивность их обслуживания, т.е. доставки по СПД.

Всю совокупность заявок можно разделить на две категории: высокоприоритетные заявки классов $1 \dots H-1$, влияющие на выполнение основных функций системы, которые обязательно должны быть обслужены за фиксированное время, и низкоприоритетные заявки класса H , от интенсивности обслуживания которых зависит лишь время выполнения второстепенных задач.

Общая интенсивность потока высокоприоритетных заявок от всех модулей ССОИ описывается как:

$$\lambda_s = \sum_{h=1}^{H-1} \lambda_h. \quad (11)$$

Интенсивность потока высокоприоритетных заявок $\lambda_{k,h}$ (заявки класса h , формируемые одним модулем k -го типа) с учетом длительности цикла синхронизации T_{SYNC} , периода передачи $B_{k,h}$ сообщений класса h модулем k -го типа, выраженного в циклах синхронизации и параметра $a_{k,h}$ экспоненциального распределения вероятности выхода измеряемой и передаваемой в сообщении (k, h) величины за пределы зоны нечувствительности вычисляется с помощью выражения:

$$\lambda_{k,h} = \min \left[\frac{1}{T_{SYNC}}, a_{k,h} \frac{\left(1 - e^{-a_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}\right)^2}{1 - \left(1 + a_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}\right) e^{-a_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}} + \frac{e^{-a_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}}{B_{k,h} T_{SYNC}} \right]. \quad (12)$$

Среднее время обслуживания высокоприоритетной заявки b в системе, работающей без перегрузки, с учетом (11) можно выразить как:

$$b = \frac{\lambda_s t_{1,1} + \sum_{k=1}^M (m_k \sum_{h=2}^{H-1} \lambda_{k,h} t_{k,h})}{\lambda_s}, \quad (13)$$

где $t_{k,h}$ – время передачи сообщения h -класса, сформированного модулем k -го типа.

Интенсивность обслуживания высокоприоритетных заявок μ определяется как $\mu = 1 / b$, а нагрузка системы $y = \lambda_s / \mu$ или $y = \lambda_s b$. Нагрузка y определяет качество функционирования ССОИ. В случае если $y < 1$, все высокоприоритетные заявки обслуживаются вовремя, СПД работает без перегрузки и имеет некий запас для передачи низкоприоритетных сообщений. Если же $y > 1$, возникает перегрузка, что приводит к неправильной работе ССОИ в целом.

Далее была проанализирована возможность СПД по обслуживанию низкоприоритетных заявок класса H . Их потеря или снижение интенсивности обслуживания не

вливают на общую работоспособность ССОИ, но увеличивают время выполнения таких операций, как считывание осциллограмм сигналов или протоколов событий. Коэффициент простоя ρ , показывающий часть времени, в которой СПД свободна от обслуживания высокоприоритетных заявок и может обслужить заявки H -класса, определяется выражением $\rho = 1 - u$.

Определена средняя скорость передачи заявок H -класса, для этого проанализирован алгоритм функционирования службы *USDO* протокола *CANopen FD*. Анализ показал, что для передачи одного объекта данных служба использует сообщения нескольких типов с различной длиной поля данных. Количество бит N_0 , передаваемых в каждом сообщении на номинальной скорости, одинаково для всех сообщений *USDO* и определяется (3). Количество бит N_1^i , передаваемых на альтернативной скорости, зависит от типа сообщения, то есть от длины поля данных, и определяется (4).

Суммарное количество бит, передаваемых на номинальной скорости $N_0^{\text{сумм}}$ и альтернативной скорости $N_1^{\text{сумм}}$ с учетом (3), (4), (6), (7) и с использованием коэффициента вставки дополнительных битов η ($\eta \in [0, 1]$) определяется полученными выражениями:

$$N_0^{\text{сумм}} = \left(2 + \left\lfloor \frac{N}{60} \right\rfloor + \left(\left\lceil \frac{N}{60} \right\rceil - \left\lfloor \frac{N}{60} \right\rfloor \right) + \left\lceil \frac{\lfloor N/60 \rfloor}{Z} \right\rceil \right) (N_0 + N_{0s}\eta), \quad (14)$$

$$N_1^{\text{сумм}} = N_1(12) + N_{1s}(12)\eta + N_1(8) + N_{1s}(8)\eta + N_1(64) + N_{1s}(64)\eta + N_1(N \bmod 60) + N_{1s}(N \bmod 60)\eta + \left(\left\lceil \frac{N}{60} \right\rceil / Z \right) (N_1 + N_{1s}\eta). \quad (15)$$

Используя выражения (14), (15) и зная время, за которое передаются биты N_0 и N_1 , можно определить теоретическое суммарное время передачи одного объекта данных службой *USDO*:

$$T^{\text{сумм}} = N_0^{\text{сумм}} \cdot T_N + N_1^{\text{сумм}} \cdot T_D.$$

Фактическое время передачи зависит от коэффициента простоя ρ и вычисляется как:

$$T_{\text{факт}}^{\text{сумм}} = T^{\text{сумм}} / \rho. \quad (16)$$

С использованием выражения (16) и с учётом размера передаваемого объекта данных N составлено выражение для вычисления средней скорости передачи этого объекта службой *USDO* в байтах в секунду:

$$Q_H = N / T_{\text{факт}}^{\text{сумм}}. \quad (17)$$

Разработанный вероятностный метод позволяет оперативно оценить зависимость таких важных параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ, как нагрузка СПД при передаче обязательных высокоприоритетных сообщений и скорость передачи низкоприоритетных данных при известной нагрузке СПД, от номенклатуры и количества модулей системы, а также от параметров их настройки. Это даёт возможность исключить серьёзные ошибки конфигурирования ССОИ на самых ранних этапах проектирования.

Вероятностный метод оценки параметров реализован автором в математической модели, предназначенной для исследования различных конфигураций ССОИ и влияния параметров настройки входящих в неё модулей на нагрузку СПД.

Исходными данными для модели являются:

BitRate_N, *BitRate_D* – номинальная и альтернативная скорости шины *CAN FD*, бит/с; T_{SYNC} – продолжительность цикла синхронизации ССОИ, с; η – коэффициент,

определяющий увеличение времени передачи при автоматической вставке бит; α – параметр экспоненциального распределения вероятности выхода за пределы зоны нечувствительности одного измеряемого или вычисляемого значения, передаваемого в *PDO*; H – количество классов заявок; M – количество типов модулей в ССОИ; $M = [m_1 m_2 \dots m_M]$ – массив количества модулей разного типа; B – матрица периодичности отправки заявок модулями; D – матрица длин сообщений:

$$B = (b_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}, \quad D = (d_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}};$$

V – матрица, содержащая количество отдельных значений, передаваемых в каждом сообщении *PDO*; LM – матрица режима вычисления интенсивностей потоков заявок (задаёт 3 режима работы: «0» - определена периодичность отправки заявок, «1» – определена периодичность отправки, но имеется возможность досрочной отправки при выходе значения за пределы зоны нечувствительности, «2» – специальный режим вычисления интенсивности потока):

$$V = (v_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}, \quad LM = (lm_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}.$$

Использование матрицы LM можно обосновать тем, что закон распределения интервалов времени между изменениями значений некоторых параметров ССОИ (например, признаки превышения пороговых уровней) определить затруднительно, поскольку он существенно зависит от режима работы и состояния электрооборудования ПС. Для таких параметров в матрице LM введён режим вычисления «2» - специальный режим, в котором интенсивность потока отдельных заявок принудительно задаётся параметром модели *StressMode* («0» - минимальная интенсивность, «1» - максимальная интенсивность), что позволяет имитировать предельные режимы работы СПД.

Далее приведены ключевые этапы работы модели.

1. Выполняется формирование матрицы параметров экспоненциального распределения вероятностей досрочной передачи заявок каждого класса от каждого типа модулей:

$$A = (a_{k,h}) = \alpha V.$$

2. Формируется матрица длительностей передачи сообщений:

$$T = (t_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} : \quad t_{k,h} = F_1(d_{k,h}, \eta),$$

где $F_1(d_{k,h}, \eta)$ – функция, определяющая время передачи с использованием (10).

3. Формируется матрица интенсивностей потоков сообщений каждого класса, управляемых одним модулем каждого типа:

$$L = (l_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} : \quad l_{k,h} = \begin{cases} 0 & npu \quad b_{k,h} = 0 \\ (T_{SYNC} b_{k,h})^{-1} & npu \quad lm_{k,h} = 0 \\ F_2(T_{SYNC} b_{k,h}, a_{k,h}) & npu \quad lm_{k,h} = 1 \\ (T_{SYNC} b_{k,h}) & npu \quad lm_{k,h} = 2 \text{ u } StressMode = 0 \\ T_{SYNC}^{-1} & npu \quad lm_{k,h} = 2 \text{ u } StressMode = 1 \end{cases}.$$

4. Формируются матрица интенсивностей потоков заявок каждого класса от всех модулей каждого типа:

$$\Lambda = (\lambda_{k,h})_{\substack{k=1,\overline{M} \\ h=1,\overline{H-1}}} = L \circ (E \oplus M),$$

где E – единичный вектор длиной $H-1$.

Общая интенсивность потока заявок является суммой элементов матрицы Λ :

$$\lambda_s = \sum_{k,h} \lambda_{k,h}.$$

5. Определяется среднее время обслуживания заявки b в соответствии с (13):

$$X = (x_{k,h})_{\substack{k=1,\overline{M} \\ h=1,\overline{H-1}}} = T \circ \Lambda, \quad b = \lambda_s^{-1} \sum_{k,h} x_{k,h}.$$

Нагрузка системы y и коэффициент простоя ρ высчитываются по формулам: $y = \lambda_s b$, $\rho = 1 - y$; скорость, с которой передаются низкоприоритетных данные Q_H , определяется формулой (17). Применение разработанной вероятностной модели при исследовании КП ПС 10-110 кВ рассмотрено в четвёртой главе.

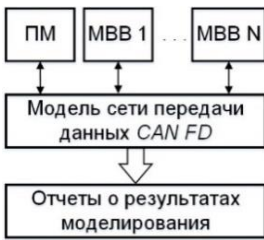


Рисунок 6 - Иерархическая структура имитационной модели модульной ССОИ

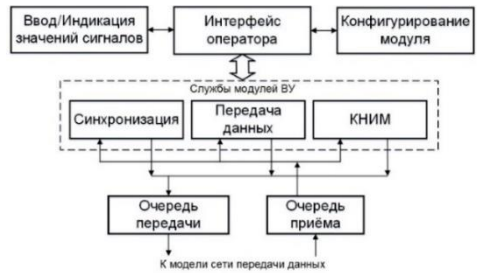


Рисунок 7 - Модель модуля верхнего уровня

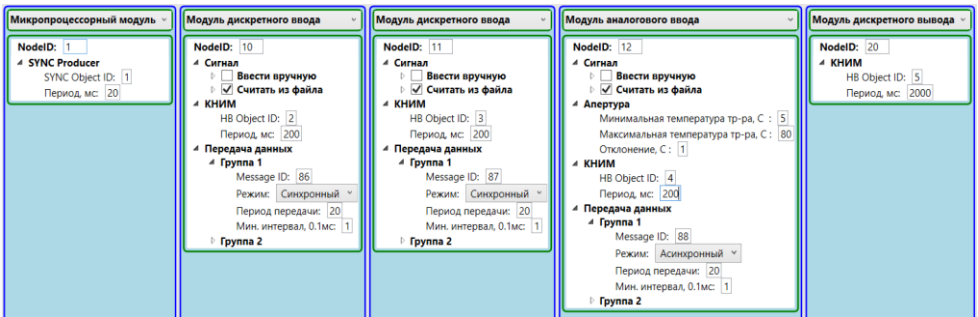


Рисунок 8 – Графический интерфейс имитационной модели

Для детальной оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ разработана имитационная модель. Она имеет иерархическую структуру (рис. 6) и состоит из некоторого количества модулей верхнего уровня (рис. 7) и модели сети передачи данных. Разработанная имитационная модель имеет графический интерфейс, позволяющий оператору удобно взаимодействовать с каждым модулем и параметром ССОИ (рис. 8). Благодаря использованию разработанного метода оценки времени передачи сообщений, в результатах моделирования в ряде случаев отсутствует погрешность, связанная со вставкой дополнительных битов.

Адекватность разработанных вероятностной и имитационной моделей подтверждена с использованием критериев Стьюдента и критерия Фишера.

В четвёртой главе «Практическая реализация предложенных методов и моделей» показаны результаты использования разработанных методов и моделей в задачах, возникающих при проектировании модульных систем.

Вероятностная модель была использована для исследования взаимодействия модулей в проектируемой ССОИ с целью определения возможности передачи осциллограмм токов и напряжений в реальном масштабе времени. Рассмотренная ССОИ ПС 10-110кВ состоит из модулей следующих типов: системный контроллер (тип 1) – 1 шт., модуль прямого ввода (тип 2) – 2 шт., модуль аналогового ввода (тип 3) – 10 шт., модуль дискретного ввода (тип 4) – 8 шт., модуль дискретного вывода (тип 5) – 2 шт.

На первом этапе исследования ССОИ была получена зависимость нагрузки СПД от ширины зоны нечувствительности при максимальной скорости шины (8 Мбит/с) для режимов обычной нагрузки ($StressMode = 0$) и максимальной нагрузки ($StressMode = 1$) (рис. 9а).

Каждый модуль может передавать данные не только периодически, но и досрочно, если какое-то значение изменится более чем на заданную величину, т.е. выйдет за пределы зоны нечувствительности δ . Чем шире зона нечувствительности, тем реже будут передаваться сообщения и меньше нагружать сеть, но тем ниже будет точность измерений. Чем уже зона нечувствительности, тем выше будет точность измерений, но при этом повысится нагрузка на сеть.

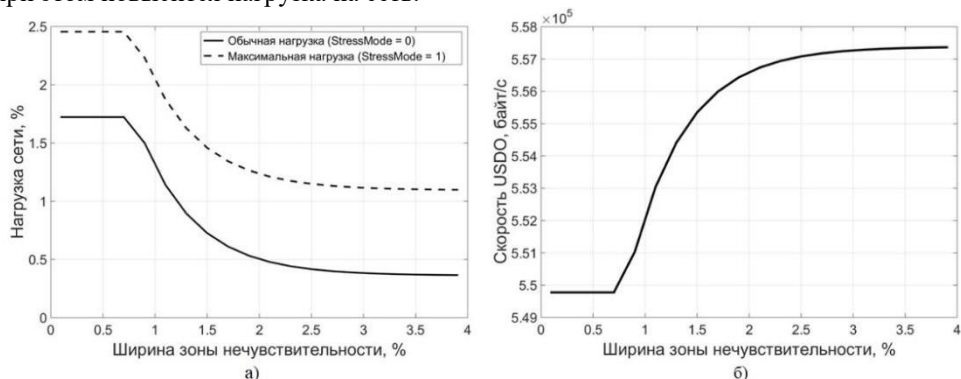


Рисунок 9 – Зависимость параметров СПД от ширины зоны нечувствительности δ :
 а – нагрузка u ; б – скорость передачи низкоприоритетных данных Q_H

Из графика видно, что при $\delta > 3\%$ влияние данного параметра на нагрузку СПД практически отсутствует, а при $\delta < 0,7\%$ – нагрузка сети вовсе перестает изменяться, достигнув максимума. Для рассмотренных режимов работы предельная нагрузка СПД на максимально возможной скорости передачи составила 2,47 %.

На рис. 9б показана зависимость скорости передачи низкоприоритетных данных (осциллограмм) Q_H от ширины зоны нечувствительности в режиме обычной нагрузки ($StressMode = 0$). Длина каждой осциллограммы тока или напряжения составляет 4000 байт, как видно из графика, даже при максимальной нагрузке СПД ($\delta = 0,7\%$) они передаются на скорости около 550 кбайт/с. При этой скорости одна осциллограмма будет передана примерно за 7,3 мс, а это означает, что СПД способна обеспечить передачу до 13 осциллограмм за 100 мс, что вполне достаточно для непрерывного их отображения на АРМ оператора в режиме реального времени.

Дополнительный анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что ширину зоны нечувствительности δ можно выбрать равной 0.7 %: её уменьшение не приводит к повышению частоты передачи данных, а увеличение не существенно снижает нагрузку, но заметно снижает чувствительность ССОИ к изменениям электрических параметров. Также можно сделать вывод, что при заданных параметрах модели и при любой δ коэффициент простоя СПД ρ превышает 97 % для всех режимов работы. Это означает, что при отсутствии необходимости оперативной передачи большого количества низкоприоритетных данных можно понизить скорость работы шины *CAN FD*, что в свою очередь повышает помехоустойчивость интерфейса и понижает тепловыделение модулей ССОИ. Поэтому далее были исследованы зависимости показателей сети от скорости передачи данных по интерфейсу *CAN FD* при $\delta = 0.7\%$ (рис. 10).

Из рис. 10а следует, что даже восьмикратное снижение скорости шины *CAN FD* (до 1 Мбит/с) не привело к возникновению перегрузки сети при передаче высокоприоритетных сообщений. Даже предельная нагрузка в данной конфигурации системы не превышает 17%, это гарантирует своевременную доставку высокоприоритетных сообщений. Из рис. 10б видно, что скорость передачи низкоприоритетных данных зависит от скорости шины *CAN FD* и при её минимальном значении уменьшается с 550 до 86,95кбайт/с, но даже такое уменьшение не вызывает дискомфорт при необходимости передачи данных по команде оператора: так, одна осциллограмма будет передана за 46 мс, а в режиме реального времени (за 100 мс) может передаваться до двух осциллограмм. Из этого следует, что для рассматриваемой конфигурации ССОИ целесообразно снизить скорость шины *CAN FD* до 2...4 Мбит/с, что позволит уменьшить тактовую частоту приёмопередатчиков *CAN FD* во всех модулях ССОИ в 4...2 раза соответственно. Это приведет к снижению их тепловыделения без потери возможности передачи низкоприоритетных данных.

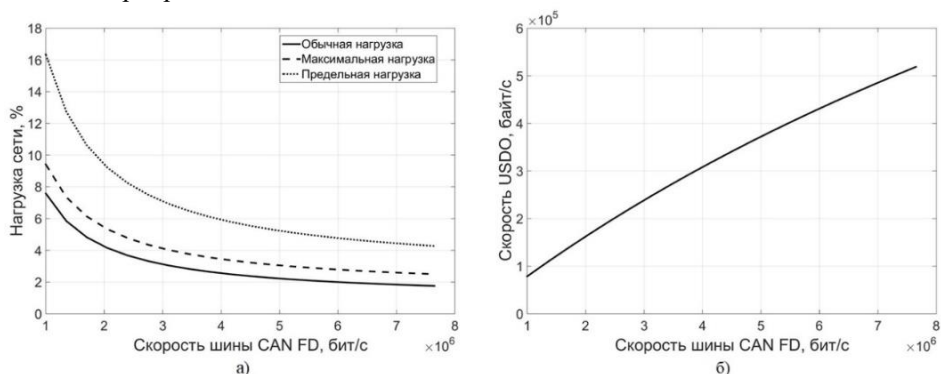


Рисунок 10 – Зависимость параметров СПД от скорости шины *CAN FD*:
 а – нагрузка; б – скорость передачи низкоприоритетных данных

В условиях, аналогичных описанным выше, исследовались реальные системы, при этом погрешность сопоставления результатов моделирования с результатами исследования реальных систем составила не более 7,7 %. Такая погрешность является допустимой для предварительной оценки параметров взаимодействия модулей в проектируемой ССОИ.

Рассмотренная ранее конфигурация ССОИ ПС 10 -110кВ была исследована с помощью имитационной модели с целью оценки загруженности сети передачи данных на начальных этапах проектирования ССОИ ПС, выбора значений параметров настройки, обеспечивающих достаточную скорость взаимодействия модулей без потери данных. В ходе эксперимента получены сведения о времени постановки в очередь передачи, времени начала передачи, длительности передачи и общего времени доставки для каждого сообщения. Погрешность сопоставления результатов имитационного моделирования с результатами исследования реальной системы составила не более 1,3%.

Показано, что с использованием разработанных методов и моделей возможно исследование не только ССОИ ПС, но и других модульных систем. С использованием вероятностной модели выполнено исследование сети устройств управления дугогасящими реакторами в условиях передачи высокоприоритетных и низкоприоритетных данных с целью определения минимально допустимой скорости работы интерфейса *CAN FD*, позволяющей обеспечить взаимодействие узлов сети, находящихся на значительном расстоянии.

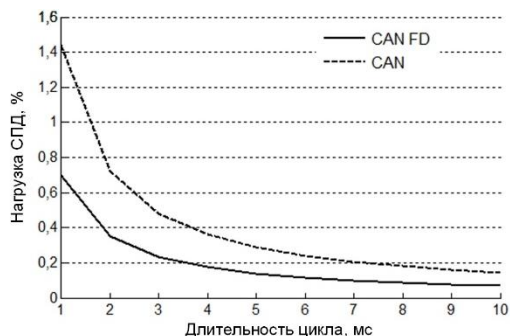


Рисунок 11 – Исследование нагрузки СПД регистратора событий

Метод оценки времени передачи сообщений по шине *CAN FD* разработан в первую очередь для использования в вероятностной и имитационной моделях, однако может применяться и независимо от них. В результате использования метода при исследовании работы модульного регистратора событий, разработанного с участием автора, выяснилось, что замена интерфейса *CAN* на *CAN FD* существенно снижает нагрузку на СПД (с 0.72 до 0.35) (рис. 11) в текущей конфигурации изделия, обеспечивая возможность подключения дополнительных модулей ввода данных при сохранении периода их опроса 2 мс. Если же подключение дополнительных модулей не требуется, то период опроса можно уменьшить до 1 мс, повысив таким образом скорость реакции регистратора на изменения входных сигналов при сохранении запаса по нагрузке на СПД около 30 % на случай возникновения ошибок передачи / приёма отдельных сообщений.

Разработанные методы и модели были использованы при создании универсального модульного контроллера присоединения, рассчитанного на установку от 1 до 10 модулей ввода\вывода с возможностью

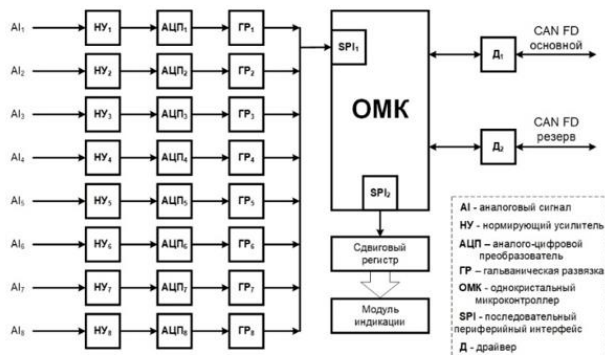


Рисунок 12 – Функциональная схема модуля аналогового ввода

расширения до 127 модулей за счёт использования дополнительных блочных каркасов. В ходе его проектирования разработаны функциональные схемы основных модулей ввода/вывода: модуля дискретного ввода, модуля дискретного вывода, модуля аналогового ввода, одна из которых приведена на рис. 12.

В заключении излагаются основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях приведены схемы информационных связей и компоновки элементов АСУТП ПС, исходные тексты разработанного программного обеспечения, результаты экспериментальных исследований, сведения о внедрении результатов работы.

Основные результаты диссертационного исследования

1. На основе аналитического обзора публикаций, научных трудов и других источников по теме исследования обоснована необходимость использования модульной структуры ССОИ и интерфейса *CAN FD*, реализующего межмодульное взаимодействие. Обоснована необходимость разработки метода описания модульной ССОИ на базе протокола *CANopen FD* и интерфейса *CAN FD*, учитывающего межмодульные информационные связи.

2. Разработан метод описания модульной ССОИ, использующей протокол *CANopen FD* и интерфейс *CAN FD*, позволяющий полностью исключить основные ошибки настройки межмодульного взаимодействия и за счёт этого сократить время конфигурирования с нескольких дней до нескольких часов.

3. Разработан метод оценки времени передачи сообщений *CAN FD* для моделирования межмодульного взаимодействия в ССОИ, позволяющий исключить погрешность оценки времени передачи сообщений, связанную с наличием дополнительных битов. У известных методов эта погрешность может достигать 18 %.

4. Разработаны вероятностные метод и модель для предварительной оценки параметров межмодульного взаимодействия в ССОИ, функционирующих на базе протокола *CANopen FD* и интерфейса *CAN FD*, позволяющие оперативно оценить критически важные параметры межмодульного взаимодействия на самых ранних этапах проектирования ССОИ. Использование модели для исследования конкретной конфигурации ССОИ позволило уменьшить тактовую частоту приёмопередатчиков *CAN FD* в 2-4 раза, что значительно снижает энергопотребление и тепловыделение модулей ССОИ. Показано, что результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным, полученными при исследовании реальной системы, с погрешностью не более 7,7 %.

5. Разработана имитационная модель для детального исследования межмодульного взаимодействия в ССОИ на базе интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD*, позволяющая в полном объеме исследовать все необходимые параметры межмодульного взаимодействия и путём изменения конфигурации модулей выбрать значения этих параметров, обеспечивающие наилучшую эффективность функционирования ССОИ. Показано, что результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным, полученными при исследовании реальной системы, с погрешностью не более 1,3 %.

6. Разработано программное обеспечение, реализующее вероятностную и имитационную модели и позволяющее исследовать параметры межмодульного взаимодействия, оценить степень их влияния на качество связи.

7. С использованием созданных методов, моделей и программного обеспечения разработаны функциональные схемы модулей универсального контроллера присоединения, рассчитанного на работу без перегрузки при установке от 1 до 10 модулей

ввода\вывода в основной корпус с возможностью расширения до 127 модулей за счёт использования дополнительных блочных каркасов.

Публикации автора по теме работы.

Основные научные результаты опубликованы в следующих работах:

- в изданиях, включенных в перечень Минобрнауки России:

1. **Муженко, А.С.** Выбор и оптимизация метода поиска записей в объектном словаре модуля системы вибромониторинга, использующего протокол *CANopen* / А.С. Муженко, Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.К.М. Алджиязна // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 14-21;

2. **Муженко, А.С.** Оценка времени передачи сообщений в информационно-измерительных и управляющих системах, использующих интерфейс *CAN FD* / А.С. Муженко, В.И. Лачин, Д.А. Плотников, Н.В. Рарова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 5-10;

3. **Муженко, А.С.** Метод снижения вероятности ошибок управления защитой турбоагрегата по вибрации / А.С. Муженко, Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.Б. Дьяченко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 70-76;

4. **Муженко, А.С.** Оценка интенсивности межмодульного взаимодействия и выбор его организации в системах вибромониторинга турбоагрегатов / А.С. Муженко, Д.А. Плотников, В.И. Лачин // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2024. – № 32 (1). – С. 102-112;

5. **Муженко, А.С.** Усовершенствованные вероятностные метод и модель для оценки параметров межмодульного взаимодействия в системах сбора и обработки информации. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 55-60;

- в свидетельствах о регистрации программ:

6. Плотников Д.А., **Муженко А.С.** Проверка *XML*-описания модульных систем на основе протокола *CANopen FD* / Д.А. Плотников, А.С. Муженко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – 24.12.2024 – № RU 2024691739;

7. Плотников Д.А., **Муженко А.С.** Вероятностная модель модульной системы на базе протокола *CANopen FD* / Д.А. Плотников, А.С. Муженко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – 19.12.2024 – № RU 2024691042.

- Прочие публикации по теме диссертации:

8. **Муженко, А.С.** Метод описания модульной информационно-измерительной системы на основе протокола *CANopen* с учетом межмодульных информационных связей / А.С. Муженко, Д.А. Плотников, В.И. Лачин // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – С. 26–36;

9. **Муженко, А.С.** Метод повышения помехоустойчивости устройства управления дугогасящим реактором / А.С. Муженко, Д.А. Плотников, В.И. Лачин, К.Ю. Соломенцев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т.66, № 4. – С. 112–117;

10. **Муженко, А.С.** Разработка имитационной модели модульной информационно-измерительной системы (ИИУС) на базе интерфейса *CAN FD* / А.С. Муженко,

В.И. Лачин, Д.А. Плотников, В.Б. Дьяченко, Н.В. Рарова // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. 19-й Междунар. науч.-практ. конф., 06-07 июня 2023 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 130-133;

11. **Муженко, А.С.** О контроле состояния и уровня заряда аккумуляторных батарей в информационно-измерительных и управляющих системах / А.С. Муженко, В.Г. Миляков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 5. – С. 9-11;

12. **Муженко, А.С.** Оценка максимального и минимального времени передачи сообщений в информационно-измерительных и управляющих системах, использующих интерфейс *CAN FD* / А.С. Муженко, В.И. Лачин, Д.А. Плотников // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. 20-й Междунар. науч.-практ. конф., 19-20 сентября 2024 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – С. 183-186;

13. **Муженко, А.С.** Результаты оценки параметров межмодульного взаимодействия в контроллерах присоединения электроэнергетических подстанций, работающих на базе интерфейса *CAN FD* и протокола *CANopen FD* с использованием вероятностной модели / А.С. Муженко, Д.А. Плотников // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XLVI Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 19-21 нояб. 2024 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮГРПУ (НПИ), 2024. – С. 225-228.

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах:

[1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13] – проведение исследований, обобщение результатов, [6, 10] – разработка концепции построения модели и структуры ПО, [1, 2, 8, 9, 10, 11, 12, 13] – сбор и структурирование информации, разработка функциональных схем, [2, 12, 13] – разработка методики проведения эксперимента, тестовых программ, [6, 7] – разработка программного обеспечения, реализующего разработанные методы.