

Анализ эффективности функционирования информационной сети цифровой подстанции

А.В. ЖУКОВ, Д.М. СТЕШЕНКО
ОАО «СО ЕЭС», Россия
А.Ф. ДЬЯКОВ, Б.К. МАКСИМОВ,
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», Россия
А.О. АНОШИН
ООО «ТЕКВЕЛ» Россия
steshenko-dm@so-ups.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ЦПС, ИЭУ, МЭК 61850, информационная сеть, управляемые промышленные коммутаторы, OPNET Modeler, RTDS, SV, GOOSE

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся работы в направлении создания цифровых подстанций (ЦПС). Данные работы осуществляются в рамках создания интеллектуальной электроэнергетической системы в целях повышения надежности и живучести энергосистемы. Создание ЦПС преследует несколько целей, а именно:

- Уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат
- Повышение надежности и качества выполнения функций по передаче и распределению электрической энергии
- Повышение надежности электроснабжения потребителей

Одной из главных задач при создании проекта ЦПС является разработка информационной сети для реализации функций релейной защиты и автоматики (РЗА) в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850. В рамках решения данной задачи осуществляется:

1. Разработка информационной платформы для реализации функций РЗА.
2. Разработка физической топологии информационной сети ЦПС.
3. Разработка технических решений по обеспечению надежности передачи данных в информационной сети ЦПС.
4. Разработка технических решений по обеспечению управления информационной нагрузкой.
5. Оценка производительности информационной сети в соответствии с выбранной топологией и методами управления информационной нагрузкой.

Целью данной статьи является представление результатов моделирования динамической производительности и анализа эффективности функционирования информационной сети модели «шины процесса» ЦПС и разработки рекомендаций по управлению информационной нагрузкой.

Модель была создана в программной системе имитационного моделирования OPNET Modeler, в соответствии с требованиями к методам моделирования локальной вычислительной сети (LAN), приведенными в части 5 стандарта МЭК 61850 [1].

Верификация разработанной модели была произведена путем сравнительного анализа результатов моделирования в OPNET Modeler и результатов экспериментов, проведенных с использованием устройств релейной защиты и телекоммуникационного оборудования

лаборатории «Лаборатория по исследованию функциональной совместимости устройств, работающих по условиям стандарта МЭК 61850» и RTDS (Real Time Power System Simulation) в научно-образовательном центре «Надежность и эффективность РЗА, ПА и телекоммуникации в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивными сетями» на базе кафедры РЗАЭС «НИУ «МЭИ».

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ ЦПС

2.1 Подходы к проведению анализа работы информационной сети ЦПС

Наиболее распространенным подходом к проектированию информационных систем подстанций в настоящее время являются решения на основе экспертных оценок. В соответствии с этим подходом специалисты в области телекоммуникационных технологий на основании имеющегося у них опыта и экспертных оценок осуществляют проектирование вычислительных систем, обеспечивающее решение конкретной задачи или класса задач. Этот подход позволяет минимизировать затраты на этапе проектирования, быстро оценить стоимость реализации информационной системы. Однако решения, полученные с использованием экспертных оценок, носят субъективный характер.

Еще одним подходом является физическое моделирование. Оно позволяет решать отдельные задачи при задании небольшого количества сочетаний исследуемых параметров системы. При натурном моделировании вычислительной сети практически невозможно проверить ее работу для вариантов с использованием большого количества телекоммуникационных устройств и устройств РЗА. Поэтому возможности физического моделирования при анализе информационных сетей ограничены. Но если определенным образом преобразовать топологию и использовать программы-эмуляторы устройств РЗА с поддержкой МЭК 61850, то возможности физического моделирования возрастают. Однако снятие статистических характеристик с различных точек сети чрезвычайно затруднено.

При анализе и оптимизации информационных сетей во многих случаях предпочтительным оказывается использование математического моделирования. Особым классом математических моделей являются имитационные модели. Такие модели представляют собой компьютерную программу, которая хронологически шаг за шагом воспроизводит события, происходящие в реальной системе. Применительно к вычислительным сетям их имитационные модели воспроизводят процессы генерации сообщений приложениями, осуществляют разбиение сообщений на пакеты и кадры определенных протоколов, выявляют задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов и кадров внутри информационной системы, а также позволяют анализировать процесс получения доступа устройств к разделяемой сетевой среде.

При имитационном моделировании информационной сети не требуется приобретать дорогостоящее оборудование, так как его работа имитируется программами, достаточно точно воспроизводящими все основные особенности и параметры такого оборудования. Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе прогона модели статистические данные о наиболее важных характеристиках сети:

- Прогнозируемые задержки между конечными и промежуточными узлами сети
- Пропускную способность каналов
- Коэффициенты использования сегментов, буферов и процессоров
- Источники задержек и узких мест сети
- Вероятности потерь пакетов и т.п.

Все это позволяет взглянуть на информационную сеть ЦПС не как на «черный ящик», а с точки зрения потока информационных процессов, протекающих в них.

Поэтому в качестве основного может быть использован подход, предполагающий разработку модели и моделирование (имитацию работы) поведения вычислительной системы в программных комплексах имитационного моделирования.

В данной статье рассматривается программная система имитационного моделирования OPNET Modeler, которая ориентирована на сети связи и позволяет строить модели с элементами программирования.

В статье представлены результаты моделирования информационного обмена данными на уровне «шины процесса» ЦПС в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850. Информационный обмен на ЦПС осуществляется между интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) для реализации функций РЗА с применением различных методов управления информационной нагрузкой сети Ethernet.

2.2 Требования к времени передачи и времени восстановления работоспособности информационной сети

Стандарт МЭК 61850 ставит жёсткие требования к времени передачи данных (Таблица 1) и времени восстановления работоспособности (функционирования) информационной сети (Таблица 2). Полное время передачи данных от момента создания сообщения и до момента его приема и возникающие задержки являются необходимой информацией при проектировании систем релейной защиты и автоматизации.

До выхода и утверждения второй редакции части 5 стандарта МЭК 61850 основным требованием являлось не превышение времени передачи данных значений установленных для различных типов сообщений. В тексте первой редакции части 5 стандарта МЭК 61850 встречались такие понятия как «*transmission time*», «*total transmission time*» и «*delay times*» и они характеризовали один и тот же физический процесс. Также данные понятия включали в себе еще один показатель работы информационной сети, такой как время восстановления сети. Во второй редакции части 5 стандарта МЭК 61850 произошло разграничение этих двух физических процессов и ввели отдельные требования к времени передачи данных (*transmission time*) и к времени восстановления сети (задержка при восстановлении связи – *recovery delay*) – максимальное время, в течение которого может отсутствовать связь, чтобы выполняемую функцию можно было считать работоспособной. Если задержка превышает установленные границы, то функция ИЭУ считается отказавшей.

Функция Сообщение/Тип (класс)		Время передачи	Трафик (ПП)	Приоритет	Приложение
Тип 1А.Срабатывание (ТТ6)	GOOSE	≤ 3 мс	Низкий	Высокий	Релейная защита
Тип 1В. Другие данного класса (Т4)	GOOSE	≤ 20 мс	Низкий	Средний/ Высокий	Релейная защита
Тип 2. Автоматика (ТТ3)	GOOSE	≤ 100 мс	Низкий	Средний/ Высокий	Релейная защита
Тип 4. Выборки мгновенных значений (ТТ6) для релейной защиты	SV	≤ 3 мс	Высокий	Высокий	Шина процесса
Тип 4. Выборки мгновенных значений (ТТ5) для других целей	SV	≤ 10 мс	Высокий	Высокий	Шина процесса
Тип 6. Передача файлов (ТТ0)	FTP	≤ 10000 мс	Dscjrbq	Низкий	АСУ, контроллер присоединения
Тип 7. Команды (ТТ2)	MMS	≤ 500 мс	Низкий	Средний/ Низкий	АСУ, контроллер присоединения
Синхронизация	Time Sync	0.001..10 мс	Низкий	Средний/ Высокий	PMU, SVs

Табл. 1: Требования к времени передачи данных согласно МЭК 61850–5 ред. 2

В тоже время, в случае возникновения длительного времени восстановления сети после отказа (выхода из строя), при малой вероятности данного отказа информационной сети ЦПС (редкий случай), допустимо превышение указанных значений в таблице 2 при обеспечении системой заданного класса надежности.

Участники взаимодействия	Задержка на уровне приложения ИЭУ, мс	Задержка при восстановлении сети связи, мс
SCADA системой и ИЭУ РЗА, клиент – сервер	800	400
Между ИЭУ РЗА при передаче сообщений блокировок, в том числе для целей резервирования данных сообщений	12	4
Между ИЭУ РЗА при передаче сообщений Срабатывания защиты, исключая ДЗШ	8	4
Между ИЭУ ДЗШ	≤1	Недопустима
Передача выборок мгновенных значений	Недопустима	Недопустима

Табл. 2: Требования к времени восстановления согласно МЭК 61850–5 ред. 2

2.3 Параметры моделирования работы информационной сети ЦПС и ИЭУ РЗА

Первым этапом работы являлось создание модели «шины процесса» в программном комплексе OPNET Modeler [3] с детальным описанием моделей отдельных ИЭУ и системы связи.

Разработаны следующие модели с параметрами, представленными в таблице 3:

1. Модель пакета данных sampled values (SV) (Рис.1) и GOOSE сообщений.
2. Модель ИЭУ аналогового мультиплексора – IED MU (Рис.2).
3. Модель ИЭУ релейной защиты – IED P&C.
4. Модель «шины процесса» – Process Bus (Рис.3).

Под «шиной процесса» понимается локальная вычислительная сеть, соединяющая первичное оборудование с ИЭУ, выполняющими различные функции. Например, выполнение функций релейной защиты, различного рода автоматики, технического (измерительные преобразователи) и коммерческого (счетчики) учета. При этом цифровой интерфейс может быть реализован либо в самом первичном оборудовании, либо при помощи различных комбинаций объединяющих устройств:

1. Специализированных аналоговых мультиплексоров.
2. Полевых контроллеров ввода/вывода.

Информация, передаваемая по этой сети – это выборки токов и напряжений (SV) и GOOSE сообщения (дискретные сигналы) в цифровом виде [1].

Модель «шины процесса» присоединений в OPNET Modeler состоит из двух моделей ИЭУ аналогового мультиплексора, трех моделей ИЭУ релейной защиты, модели управляемого коммутатора Ethernet и моделей линий связи Ethernet 100 Мбит/с.

Модель	Тип отправляемого пакета данных	Тип генератора пакета данных	Постоянный размер пакета данных, байт	Постоянный интервал времени между двумя отправляемыми пакетами данных
ИЭУ аналогового мультиплексора – IED MU	SV	простой источник	1192	250 мкс для 80 выборок за период промышленной частоты
ИЭУ релейной защиты – IED P&C	Стационарный режим			
	GOOSE	простой источник	1152	1 с

	Аварийный режим			
	GOOSE	простой источник	1152	Описывается нормальным законом распределения с параметрами: математическое ожидание – 1 мс, дисперсией – 250 мкс

Табл. 3: Параметры моделирования ИЭУ

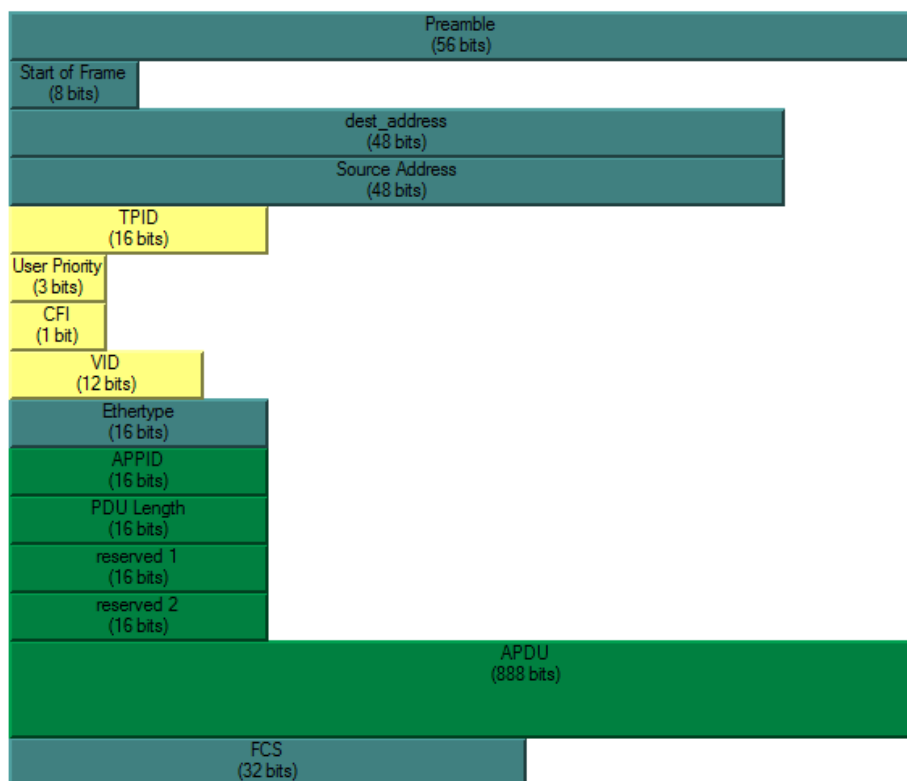


Рис. 1: Модель фрейма Ethernet в OPNET Modeler для сообщения типа SV

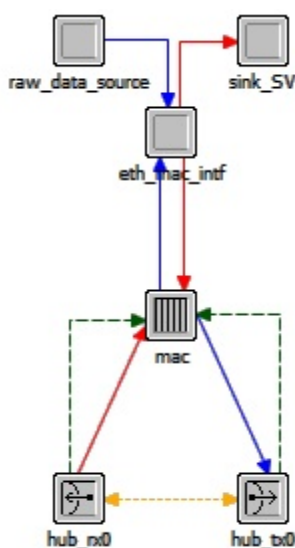


Рис. 2: Модель ИЭУ аналогового мультиплексора

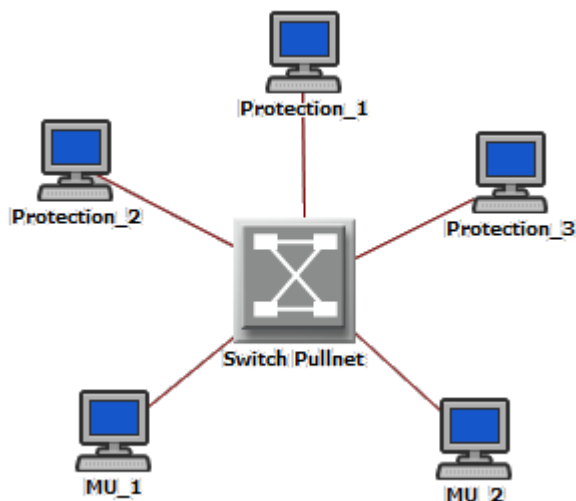


Рис. 3: Модель «шины процесса» в OPNET Modeler

На коммутаторе включена поддержка виртуальных локальных сетей (VLAN) и механизм управления качеством обслуживания (QoS) с поддержкой управления очередями и приоритизацией трафика.

На втором этапе осуществлялся выбор и настройка инструментов управления сетью с целью достижения заданных стандартом МЭК 61850 показателей времени передачи данных, достоверности передачи данных (качества) и времени восстановления сети в случае выхода из строя телекоммуникационного оборудования [1].

Результаты моделирования:

1. Загрузка канала связи от одного потока SV для 80 выборок за период промышленной частоты (4 значения тока и 4 значения напряжения) с размером пакета 1192 бита (149 байт) составляет 5,6 Мбит/с.

2. Загрузка канала связи от одного потока GOOSE с размером пакета 1152 бита и периодом между двумя посылками 1 с, составляет 1,35 кбит/с.

3. Загрузка канала связи от одного потока GOOSE с размером пакета 1152 бита и периодом отправки, описываемым нормальным законом распределения с параметрами: математическое ожидание – 1 мс, дисперсией – 250 мкс, составляет 270 кбит/с. Закон формирования исходящих сообщений был получен после обработки экспериментальных данных, полученных на RTDS и с МП терминала P3A Schweitzer Engineering Laboratory SEL-451.

4. Величина задержки End-to-End в канале связи удовлетворяет требованиям стандарта МЭК 61850. В качестве основной топологии «шины процесса» выбрано «Звезда. При этом следует отметить, что при передаче данных в первый момент времени величина задержки максимальна в связи с процессом «схождения» сети.

5. Загрузка управляемого коммутатора входящим и исходящим трафиком (потoki SV и GOOSE) составляет 12 Мбит/с.

На третьем этапе произведена верификация разработанных моделей в научно-образовательном центре «Надежность и эффективность РЗА, ПА и телекоммуникации в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивными сетями». Верификация осуществляется путем сравнительного анализа результатов моделирования со значениями, полученными экспериментальным путем с помощью программно-аппаратного комплекса RTDS (Real Time Power System Simulation) и волокну-оптического преобразователя токов и напряжения (ВОПТ) компании «ПРОФОТЕК». Результат анализа показал, что:

1. Структура разработанной модели пакета данных SV и GOOSE сообщений в OPNET Modeler, RTDS и «ПРОФОТЕК» соответствуют стандарту МЭК 61850. Данные, полученные экспериментальным путем на RTDS и ВОПТ компании «ПРОФОТЕК» и по результатам моделирования в OPNET Modeler имеют одинаковый порядок и совпадают с теоретическим значением 4 Мбит/с. Основные отличия заключаются в том, что при моделировании в

программном комплексе OPNET Modeler передается полный кадр Ethernet, а анализатором трафика Wireshark захватываются кадры с RTDS и ВОПТ «ПРОФОТЕК» без полей преамбулы, стартового бита, тега IEEE 802.1Q и контрольной суммы (FCS).

2. Загрузка канала связи выборками мгновенных значений SV составляет 4 Мбит/с, что соответствует теоретическому значению, полученному аналитическим путем: 122 байт (размер меньше за счет отбрасывания: преамбулы, бита начала кадра, тега IEEE 802.1Q и контрольной суммы)×8 бит×4000 Гц = 3904000 бит/с для 80 выбор за период промышленной частоты.

Заключительным этапом являлся анализ существующего на рынке телекоммуникационного оборудования и выработка рекомендаций для технической реализации построения информационной сети «шины процесса» ЦПС.

2.4. Рекомендаций по управлению информационной нагрузкой

Представляется целесообразным при проектировании и планировании информационных сетей ЦПС придерживаться следующей последовательности выполнения:

1. Разрабатывается физическая конфигурация сети.

В качестве основной топологии сети Ethernet для «шины процесса» предлагается топология типа «Звезда».

В качестве основной топологии сети Ethernet для «шины станции» предлагается топология типа «Кольцо» и различные ее вариации («Кольцо в Кольце», смешенная топология). Основное достоинство данной топологии – это резервирование связей. В случае обрыва одной из связи, данная сеть переконфигурируется в топологию «Шина».

2. Все узлы сети распределяются по рабочим группам.

3. Рабочие группы распределяются по виртуальным локальным сетям (VLAN).

Технология виртуальных локальных сетей VLAN позволяет в информационной сети создать изолированные группы конечных узлов, между которыми отсутствует любой трафик, в том числе широковещательный, от других ИЭУ, не входящих в данную рабочую группу. В случае использования данной технологии, описанной в спецификации IEEE 802.1Q, каждый передаваемый кадр Ethernet (фрейм) от ИЭУ помечается специальной меткой – тегом, идентифицирующим номер сети (VLAN ID), которой принадлежит отправитель сообщения.

4. Исходя из оценок прогнозируемого трафика и его характера, числа узлов и VLAN выбирается структура сети и типы сетевого оборудования.

5. Каждому типу трафика присваивается приоритет в соответствии с рекомендациями МЭК 61850. В соответствии со спецификацией IEEE 802.1P каждому типу трафика может быть задан приоритет от 0 до 7. Стандартом «по умолчанию» рекомендуется использование значение 4 для SV и GOOSE сообщений.

6. На управляемых коммутаторах настраивается механизм управления качеством обслуживания QoS, выбирается соответствующий тип управления и приоритет каждой очереди.

Для приоритизации трафика на управляемых коммутаторах настраивается механизм управления качеством обслуживания QoS: классификация и профилирование трафика, приоритетные и взвешенные очереди, резервирование пропускной способности.

7. При наличии свободных портов настраивается механизм агрегирования физических каналов связи в один логический и также создаются магистральные VLAN соединения – транки, что увеличивает пропускную способность и надежность сети.

Так же при наличии свободных портов на коммутаторе используется технология агрегирования нескольких физических портов в один логический. Данная технология позволяет увеличить пропускную способность и надежность сети, путем создания нескольких альтернативных маршрутов в локальной сети на коммутаторах.

8. Необходимо учитывать возможности масштабирования сети, если ожидается ее расширение в процессе эксплуатации.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в отечественной практике были разработаны модели пакетов данных SV и GOOSE сообщений в программном комплексе имитационного моделирования OPNET Modeler. Выбранная структура пакетов подтверждена анализом Ethernet фреймов, полученных с RTDS, ВОПТ «ПРОФОТЕК» и МП РЗА Schweitzer Engineering Laboratory SEL-451, AREVA MiCOM P141, Siemens 7SJ80 и General Electric D60.

2. Впервые в отечественной практике были разработаны модели коммуникационных интерфейсов ИЭУ аналогового мультиплексора, релейной защиты в программном комплексе имитационного моделирования OPNET Modeler. Это позволило создать модель «шины процесса» для моделирования информационного обмена и сети ЦПС.

3. Проведенный анализ моделирования информационной сети «шины процесса» ЦПС показал совпадение загрузки канала связи от одного потока SV и GOOSE сообщений, полученной расчетным и экспериментальным путем. Загрузка шины процесса от одного потока SV и GOOSE сообщений не превышает 10 Мбит/с. Возникающие задержки при передаче данных не превышают 3 мс для GOOSE сообщений и сообщений SV, что удовлетворяет требованиям стандарта МЭК 61850.

4. Для эффективного функционирования системы автоматизации подстанции предлагается использовать методы управления информационной нагрузкой: применение виртуальных локальных сетей VLAN и управление качеством обслуживания QoS (приоритизация трафика и использование технологии управления очередями). Использование данных методов позволило эффективно использовать возможности телекоммуникационного оборудования ЦПС.

5. На основе анализа существующего на рынке телекоммуникационного оборудования для «шины процесса» ЦПС предлагается устанавливать управляемые промышленные коммутаторы компании Pullnet серии AGENT-2, удовлетворяющие требованиям стандарта МЭК 61850 [1].

В дальнейшем результаты данной работы будут применяться при анализе эффективности функционирования информационной сети энергообъектов, на которых предполагается создание системы автоматического управления на основе стандарта МЭК 61850.

Данная работа была выполнена при тесном взаимодействии сотрудников кафедры РЗиАЭС «НИУ «МЭИ», ООО «ТЕКВЕЛ» и специалистов ОАО «СО ЕЭС».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 61850: Communication networks and systems in substations: [сборник]. – Женева, Швейцария: IEC Central Office, 2004. – 29 см. – (Межгосударственные стандарты). – Содерж.: 10 док. – 33200 экз.
- [2] IEC 61850-90-4 TR: Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-4: Network engineering guidelines for substations: [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) – IEC Central Office, 2011. – 181 с.
- [3] Электронный учебник OPNET Modeler Tutorial [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. дан. и прикладная прогн. (4 Гб) – OPNET Technologies, 2004 – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).