

На правах рукописи

Лобастова Мария Викторовна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ СЕТЕЙ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Матюхин Александр Юрьевич

Официальные
оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**,
доктор технических наук, с.н.с.,
ОАО «ЦНПО «Ленинец», главный специалист,
заместитель главного конструктора

Опарин Евгений Валерьевич,
кандидат технических наук, ,
Институт по проектированию сигнализации,
централизации, связи и радио на железнодорожном
транспорте «Гипротранссигналсвязь» –
филиал АО «Росжелдорпроект»,
отдел связи, инженер I категории

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 08 декабря 2021 года в 16.00 на заседании
диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-
Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу
Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 08 октября 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время отрасль телекоммуникаций бурно развивается. Информационные технологии поражают своим внедрением во многие сферы человеческой жизни.

Уже несколько десятилетий упор делается на развитие цифровых систем передачи. Однако, стоит отметить, что стабильная и безотказная работа современных сетей тесно связана с вопросом организации тактовой синхронизации. За счет согласования частот задающих генераторов она позволяет избежать или сократить до минимума потерю информации. Организация цифровой сети с заявленным высоким качеством связи невозможна без правильной организации сети тактовой сетевой синхронизации, которая представляет собой комплекс технических средств, обеспечивающих формирование и передачу сигналов синхронизации по линиям связи.

Проблемы соединения различных сетей, взаимодействия систем коммутации и передачи внутри сетей также актуальны для современной телекоммуникационной сети связи. Тактовая сетевая синхронизация необходима для синхронной работы цифровых систем передачи и коммутации, а также для обеспечения требуемого качества предоставляемых сетевых услуг. Следовательно, разработчики должны искать новые подходы к поиску методов, позволяющих организовывать слаженную и надежную работу сети тактовой синхронизации.

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию методов маршрутизации и определения структуры для сетей тактовой синхронизации с учетом накопленного опыта и современных вызовов, связанных с растущим трафиком, а, следовательно, и скоростью передачи, что, несомненно, доказывает актуальность поставленных задач.

Современным операторам связи, стремящимся к увеличению средней прибыли необходимо не только постоянно внедрять вновь появляющиеся услуги, но и для того, чтобы оставаться конкурентно способными, делать большой акцент на качество предоставляемых услуг, а значит, на надежную работу сети.

Степень разработанности темы. Вопросы построения сетей тактовой сетевой синхронизации исследовались в работах отечественных (М.Н. Колтунова,

Г.В. Коновалова, Н.Н. Леготина, А.В. Рыжкова, П.Н. Давыдкина, А.К. Канаева, Е.В. Опарина,) и зарубежных (S. Bregni, M. Carbonelli) авторов.

В основном, Международный союз электросвязи (ITU, International Telecommunication Union), Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI, European Telecommunication Standards Institute) ведут постоянную работу в области стандартизации норм и требований к организации работы тактовой сетевой синхронизации.

Так, например, рекомендации ITU-TG.823 «Контроль джиттера и блуждания в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 кбит/с», G.825 «Контроль джиттера и блуждания в цифровой сети, основанной на синхронной цифровой иерархии (SDH)», G.811 «Временные характеристики первичных эталонных часов», G.812 «Требования к времени подчиненных часов, подходящих для использования в качестве часов узла в сетях синхронизации», G.813 «Временные характеристики SDH оборудования ведомых часов (SEC)», требования стандартов ETSI EN 300 462-3-1 «Передача и мультиплексирование (TM); общие требования для сетей синхронизации; часть 3-1: контроль дрожания и блуждания в пределах сети синхронизации», EN 300 462-4-1 «Передача и мультиплексирование (TM); общие требования для сетей синхронизации; часть 4-1: временные характеристики для синхронизации в SDH и PDH», EN 300 462-6-1 «Передача и мультиплексирование (TM); общие требования для сетей синхронизации; часть 6-1: временные характеристики первичных эталонных часов», и другие являются результатом работы этих организаций.

Требования, установленные ITU и ETSI к рабочим характеристикам сети синхронизации, нормируют количество переприемов сигнала синхронизации, отсутствие петель при передаче сигнала, охватывают вопросы джиттера и вандера в сетях, а также частоту проскальзываний.

В данной диссертационной работе ставятся и решаются задачи, связанные с поиском методов передачи сигналов синхронизации по маршруту с минимальным числом переприемов, обнаружением и устранением петель в сети тактовой сетевой синхронизации.

В ряде работ А.Ю. Матюхина, А.К. Канаева, П.Н. Давыдкина, Е.В. Опарина, Н.Н. Леготина решаются вопросы организации работы тактовой сетевой синхронизации.

Тем не менее, проблемы, связанные с организацией надежной работы сети тактовой синхронизации, остаются открытыми, что определяет актуальность данной работы.

Объект исследования – сеть тактовой синхронизации.

Предмет исследования – методы маршрутизации и определения структуры сетей тактовой синхронизации с учетом возможности их реализации в реальном масштабе времени.

Цель работы и задачи диссертации.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и исследовании методов маршрутизации, обнаружения и устранения петель в сети тактовой сетевой синхронизации, реализуемых в реальном масштабе времени.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе последовательно решаются следующие задачи:

- анализ методов построения сети синхронизации с учетом основных негативных факторов;
- анализ методов выбора структуры сети тактовой синхронизации;
- разработка метода поиска маршрута для передачи сигнала синхронизации с минимальным количеством переприемов;
- разработка методов обнаружения петель в сети тактовой синхронизации;
- разработка метода устранения петель в сети тактовой синхронизации;
- разработка метода оценки надежности элемента сети тактовой сетевой синхронизации;
- разработка метода оценки надежности работы сети тактовой сетевой синхронизации;
- разработка программного обеспечения для подтверждения работоспособности предложенных методов.

Научная новизна. Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

- разработан метод выбора маршрута передачи сигнала синхронизации в сети тактовой синхронизации, отличающийся от известных тем, что для обеспечения минимального числа переприемов используется модифицированный алгоритм Флойда-Уоршалла;

– разработан метод обнаружения петель в сети тактовой синхронизации, отличающийся от известных тем, для этой цели впервые применяется вычеркивание нулевых строк и столбцов в матрице смежности графа сети синхронизации;

– разработан метод устранения петель в сети тактовой синхронизации, отличающийся от известных тем, что для этой цели применяются компоненты связности графа сети синхронизации и анализ матрицы циклов графа сети синхронизации, при этом для удаления минимального числа связей в графе необходимо в первую очередь удалять те ребра, которым соответствуют столбцы матрицы циклов с наибольшей суммой элементов.

Теоретическая и практическая значимость работы. *Теоретическая значимость* работы состоит в расширении класса методов выбора маршрута передачи сигнала синхронизации путем применения модифицированного алгоритма Флойда-Уоршалла для минимизации числа переприемов в сетях тактовой синхронизации; показанной возможности использования матрицы смежности графа сети синхронизации для выявления всех узлов, участвующих в образовании петель, путем вычеркивания нулевых строк и столбцов в ней; в показанной возможности использования компонент связности графа для выявления всех узлов, участвующих в образовании петель, с определением конфигурации этих петель, а также возможности устранения петель с удалением минимального числа связей в графе на основе анализа матрицы циклов.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании методов маршрутизации и определения структуры для сетей тактовой синхронизации, позволяющих обеспечить минимальное количество переприемов при передаче сигнала хронирования, а кроме того, обнаруживать и устранять замкнутые петли в сети синхронизации с удалением минимального количества связей. Предложенные методы ориентированы на реализацию в реальном масштабе времени и могут быть использованы как на этапе проектирования, так и в качестве основы при разработке соответствующих модулей программного обеспечения для реализации управления сетью синхронизации.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ПАО "ГИПРОСВЯЗЬ" при разработке методики обнаружения петель в сети тактовой синхронизации, а также в Санкт-Петербургском государственном университете

телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Проблемы построения оптических систем передачи и сетей синхронизации», «Инфокоммуникационные системы специального назначения», «Цифровые системы передачи».

Методология и методы исследования. При проведении исследований применялись методы теории графов и матриц, алгоритм Флойда-Уоршалла, метод прямого перебора. Для численного анализа, проведения оценки и промежуточных вычислений использовался программный математический пакет Mathcad 15.0.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод выбора маршрута передачи сигнала синхронизации в сети тактовой синхронизации на основе модифицированного алгоритма Флойда-Уоршалла.

2. Метод обнаружения петель в сети тактовой синхронизации путем вычеркивания нулевых строк и столбцов в матрице смежности графа сети синхронизации.

3. Метод устранения петель в сети тактовой синхронизации на основе определения компонент связности графа и анализа матрицы циклов графа сети синхронизации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математических методов исследования и результатами моделирования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2012–2014, 2018–2021); 73-й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна – 2019» (Санкт-Петербург, 2019); 5-й Международной научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и его приложения. Искусственный интеллект в сетях связи 5G/ИМТ-2020» (Санкт-Петербург, 2019); 75-й и 76-й конференции российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (Санкт-Петербург, 2020, 2021); а также на заседаниях кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них: 4 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 1 – в изданиях, входящих в международные базы данных, 13 – в других научных журналах и материалах конференций.

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 3 и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы 170 страниц, из них основного текста 109 страниц. Работа содержит 58 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 93 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, рассмотрены теоретическая и практическая ценность исследования, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проводится обзор рекомендаций Международного союза электросвязи и Европейского института по стандартизации в области телекоммуникаций, касающихся вопросов организации тактовой сетевой синхронизации; рассматриваются требования, предъявляемые к построению сети синхронизации, нормы основных показателей работы, режимы работы сети. Кроме того, производится анализ методов построения сети синхронизации с учетом основных негативных факторов.

В качестве основных требований, предъявляемых к сетям синхронизации, являются иерархическое построение сети с использованием задающего (первичного) генератора, генераторов узлов (вторичных) и генераторов сетевых

элементов (третичных); ограниченное число переприемов сигнала синхронизации; резервирование источников синхросигнала; отсутствие петель при передаче сигнала хронирования.

Новые требования постоянно добавляются. Так в перспективных системах технология мультиплексирования достаточно сложная и имеет высокие требования к синхронизации и параметрам качества среды передачи. Сеть ТСС представляет собой разветвленную однородную сеть формирования, доставки и распределения синхросигналов, наложенную на транспортную сеть, и включает в себя первичные таймеры и надежную систему распределения сигнала синхронизации на все узлы сети.

Во второй главе описывается метод поиска маршрута для передачи сигнала синхронизации с минимальным числом переприемов.

При построении сети синхронизации важно, чтобы число переприемов сигнала синхронизации от задающего генератора до любого сетевого узла было минимальным. Обращаясь к теории графов, это эквивалентно поиску кратчайших путей от одной из вершин к любой другой вершине. Для решения сформулированной выше задачи может быть использован алгоритм Флойда-Уоршалла, позволяющий находить самый короткий маршрут в ориентированном графе.

Особенность задачи заключается в том, что нас интересует минимальное количество узлов, участвующих в цепочке. Обеспечить эквивалентность этих двух задач, а, соответственно, обеспечить применимость алгоритма Флойда-Уоршалла можно путем фиксации расстояний между узлами.

Сеть тактовой сетевой синхронизации можно представить в виде ориентированного графа размерностью n , в котором стрелками указаны возможные связи между узлами сети, включая резервные пути. Так как граф ориентированный, то его матрица смежности несимметрична относительно главной диагонали.

Пусть граф сети синхронизации $G = (V, E)$ состоит из конечного множества вершин V и ребер E . Вершины графа пронумерованы от 1 до n . Важно, чтобы граф не содержал ориентированных циклов. Граф можно описать матрицей длин ребер графа $W = [w_{i,j}]$ размерностью $n \times n$. Элементы матрицы $w_{i,j}$ – длины ребер графа сети синхронизации G . Вес каждого ребра принимается равным

единице. В случае если в графе нет ребра, ориентированного из i в j , соответствующий элемент $w_{i,j}$ будем считать равным $\frac{n(n-1)}{2}$. Также примем, что $w_{i,i} = 0$ для всех i .

В общем виде алгоритм сводится к поиску таких матриц $\mathbf{W}^{(0)}, \mathbf{W}^{(1)}, \mathbf{W}^{(2)}, \dots, \mathbf{W}^{(n)}$ размерностью $n \times n$, что элементы $w_{i,j}^{(n)}$ матрицы $\mathbf{W}^{(n)}$ представляют собой количество переприемов между i и j в графе G . Матрица $\mathbf{W}^{(k)}$ находится по матрице $\mathbf{W}^{(k-1)} = [w_{i,j}^{(k-1)}]$ в соответствии с правилом

$$w_{i,j}^{(k)} = \min\{w_{i,j}^{(k-1)}, w_{i,k}^{(k-1)} + w_{k,j}^{(k-1)}\}.$$

В том случае, если $w_{i,k}^{(k-1)}$ или $w_{k,j}^{(k-1)}$ равны $\frac{n(n-1)}{2}$, то $w_{i,j}^{(k)} = w_{i,j}^{(k-1)}$.

В результате формируется матрица $\mathbf{W}^{(n)}$, элементы которой равны числу переприемов между узлами сети, если такие пути существуют.

Для реализации алгоритма все вершины графа нумеруются, а затем в соответствии с алгоритмом Флойда-Уоршалла производится расчет кратчайших маршрутов. В результате выполнения алгоритма для графа G , описывающего сеть синхронизации, получается матрица, в которой будут указаны маршруты с минимальным числом переприемов сигнала синхронизации.

В третьей главе описаны методы обнаружения и устранения петель в сети тактовой синхронизации. Наличие замкнутых петель в цепи передачи синхросигналов приводит к деградации всего участка системы синхронизации и нарушению связи из-за большого количества проскальзываний во всех информационных потоках.

Для обнаружения петель в сети тактовой синхронизации предложен метод, основанный на вычеркивании нулевых строк и столбцов в матрице смежности графа сети синхронизации.

Наличие связей между узлами графа в матрице смежности обозначено единицами, отсутствие – нулями. Элементы сети, которым соответствуют нулевые строки или столбцы матрицы, не могут участвовать в петлях. В случае, если в матрице смежности имеется нулевая строка, можно сделать вывод, что соответствующий узел не является источником синхросигнала ни для одного из других сетевых элементов. В том случае, когда в матрице смежности есть нулевой

столбец, можно говорить о том, что соответствующий ему узел не получает сигнал ни от одного из других элементов сети. А значит, такой сетевой элемент можно не рассматривать при поиске петель в сети синхронизации, а соответствующие ему строку и столбец можно удалить из матрицы смежности.

Исключение элемента из сети приведет к тому, что размерность матрицы уменьшится. А также уменьшится число связей в сети. В результате некоторые строки или столбцы новой полученной матрицы смежности могут оказаться нулевыми. Значит, из сети можно будет исключить новые элементы, не участвующие в петлях. Если в результате вычеркивания нулевых строк и столбцов в матрице приходим к нулевой матрице, то можно сделать вывод, что сеть не содержит замкнутых петель. В случае, когда матрица смежности не содержит нулевых строк или столбцов, в сети присутствуют замкнутые петли, причем номера строк или столбцов позволяют определить узлы, входящие в петли.

Пошагово метод определения наличия петель в сети с помощью вычеркивания нулевых строк и столбцов матрицы смежности графа сети можно описать следующим образом.

1. Для имеющейся сети синхронизации построить направленный граф, где стрелками указать возможные связи в сети.

2. По графу составить матрицу смежности.

3. Проверить наличие нулевой строки или нулевого столбца в матрице смежности. Если таковые отсутствуют, сделать вывод, что в сети имеются петли. Если нулевые строка или столбец присутствуют, продолжить алгоритм.

4. Исключить из графа и матрицы смежности узел, которому соответствует нулевой столбец или строка.

5. Вернуться на шаг 3, рассматривая оставшуюся матрицу смежности, если еще не были исключены все узлы. Иначе сделать вывод, что в сети петель нет.

Вычислительная сложность при вычеркивании нулевых строк и столбцов равна $n^4(1-k)^4$, где $0 \leq k \leq 1$, $m = k \cdot n$ – количество нулевых строк и столбцов в матрице смежности графа сети синхронизации.

Так, на рисунке 1 приведен график оценки вычислительной сложности метода обнаружения петель в сети тактовой синхронизации для 50 и 60 узлов. По графику видно, что при значительном числе нулевых строк или столбцов в

матрице смежности графа сети вычислительная сложность уменьшается примерно в 2 раза.

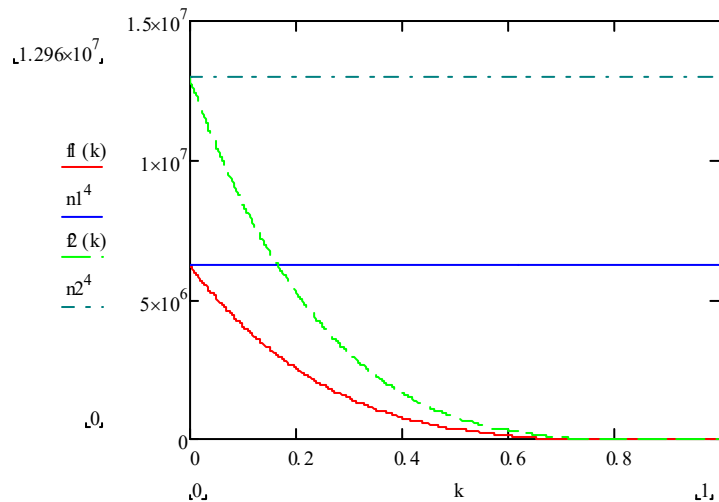


Рисунок 1 – Оценка вычислительной сложности метода обнаружения петель в сети тактовой синхронизации

Предложенный метод позволяет обнаружить наличие петель и определить узлы, входящие в петли, но не позволяет судить о конфигурации петель, а также их устранять.

Для решения данной задачи разработан метод устранения петель в сети тактовой синхронизации на основе определения компонент связности графа и анализа матрицы циклов.

Для его реализации необходимо использовать матрицу смежности \mathbf{A} графа, полученную после вычеркивания нулевых строк и столбцов.

По данной матрице смежности графа D , соответствующего матрице смежности \mathbf{A} , находится матрица достижимости $\mathbf{T}(D)$, которая показывает, существует ли путь из вершины i в вершину j . Матрица достижимости $\mathbf{T}(D)$ – это квадратная матрица $\mathbf{T}(D) = \mathbf{T}[t_{i,j}]$ порядка n . Элемент $t_{i,j} = 1$, если вершина v_j достижима из вершины v_i ; в противном случае $t_{i,j} = 0$. Элементы главной диагонали матрицы достижимости будут равны единице.

Матрицу достижимости $\mathbf{T}(D)$ можно определить в соответствии с выражением:

$$\mathbf{T}(D) = \|\mathbf{E}\| \wedge \mathbf{A}(D) \wedge \mathbf{A}(D)^2 \wedge \mathbf{A}(D)^3 \wedge \dots \wedge \mathbf{A}(D)^{n-1},$$

где $\|\mathbf{E}\|$ – единичная матрица размерности n .

В свою очередь, матрица сильной связности графа D – это квадратная матрица $\mathbf{S}(D) = [s_{i,j}]$. Элемент $s_{i,j} = 1$, если вершина v_i достижима из вершины v_j

вершина v_j достижима из вершины v_i . В противном случае элемент $s_{i,j} = 0$.

Матрица $\mathbf{S}(D)$ вычисляется по формуле:

$$\mathbf{S}(D) = \mathbf{T}(D) \wedge \mathbf{T}(D)^T = ((t_{ij}) \wedge (t_{ji})),$$

где $\mathbf{T}(D)^T$ – транспонированная матрица достижимости $\mathbf{T}(D)$.

Компонента связности представляет собой максимальный связный подграф рассматриваемого графа. Выделение компонент связности с помощью матрицы сильной связности производится путем последовательной фиксации одной из вершин $v_{i,j}$ и удалением из матрицы $\mathbf{S}(D)$ строк и столбцов, соответствующих ненулевым элементам фиксированной строки или столбца.

Каждая из компонент связности $k(D) > 1$, показывает, какие из узлов входят в петлю. Удаления одного ребра достаточно для разрыва одного простого цикла. Однако, компонента связности может указывать на сложный путь, содержащий несколько простых циклов. В таком случае оптимальным будет удаление ребра, входящего в несколько петель.

Для обнаружения такого ребра необходимо обратиться к матрицам смежности и инцидентности графа конкретной компоненты связности.

Для этого для каждой из полученных компонент сильной связности составляется матрица смежности. Возведение матрицы смежности в степень от 2 до l , где l – порядок матрицы смежности, позволяет определить наличие петель определенной длины и узлы, входящие в эти петли. О наличии петель можно судить по ненулевым элементам главной диагонали, причем степень, в которую возводится матрица смежности, указывает на количество узлов, входящих в петлю.

Очевидно, что максимальный размер петли равен величине компоненты связности. В том случае, если элементы главной диагонали матрицы смежности компоненты связности, возведенной в степень от 2 до $k(D)$, окажутся ненулевыми, значит, в графе компоненты связности есть и другие петли.

Для обнаружения узлов, входящих в несколько фундаментальных циклов одной компоненты связности, необходимо логически перемножить соответствующие элементы главных диагоналей степенных матриц смежности, указывающих на наличие петель определенного размера. На наличие таких узлов укажут полученные ненулевые элементы.

Альтернативным вариантом поиска ребер, участвующих в нескольких

фундаментальных циклах является построение матрицы циклов. Данная матрица строится для каждой из выделенных компонент сильной связности по ее матрице смежности.

Данный способ устранения петель в сети синхронизации выявляет все узлы, участвующие в петлях, определяет конфигурацию петель, а также позволяет устранять петли, нарушая минимальное число связей в сети синхронизации.

Вычислительная сложность предложенного метода описывается степенной функцией.

В четвертой главе предложены модели для оценки надежности сети синхронизации, включающие оценку надежности работы одного сетевого элемента и оценку надежности работы сети в целом.

Сегодня проблема надежности телекоммуникационной сети является крайне актуальной. Так предполагается, что сети 5G будут работать с очень высоким коэффициентом готовности, в перспективе возможен рост требований к надежности сети. Однако, надежность сети связи во многом зависит от работы тактовой сетевой синхронизации, как одной из важнейших ее компонент. Возникновение отказов в сети тактовой сетевой синхронизации может привести к существенному ухудшению качества предоставления услуг связи вплоть до отказа сети.

При условии отсутствия петель в сети синхронизации, ее можно описать ациклическим ориентированным графом.

О надежности сети можно судить по тому, существуют ли маршруты передачи сигнала синхронизации от задающего генератора до каждого из генераторов сетевых элементов. Для того чтобы маршрут существовал, необходимо, чтобы были надежны все генераторы, входящие в цепочку, а также все линии связи между ними.

При сложной структуре сети тактовой синхронизации важно, чтобы каждый из ее элементов работал надежно. Основными элементами сети тактовой сетевой синхронизации являются генераторы. Поэтому необходимо знать, в каких состояниях может находиться генератор узла, а также знать вероятности перехода из одного состояния в другое.

Математическим аппаратом, позволяющим оценить возможные переходы из одного состояния в другое, зная вероятности наступления того или иного события,

является полумарковский процесс.

Важно, что полумарковский процесс – это процесс, который переходит из одного состояния в другое в соответствии с заданными распределениями вероятностей, а время пребывания процесса в каком-либо состоянии является случайной величиной, распределение которой зависит как от этого состояния, так и от состояния, в которое будет осуществлен следующий переход процесса. В предложенной модели полумарковские процессы используются для описания состояния одного из узлов сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты.

1. По результатам анализа концепций развития сетей 5G и сетей 2030 установлено, что к сетям тактовой синхронизации будут предъявляться более жесткие требования, что требует разработки новых методов их организации.

2. Для выполнения требований, предъявляемых согласно Рекомендации G.803 необходимо передавать сигнал тактовой синхронизации по кратчайшему маршруту от задающего генератора до каждого из генераторов сетевых элементов. Для достижения этих целей предложен метод выбора маршрута передачи сигнала синхронизации, отличающийся от известных тем, что для обеспечения минимального числа переприемов используется модифицированный алгоритм Флойда-Уоршалла.

3. Кроме разработки методов маршрутизации встает вопрос определения структуры сети тактовой синхронизации. Сеть тактовой синхронизации должна строиться по иерархическому принципу и не иметь петель при передаче сигнала хронирования. В диссертационной работе решены вопросы поиска и устранения петель в сети синхронизации. Для этого предложены метод обнаружения петель, основанный на вычеркивании нулевых строк и столбцов матрицы смежности графа сети синхронизации, и метод устранения петель, основанный на определении компонент связности графа и анализе матрицы циклов графа сети синхронизации.

4. Показано, что метод поиска петель выявляет все узлы, участвующие в петлях, и имеет меньшую вычислительную сложность по сравнению с известными методами, что позволяет реализовывать поиск петель в реальном масштабе времени при функционировании сети.

5. Показано, что метод устранения петель, основанный на определении компонент связности графа и анализе матрицы циклов графа сети синхронизации, позволяет определить конфигурацию петель, а также устранить петли в сети с удалением минимального числа связей в графе. Кроме того, данный метод может быть реализован в реальном масштабе времени.

6. Для оценки надежности сети синхронизации рассматривается структурная надежность сети. Направление передачи сигнала синхронизации является надежным, если надежны генераторы и линии связи, входящие в маршрут при условии, что все линии идентичны по надежности. Для оценки надежности сетевых элементов используется модель на основе полумарковских процессов, которая позволяет сделать вывод о работоспособности генераторного оборудования, входящего в маршрут передачи сигнала синхронизации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий

1. Лобастова, М.В. Метод устранения петель в сети тактовой синхронизации / Лобастова М.В., Матюхин А.Ю., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 8. С.30-33.

2. Лобастова М.В. Оценка надёжности работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 3(39). С. 27-36.

3. Лобастова М.В. Использование алгоритма Флойда-Уоршалла для поиска маршрута передачи сигнала синхронизации с минимальным числом переприемов / Лобастова М. В., Матюхин А.Ю. // Электросвязь. 2020. № 4. С. 51-54.

4. Лобастова М.В. Метод обнаружения замкнутых петель в сети синхронизации / М. В. Лобастова // Электросвязь. 2019. № 1. С. 29-32.

**Научные статьи, опубликованные в изданиях,
включенных в международные базы цитирования**

5. Lobastova M. Method to detect and eliminate loops synchronization in 5G networks / Lobastova M., Matyukhin A. // 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2019.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях
и сборниках научных конференций**

6. Лобастова М.В. Основные аспекты оценки надежности сети тактовой сетевой синхронизации / М.В. Лобастова, Лыткина Е.А., Пономаренко К.М., Шарипова И.Д // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, в 4 т.: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2021. С. 582-587.

7. Лобастова М.В. Оценка надежности сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. № 1(76), 2021. С. 181-182.

8. Лобастова, М.В. Анализ надежности сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин, А. С. А. Мутханна // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8. – № 4. – С. 93-99.

9. Лобастова М. В. Оптимизация структуры сети синхронизации с целью устранения замкнутых петель / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2020. – № 1(75). – С. 140-142.

10. Лобастова М. В. Модель для оценки надежности функционирования сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020): IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2020. – С. 688-692.

11. Лобастова М.В. Теоретические аспекты построения сетей тактовой сетевой синхронизации / М.В. Лобастова, А.М. Апатенко, С.В. Иванов //

73-я региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна – 2019»: сб. науч. ст. в 2-х т. Т-2. СПб.; СПбГУТ, 2019. С. 50-53.

12. Лобастова М.В. Алгоритм устранения петель в сети тактовой сетевой синхронизации / М.В. Лобастова, А.Ю. Матюхин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019) : сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции : в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2019 года. – СПб.: СПбГУТ, 2019. – С. 665-670.

13. Лобастова М.В. Аналитическое описание метода обнаружения замкнутых петель в сетях тактовой сетевой синхронизации / М.В. Лобастова, А.Ю. Матюхин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018) VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 574-577.

14. Лобастова М.В. Алгоритм построения системы тактовой синхронизации сети SDH / М. В. Лобастова/ Материалы 69 НТК СПбНТОРЭС, СПб. 2014. С. 168-169.

15. Лобастова М.В. Эволюция сетей синхронизации / М.В. Лобастова // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. III международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. научных статей / Под ред. Доценко С.М. – СПб. : СПбГУТ, 2014.– С. 296-299.

16. Лобастова М. Анализ системы синхронизации сети SDH / М. Лобастова // Первая миля. – 2014. – № 3(42). – С. 66-71.

17. Лобастова М.В. Алгоритм обнаружения замкнутых петель в сетях SDH / М.В. Лобастова // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2013 года. – СПб.: СПбГУТ, 2013. – С. 738-741.

18. Лобастова М. В. Анализ работы системы тактовой синхронизации сети SDH / М.В. Лобастова // Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в

науке и образовании». № 64. 20-24 февраля 2012 года : материалы – СПб. :
Издательство СПбГУТ, 2012. – С. 312-313.

Подписано в печать 22.09.2021. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1