

УДК 621.39

Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа

А. К. Канаев¹, Е. В. Опарин², Е. В. Опарина¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Институт по проектированию сигнализации, централизации, связи и радио на железнодорожном транспорте «Гипротрансигналсвязь» — филиал АО «Росжелдорпроект», Российская Федерация, 191119, Санкт-Петербург, Боровая ул., 49К

Для цитирования: Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 505–514. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-505-514

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос обеспечения информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации при ее функционировании в составе телекоммуникационной системы. Для достижения поставленной цели в статье поэтапно рассмотрено решение следующих задач: проведен системный анализ процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации в условиях воздействия организованных злоумышленников, приведены основные угрозы информационной безопасности для системы тактовой сетевой синхронизации. В качестве комплексной характеристики процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации предложено использование ее дифференциальной энтропии, выявлена взаимосвязь значений дифференциальной энтропии от значений параметров информационной безопасности и управляемости системы ТСС, на основании которой предложены подходы по обеспечению информационной безопасности ТСС. **Методы:** Используемые в работе методы исследования основаны на фундаментальных положениях теории систем, теории вероятностей, теории сетей, энтропийного моделирования, системного и математического анализа, математического моделирования. **Результаты:** Сформирована энтропийная модель динамики процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации, предложена поэтапная структура действий по обеспечению информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации исходя из требований защищенности и управляемости. **Практическая значимость:** Возможность для операторов телекоммуникационных систем обоснованно формировать количественный и качественный характер средств защиты, а также оптимально настраивать параметры процесса функционирования системы ТСС и входящих в ее состав элементов.

Ключевые слова: Телекоммуникационная система, система тактовой сетевой синхронизации, дифференциальная энтропия, угроза, информационная безопасность.

Введение

Функционирование телекоммуникационной системы (ТКС) зависит от множества подсистем, среди которых одной из наиболее важных является система тактовой сетевой синхронизации (ТСС). Основным назначением системы ТСС является формирование, передача и распределение сигналов синхронизации до цифрового оборудования ТКС с целью его согласованного взаимодействия. Система ТСС обеспечивает установление и поддержание определенного значения тактовой частоты цифровых сигналов в цифровых сетях связи, которые служат для цифровой коммутации, транзита и синхронного объединения цифровых потоков информации, а также обеспечивает устойчивую работу всех задающих генераторов, установленных на сетях связи. Функционирование системы ТСС осуществляется по принципу принудительной иерархической синхронизации элементов сетей связи. В случае применения на сети оборудования, реализующего канальный уровень на основе технологии Ethernet, синхронизация оборудования обеспечивается с применением технологии Synchronous Ethernet [1–3].

В связи с появлением множества автоматизированных систем управления (АСУ), функционирующих в режиме реального времени, существует потребность в частотно-временном обеспечении данных систем. Таким образом, качество услуг связи неразрывно связано с показателями функционирования ТСС, синхросигналы и полезные информационные сигналы передаются, как правило, в одних и тех же цифровых потоках и по одним и тем же направляющим системам. Возникновение отказов в системе ТСС, а также отклонение значений параметров сигналов синхронизации от нормативных значений может привести к значительному ухудшению качества услуг связи вплоть до полного их прекращения [4, 5].

В силу указанных особенностей система ТСС является потенциальным местом проникновения

в ТКС со стороны организованных злоумышленников с целью оказать деструктивное и разрушающее воздействие.

Особая опасность воздействия на систему ТСС состоит в том, что влияние носит косвенный характер, при котором разрушение сети ТСС приводит к последующему разрушению ТКС. При возникновении подобных ситуаций могут возникать значительные затруднения по восстановлению процесса функционирования ТКС, так как зачастую невозможно достоверно определить причину возникновения отказов.

Обзор основных угроз информационной безопасности для системы тактовой сетевой синхронизации

Система ТСС является сложной гетерогенной структурой и представляет собой единый комплекс, который функционирует во взаимосвязи со сторонними подсистемами ТКС и который подвержен различным дестабилизирующим факторам. Отказ или нарушение функционирования отдельных элементов системы ТСС может привести к значительному ухудшению качества синхросигналов в сегменте, находящемся ниже по иерархии. Таким образом, злоумышленник потенциально может нейтрализовать отдельный элемент или узел системы ТСС, что способно привести к отказу узлов, находящихся ниже по уровню иерархии.

Территориально система ТСС располагается в рамках определенного региона синхронизации, поэтому злоумышленник способен искусственно расширить или сузить регион синхронизации, вывести из-под контроля систем управления отдельные узлы системы ТСС или добавить дополнительные, что приведет к изменению маршрутов доставки синхросигналов, а также подмене ведущих/ведомых источников синхронизации.

Взаимодействие между элементами системы ТСС осуществляется через стандартные интерфейсы, определяемые международными и наци-

ональными рекомендациями, определяющими интерфейсы передачи цифровых сигналов. Данные интерфейсы являются точками обмена информацией между различными подсистемами. Ошибки при определении связей функционирования способны привести к потере контроля над системой ТСС [6–8].

Основополагающими функциями системы ТСС является формирование сигналов синхронизации, распространение и распределение сигналов синхронизации с использованием различных направляющих систем и систем передачи; восстановление сигналов синхронизации; преобразование синхросигналов. Злоумышленник способен изменить набор функций, выполняемых системой ТСС, дополнить набор нестандартными функциями, которые не свойственны системе ТСС, устранить ряд функций, что приведет к разрушению структуры системы ТСС, а в последующем всей системы ТСС.

Эффективное осуществление функций системы ТСС возможно только при организации оптимальной системы управления. Управление системой ТСС, как правило, имеет многоуровневую иерархическую структуру, в соответствии с регионами синхронизации. Комплексное управление осуществляется единым центральным органом управления. Злоумышленник способен внедриться в систему управления ТСС, получив таким образом полноту и свободу действий по управлению сетью ТСС.

Дополнительно злоумышленник способен воздействовать на физическую среду распространения сигналов синхронизации, управлять направлением дестабилизирующих факторов [6–8].

Обобщенная модель предметной области функционирования системы ТСС в условиях воздействия организованных злоумышленников имеет следующий вид (рис. 1).

Указанная модель (см. рис. 1) имеет трехуровневую структуру, на нижнем уровне распо-

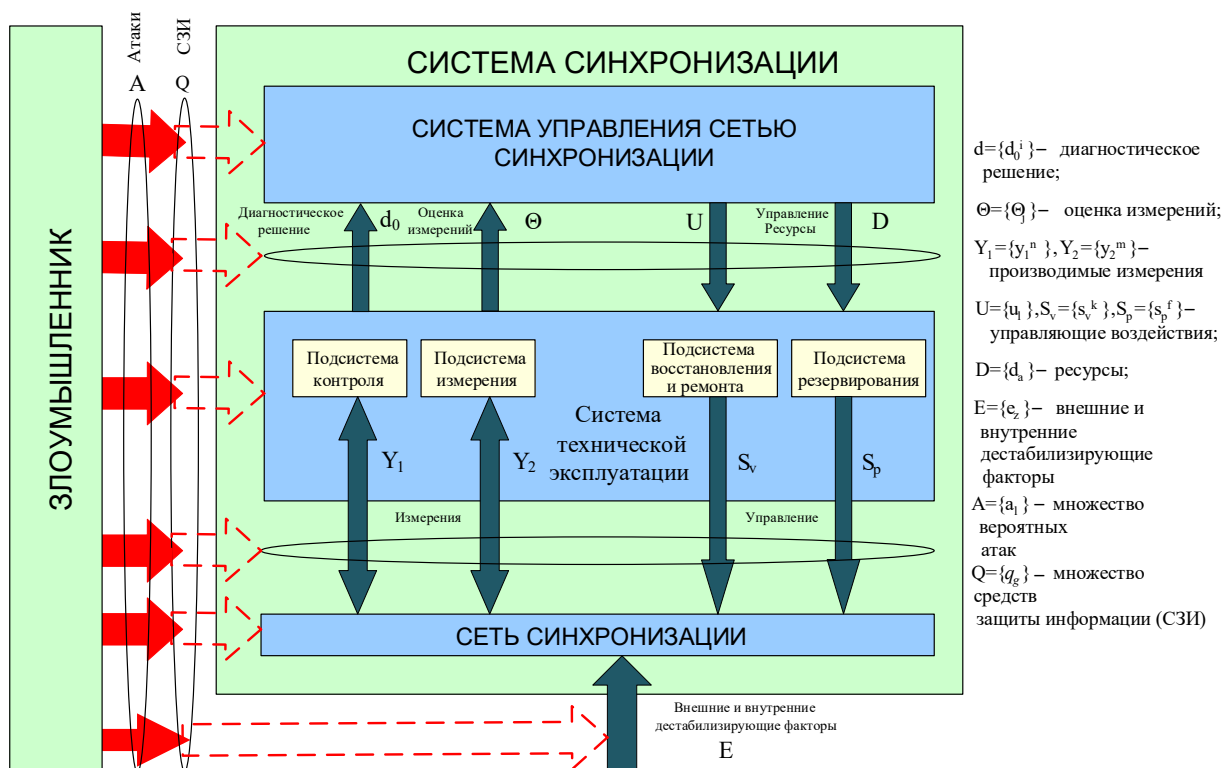


Рис. 1. Обобщенная модель предметной области функционирования системы ТСС в условиях воздействия организованных злоумышленников

лагается сеть ТСС, включающая все основное оборудование синхронизации. Второй уровень образует система технической эксплуатации сети ТСС, включающая подсистемы контроля, измерений, резервирования, восстановления и ремонта. Третий уровень образует система управления сетью ТСС. В совокупности указанные три уровня образуют систему ТСС. Злоумышленник способен осуществлять воздействия на каждый из уровней или его элементы.

Изменения в системе ТСС в результате воздействий злоумышленников могут носить стремительный характер, например, в случае, отказа направляющих систем или источников синхронизации верхних уровней, так и монотонный, в случае постепенного дрейфа частоты в генераторах сетевых элементов. Изменения могут носить как качественный, так и количественный характер, а также внезапный или детерминированный [6–8].

Оценка дифференциальной энтропии системы тактовой сетевой синхронизации

В соответствии с моделью, представленной на рис. 1, элемент структуры системы ТСС имеет определенные параметры функционирования. Это могут быть внутренние параметры узлов системы ТСС, выходные параметры генераторного оборудования, параметры функционирования элементов, характеристики сигналов синхронизации, такие как джиттер, вандер и дрейф частоты, а также различные диагностические параметры. Применительно к системам технической эксплуатации следует отметить параметры распределения ресурсов, параметры систем резервирования, контроля, измерения и ремонта, например количество находящихся ресурсов в данных системах, а также их качественный характер. Для систем управления следует выделить параметры функционирования узлов управления, например серверного оборудования, систем распределения управляющих воздействий.

Система ТСС является сложной динамической стохастической системой, каждый элемент которой характеризуется множеством параметров и взаимосвязей. Значения данных параметров могут быть взаимозависимы, так и не зависеть друг от друга. Таким образом, представление процесса функционирования ТСС с использованием традиционных подходов, например, на основе логико-вероятностных моделей или на основе графов существенно затруднено. В подобных случаях рациональным является применение энтропийных методов моделирования. Энтропия представляет собой универсальный параметр, который позволяет объединить в единое целое процессы различной природы, поэтому его применение является целесообразным для анализа сложных систем [9].

Для анализа процесса функционирования системы ТСС возможно применение дифференциальной энтропии. Дифференциальная энтропия определяется исходя из плотности распределения вероятности, она применима во всех системах, в которых определено понятие вероятности, в том числе и для системы ТСС [9].

Дифференциальная энтропия определяется в соответствии со следующим выражением (1) [9–12]:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln f(x) dx, \quad (1)$$

где $f(x)$ — плотность распределения сигнала непрерывного источника как случайной величины.

Для оценки дифференциальной энтропии системы ТСС будем использовать следующий подход. Будем оценивать изначально дифференциальную энтропию отдельного элемента системы ТСС, а далее исходя из полученных значений конкретных элементов оценим общую дифференциальную энтропию системы ТСС или ее фрагментов.

Представим отдельный элемент системы ТСС в виде вектора $Y(2)$:

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m), \quad (2)$$

где Y_1, Y_2, \dots, Y_m представляют собой множество параметров элемента системы ТСС.

Введем следующие допущения:

- вектор $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ имеет многомерное нормальное распределение;
- для вектора $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ возможно вычисление ковариационной матрицы Σ (3).

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{Y_1}^2 & \text{cov}(Y_1, Y_2) & \dots & \text{cov}(Y_1, Y_m) \\ \text{cov}(Y_2, Y_1) & \sigma_{Y_2}^2 & \dots & \text{cov}(Y_2, Y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(Y_m, Y_1) & \text{cov}(Y_m, Y_2) & \dots & \sigma_{Y_m}^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Первое допущение введено исходя из сообщений того, что в работе [9–12] отмечается следующий факт. Аналитическое нахождение энтропии $H(Y)$ в настоящее время возможно лишь для совместного нормального распределения. Использование других распределений существенно затруднено и вызвано отсутствием величины, аналогичной определителю корреляционной матрицы для совместного нормального распределения [12]. Тем не менее, учитывая большое разнообразие элементов системы ТСС и их параметров, использование многомерного нормального распределения вполне оправдано.

Вычисление ковариационной матрицы для вектора Y возможно путем накопления статистики параметров процесса функционирования элементов системы ТСС.

Таким образом, исходя из введенных допущений, дифференциальная энтропия отдельного элемента системы ТСС может быть вычислена следующим образом (4) [9–12]:

$$H(Y) = \frac{1}{2} \ln \left[(2\pi e)^m |\Sigma| \right] = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R| = H(Y)_{\Sigma} + H(Y)_R, \quad (4)$$

где $|\Sigma|$ — определитель ковариационной матрицы Σ вектора Y ;

$|R|$ — определитель корреляционной матрицы R вектора Y .

По выражению (4) видно, что энтропия отдельного элемента системы ТСС складывается из двух составляющих, величина $H(Y)_{\Sigma}$ определяет предельную дифференциальную энтропию, соответствующую полной независимости параметров элемента системы ТСС и представляет собой энтропию хаотичности, а величина $H(Y)_R$ отражает степень взаимосвязей между параметрами и представляет собой энтропию самоорганизации.

Представление дифференциальной энтропии в виде двух составляющих определяет ее двойственный характер. Изменение дифференциальной энтропии может происходить, с одной стороны, за счет изменения дисперсий значений параметров элемента системы ТСС, а с другой — за счет изменения коррелированности параметров, по которым определяется дифференциальная энтропия [9–12].

При непрерывном измерении параметров элемента системы ТСС можно отследить динамику изменения дифференциальной энтропии. Если в течение рассматриваемого периода времени значение дифференциальной энтропии не изменилось, то элемент системы ТСС стабилен и функционирует в стационарном режиме, если значение дифференциальной энтропии уменьшилось, то элемент системы ТСС стал функционировать более стабильно, если значение дифференциальной энтропии увеличилось, то происходящие в элементе системы ТСС изменения привели к увеличению нестабильности процесса его функцио-

нирования. Анализируя происходящие изменения с точки зрения энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации, можно отметить, что если увеличилась энтропия хаотичности, то увеличился разброс значений параметров функционирования элемента системы ТСС, если энтропия хаотичности уменьшилась, то разброс значений параметров функционирования элемента системы ТСС уменьшился.

Аналогично, если энтропия самоорганизации увеличилась, то произошло уменьшение взаимосвязей параметров элемента системы ТСС. Если энтропия самоорганизации уменьшилась, то произошло увеличение взаимосвязей параметров [9–12].

Используя указанный подход на основе выражения (2) и оценив дифференциальную энтропию каждого элемента системы ТСС, можно оценить дифференциальную энтропию всей системы ТСС или отдельного ее фрагмента системы ТСС. Проведя указанные действия, будет получена энтропийная модель динамики системы ТСС. В этом случае в качестве параметров будут выступать полученные дифференциальные энтропии отдельных элементов системы ТСС. Определяя энтропию хаотичности и энтропию самоорганизации системы ТСС, можно определять динамику изменения взаимосвязей элементов системы ТСС, определять отказавшие элементы и элементы с пониженным качеством функционирования.

Обеспечение информационной безопасности системы ТСС путем управления значениями ее дифференциальной энтропии

В работе [9] отмечается факт, что рост дифференциальной энтропии сложной системы соответствует повышению ее безопасности. Данный факт можно объяснить тем, что с ростом энтропии уменьшается взаимосвязь между элементами. Следовательно, будет уменьшена резуль-

тативность атаки со стороны организованного злоумышленника, так как дестабилизирующее воздействие сконцентрируется на атакуемом узле и получит меньшее распространение на смежные узлы системы ТСС. Таким образом, можно искусственно повышать значение дифференциальной энтропии системы ТСС за счет повышения дифференциальной энтропии отдельных ее элементов. Данное повышение возможно за счет изменения энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации. Однако следует отметить, что с повышением дифференциальной энтропии уменьшается управляемость системой ТСС вследствие уменьшения взаимосвязей между элементами, что существенно может сказаться на процессе ее функционирования. Таким образом, основную задачу при построении системы информационной безопасности ТСС можно сформулировать как нахождение оптимального диапазона значений дифференциальной энтропии системы ТСС, при котором будет достигнута требуемая информационная безопасность, но в то же время будет обеспечена необходимая управляемость системы ТСС.

Для решения данной задачи необходимо определиться с критерием информационной безопасности системы ТСС, а также с критерием управляемости системы ТСС. Решение задачи обеспечения информационной безопасности можно проводить с использованием двух подходов. В основе первого подхода лежит идея обеспечения требуемой информационной безопасности. Необходимо найти минимальное значение дифференциальной энтропии системы ТСС, для которой будет обеспечена требуемая информационная безопасность. Исходя из данного значения дифференциальной энтропии, в дальнейшем необходимо определить оптимальные значения параметров системы ТСС, при которых будет обеспечена максимальная ее управляемость. В основе второго подхода лежит идея обеспе-



Рис. 2. Подходы к построению системы информационной безопасности ТСС

чения требуемой управляемости системы ТСС. Необходимо найти максимальное значение дифференциальной энтропии, при которой будет обеспечена требуемая управляемость. Исходя из данного значения дифференциальной энтропии, в дальнейшем необходимо определить оптимальные значения параметров системы ТСС, при которых будет обеспечена максимальная информационная безопасность. Учитывая сформулированные подходы, блок-схема построения системы информационной безопасности примет следующий вид (рис. 2).

Решение задачи обеспечения информационной безопасности системы ТСС возможно с использованием различных методов оптимизации. Конечным итогом будет являться находже-

ние таких значений параметров системы ТСС, при которых будут достигнуты необходимые значения критериев информационной безопасности и управляемости.

Заключение

Система тактовой сетевой синхронизации представляет собой основополагающую подсистему в структуре ТКС. Нарушение процесса функционирования системы ТСС способно привести к значительным отказам в предоставлении телекоммуникационных услуг, взаимодействии элементов и смежных подсистем ТКС. Данный факт обуславливает актуальную задачу построения эффективной системы информационной безопасности ТСС, способной надежно блоки-

ровать целенаправленные внешние воздействия. В статье были предложены подходы к обеспечению информационной безопасности ТСС на основании оценки динамики изменения ее дифференциальной энтропии. Оценку дифференциальной энтропии системы ТСС возможно проводить путем анализа параметров функционирования элементов ТСС, на основании которого возможно построение энтропийной модели динамики системы ТСС. Изменение параметров функционирования системы ТСС и ее элементов находит отражение в изменении ее дифференциальной энтропии. Увеличение значения дифференциальной энтропии способствует повышению информационной безопасности ТСС, но также влияет и на процесс управляемости системой.

Отличительной особенностью предложенных подходов является оценка системы информационной безопасности ТСС исходя из процесса функционирования самой ТСС, без учета влияния датчиков безопасности, межсетевых экранов и систем обнаружения вторжений. Процесс функционирования системы ТСС обуславливает построение энтропийной модели динамики в реальном времени, в результате чего можно в реальном времени отслеживать параметры информационной безопасности.

Построение систем управления ТСС с учетом предложенных подходов в сочетании с традиционными системами информационной безопасности способно значительно повысить защищенность ТСС без потери ее управляемости.

Библиографический список

1. Еремеев Е. Л. Синхронизация и цифровая передача в сетях SDN / Е. Л. Еремеев, С. Ф. Буцев, И. И. Горай и др. // *Инновации, наука, образование*. — 2021. — № 43. — С. 1010–1025.
2. Колтунов М. Н. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России / М. Н. Колтунов, М. Л. Шварц // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. — 2018. — № 2. — С. 113–120.
3. Лобастова М. В. Оценка надежности работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. — 2020. — № 3. — С. 27–36.
4. Нетес В. А. Соглашение об уровне обслуживания при предоставлении сигналов синхронизации / В. А. Нетес // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. — 2018. — № 2. — С. 137–140.
5. Малыгин С. В. Особенности построения систем тактовой сетевой синхронизации для распределенных сетей связи / С. В. Малыгин, М. Л. Шварц // *Информатизация и связь*. — 2021. — № 1. — С. 29–40.
6. Канаев А. К. Моделирование атаки на систему управления сетью синхронизации / А. К. Канаев, А. Н. Горбач, Е. В. Опарин // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. — 2020. — № 72. — С. 35–47.
7. Канаев А. К. Обобщенная модель действий злоумышленника на начальном этапе реализации атаки на систему управления сетью синхронизации / А. К. Канаев, А. Н. Горбач, Е. В. Опарин // *Телекоммуникации*. — 2020. — № 12. — С. 16–24.
8. Канаев А. К. Методика мониторинга технического состояния сети тактовой сетевой синхронизации на основе энтропийного анализа диагностических параметров ее элементов / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. — 2021. — № 3. — С. 108–117.
9. Тырсин А. Н. Энтропийный подход к риск-анализу систем критичных инфраструктур / А. Н. Тырсин, А. А. Сурина // *Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции естественных наук*. — 2014. — С. 210–218.
10. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии, технике / О. В. Цветков. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 202 с.
11. Тырсин А. Н. Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования / А. Н. Тырсин, О. В. Ворфоломеева //

Информатика и ее применения. — 2013. — Т. 7. — № 4. — С. 3–10.

12. Лебедева О. В. Энтропийное моделирование динамики многомерных стохастических систем: дис. ... канд. физ.-мат. наук / О. В. Лебедева. — Челябинск, 2015. — 174 с.

Дата поступления: 20.07.2022

Решение о публикации: 05.08.2022

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрическая связь»; kanaevak@mail.ru

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, инженер I категории; ОпаруН@mail.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций»; sirayaekaterina@mail.ru

Ensuring Information Security for Clocked Network Synchronization System on the Basis of the System Entropy Analysis

A. K. Kanaev¹, E. V. Oparin², E. V. Oparina¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Institute of Signaling, Centralization and Communication Projecting on Railway Transport “Giprotranssignal-svyaz” — “Roszheldorproekt” JSC Branch, 49, Borovaya St., Saint Petersburg, 191119, Russian Federation

For citation: Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Ensuring Information Security for Clocked Network Synchronization System on the Basis of the System Entropy Analysis // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 505–514. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-505-514

Summary

Purpose: To consider the issue of ensuring informational security for clocked network synchronization system during its operation as a part of telecommunication system. To achieve this goal, the article considers by stages the solution of the following tasks: system analysis of function process of clocked network synchronization system under the influence of organized intruders is carried out, main threats to information security for clocked network synchronization system are given. As a complex characteristic of function process of network clocked synchronization (NCS) system, the use of its differential entropy is proposed, the relationship of differential entropy values with parameter values for informational security and NCS system controllability is revealed which basis on, the approaches to ensure NCS system information security are proposed. **Methods:** Research methods used in the work are based on fundamental principles of system theory, probability theory, network theory, entropy modeling, system and mathematical analysis and mathematical modeling. **Results:** Entropy model for dynamics of function process of clocked network synchronization system has been formed, phased structure for actions to ensure information security of clocked network synchronization system on the strength of security and controllability requirements has been proposed. **Practical significance** of the work lies in the possibility for telecommunication system operators to form reasonably a quantitative and qualitative character of protection means as well as to adjust optimally the parameters of NCS system functioning and the system constituent elements.

Keywords: Telecommunication system, clocked network synchronization system, differential entropy, threat, information security.

References

1. Ereemeev E. L., Butsev S. F., Goray I. I., Buravtsova D. A., Usatskiy V. A., Dmitriev A. M. Sinkhronizatsiya i tsifrovaya peredacha v setyakh SDH [Synchronization and digital transmission in SDH networks]. *Innovatsii, nauka, obrazovanie* [Innovations, science, education]. 2021, I. 43, pp. 1010–1025. (In Russian)
2. Koltunov M. N., Shvarts M. L. Aktual'nye voprosy primeneniya oborudovaniya chastotno-vremennogo obespecheniya na ESE Rossii [Topical issues of the use of time-frequency equipment in the Unified Energy System of Russia]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2018, I. 2, pp. 113–120. (In Russian)
3. Lobastova M. V., Matyukhin A. Yu. Otsenka nadezhnosti raboty elementa seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii [Evaluation of the reliability of the network element of clock network synchronization]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems]. 2020, I. 3, pp. 27–36. (In Russian)
4. Netes V. A. Soglashenie ob urovne obsluzhivaniya pri predostavlenii signalov sinkhronizatsii [Service level agreement for the provision of synchronization signals]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2018, I. 2, pp. 137–140. (In Russian)
5. Malygin S. V., Shvarts M. L. Osobennosti postroeniya sistem taktovoy setevoy sinkhronizatsii dlya raspredelennykh setey svyazi [Features of building clock network synchronization systems for distributed communication networks]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2021, I. 1, pp. 29–40. (In Russian)
6. Kanaev A. K., Gorbach A. N., Oparin E. V. Modelirovanie ataki na sistemu upravleniya set'yu sinkhronizatsii [Modeling an attack on a synchronization network control system]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University]. 2020, I. 72, pp. 35–47. (In Russian)
7. Kanaev A. K., Gorbach A. N., Oparin E. V. Obobshchennaya model' deystviy zloumyshlennika na nachal'nom etape realizatsii ataki na sistemu upravleniya set'yu sinkhronizatsii [A generalized model of an attacker's actions at the initial stage of an attack on a synchronization network control system]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2020, I. 12, pp. 16–24. (In Russian)
8. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Metodika monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii na osnove entropiynogo analiza diagnosticheskikh parametrov ee elementov [Method of monitoring the technical condition of the clock network synchronization network based on the entropy analysis of the diagnostic parameters of its elements]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya* [Issues of radio electronics. Series: TV Technique]. 2021, I. 3, pp. 108–117. (In Russian)
9. Tyrsin A. N., Surina A. A. Entropiynyy podkhod k risk-analizu sistem kritichnykh infrastruktur [Entropy approach to risk analysis of critical infrastructure systems]. *Nauka YuUrGU: materialy 66-y nauchnoy konferentsii Sektsii estestvennykh nauk* [SUSU Science: Proceedings of the 66th Scientific Conference of the Section of Natural Sciences]. 2014, pp. 210–218. (In Russian)
10. Tsvetkov O. V. *Entropiynyy analiz dannykh v fizike, biologii, tekhnike* [Entropy analysis of data in physics, biology, technology]. St. Petersburg: SPbGETU «LETI» Publ., 2015. 202 p. (In Russian)
11. Tyrsin A. N., Vorfolomeeva O. V. Issledovanie dinamiki mnogomernykh stokhasticheskikh sistem na osnove entropiynogo modelirovaniya [Study of the dynamics of multidimensional stochastic systems based on entropy modeling]. *Informatika i ee primeneniya* [Computer science and its applications]. 2013, Vol. 7, I. 4, pp. 3–10. (In Russian)
12. Lebedeva O. V. *Entropiynoe modelirovanie dinamiki mnogomernykh stokhasticheskikh sistem. Kand. Diss* [Entropy modeling of the dynamics of multidimensional stochastic systems. Cand. Diss]. Chelyabinsk, 2015. 174 p. (In Russian)

Received: July 20, 2022

Accepted: August 05, 2022

Author's information:

Andrey K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Electrical Connection Department; kanaevak@mail.ru

Evgeny V. OPARIN — PhD in Engineering; First Category Engineer; onapuh@mail.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanics and Strength of Materials and Structures; sirayaekaterina@mail.ru