

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТА СЕТИ ТАКТОВОЙ СЕТЕВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Лобастова Мария Викторовна

старший преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.
E-mail: mlobastovabk1@rambler.ru.

Матюхин Александр Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.
E-mail: matukhin@list.ru.

Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22/1.

Аннотация: Развитие современных сетей связи диктует новые, более жёсткие требования к их надёжности. Сеть тактовой сетевой синхронизации является важнейшей частью сети связи, поэтому вопросу надёжности работы сети синхронизации в целом, а также её элементов, необходимо уделять большое внимание. В статье рассматривается надёжность функционирования элемента сети тактовой синхронизации. В качестве основных методов исследования использовались полумарковские методы расчёта надёжности, а также моделирование. Результаты работы позволяют сделать вывод о возможности применения предложенных методов для оценки надёжности работы элемента сети тактовой синхронизации. Предложенное в статье решение может быть применено для обоснованной оценки показателей надёжности сети, что необходимо для принятия решения о замене и ремонте элемента сети синхронизации. Однако, следует отметить, что в качестве продолжения данной темы необходимо рассмотреть надёжность сети в целом.

Ключевые слова: тактовая сетевая синхронизация, надёжность элемента сети синхронизации, подмножества состояний надёжности элемента сети, полумарковские методы расчета надёжности, матрица переходных вероятностей, коэффициент готовности.

Введение

Построение сети связи с заявленным высоким качеством невозможно представить без грамотно организованной сети тактовой синхронизации. Это обусловлено, в первую очередь, преимуществами синхронных и когерентных методов передачи [1]. Основная задача синхронизации сводится к согласованию работы генераторов различных уровней иерархии сети, что позволяет избежать потери информации или сократить потери информации до минимума. В настоящее время вопросу надёжности сети тактовой синхронизации не уделяется должного внимания, несмотря на то, что с появлением сетей пятого поколения (5G) ужесточаются требования к надёжности сети [2–3].

Надёжность современных сетей связи обсуждается в работах Нетеса В.А., Киричка Р.В., Мутханны А.С.А., Колтунова М.Н., Канаева А.К. и других авторов [4–11]. Однако

вопрос надёжности сетей и составляющих их элементов в нашей стране изучен недостаточно.

Разработка математической модели для оценки надёжности сети синхронизации направлена на количественную оценку надёжности сети и оценку эффективности её функционирования.

Сеть тактовой синхронизации имеет иерархическую структуру, которая может включать большое число элементов сети. Поэтому понятие структурной надёжности сети тактовой синхронизации должно опираться на понятие надёжности отдельно взятого сетевого элемента. В качестве сетевого элемента сети следует рассматривать генераторное оборудование всех уровней иерархии от первичного задающего генератора до генераторов сетевых элементов.

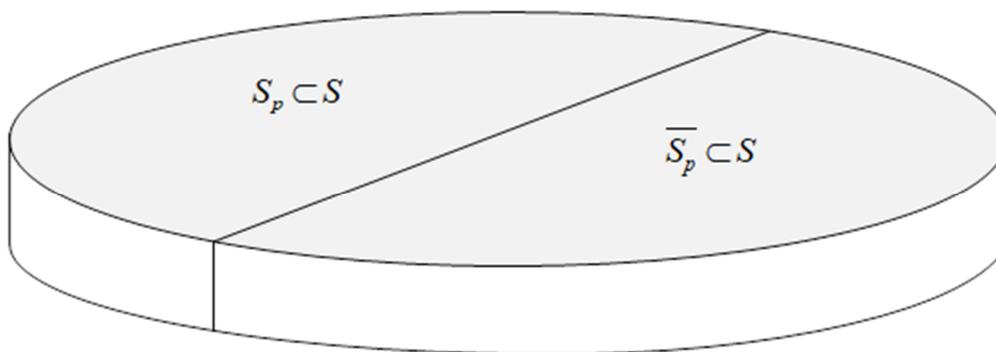


Рис. 1. Подмножества состояний сети тактовой сетевой синхронизации

Постановка задачи

Для более точной оценки показателей надёжности сети тактовой сетевой синхронизации необходимо разработать модель оценки надёжности работы сетевых элементов, а также сети в целом. Для этого необходимо усовершенствовать математическую модель, рассмотренную в работе А.К. Канаева [8], и дополнить её.

Определение понятия надёжности

Надёжность — это комплексное свойство, которое может включать такие показатели, как безотказность, готовность, долговечность и целый ряд других [12].

Понятие надёжности регламентируется ГОСТ 27.002-2015 «Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения» и определено им как свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [13].

В контексте данной статьи речь пойдет о надёжности генераторного оборудования узла сети тактовой синхронизации, а также о надёжности сети тактовой синхронизации в целом.

Поток отказов сети тактовой сетевой синхронизации

Для описания надёжности сети синхронизации необходимо все возможные состояния сети

разделить на работоспособные и неработоспособные. Для математического описания выделим подмножество работоспособных и подмножество неработоспособных состояний.

Оба данных подмножества вместе образуют множество всех возможных состояний.

$$S = S_p \cup \overline{S_p}. \quad (1)$$

Однако между собой данные подмножества не совпадают

$$S_p \neq \overline{S_p}. \quad (2)$$

Возникающие отказы можно разделить на постепенные и внезапные. Внезапные отказы характеризуются такими свойствами как ординарность, стационарность и отсутствие последствия.

Случайный поток событий, обладающий тремя перечисленными свойствами, можно описать Пуассоновским потоком

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где k — число внезапных отказов, λ — интенсивность отказов [12].

Описание потока отказов формулой Пуассона позволяет определить вероятность возникновения наступления k отказов за интервал времени $(0, t)$, или определить вероятность того, что за рассматриваемый промежуток времени не наступит ни одного отказа.

Так, например, вероятность наступления внезапных отказов при $\lambda = 5 \cdot 10^{-2}$ не превышает 0,4.

Модель работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации

Сеть синхронизации представляет собой наложенную сеть, которая строится по иерархическому принципу [14]. Главными элементами данной сети является генераторное оборудование. В зависимости от уровня иерархии, это может быть первичный задающий генератор (PRC), генератор узла (SSU) или генератор сетевого элемента (SEC) [15–17]. Для обеспечения требуемой высокой точности выходного сигнала первичный задающий генератор в своем составе должен иметь два эталонных источника, представляющих собой квантовые стандарты частоты с точностью не хуже 10^{-13} – 10^{-12} , и третий источник в виде эталонного сигнала GPS/ГЛОНАСС [14].

Сеть тактовой синхронизации имеет сложную структуру и может включать большое количество элементов. Учитывая важность сети, необходимо знать, насколько надёжен каждый из её элементов.

Для каждого из узлов сети синхронизации можно выделить работоспособные и неработоспособные состояния. Переход из одного состояния в другое можно описать с помощью Марковской цепи. Рассмотрим более детально возможные состояния элемента сети.

Состояние S_1 — включение электропитания элемента сети синхронизации. Данный режим является начальным этапом работы каждого элемента сети тактовой синхронизации.

Состояние S_2 — самотестирование элемента сети. Самотестирование, как правило, начинается автоматически после подачи электропитания.

Состояние S_3 — работа в режиме свободных колебаний. Работа в данном режиме означает отсутствие хронизирующего сигнала на входе генератора. При этом переход в режим удержания ещё не возможен, так как для его установления недостаточно данных.

Состояние S_4 — выбор внешнего источника колебаний по наилучшим характеристикам входного сигнала. В аппаратуре синхронизации предусмотрено резервирование источни-

ков сигнала хронирования. Поэтому выбор источника сигнала синхронизации для рассматриваемого узла происходит в зависимости от установленного приоритета. Первый приоритет для генераторов узлов сети обычно принадлежит сигналу, который поступает от первичного задающего генератора по кратчайшему маршруту с минимальным числом переприёмов [10]. Второй приоритет отдаётся сигналу первичного задающего генератора, поступающему по другому маршруту. При переключении на резервный источник сигнала синхронизации в сети не должно возникать замкнутых петель.

Состояние S_5 — установление режима синхронной работы. Режим синхронной работы является основным и самым важным режимом работы элемента сети тактовой синхронизации. В данном режиме основные параметры сигнала синхронизации на выходе генератора, такие как частота и фаза, соответствуют предъявляемым требованиям с допустимой точностью.

Состояние S_6 — работа в режиме удержания. Переход в режим удержания возможен при возникновении аварийной ситуации, когда сигнал на входе генератора пропадает, либо при принудительном переключении по команде оператора. При работе в данном режиме характеристики выходного сигнала зависят от точности запоминания управляющего сигнала, которая должна быть не хуже, чем $3 \cdot 10^{-10}$.

Состояние S_7 — отказ элемента и его восстановление. Возникновение отказа может наступить в любой момент. Поэтому в модели переход в состояние отказа возможен из любого другого состояния. Для надёжного восстановления синхронизации ведомый генератор должен обладать высокой стабильностью и возможностью запоминать частоту принимаемого сигнала.

Для определения временных показателей времени наработки на отказ и времени простоя разделим рассмотренные возможные состояния узла сети на работоспособные и неработоспособные. К работоспособным состояниям

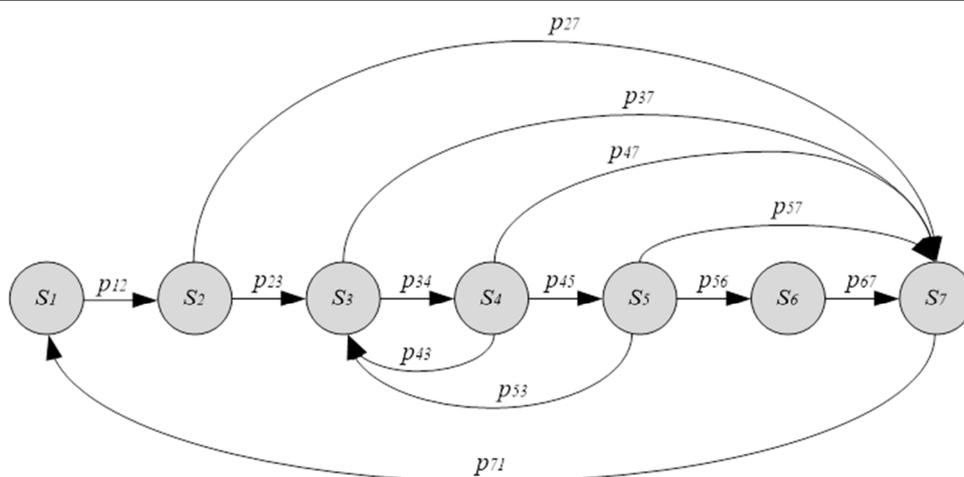


Рис. 2. Марковская цепь, характеризующая работу элемента сети тактовой синхронизации

отнесем состояния \$S_1 - S_6\$, а к неработоспособным — состояние отказа и восстановления \$S_7\$.

Так как множество состояний конечно, и можно описать время пребывания в каждом состоянии, то для описания надёжности сети можно использовать Марковские цепи. Дискретная Марковская цепь, описывающая работу элемента сети тактовой синхронизации, приведена на рис. 2.

Оценка надёжности работы элемента сети тактовой синхронизации

Для описания надёжности элемента сети с помощью Марковской цепи необходимо задать матрицу переходных вероятностей \$P = (p_{ij})\$.

Матрица переходных вероятностей задаётся аналогично матрице смежности ориентированного графа с тем лишь отличием, что вместо булевых элементов содержит переходные вероятности из одного возможного состояния в другое [12].

$$P = \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 & p_{27} \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & 0 & 0 & p_{37} \\ 0 & 0 & p_{43} & 0 & p_{45} & 0 & p_{47} \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 & p_{56} & p_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{67} \\ p_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Матрица переходных вероятностей всегда квадратная, размерностью \$n \times n\$, где \$n\$ – количество возможных состояний цепи. Кроме того, данная матрица всегда стохастическая, а значит, сумма переходных вероятностей, описывающих дуги, исходящие из одной вершины \$S_i\$, равна единице

$$\sum p_{ij} = 1, \quad (5)$$

так как они образуют полную группу событий [12].

Для определения стационарных вероятностей пребывания системы к каждому из семи состояний можно использовать метод матричного уравнения или метод миноров.

Решим задачу с помощью матричного уравнения.

$$\begin{aligned} & [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7] = \\ & = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7] \times \\ & \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 & p_{27} \\ 0 & 0 & 0 & p_{34} & 0 & 0 & p_{37} \\ 0 & 0 & p_{43} & 0 & p_{45} & 0 & p_{47} \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 & p_{56} & p_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{67} \\ p_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

Выразим все неизвестные стационарные вероятности через \$p_1\$. Для этого вектор вероятностей

стей должен быть собственным вектором матрицы переходных вероятностей при собственном значении этой матрицы, равном 1.

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{71} \\ p_{12} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{23} & -1 & p_{43} & p_{53} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{45} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{56} & -1 & 0 \\ 0 & p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{57} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

Зафиксируем значение $p_1 = a < 1$. В результате число уравнений уменьшится.

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{23} & -1 & p_{43} & p_{53} & 0 & 0 \\ 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{45} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{56} & -1 & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{57} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ap_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

При этом необходимо вычислить определитель матрицы P :

$$\begin{aligned} \det P &= \det \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{23} & -1 & p_{43} & p_{53} & 0 & 0 \\ 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{45} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{56} & -1 & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{57} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} = \\ &= -\det \begin{pmatrix} -1 & p_{43} & p_{53} \\ p_{34} & -1 & 0 \\ 0 & p_{45} & -1 \end{pmatrix} = \\ &= -(-1 - p_{34}(-p_{43} - p_{53}p_{45})) = \\ &= 1 - p_{34}(-p_{43} - p_{53}p_{45}). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначив $F = P^{-1}$, вычислим значения элементов f_{ij} .

$$f_{11} = -1; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_{21} &= \frac{1}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} \times \\ &\times \det \begin{pmatrix} p_{23} & p_{43} & p_{53} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{45} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{56} & -1 & 0 \\ p_{27} & p_{47} & p_{57} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{p_{23}}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_{31} &= \frac{1}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} \times \\ &\times \det \begin{pmatrix} p_{23} & -1 & p_{53} & 0 & 0 \\ 0 & p_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{56} & -1 & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{57} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{-p_{23}p_{34}}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} f_{41} &= \frac{1}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} \times \\ &\times \det \begin{pmatrix} p_{23} & -1 & p_{43} & 0 & 0 \\ 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{67} & -1 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{-p_{23}p_{34}p_{45}}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$f_{51} = \frac{1}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} \times$$

$$\times \det \begin{pmatrix} p_{23} & -1 & p_{43} & p_{53} & 0 \\ 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{56} & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{57} & -1 \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{-p_{23}p_{34}p_{45}p_{56}}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})}; \quad (14)$$

$$f_{61} = \frac{1}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} \times$$

$$\times \det \begin{pmatrix} p_{23} & -1 & p_{43} & p_{53} & 0 \\ 0 & p_{34} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{56} & 0 \\ p_{27} & p_{37} & p_{47} & p_{57} & p_{67} \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{p_{23}p_{34}p_{45}p_{56}p_{67} - p_{23}(p_{34}p_{47} + p_{37} + p_{34}p_{45}p_{57})}{1 - p_{34}(p_{43} + p_{53}p_{45})} +$$

$$+ p_{27}. \quad (15)$$

Тогда вектор стационарных вероятностей примет следующее значение:

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = -ap_{12} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \\ f_{41} \\ f_{51} \\ f_{61} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Наиболее универсальным методом нахождения стационарных вероятностей пребывания узла сети синхронизации в том или ином состоянии является метод миноров. Преобразуем матричное уравнение к виду

$$\vec{P} - \vec{P} \cdot \Pi = \vec{P}(I - \Pi) = 0 \text{ или } \vec{P} \cdot D = 0, \quad (17)$$

где 0 — нулевая матрица; I — единичная матрица.

Тогда P_i можно найти по формуле

$$P_i = \frac{D_i}{\sum_{i \in S} D_i}, \quad (18)$$

где D_i — главный минор определителя матрицы D , получаемый вычёркиванием i -ой строки и i -го столбца матрицы

$$D = \begin{pmatrix} 1 - p_{11} & -p_{12} & \dots & -p_{1n} \\ -p_{21} & 1 - p_{22} & \dots & -p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -p_{n1} & & & 1 - p_{nn} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Зная $F_{ij}(t)$ — функцию распределения длительности пребывания процесса в состоянии S_i , можно определить математическое ожидание безусловного времени пребывания узла сети в любом из возможных состояний

$$T_i = \sum_{j \in S} p_{ij} T_{ij}, \quad (20)$$

где $T_{ij}(t) = \int_0^{\infty} [1 - F_{ij}(t)] dt$.

Тогда стационарную вероятность пребывания в каждом из состояний можно вычислить по формуле

$$\pi_i = \frac{P_i T_i}{\sum_{j \in S} P_j T_j}, \quad (21)$$

где $i, j = 1, \dots, 7; i, j \sum_{i \in S} \pi_i = 1$.

Основным показателем, который используется в инфокоммуникациях, и, требования к которому описываются в нормативных документах, является коэффициент готовности. Зная стационарные вероятности пребывания узла сети синхронизации в каждом из состояний, можно вычислить коэффициенты готовности и простоя по следующим двум формулам [8]:

$$K_{\Gamma} = \sum_{i \in S_p} \pi_i, \quad (22)$$

$$K_{\text{пр}} = \sum_{i \in S_d} \pi_i = 1 - K_{\Gamma}. \quad (23)$$

Вычислив необходимые данные, можно определить время наработки на отказ и время простоя

```

Ti := | for i ∈ 1..rows(T)
      | for j ∈ 1..cols(T)
      |   cols(T)
      |   Si ← ∑j=1 Ti,j
      | ST
    
```

Рис. 3. Фрагмент программы, выполняющий вычисление математического ожидания безусловного времени пребывания узла сети в любом из возможных состояний

```

D := | for i ∈ 1..rows(Π)
      | for j ∈ 1..cols(Π)
      |   Si,j ← Πi,j(-1) if i ≠ j
      |   Si,j ← 1 - Πi,j if i = j
      | S
    
```

Рис. 4. Вычисление матрицы D на основании матрицы переходных вероятностей

$$T_0 = \frac{\sum_{i \in S_p} P_i T_i}{\sum_{i \in S_+} P_i \sum_{j \in S_p} P_{ij}}; \quad (24)$$

$$T_{np} = \frac{\sum_{i \in S_p} P_i T_i}{\sum_{i \in S_-} P_i \sum_{j \in S_p} P_{ij}}. \quad (25)$$

В данных выражениях используются подмножества граничных работоспособных S_+ и неработоспособных S_- состояний. Это обусловлено тем, что переход из подмножества S_p в подмножество $\overline{S_p}$ может происходить не из любого работоспособного состояния, а только

из граничного работоспособного состояния S_+ , и наоборот, переход из подмножества неработоспособных состояний в подмножество работоспособных состояний может осуществляться только из подмножества граничных неработоспособных состояний S_- [12].

К подмножеству граничных состояний S_+ относятся состояния S_2-S_6 , а к подмножеству S_- можно отнести состояние отказа и восстановления S_7 .

Программная реализация предложенных методов оценки работоспособности элемента сети тактовой синхронизации

Для подтверждения работоспособности рассмотренных способов оценки надёжности элемента сети тактовой синхронизации на основе

```

minor(A,m,n) := | for i ∈ 1..k
                  |   Am,i ← NaN
                  | A ← filterNaN(A)
                  | B ← AT
                  | for i ∈ 1..k-1
                  |   Bn,i ← NaN
                  | A ← filterNaN(B)
                  | A ← AT
                  | A
    
```

```

Pi := | for i ∈ 1..rows(D)
       |   Si ←  $\frac{|\text{minor}(D,i,i)|}{\text{rows}(D)}$ 
       |    $\sum_{i=1} |\text{minor}(D,i,i)|$ 
       | ST
    
```

Рис. 5. Фрагмент программы, производящий вычисление минора матрицы D и поиск вектора стационарных вероятностей P_i

метода миноров с использованием программного математического обеспечения Mathcad была написана программа, реализующая необходимые расчёты. В качестве исходных данных в Mathcad задаются матрица переходных вероятностей P , матрица распределения условных случайных времен пребывания элемента сети ТСС в каждом из возможных состояний A и матрица математических ожиданий условных времен пребывания в каждом состоянии T_{ij} .

Для вычисления вектора математических ожиданий T_i необходимо запустить 2 цикла: от 1 до rows(T) и от 1 до cols(T) и произвести сложение элементов каждой строки матрицы T . Для удобства восприятия полученный результат транспонируется (рис. 3). При всех вычислениях нумерация строк и столбцов матриц начинается с единицы. В результате получится вектор-строка математических ожиданий безусловных времен пребывания элемента сети тактовой сетевой синхронизации в каждом из возможных состояний.

На основе матрицы переходных вероятностей P , производится вычисление матрицы D . Элементы главной диагонали вычисляются как $(1 - p_{ij})$, остальные элементы — как $(-p_{ij})$.

Для нахождения вектора стационарных вероятностей пребывания вложенной однородной марковской цепи в одном из возможных состояний необходимо вычислить определитель (minor) матрицы D , введя функцию filterNaN, который удаляет строки набора данных.

На рис. 6 приведён фрагмент программы, реализующий вычисление стационарных вероятностей пребывания элемента сети ТСС π_i в

```

M := | for i ∈ 1..rows(Pi)
      | for j ∈ 1..cols(Pi)
      | Si,j ← (Pii,j · Tii,j)
      | ∑ S
mi := | for i ∈ 1..rows(Pi)
       | for j ∈ 1..cols(Pi)
       | Si,j ← (Pii,j · Tii,j) / M
       | S
    
```

Рис. 6. Фрагмент программы, производящий вычисление вектора π_i

```

Kg := mi1,1 + mi1,2 + mi1,3 + mi1,4 + mi1,5 + mi1,6
Kpr := 1 - Kg
    
```

Рис. 7. Фрагмент программы, производящий вычисление коэффициентов готовности и простоя элемента сети тактовой сетевой синхронизации

произвольный момент времени в одном из возможных состояний.

Вычисление коэффициентов готовности и простоя производится на основе выражений (22, 23).

Заключение

В данной статье был предложен способ оценки надёжности элемента тактовой сетевой синхронизации, основанный на свойствах Марковских цепей. Рассмотрены два способа определения стационарных вероятностей пребывания системы к каждому из возможных состояний: на основе матричного уравнения и метода миноров. Для подтверждения работоспособности рассмотренных методов написана программа с использованием возможностей программирования среды Mathcad.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут посвящены оценке надёжности сети в целом.

Литература

1. Пестряков А.В. Синхронизация. История и тенденции развития // Системы синхронизации,

- формирования и обработки сигналов. 2018. № 4. С. 5–7.
2. ITU-T Recommendation Y.4100 (06/2014). Common requirements of the Internet of things. (Ранее ITU-T Recommendation Y.2066).
 3. ITU-T Recommendation Y.4113 (09/2016). Requirements of the network for the Internet of things.
 4. *Нетес В.А.* Надежность сетей связи в стандартах МЭК // Вестник связи. 2014. № 2. С. 13–15.
 5. *Нетес В.А.* Проблемы обеспечения надежности сетей пост-NGN // В сборнике: Технологии информационного общества. Материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции. 2019. С. 72–74.
 6. *Нетес В.А.* Использование коэффициента сохранения эффективности для оценки надежности инфокоммуникационных сетей и систем // В сб.: Технологии информационного общества. Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. 2020. С. 294–296.
 7. *Колтунов М.Н., Шварц М.Л.* Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России. Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. № 2. С. 113–120.
 8. *Канаев А.К., Опарин Е.В.* Математическая модель процесса функционирования элемента сети тактовой сетевой синхронизации для определения стационарных характеристик его надежности // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. № 3–4 (16–17). С. 82–91.
 9. *Довгий С., Сторожук М., Сторожук Н.* Методика оценки надежности сетей связи // Первая мила. 2020. № 5 (90). С. 44–49.
 10. *Лобастова М.В., Матюхин А.Ю.* Использование алгоритма Флойда-Уоршалла для поиска маршрута передачи сигнала с минимальным числом переприемов // Электросвязь. 2020. № 4. С. 51–54.
 11. *Амелянович А.В., Шпаков М.Н., Мутханова А.С.А., Киричек Р.В., Владыко А.Г.* Исследование централизованного управления архитектурой D2D коммуникации на базе SDN // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 2. С. 13–24.
 12. *Шубинский И.Б.* Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: «Журнал Надежность», 2012. 216 с.
 13. ГОСТ 27.002-2015 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2016.
 14. *Слепов Н.* Синхронизация цифровых сетей. Методы, терминология, Аппаратура // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 2. С. 24–29.
 15. ITU-T Recommendation G.811 (09/97) Timing characteristics of primary reference clocks.
 16. ITU-T Recommendation G.812 (06/2004) Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks.
 17. ITU-T Recommendation G.813 (2003) Corrigendum 2 (11/16) Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC).

Поступила 18 августа 2020 г.

English

OPERATION RELIABILITY ASSESSMENT OF NETWORK ELEMENT IN CLOCK NETWORK SYNCHRONIZATION

Maria Viktorovna Lobastova — Senior Lecturer, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: mlobastovabk1@rambler.ru.

Alexander Yurievich Matyukhin — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Communication Networks and Data Transmission, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: matukhin@list.ru.

Address: 193232, Russian Federation, St. Petersburg, Bolshevikov Ave., 22/1.

Abstract: The rapid development of current communication networks inevitably brings to requirements toughening for their reliability. One of the most important elements of communication network is a clock synchronization network. The article deals with the issue of assessing the reliability of clock synchronization network element and proposes the model that describes network element operation. The process of network element functioning represents generator equipment of one of the hierarchy levels and is described by Markov chain. Possible states of the node in clock synchronization network are Markov chain elements and the links represent probabilities of transition from one possible state to another. The following states of network node are regarded as principle ones: network element power-on, self-testing, operation in free oscillation mode, external source selection of synchronization signal, setting of synchronous operation mode, holding mode operation, element failure and its restoration. Markov chain is described through transition probability

matrix, which is based on adjacency matrix of directed graph, but it comprises transition probabilities from one possible state to another instead of Boolean elements. It is proposed to use availability and downtime ratios as reliability key indicators, since requirements are specified for them in documentary standard and precisely they are used in service-level agreements. Availability and downtime ratios are calculated through stationary probabilities of the system being in each of the described states. The article gives an analytical description of methods to retrieve stationary probabilities of network element staying in each of the states based on matrix equation method and minors' method. The program was written using Mathcad program abilities to confirm the efficiency of the proposed method for assessing reliability of synchronization network element. The program segments and their description are given in the article. It is assumed that follow-up research of this subject-matter will be concerned with assessing reliability of network as a whole.

Keywords: clock network synchronization, reliability of synchronization network element, subsets of network element reliability states, semi-Markov calculating reliability methods.

References

1. *Pestryakov A.V.* Synchronization. History and development trends. Systems of synchronization, formation and processing of signals. 2018. No. 4. Pp. 5–7.
2. ITU-T Recommendation Y.4100 (06/2014). Common requirements of the Internet of things. (Previously ITU-T Recommendation Y.2066).
3. ITU-T Recommendation Y.4113 (09/2016). Requirements of the network for the Internet of things.
4. *Netes V.A.* Reliability of communication networks in IEC standards. Bulletin of communications. 2014. No. 2. Pp. 13–15.
5. *Netes V.A.* Problems of ensuring the reliability of post-NGN networks. Technologies of the information society. Materials of the XIII International Industrial Scientific and Technical Conference. 2019. Pp. 72–74.
6. *Netes V.A.* Using the efficiency retention factor to assess the reliability of infocommunication networks and systems. Technologies of the information society. Proceedings of the XIV International Branch Scientific and Technical Conference. 2020. Pp. 294–296.
7. *Koltunov M.N., Schwartz M.L.* Topical issues of the use of equipment for time-frequency support at the ESE of Russia. Systems of synchronization, formation and processing of signals. 2018. No. 2. Pp. 113–120.
8. *Kanaev A.K., Oparin E.V.* Mathematical model of the process of functioning of a network element of clock network synchronization to determine the stationary characteristics of its reliability. Bulletin of scientific research results. 2015. No. 3–4 (16–17). Pp. 82–91.
9. *Dovgy S., Storozhuk M., Storozhuk N.* Methods for assessing the reliability of communication networks. First mile. 2020. No. 5 (90). Pp. 44–49.
10. *Lobastova M.V., Matyukhin A.Yu.* Using the floyd-warshall algorithm for finding a signal transmission route with the minimum number of hops. Electrosvyaz. 2020. No. 4. Pp. 51–54.
11. *Amelyanovich A.V., Shpakov M.N., Muthanna A.S.A., Kirichek R.V., Vladyko A.G.* Investigation of the centralized management of the architecture of D2D communication based on SDN. Information technologies and telecommunications. 2017. Vol. 5. No. 2. Pp. 13–24.
12. *Shubinsky I.B.* Structural reliability of information systems. Methods of analysis. Moscow: "Jurnal Nadezhnost'", 2012. 216 p.
13. GOST (State Standard, Russian National Standard) 27. 002-2015 Reliability in technology. Basic concepts. Terms and Definitions. Official edition. Moscow: Standards publishing house, 2016.
14. *Slepov N.* Synchronization of digital networks. Methods, Terminology, Equipment. ELECTRONICS: Science, Technology, Business. 2002. No. 2. Pp. 24–29.
15. ITU-T Recommendation G.811 (09/97) Timing characteristics of primary reference clocks.
16. ITU-T Recommendation G.812 (06/2004) Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks.
17. ITU-T Recommendation G.813 (2003) Corrigendum 2 (11/16) Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC).