

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ЖИВУЧЕСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Нина Князева

Аннотация: Представлен метод обеспечения структурной живучести телекоммуникационной сети, реализующий потоковый подход на основе предложенного показателя структурной живучести – нижней границы структурной живучести, обеспечивающей гарантированное устойчивое функционирование телекоммуникационной сети, достижение требуемого значения которой осуществляется введением структурной избыточности, осуществляемой с использованием оптимизационной процедуры резервирования тех ветвей сечений, разделяющих множество путей, организуемых для обслуживания поступающих в сеть потоков требований, выбор которых определяется на основе максимизации эффективности каждого этапа резервирования.

Ключевые слова: структурная живучесть, сеть, резервирование, путь, сечение, показатель живучести.

Ключевые слова классификации АСМ: С.2. Computer-communication networks, H. Information Systems - H.1 Models and Principles, K. Computing Milieux - K.6 Management of computing and information system.

Введение

Одним из важнейших свойств телекоммуникационных сетей, обеспечивающих их эффективное функционирование, является живучесть. Вопросы обеспечения живучести телекоммуникационных сетей становятся все более актуальными в связи с их интенсивным развитием в последнее десятилетие. Современные тенденции развития телекоммуникаций, переход к сетям нового поколения – NGN (Next Generation Network – сети следующего поколения), FGN (Future Generation Network – сети будущего поколения (БС)) – обуславливают особую важность вопросов оценки, обеспечения и повышения живучести ТКС с учетом тенденций их развития. Применительно к Future Networks в документах ИТУ [1] рекомендуется, чтобы проектирование, эксплуатация и развитие БС осуществлялись таким образом, чтобы обеспечить надежность, безопасность, а также живучесть, определяющую возможность системы своевременно выполнять свою миссию – обеспечивать выполнение критического подмножества функций для достижения цели функционирования, а также приемлемый уровень обслуживания, даже если нормальная эксплуатация сети осложняется различными проблемами. Для обеспечения живучести телекоммуникационных сетей требуется решение ряда научно-технических задач на всех этапах их жизненного цикла – проектирования, модернизации или совершенствования, эксплуатации. Решение задач, в ходе которых удовлетворяются требования живучести, как правило, организуется путем поиска оптимальных или квазиоптимальных вариантов структурных преобразований и способов защиты элементов систем.

Под живучестью телекоммуникационной сети (ТКС) понимают свойство, характеризующее способность сети эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) вследствие некоторых

неблагоприятных внешних воздействий или восстанавливать данную способность в течение заданного времени [2, 3]. Существенный вклад в разработку вопросов теории живучести систем различного назначения внесли работы В.М. Вишневого, Ю.Ю. Громова, А.Г. Додонова, В.Ф. Крапивина, И.А. Рябинина, В.К. Попкова, Ю.И. Стекольников и др. Следует отметить, что на данном этапе развития теории живучести пока не сложились условия, позволяющие сформулировать и реализовать единый подход к разработке задач оптимизации характеристик живучести различных типов систем. Существенная специфика в построении и функционировании ассоциативных, ассоциативно-структурных и структурных систем вынуждает искать специфические подходы при постановке и решении соответствующих оптимизационных задач. Тем не менее, сформулированы принципы, руководство которыми приводит к положительному эффекту в деле обеспечения живучести систем различного назначения [2].

Принцип 1. Элементы системы должны обладать малой структурной значимостью и высокой стойкостью.

Принцип 2. Структура системы должна обеспечивать возможно большее или достаточное (в задачах оптимизации) число состояний способности.

Принцип 3. Состояния способности системы должны обеспечиваться возможно меньшим числом элементов.

Принцип 4. Различные состояния способности системы должны обеспечиваться различными элементами.

Конкретные способы обеспечения живучести систем, как правило, являются реализацией одного или одновременно нескольких принципов. При этом важным вопросом является выбор показателей живучести, которые должны удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

- а) по смысловому содержанию выбор должен соответствовать определению свойства живучести систем;
- б) показатель должен обеспечивать достаточно высокий уровень системности исследований;
- в) показатель должен обеспечивать возможность разработки моделей живучести систем, доступных для проведения исследований и выполнения расчетов;
- г) показатель должен быть чувствительным к манипуляциям на уровне характеристик свойства живучести.

Особую актуальность сегодня приобрели задачи синтеза живучих систем, оценки, обеспечения и повышения живучести систем, что определяется потребностями практики. Разработка подходов к решению задач синтеза живучих систем, оценки, обеспечения и повышения живучести систем предполагает поиск и формулирование системы устойчивых взглядов (правил, принципов) на возможность эффективного управления свойством живучести систем. Известно, что оценка показателей живучести систем осуществляется аналитическими методами. Существуют различные аналитические модели и методы синтеза живучих систем, оценки, обеспечения и повышения живучести систем различного назначения, основанные на разнообразных подходах – на использовании теоретико-игрового, энтропийного подходов, на использовании логико-вероятностных, детерминированных и стохастических моделей невозстанавливаемых и восстанавливаемых систем, а также методы, которые основаны на использовании искусственного интеллекта [2 – 4]. Отметим, что рассмотренные общие проблемы синтеза

живучих систем, оценки, обеспечения и повышения живучести систем различного назначения относятся и к ТКС.

Постановка задачи исследования

Телекоммуникационные сети относятся к структурным системам, в соответствии с чем особое значение для ТКС приобретают вопросы обеспечения структурной живучести, что определяет необходимость разработки методов обеспечения структурной живучести ТКС, основанных на использовании потокового подхода [3, 5]. Целью данной работы является разработка метода обеспечения структурной живучести ТКС, реализующего потоковый подход с использованием предложенного показателя структурной живучести ТКС, определяемого нижней границей структурной живучести, обеспечивающей гарантированное устойчивое функционирование ТКС, достижение требуемого значения которой обеспечивается введением структурной избыточности (поскольку свойством живучести обладают только избыточные системы), осуществляемой с использованием оптимизационной процедуры резервирования тех ветвей сечений, разделяющих множество путей, организуемых для обслуживания поступающих в сеть потоков требований, выбор которых определяется на основе максимизации эффективности каждого этапа резервирования.

Выбор показателя структурной живучести телекоммуникационной сети

Выбор показателя живучести системы определяется исключительно типом задачи, решаемой в ходе исследования. Для ТКС показатели структурной живучести интерпретируются как количественные меры связности для структуры графа, при этом задачи оценки структурной живучести сети можно свести к задачам анализа связности графов, оценки величины кратчайших путей и максимальных потоков, оценки вероятности формирования работоспособной структуры в случае неблагоприятных внешних воздействий и т.п. [3, 5]. В работе [2] отмечается, что все многообразие задач исследования и разработки живучих систем может быть обеспечено тремя критериями – пригодности, сравнительной оценки и оптимальности. Основной задачей ТКС является обслуживание потоков требований различных классов в соответствии с требуемым качеством обслуживания QoS (Quality of Service) для соответствующих классов потоков, что обуславливает необходимость в разработке показателя, базирующегося на так называемом «потоковом» подходе. Именно потоковый подход позволяет [2, 3, 5]:

- обосновать требования к структуре ТКС с учетом заданного (директивного) уровня показателя структурной живучести;
- выбрать лучший по показателю структурной живучести проект системы из рассматриваемых альтернатив;
- обеспечить показателю структурной живучести максимальное значение в некоторой области допустимых значений.

В данной работе на основе использования потокового подхода в качестве показателя структурной живучести предложена нижняя граница структурной живучести (НГСЖ) ТКС, обеспечивающая гарантированное устойчивое функционирование ТКС, определяемая как средневзвешенное значение вероятностей непоражения множества допустимых сечений сети, разделяющих множество допустимых путей, организуемых для обслуживания поступающих в сеть потоков требований, оптимизация значения которого состоит в достижении его максимального значения при существующих ограничениях.

Выбор показателя – НГСЖ – определяется тем, что данный показатель удовлетворяет основным требованиям (а) – (г) [2], а именно:

- а) по смысловому содержанию НГСЖ определяется на основе потокового подхода, который используется для решения задач синтеза живучих систем, оценки, обеспечения и повышения живучести систем;
- б) достаточно высокий уровень системности исследований обеспечивается учетом множеств всех допустимых путей, организуемых для обслуживания поступающих в сеть потоков требований, и множеств всех допустимых сечений, разделяющих эти пути;
- в) показатель НГСЖ имеет высокую степень формализации, что позволяет выполнить его расчет и провести исследование его изменений при изменении ситуации в ТКС;
- г) расчет НГСЖ осуществляется на основе учета требований на передачу потоков информации, поступивших в сеть, и возможностей по их обслуживанию, что позволяет обеспечить чувствительность показателя к любым манипуляциям на уровне характеристик ТКС.

Кроме того, данный показатель полностью соответствует критериям разработки живучих систем – пригодности, сравнительной оценки и оптимальности. НГСЖ определяется на основе потокового подхода, что соответствует критерию пригодности; определение достижения показателем требуемого значения осуществляется на основе учета существующих ограничений, что определяется критерием сравнительной оценки; требуемое значение НГСЖ достигается в процессе оптимизации (максимизации) его значения, что соответствует критерию оптимальности.

Метод обеспечения структурной живучести телекоммуникационной сети

Процедурная модель метода обеспечения структурной живучести ТКС представлена на рис. 1.

Расчет и максимизация НГСЖ осуществляется следующим образом.

1. Формирование исходных данных

Имеется ТКС, модель которой описывается взвешенным графом с заданными матрицами вероятностей непоражения ветвей сети (ребер графа) $P = [p_{st}]$ и требований на передачу потоков информации $\Phi = [\varphi_{st}]$ ($s, t = \overline{1, n}$, $s \neq t$, n – количество пунктов сети). Каждый поток φ_{st} принадлежит соответствующему классу k ($k = \overline{1, K}$, K – число классов потоков). Каждому классу k присваивается приоритет исходя из заданного показателя качества обслуживания QoS. Для потоков φ_{st} соответствующего класса задается их значимость – «вес» w_{st} . Задаются также:

- а) требуемое значение нижней границы структурной живучести НГСЖ_{тр} ТКС, при котором обеспечивается гарантированное устойчивое функционирование ТКС с заданным качеством обслуживания поступающих в сеть потоков требований φ_{st} ($s, t = \overline{1, n}$, $s \neq t$, n – число пунктов сети), достижение которого обеспечивается введением минимально необходимого дополнительного резервного оборудования стоимостью СДР – при решении прямой задачи оптимального резервирования;
- б) предельная стоимость дополнительного резервного оборудования СДР_{пр}, при введении которого обеспечивается возможность достижения максимального (при данных затратах на резервирование) значения нижней границы структурной живучести НГСЖ ТКС – при решении обратной задачи оптимального резервирования.

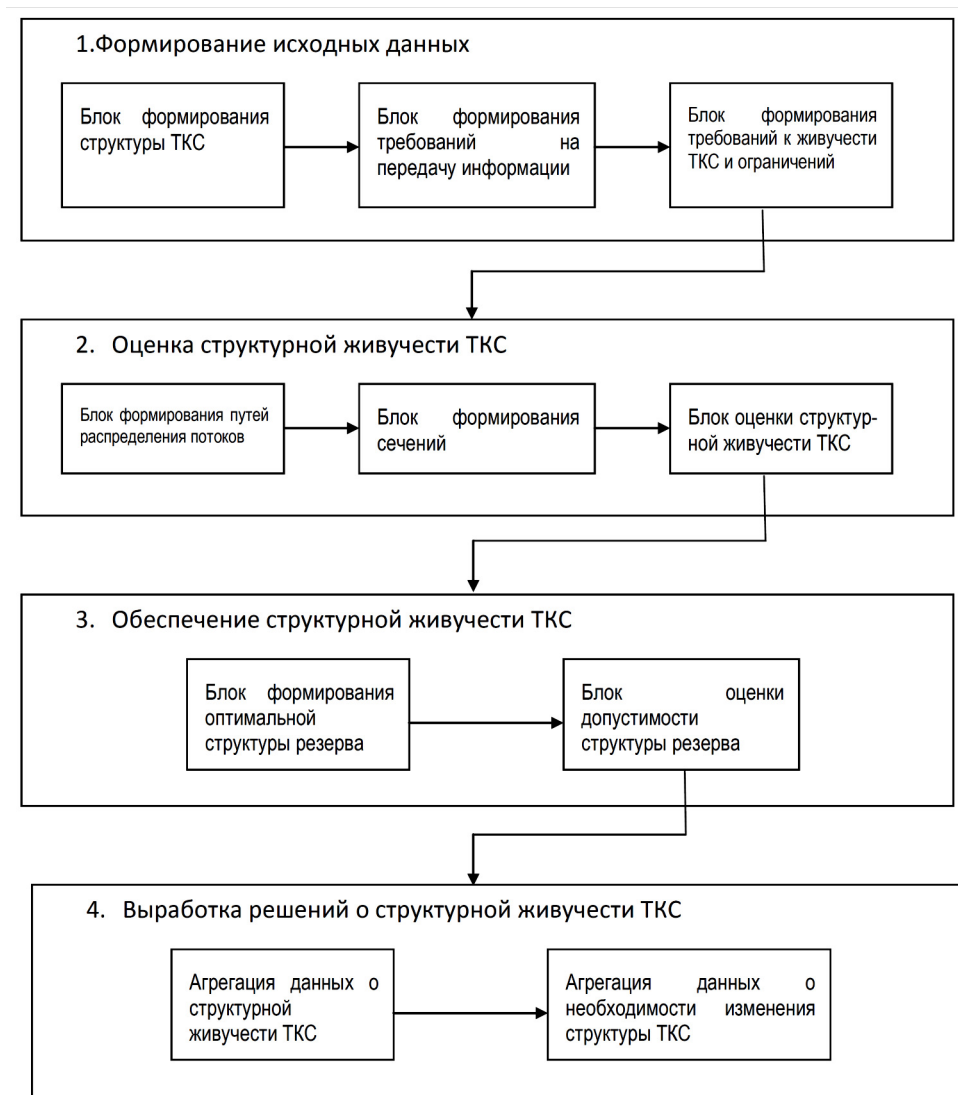


Рисунок 1. Процедурная модель метода обеспечения структурной живучести ТКС

2. Оценка структурной живучести ТКС

Для каждого требования на передачу потоков информации φ_{st} ($s, t = \overline{1, n}$, $s \neq t$, n – число пунктов сети) формируется множество путей m_{st} для его обслуживания. С использованием представленных принципов 1-4 обеспечения живучести систем среди множества путей m_{st} выбираются то множество допустимых путей $m_{st}^{доп}$, которые соответствуют указанным принципам, и для них формируется множество сечений, которые ранжируются также с учетом указанных принципов. В результате формируется множество допустимых сечений $\sigma_{st}^{доп}$. Для каждого требования φ_{st} осуществляется расчет значения вероятности непоражения π_{st} множества допустимых сечений $\sigma_{st}^{доп}$ [6].

Вероятность непоражения π_{st}^l l -го сечения $\sigma_{st}^l \in \sigma_{st}^{доп}$ ($l = \overline{1, L}$, L – количество сечений, составляющих множество $\sigma_{st}^{доп}$) рассчитывается как вероятность параллельного соединения ветвей β_{xy} , которые составляют сечение σ_{st}^l :

$$\pi_{st}^l = 1 - \prod_{\beta_{xy} \in \sigma_{st}^l} (1 - \rho_{xy}) \quad (1)$$

Вероятность непоражения π_{st} всех допустимых сечений $\sigma_{st}^{доп}$, которые разделяют пункты s и t , рассчитывается как вероятность последовательного соединения сечений:

$$\pi_{st} = \prod_{\sigma_{st}^l \in \sigma_{st}^{доп}} (1 - \prod_{\beta_{xy} \in \sigma_{st}^l} (1 - \rho_{xy})) \quad (2)$$

Нижняя граница структурной живучести НГСЖ ТКС определяется как средневзвешенная величина по всем рассчитанным значениям π_{st} для множеств сечений $\sigma_{st}^{доп}$, при этом веса w_{st} , с которыми учитываются значения π_{st} в выражении (3), зависят от класса k ($k = \overline{1, K}$, K – число классов потоков) потоков требований φ_{st} ($s, t = \overline{1, n}$, $s \neq t$, n – число пунктов сети):

$$\text{НГСЖ} = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st} \quad (3)$$

Выражение (3) для расчета НГСЖ используется при условии (4):

$$\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n w_{st} = 1. \quad (4)$$

Если значения w_{st} не связаны нормировочным условием (4), то НГСЖ рассчитывается в соответствии с выражением (5):

$$\text{НГСЖ} = \left(\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st} \right) / \left(\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n w_{st} \right). \quad (5)$$

Полученное значение НГСЖ сравнивается с требуемым значением нижней границы структурной живучести НГСЖ_{тр} ТКС:

$$\text{НГСЖ} \geq \text{НГСЖ}_{тр}. \quad (6)$$

При выполнении условия (6) – значение показателя структурной живучести ТКС соответствует требуемому, при невыполнении – переход к осуществлению последовательных шагов оптимального резервирования ветвей сечений, разделяющих потоки требований φ_{st} в сети для обеспечения требуемого значения показателя структурной живучести ТКС – к этапу 3 метода.

3. Обеспечение структурной живучести ТКС

Возможна постановка двух оптимальных задач математического программирования, связанных с обеспечением ТКС достаточным количеством резервных элементов для достижения требуемого значения показателя структурной живучести ТКС.

1. Необходимо найти такое количество резервных элементов для сети (системы), чтобы требуемый показатель структурной живучести сети в целом обеспечивался при минимальных суммарных затратах на все резервные элементы.
2. Необходимо найти такое количество резервных элементов для сети (системы), чтобы при заданных допустимых затратах на систему резервных элементов в целом обеспечить максимально возможный показатель структурной живучести сети.

В формальной записи эти задачи имеют следующий вид.

I. Прямая задача

Найти вектор оптимальной структуры резерва $M(m_1, m_2, \dots, m_b)$, обеспечивающий минимум функции

$$\text{СДР} = \sum_{i=1}^b c_i m_i \rightarrow \min \quad (7)$$

при условии

$$\text{НГСЖ} = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st} \geq \text{НГСЖ}_{\text{тр}} \quad (8)$$

(или при невыполнении условия (4) $\text{НГСЖ} = ((\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st}) / (\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n w_{st})) \geq \text{НГСЖ}_{\text{тр}}$).

II. Обратная задача

Найти вектор оптимальной структуры резерва $M(m_1, m_2, \dots, m_b)$, обеспечивающий максимум функции

$$\text{НГСЖ} = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st} \rightarrow \max \quad (9)$$

(или при невыполнении условия (4) $\text{НГСЖ} = ((\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n \pi_{st} \cdot w_{st}) / (\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n w_{st})) \rightarrow \max$)

при условии

$$\text{СДР} = \sum_{i=1}^b c_i m_i \leq \text{СДР}_{\text{пр}} \quad (10)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

НГСЖ – нижняя граница структурной живучести сети (НГСЖ_{тр} – требуемое необходимое значение);

СДР – стоимость дополнительного резервного оборудования сети (СДР_{пр} – заданное предельное значение);

m_i – число резервных элементов на i -м участке системы;

b – количество участков системы;

c_i – стоимость одного элемента i -го участка системы;

π_{st} – вероятность непоражения множества всех допустимых сечений $\sigma_{st}^{\text{доп}}$, которые разделяют пункты s и t , рассчитывается в соответствии с выражением (2);

w_{st} – заданная значимость («вес») потоков φ_{st} соответствующего класса;

$s, t = \overline{1, n}$, $s \neq t$, n – число пунктов сети;

Участки системы – это ветви сети, образующие сечения для заданных потоков требований на передачу информации. Последовательная нумерация ветвей сети принята для удобства формулировки задачи прямого (обратного) резервирования.

Для решения этих двойственных задач оптимального резервирования наиболее эффективно применение градиентного метода. Удобство этого метода заключается в том, что для решения задачи в этом случае не нужно знать аналитического выражения исследуемой функции, а нужно лишь иметь значение функции

и ее первых частных производных в точках, в какие мы попадаем в процессе движения к экстремуму функции [6].

Создание оптимальной резервируемой системы представим в виде следующего многошагового процесса. Рассматривается система, которая состоит из b участков, при том, что на начальном этапе процесса допускается, что ни у одного из участков нет резервных элементов. На первом шаге процесса отыскивается такой участок, добавление к которому одного резервного элемента дает наибольший "удельный" выигрыш в приросте показателя структурной живучести системы в целом, то есть наибольший прирост на единицу стоимости. На втором шаге отыскивается следующий участок (включая и тот, к которому только что был присоединен резервный элемент), добавление к которому одного резервного элемента дает опять наибольшее относительное увеличение показателя структурной живучести системы в целом. Аналогичным способом процесс построения оптимальной системы продолжается дальше.

Допустим, что на некотором шаге построенного таким образом процесса каждый i -й участок уже имеет по m_i резервных элементов, то есть всего сделано $k = \sum_{i=1}^b m_i$ шагов описанного процесса.

Для указанного k -го шага вероятность непоражения $\pi_{st}(k)$ всех допустимых сечений $\sigma_{st}^{доп}$, разделяющих пункты s и t , которая обеспечивается в результате выполняемого резервирования, рассчитывается в соответствии с выражением (11):

$$\pi_{st}(k) = \pi_{st}(m_1, m_2, \dots, m_b) = \prod_{\sigma_{st}^i \in \sigma_{st}^{доп}} (1 - \prod_{i \in \sigma_{st}^i} (1 - \pi_i(m_i))). \quad (11)$$

Здесь $\pi_i(m_i)$ – вероятность непоражения i -го участка (ветви ТКС), обеспечиваемая при кратности резервирования m_i .

$\pi_{st}(k)$ на основе выражения (11) рассчитывается для всех заданных потоков требований φ_{st} ($s, t = \overline{1, n}$). В результате определяется НГСЖ в соответствии с выражением (3) (или (5), если не выполняется условие(4)).

Суммарная стоимость резервных элементов после выполнения k -го шага будет равняться (12):

$$C(k) = C(m_1, m_2, \dots, m_b) = \sum_{i=1}^b c_i m_i. \quad (12)$$

Отметим, что $k = \sum_{i=1}^b m_i$.

Для выбора направления движения на $(k + 1)$ -ом шаге процесса следует прибавить еще один резервный элемент к такому i -му участку (i -й ветви) ($i = \overline{1, b}$), для которого максимальной является величина:

$$\gamma(m_i + 1) = \frac{1}{c_i} [(\pi_{st}(m_1, m_2, \dots, m_i + 1, \dots, m_b) - \pi_{st}(m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_b))].$$

После преобразования получим:

$$\gamma(m_i + 1) = \frac{1}{c_i} \prod_{i=1}^b \pi_i(m_i) \left[\frac{\pi_i(m_i + 1)}{\pi_i(m_i)} - 1 \right] = \text{НГСЖ}(k) \frac{\pi_i(m_i + 1) - \pi_i(m_i)}{c_i \cdot \pi_i(m_i)} \quad (13)$$

Здесь НГСЖ(k) – значение показателя структурной живучести ТКС, полученное в результате выполнения k шагов процесса обеспечения структурной живучести. Поскольку величина НГСЖ(k) входит множителем при расчете величины $\gamma(m_i+1)$ (выражение (13)) для всех $i = \overline{1, b}$, можно упростить вычислительную процедуру, связанную с проведением процесса построения оптимальной системы. Очевидно, что содержание процесса не изменится, если на каждом шаге выбирать тот участок, в котором наибольшей является величина

$$\gamma(m_i+1) = \frac{\pi_i(m_i+1) - \pi_i(m_i)}{c_i \cdot \pi_i(m_i)} \quad (14)$$

Поэтому, рассчитав для каждого участка значение $\gamma(m_i+1)$, можно определить, в какой последовательности нужно добавлять резервные элементы, чтобы, остановившись на любом шаге процесса, мы получили наилучшее решение для данного шага. Процесс останавливается на таком k -ом шаге, при котором для задачи первого вида (прямой) выполняется условие (15):

$$\text{НГСЖ}(k-1) < \text{НГСЖ}_{\text{тр}} \leq \text{НГСЖ}(k), \quad (15)$$

для задачи второго вида (обратной) выполняется условие (16):

$$\text{СДР}(k) \leq \text{СДР}_{\text{пр}} < \text{СДР}(k-1). \quad (16)$$

4. Выработка решений о структурной живучести ТКС

При выполнении условия (15) (для прямой задачи вида (7) с ограничением (8)) или условия (16) (для обратной задачи вида (9) с ограничением (10)) – значения требуемых показателей структурной живучести сети достигнуты. В противном случае – выработка следующих возможных рекомендаций по:

- Изменению значений элементов матрицы вероятностей непоражения ветвей сети на вычисленную в результате решения задачи величину;
- Изменению классов (приоритетов) и «весов» определенных требований;
- Ограничению величины поступающих в сеть требований;
- Изменению задаваемых предельно допустимых значений нижней границы структурной живучести НГСЖ_{тр} ТКС – при решении прямой задачи оптимального резервирования или предельной стоимости дополнительного резервного оборудования СДР_{пр} – при решении обратной задачи оптимального резервирования.

Предложенный метод может быть использован в случае, когда множества допустимых путей и допустимых сечений являются множества всех возможных путей и всех возможных сечений в ТКС.

Пример расчета и максимизации НГСЖ

Реализацию предложенного метода обеспечения структурной живучести ТКС выполним для сети, представленной на рис.2.

1. Формирование исходных данных.

Сеть обслуживает поступающие потоки требований: $\varphi_{14}, \varphi_{36}, \varphi_{35}, \varphi_{42}$. Приоритеты всех потоков заданы одинаковыми. Заданы стоимости резервного оборудования ветвей (в условных единицах) и значения вероятностей непоражения ветвей сети, которые приняты одинаковыми для основного и резервного оборудования ветвей (табл.1).

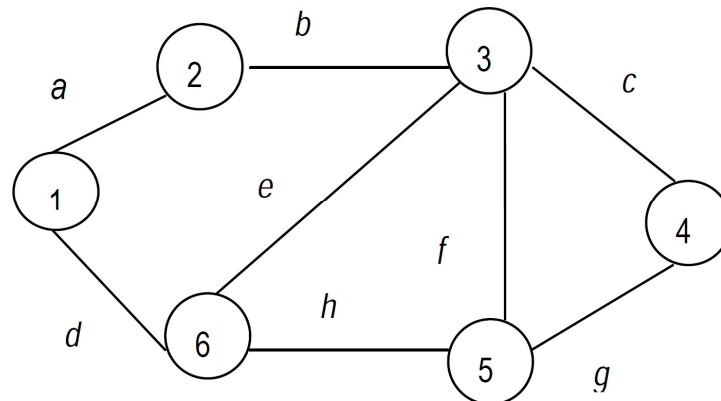


Рисунок 2. Граф сети

Таблица 1. Исходная информация по ветвям сети

Ветвь	a	b	c	d	e	f	g	h
Стоимость (у.е.)	1	2	3	4	4	3	2	1
Вероятность непоражения	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Необходимо минимизировать затраты на резервное оборудование СДР, обеспечив требуемое значение нижней границы структурной живучести ТКС НГСЖ_{тп} = 0,9950. Следовательно, требуется решить прямую задачу оптимального резервирования.

2. Оценка живучести ТКС

Для каждого заданного требования φ_{st} формируется множество путей m_{st} для его обслуживания. Полученный результат представляется в дизъюнктивной нормальной форме ДНФ. Так, для требования φ_{14} получим множество путей (17) [6]:

$$m_{14} = abc + dhg + dec + dhfc + defg + abfg + abchg. \quad (17)$$

Здесь символ «+» используется для обозначения операции дизъюнкции.

Из множества полученных путей для каждого требования выбираются допустимые пути (соответствующие принципам 1 – 4). Учитывая заданные значения вероятностей непоражения ветвей (табл. 1), считая допустимыми пути, ранг которых $r \leq 3$, получим в результате из множества (17) следующее множество допустимых путей (18):

$$m_{14}^{r \leq 3} = abc + dhg + dec. \quad (18)$$

(Ранг r пути – это число ветвей, образующих путь.)

Аналогично для всех остальных заданных требований сформируем множество допустимых путей в ДНФ (19):

$$\begin{cases} m_{36}^{r \leq 3} = e+fh+cgh+bad \\ m_{35}^{r \leq 3} = f + cg + eh \\ m_{42}^{r \leq 3} = cb + gfb \end{cases} \quad (19)$$

Для расчета показателя структурной живучести – НГСЖ – для полученных допустимых путей следует определить разделяющие их множества сечений. Множество сечений формируется как двойственная булева функция относительно множества путей, а именно: все операции логического сложения заменяются на операции логического умножения и наоборот – все операции логического умножения заменяются на операции логического сложения. В результате этих преобразований формируется конъюнктивная нормальная форма КНФ. Затем все скобки в КНФ раскрываются с использованием тождеств и законов булевой алгебры и выражение функции из КНФ преобразуется в ДНФ (но уже для множества сечений) [6]. Среди полученного множества сечений выбираются те, которые соответствуют принципам 1 – 4, т.е. сечения минимального ранга (с минимальным числом образующих их ветвей).

Отметим, что в данном примере заданы одинаковыми значения p_{xy} – вероятности непоражения ветвей β_{xy} , следовательно, выбор как путей, так и сечений осуществляется по рангу, однако, в случае различных значений p_{xy} допустимыми следует считать пути и сечения с максимальным значением вероятности

непоражения. При этом вероятность непоражения P_{st}^k k -го пути μ_{st}^k из пункта s в пункт t рассчитывается на основе выражения (20):

$$P_{st}^k = \prod_{\beta_{xy} \in \mu_{st}^k} p_{xy} . \quad (20)$$

Вероятность непоражения Π_{st}^l l -го сечения σ_{st}^l рассчитывается в соответствии с выражением (1).

В данном примере для множеств допустимых путей $m_{14}^{r \leq 3}$, $m_{36}^{r \leq 3}$, $m_{35}^{r \leq 3}$, $m_{42}^{r \leq 3}$ получим множества (21) допустимых сечений ранга $r \leq 3$:

$$\begin{cases} \sigma_{14}^{r \leq 3} = cd + ch + cg + ad \\ \sigma_{36}^{r \leq 3} = aeh + deh \\ \sigma_{35}^{r \leq 3} = fce + fch + fge + fgh \\ \sigma_{42}^{r \leq 3} = b + cg + cf \end{cases} \quad (21)$$

В соответствии с данными табл. 1 выполним расчет вероятности непоражения полученных множеств допустимых сечений на основе выражения (2). Для множества сечений $\sigma_{14}^{r \leq 3}$ получим $\pi_{14} = 0.9606$, для множества сечений $\sigma_{36}^{r \leq 3}$ – $\pi_{36} = 0.9980$. Далее получим: $\pi_{35} = 0.9960$; $\pi_{42} = 0.8821$. Рассчитаем показатель структурной живучести сети в соответствии с выражением (3): НГСЖ = 0.9512 (при расчете НГСЖ значения всех весов приняты: $w_{st} = 0,25$).

Поскольку условие (8) получения оптимального решения не выполняется, – полученное значение НГСЖ менее требуемого: $0.9512 < 0,9950$, – осуществляется переход с следующему этапу расчетов.

3. Обеспечение структурной живучести ТКС

Выполнение данного этапа метода осуществляется в постановке задачи (7) при ограничении (условии) (8). Обеспечение структурной живучести ТКС осуществляется с использованием градиентного метода на основе расчетов в соответствии с выражением (14).

Результаты первого шага расчетов, на основе которых выбирается участок сети (ветвь), подключение к которому резерва обеспечивает максимальную эффективность шага на основе (14), представлены в табл. 2.

В Табл. 2 в столбцах 2 – 5 шага «0» указаны значения вероятностей непоражения множеств сечений (21), в столбцах 6, 7 и 8 – рассчитанное значение НГСЖ, стоимость вводимого резервного оборудования

(равная нулю для шага «0») и значение приращения показателя структурной живучести, соответственно. Для шага «1» представлены расчеты изменения каждого из представленных показателей при введении резервного оборудования на каждом из участков (a, b, \dots, h). В результате формируется столбец 8 значений приращения показателя структурной живучести, максимальное значение элемента которого и определит выбор оптимального направления процесса поиска. Как видим, на первом шаге выбирается участок « b ». Резервирование обеспечивает НГСЖ = 0.9812. Поскольку $0.9812 < 0.9950$, процесс продолжается до получения оптимального решения, т.е. до выполнения условия (8). Результаты последующих расчетов представлены в табл. 3.

В результате получен вектор оптимальной структуры резерва:

$$M(m_a, m_b, m_c, m_d, m_e, m_f, m_g, m_h) = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0).$$

Это означает, что следует добавить по одному резервному элементу на участках a, b и c , что обеспечивает значение показателя живучести НГСЖ = 0,9952. При этом минимально возможная стоимость резервного оборудования составляет СДР = 2 + 3 + 1 = 6 у.е.

В случае решения задачи с ограниченной стоимостью резервного оборудования, т.е. когда задается СДР_{пр}, может оказаться, что полученное значение НГСЖ не удовлетворяет существующим требованиям к структурной живучести ТКС. В этом случае, на основе продолжения процесса резервирования, создается возможность выработки необходимых рекомендаций относительно изменения исходных данных.

Таблица 2. Результаты расчетов первого шага обеспечения требуемого значения НГСЖ

№ шага	П ₁₄	П ₃₆	П ₃₅	П ₄₂	НГСЖ	С	$\gamma(m_i+1)$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.9606	0.9980	0.9960	0.8821	0.9512	0	0
1							
a	0.9693	0.9989	0.9960	0.8821	0.9616	1	0.0025
b	0.9606	0.9980	0.9960	0.9703	0.9812	2	0.0115
c	0.9870	0.9980	0.9978	0.8982	0.9703	3	0.0039
d	0.9781	0.9989	0.9960	0.8821	0.9638	4	0.0012
e	0.9606	0.9998	0.9978	0.8821	0.9601	4	0.0002
f	0.9606	0.9980	0.9996	0.8901	0.9621	3	0.001
g	0.9693	0.9980	0.9978	0.8901	0.9638	2	0.0024
h	0.9693	0.9998	0.9978	0.8821	0.9623	1	0.0032

Таблица 3. Последовательность шагов обеспечения структурной живучести системы

№ шага	П ₁₄	П ₃₆	П ₃₅	П ₄₂	НГСЖ	С	$\gamma(m_i+1)$
0	0.9606	0.9980	0.9960	0.8821	0.9592	0	0
1(b)	0.9606	0.9980	0.9960	0.9703	0.9812	2	0.0115
2(c)	0.9870	0.9980	0.9978	0.9880	0.9927	2+3	0.0039
3(a)	0.9960	0.9989	0.9978	0.9880	0.9952	2+3+1	0.0025

Заключение

Представлен метод обеспечения структурной живучести ТКС на основе предложенного показателя живучести – нижней границы структурной живучести, обеспечивающей гарантированное устойчивое функционирование ТКС. Предложен способ определения нижней границы структурной живучести. Задача обеспечения структурной живучести ТКС сформулирована как задача математического программирования. Представлен метод достижения требуемого значения нижней границы структурной живучести на основе введения структурной избыточности путем использования оптимизационной процедуры резервирования ветвей сечений, выбор которых определяется на основе максимизации эффективности каждого этапа резервирования. Решение оптимизационной задачи введения структурной избыточности при заданных ограничениях либо позволяет обеспечить требуемый показатель структурной живучести ТКС, либо обеспечивает выработку рекомендаций по: изменению значений элементов матрицы вероятностей непоражения ветвей сети на вычисленную в результате решения задачи величину; изменению классов (приоритетов) и «весов» определенных требований; ограничению величины поступающих в сеть требований; изменению задаваемых предельно допустимых значений нижней границы структурной живучести НГСЖтр ТКС – при решении прямой задачи оптимального резервирования или предельной стоимости дополнительного резервного оборудования СДРпр – при решении обратной задачи оптимального резервирования. Предложенный метод может быть использован в случае, когда множества допустимых путей и допустимых сечений являются множества всех возможных путей и всех возможных сечений в ТКС.

Выполнен пример реализации предложенного метода обеспечения структурной живучести телекоммуникационной сети.

Благодарности

Настоящая работа была выполнена при поддержке интернационального проекта ITNEA XXI Института информационных теорий и их приложений FOI ITNEA и Ассоциации ADUIS Украина (Ассоциация разработчиков и пользователей интеллектуальных систем), в связи с чем автор выражает свою искреннюю благодарность.

Литература

1. Рекомендация ITU-T Y.3001: Глобальная информационная инфраструктура, аспекты протокола интернет и сети последующих поколений [Электронный ресурс] / ITU: Committed to connecting the world.— Режим доступа: [www/ http://www.itu.int/](http://www.itu.int/) — 10.03.2012 г. — Загл. с экрана.
2. Стекольников Ю.И. Живучесть систем – СПб.: Политехника, 2002. – 155с.
3. Додонов А.Г., Ландэ Д.В. Живучесть информационных систем. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
4. Синтез и анализ живучести сетевых систем : монография / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, К.А. Набатов, О.Г. Иванова. – М. : «Изд-во Машиностроение-1», 2007. – 152 с.
5. Князева Н.О. Повышение структурной живучести телекоммуникационной сети., International Journal Information models and analyses, 2013.– V2, №3. – P. 275-284.
6. Князева Н.О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч.2. Методи аналізу і синтезу комп'ютерних систем і мереж, Одеса: СПД, 2012. – 240 с.

Authors' Information



Нина Князева – Факультет информационных технологий и кибербезопасности Одесской национальной Академии пищевых технологий, профессор, заведующая кафедрой информационных систем и сетей; ул. Дворянская, 1/3, Одесса-26, 65026, Украина; тел. (048)-7209176; моб. (38067)-430-17-28; e-mail: knyazeva@ukr.net.

Главные области научного исследования: Управление в телекоммуникационных сетях, проблемы повышения надежности и живучести телекоммуникационных сетей

The Method of the Ensurance of Structural Survivability of Telecommunication Network

Nina Kniazieva

Summary: One of the most important properties of telecommunication networks to ensure their effective functioning is survivability. To ensure the survivability of telecommunication networks it's required to solve a number of scientific and engineering problems at all stages of their life cycle – design, modernization or improvement, operation. Questions of ensurance of survivability of telecommunication networks are becoming more actual due to the intensive development of telecommunications in the past decade. The synthesis problems of survivability systems, evaluation, ensurance and improvement of structural survivability of the systems, as determined by the needs of practice acquired particular actuality today. The aim of this work is to develop a method of ensurance of structural survivability of telecommunication network (TCN), which implements the streaming approach using the proposed index of structural survivability TCN defined lower boundary of structural survivability, providing a guaranteed stable functioning TCN, the achievement of the desired value which is performed by the introduction of structural redundancy (as the property of survivability possess only redundant systems) using the optimization procedure of the sections branches reservation, the choice of which is determined on the basis of maximizing the effectiveness of each stage of the reservation. The optimization of value of the structural survivability of TCN is to achieve its maximum value at the existing restrictions. The method to ensure structural survivability TCN, based on the formation of sets of admissible routes for each service requirements, for which are formed the sets of admissible sections is developed. Are determined the probable values of unaffecting each section, and for each set of sections, which are formed on the basis of the lower boundary of the structural survivability TCN obtained as an average value of probable unaffecting sections. The paper proposes a developed the method of the ensurance of structural survivability of TCN, which is designed for procedural model, which includes the execution of the sequence of steps: 1) formation of the source data, 2) the evaluation of the structural survivability of TCN, 3) the ensurance structural survivability of TCN, 4) the development of solutions for the structural survivability of TCN. For each stage, are formulated the objectives and are determined ways to decide them. For stage 1) the list and the method to present the initial data are determined; for stage 2) are determined ways of forming sets of admissible routes and obtaining for them sets of

admissible sections, for which are given methods for calculating the probabilities of unaffecting of each sections and the probabilities of unaffecting of all admissible sections which separate points s and t ($s, t = \overline{1, n}, s \neq t, n$ – number of network points), is formulated a condition for the lower bound of the required structural survivability of TCN. In stage 3) optimization problem is formulated to ensure the required value of the lower limit of the structural survivability of TCN as a mathematical programming problem, is shown the feasibility of using the gradient method to solve it, a method of calculating the efficiency of each step of the optimization process. Stage 4) is final. At this stage is drawn the conclusion that the obtained solution of the optimization problem to introduce structural redundancy with in sets of limits or provides the required value of the index of structural survivability TCN or provides the procedure of recommendations on: changing the value of the matrix elements of the probability of unaffecting branches of the network which is computed value by solving the problem; the change of classes (priorities) and the "weights" of certain requirements; limiting values of network requirements, the change of defined limit values, the lower boundary of the structural survivability TCN. The proposed method can be used in the case where the sets of admissible routes and admissible sections are the sets of all possible routes and all possible sections in the TCN.

An example of implementation of the proposed method to ensure structural survivability of the telecommunications network is made.