

УТОЧНЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-12-34-40

Manuscript received 24 October 2024;

Accepted 17 November 2024

Ясинский Сергей Александрович,
Военная академия связи им. Маршала Советского Союза
С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия,
yasinsky777@mail.ru

Васильев Александр Протальонович,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия

Ключевые слова: структурная устойчивость,
транспортное направление, мониторинг
устойчивости, мостиковая схема,
телекоммуникационная сеть, интегральный
коэффициент структурной устойчивости

Уточняя математические модели для мониторинга структурной устойчивости транспортного направления транспортной составляющей телекоммуникационной сети после ее реконструкции, в настоящей исследовательской работе приводятся следующие научные результаты исследования: уточнены математические модели для расчета интегрированного коэффициента структурной устойчивости транспортного направления транспортной сети связи; разработаны математические модели для расчета интегрального коэффициента связности транспортного направления, а так же для расчета интегрированных коэффициентов структурной надежности и структурной живучести транспортного направления. Полученные научные результаты могут быть использованы с применением метода аналогий для иных транспортных сетей из области моделирования и мониторинга разнородных логистических транспортных систем (автомобильных, железнодорожных и др.).

Информация об авторах:

Ясинский Сергей Александрович, д.т.н., профессор, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

Васильев Александр Протальонович, научный сотрудник, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

Ясинский С.А., Васильев А.П. Уточненные математические модели для мониторинга структурной устойчивости транспортных направлений телекоммуникационной сети // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №12. С. 34-40.

For citation:

Iasinskii S.A., Vasiliev A.P. Refined mathematical models for monitoring the structural stability of telecommunication network transport routes. T-Comm, vol. 18, no. 12, pp. 34-40. (in Russian)

Введение

Основу системного проектирования телекоммуникационной сети (ТКС) Единой сети электросвязи (ЕСЭ) РФ составляет синтез, т. к. допущенные ошибки на этой стадии проектирования существенно сказываются на последующих этапах строительства или реконструкции этой сложной транспортной системы связи. Однако, системное проектирование (синтез) ТКС в чистом виде проводить не целесообразно, т. к. ЕСЭ РФ уже построена. По этому, в основном решаются задачи по реконструкции и модернизации ТКС с учетом внедрения новых технологий, увеличения количества пользователей услугами связи, изменения топологической структуры сети с добавлением сетевых узлов и сетевых станций, а также с учетом чрезвычайных ситуаций и иных факторов, требующих обеспечения необходимой структурной устойчивости (СУ) и потоковой устойчивости, т. е. структурно-потоковой устойчивости, которая является составляющей структурно-функциональной устойчивости по выполнению задач в виде главной функции по своевременной передаче информационных потоков (ИП) требуемого объема и с заданным качеством.

Наиболее значимое место в топологическом и организационно-техническом плане строения ТКС занимает транспортная составляющая, т. е. транспортная сеть (ТС), которая находится во взаимосвязи с другими ТС и сетями доступа (СД). В ходе эксплуатации ТС и СД, как структурных составляющих ТКС, для обеспечения требований к структурно-потоковой устойчивости производится учет передачи ИП для множества корреспондирующих пар узлов связи (КПУ).

Если в образованных путях обмена данными отсутствуют общие транзитные узлы связи, то они независимые (НЗП), в противном случае – они зависимые (ЗП). Число НЗП – это коэффициент связности (КС) по НЗП (КСНЗП), а число ЗП – это КС по ЗП (КСЗП). Совместно или порознь эти два разнородных КС могут выражаться в виде интегральных КС (ИКС).

В рамках решения задачи повышения структурно-потоковой устойчивости сети электросвязи первоначальное внимание предьявляется обеспечению ее требуемой СУ, на которой остановимся более подробно путем проведения мониторинга, отслеживая изменения топологической структуры на этапе эксплуатации с учетом ИКС.

1 Основные понятия для моделирования и мониторинга структурной устойчивости транспортных направлений

Коэффициент готовности (КГ) в [1] для оценки надежности сети и коэффициент оперативной готовности (КОГ) для оценки живучести сети рассчитываются как вероятности связности (первичные критерии), что позволяет производить их перемножение в последовательных структурах функциональных сетевых элементов (СЭ) ТС. Различие между КГ и ГОГ зависит только от вида дестабилизирующего фактора (ДСФ), т.е. от того к какому он может быть отнесен – к внутренним или внешним. В качестве вторичного критерия оценки связности принято использовать КСНЗП или ИКС.

Из ГОСТ Р 53111–2008 следует, что: «Перед проведением расчетной оценки устойчивости сети связи необходимо провести предварительный анализ устойчивости сети связи по дополнительным (вторичным) критериям устойчивости. Можно ожидать, что устойчивость сети электросвязи будет достаточной, если: ... структура построения сети

электросвязи такова, что обеспечивает три независимых пути связи для основных направлений связи» [1]. В приведенной цитате используются два неоднозначно трактуемых в технической литературе термина: «путь связи» и «направление связи». Кроме этого, в [1] акцентируется внимание на выполнение требования по обеспечению трех КС по НЗП для основных направлений связи направлениях связи.

Что касается понятия пути, то иногда возникает путаница этого понятия с понятием маршрута, а в некоторых случаях они отождествляются. В работе [2] понятие маршрута увязывается с составлением цепи следования по узлам и ребрам неориентированного графа, а понятие пути – по вершинам и дугам ориентированного графа. Более современное представление об этих двух понятиях в компьютерных сетях приведено в работе [3], где предлагается использовать понятия пути и маршрута в независимости от математической модели для СД или ТС, т.е. в независимости от вида графа (ориентированного или неориентированного) с включением в маршрут пути для передачи данных в форме пакетов с ИП.

Так как путь передачи данных разбивается на участки в рамках маршрута передачи пакетов, то предлагается использовать условие вложенности слоев архитектуры ТКС для классификации КПУ в соответствии с ее явно выделенной функциональностью (ТС и СД), которая приведена в таблице 1.

Таблица 1
Классификация КПУ

Название сети	Классификация КПУ архитектуры ТКС	
	Название КПУ	Обозначение КПУ
ТС	Транспортное направление (ТН)	ТН
СД	Направление СД (НСД), т. е. телекоммуникационное направление (ТКН)	НСД, т. е. ТКН

В соответствии с нашей решаемой задачей в качестве КПУ будем использовать ТН с реальным ИКС.

2 Уточненная математическая модель транспортной сети для мониторинга ее структурной устойчивости

Одним из основных условий проведения мониторинга является завершение значительной модернизации (реконструкции) ТС, после которой возникает необходимость осуществления (после строительства или предыдущей модернизации сети) повторной оценки степени обеспечения требований к СУ.

Так как ТС на физическом уровне представляет собой совокупность СЭ в виде транспортных узлов (ТУ) и линий связи (ЛС), то в качестве ее математической модели принято использовать граф [4-7]:

$$G(A, B), A = \{a_i; i = \overline{1, N}\}, B = \{b_j; i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}, \quad (1)$$

где вершины графа соответствуют ТУ, а ребра графа – линиям связи (ЛС) [8, 9].

Проведение мониторинга структурной устойчивости ТН после завершения значительной модернизации (реконструкции) ТС с целью увеличения пропускной способности или приданию ей новых физических свойств (повышение

надежности и живучести, изменение топологической структуры, реализация новых технологических решений и др.), относится к задаче анализа (оценки возможностей) сети, не смотря на присутствие в ней ряда частных задач синтеза.

При постановке решаемой задачи анализа устойчивости ТС после ее модернизации (реконструкции) и в ходе мониторинга следует учитывать необходимость максимального сохранения преемственности коммутационных соединений в устройствах коммутации [8].

На уровне общепринятого в многоканальной электросвязи понятия образования каналов передачи (КП) будем понимать [9, 10], что ТС – это есть совокупность типовых КП, образованная на базе ТУ и соединяющих их ЛС.

Множеству транспортных направлений

$$Z = \{z_k, k = \overline{1, m}\}, \quad (2)$$

ставятся в соответствие потребности по образованию, соответствующего множество основных каналов передачи [11]:

$$V = \{v_{z_k}; z_k \in Z\}. \quad (3)$$

Математическая модель ТС (1) для мониторинга структурной устойчивости транспортных направлений (2) должна учитывать требования к коэффициентам связности, а выполнение требований к потоковой устойчивости с требованием (3) вынесем в ограничения. То есть общую задачу обеспечения требований к структурно-потоковой устойчивости декомпозируем на две подзадачи, где первая – это обеспечение требований к структурной устойчивости, а вторая – к потоковой устойчивости. При этом целью нашего исследования является решение первой подзадачи – обеспечение требований к структурной устойчивости.

Пути передачи информационных потоков предоставляются через сети доступа к маршрутизаторам для формирования маршрутов с использованием протоколов нахождения кратчайших путей и автоматического распространения информации о топологии по всем доступным маршрутам или создания маршрутов из виртуальных путей на IP-сети [11-14].

Пропускная способность u_{ij} ребра $b_{ij} \in B$ характеризуется суммой основных КП из дискретного ряда канальных емкостей, зависящих от используемых типов цифровых систем передачи из заданного перечня и должна позволять удовлетворять потребности каждого транспортного направления $z_k \in Z$ в образовании $v_{z_k} \in V$ с требуемым коэффициентом связности, т. е. когда реальный КС $k_{cv z_k}^p$ по отношению к требуемому КС $k_{cv z_k}^{mp}$ соответствует следующему условию [8, 15]:

$$k_{cv z_k}^p \geq k_{cv z_k}^{mp}. \quad (4)$$

Для анализа (оценки) структурной устойчивости транспортной сети наряду с общепринятой в теории графов квадратной матрицей связности вводятся дополнительно следующие матрицы:

матрица длин ребер $b_{ij} \in B$ графа (1), т.е. длин линий связи,

$$L = \|l_{ij}\|, \quad (5)$$

где l_{ij} – расстояние между смежными транспортными узлами, в соответствии с матрицей связности;

матрица показателей надежности (КГ) ребер $b_{ij} \in B$ графа (1), т. е. длин ЛС,

$$K_r(B) = \|k_{r_{ij}}(b_{ij} \in B)\|, \quad (6)$$

где $k_{r_{ij}}(b_{ij})$ – КГ ребра $b_{ij} \in B$ (ЛС) при воздействии внутренних ДСФ; матрица показателей надежности (КГ) узлов $a_i \in A$ графа (1), т. е. систем передачи и коммутации ТУ,

$$K_r(A) = \|k_{r_i}(a_i \in A)\|, \quad (7)$$

где $k_{r_i}(a_i \in A)$ – КГ узла $a_i \in A$ (ТУ) при воздействии внутренних ДСФ; матрица показателей живучести ребер $b_{ij} \in B$ графа (1), т.е. длин ЛС,

$$p_{ж}(B) = \|p_{ж_{ij}}(b_{ij})\|, \quad (8)$$

где $p_{ж_{ij}}(b_{ij} \in B)$ – вероятность исправного состояния ребра $b_{ij} \in B$ (ЛС) при воздействии внешних ДСФ; матрица показателей живучести узлов $a_i \in A$ графа (1), т.е. систем передачи и коммутации ТУ,

$$p_{ж}(A) = \|p_{ж_i}(a_i \in A)\|, \quad (9)$$

где $p_{ж_i}(a_i \in A)$ – вероятность исправного состояния узла $a_i \in A$ (ТУ) при воздействии внешних ДСФ.

Так как ТС представляет собой совокупность сетевых элементов в виде транспортных узлов $a_i \in A$ и линий связи на ребрах $b_{ij} \in B$ графа (1), то для расчета коэффициента готовности с целью наполнения исходными данными матриц (6) и (7) применим следующую формулу [1, 16]:

$$k_{Г-СЭ}(a_i \in A, b_{ij} \in B) = T_O / (T_O + T_B), \quad (10)$$

где T_O – среднее время наработки на отказ и T_B – среднее время восстановления работоспособности сетевых элементов.

В качестве параметра для оценки живучести ГОСТ Р 53111–2008 определен КОГ [1]:

$$K_{O.r} = P(T) \cdot K_r, \quad (11)$$

где K_r – коэффициент готовности при воздействии внутренних ДСФ и $P(T)$ – вероятность сохранения работоспособности при воздействии внешних ДСФ.

Однако, выбор в качестве параметра для оценки живучести КОГ не совсем корректен, т. к. выражение (11) состоит из двух составляющих, первое из которых для каждого сетевого элемента берется из матриц (8) и (9) с вероятностными показателями живучести, а второе – берется из матриц (6) и (7) после расчета коэффициента готовности с помощью формулы (10). То есть в выражении (11) совместно отражается показатель живучести $P(T)$ с показателем надежности (10), что на самом деле характеризует не живучесть, а устойчивость сетевого элемента, т. к. она определяется надежностью и живучестью сетевого элемента. Следовательно, в качестве показателя устойчивости (но не живучести) транспортной сети, как совокупности СЭ в виде транспортных узлов $a_i \in A$ и линий связи на ребрах $b_{ij} \in B$ графа (1), следует на подобии выражения (11) применять КОГ, расчет которых предлагается проводить используя следующее выражение:

$$k_{ог-сэ}(a_i \in A, b_{ij} \in B) = p_{ж-сэ} \cdot k_{г-сэ}(a_i \in A, b_{ij} \in B), \quad (12)$$

где $p_{ж-сэ}$ – вероятность сохранения работоспособности СЭ при воздействии внешних ВДФ, т. е. показатель живучести СЭ (ТУ или ЛС между смежными ТУ).

Мониторинг структурной устойчивости известных транспортных направлений (2) с заданными требованиями к коэффициентам связности (2) и составленными матрицами (5-9) сводится к решению для каждого транспортного направления $z_k \in Z$ следующего перечня задач:

- определение в случае необходимости методом декомпозиции фрагментов топологической структуры транспортной сети для каждого транспортного направления с учетом взаимного пространственного и (или) информационного тяготения между подмножеством транспортных узлов [17];
- поиск множества кратчайших путей с использованием матрицы длин ребер (5) на полученном фрагменте топологической структуры ТС, применяя известные алгоритмы (Дейкстры, Прима и др.) [18, 19];
- сортировка путей на независимые и зависимые с последующим их ранжированием по рангу пути или протяженности, которые не должны превышать допустимых значений номинальной цепи [15];
- при наличии структур в виде мостиковых схем (МС) производится их преобразование в последовательно-параллельные структуры (ППС) [20, 21];
- расчет КГ (10) и КОГ (12) [1];
- расчет коэффициента связности по НЗП, коэффициента связности по ЗП и ИКС [22, 23].

Анализ существующих подходов и методов решения приведенного выше перечня задач для мониторинга структурной устойчивости известных транспортных направлений показал [15, 20, 23], что они в основном позволяют эффективно решать эти задачи, за исключением моделирования и расчета ИКС, включающего в себя КС по НЗП и КС по ЗП, на исследовании которых остановимся более подробно.

3. Математические модели для расчета коэффициентов связности и функций структурной устойчивости транспортного направления

В основу математической модели учета структурной устойчивости транспортного направления заложена

известная в электросвязи процедура расчета вероятности функции структурной надежности (ВФСН) направления связи [8], которая учитывает возможность формирования множества независимых путей передачи ИП (НППИП) [8, 9]. Для направления связи и транспортного направления под ВФСН понимается зависимость их вероятностей безотказной работы (ВБР) от ВБР составляющих СЭ (узлов и ребер графа) [24, 25].

Для расчета ВФСН применительно к направлениям связи в виде последовательной структуры с известными ВБР (p_i) и присвоенной новой учетной нумерации $s = \overline{1, S}$ СЭ в пути, используется следующее выражение) [24]:

$$P_{noc.}(z_k) = \prod_{s=1}^S p_s, \quad (13)$$

где S – число сетевых элементов в последовательной цепи (пути) для транспортного направления $z_k \in Z$.

Для параллельных структур с НППИП в рамках ППС функциональные надежности рассчитываются по формуле [24, 25]:

$$P_{нар.}(z_k) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - p_m), \quad (14)$$

где $M = k_{св}^p z_k$ – число параллельных цепей (путей) с приведенным множеством СЭ в каждом пути к эквивалентному элементу по формуле (14), которое соответствует реальному КС в параллельной цепи для транспортного направления $z_k \in Z$. Что касается ППС, то для нее используется выражение

$$P_{ППС}(z_k) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{noc.}(z_k)) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \prod_{s=1}^S p_s). \quad (15)$$

На практике очень часто возникает необходимость производить расчет ВФСН для структур в виде МС с наличием зависимых путей передачи ИП (ЗППИП), схема которой приведена на рисунке 1 [16, 20, 21].

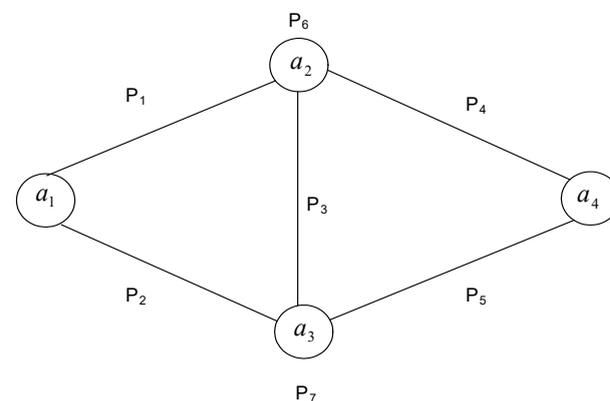


Рис. 1. Мостиковая структура (схема)

Моделирование вероятностных функций для МС можно производить с применением булевой алгебры [11, 26] или с использованием формулы полной вероятности для определения вероятностей потерь (отказов) СЭ в направлении связи, т.е. ВФСН [21]:

$$P_{MC}(z_1) = p_3[1 - (1 - p_3)(1 - p_4)] + (1 - p_3)[1 - (1 - p_1 p_2)(1 - p_4 p_5)]. \quad (16)$$

С целью упрощения моделирования и расчетов в выражении (16) не учитываются вероятности работоспособного состояния таких сетевых элементов, как транспортных узлов, принимая $p_6 = p_7 = 1,0$ на рисунке 1. Такой подход к моделированию допускается за счет проведения перераспределения вероятностей безотказной работы транспортных узлов на линиях связи, т.е. с узлов на ребра графа для транспортного направления. Результат преобразования МС (рис. 1) в эквивалентную ППС приведен на рисунке 2.

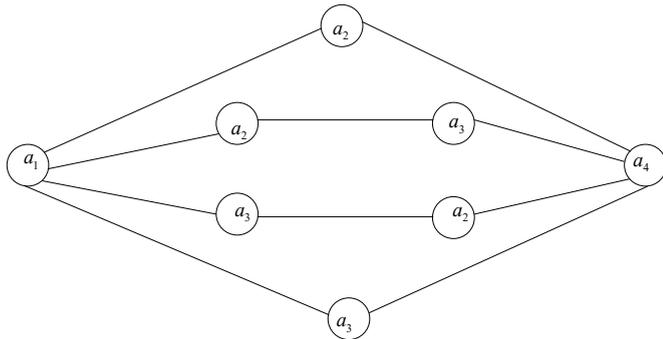


Рис. 2. Эквивалентная ППС мостиковой схеме на рисунке 1

Исследуя мостиковую схему (рис. 1) с эквивалентным преобразованием в ППС (рис. 2) в качестве транспортного направления определена КПУ $z_1 = (a_1 - a_4)$, для которой имеется возможность реально образовать:

два НППИП – $\pi_1(z_1) = (a_1, a_2, a_4)$ и $\pi_2(z_1) = (a_1, a_2, a_4)$;

два ЗППИП – $\pi_3(z_1) = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ и $\pi_4(z_1) = (a_1, a_3, a_2, a_4)$.

Полученный результат моделирования может быть использован не только для расчета ВФСН, но и для расчета вероятности функции структурной живучести (ВФСЖ), а также для расчета вероятности интегральной функции структурной устойчивости (ВИФСУ), объединяющей в себе ВФСН и ВФСЖ. Однако, в независимости, какую функцию мы рассчитываем (ВФСН, ВФСЖ или ВИФСУ) в конечном итоге необходимо использовать обобщающую выражения (13) и (14) формулу (15).

Обобщающая формула для ППС (15) являются универсальной для расчета ВФСН, ВФСЖ или ВИФСУ, т.к. она может быть применена для каждой из трех функций в следующих вариантах:

вероятность функции структурной надежности (ФСН) транспортного направления $z_k \in Z$ с использованием $k_{Г-СЭ_l}$, получаемых по формуле (10) в результате расчетов коэффициента готовности для каждого сетевого элемента в последовательности из L членов, т.е. ВФСН при воздействии внутренних ДСФ

$$P_{ФСН}(z_k) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \prod_{l=1}^L k_{Г-СЭ_l}); \quad (17)$$

вероятность функции структурной живучести (ФСЖ) транспортного направления $z_k \in Z$ с использованием $p_{Ж-СЭ_l}$, получаемых по формуле (12) в результате расчетов КОГ для каждого сетевого элемента в последовательности из L членов, т.е. ВФСЖ при воздействии внешних ДСФ

$$P_{ФСЖ}(z_k) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \prod_{l=1}^L p_{Ж-СЭ_l}); \quad (18)$$

вероятность интегральной функции структурной устойчивости (ИФСУ) с использованием $k_{ОГ-СЭ_l}$, получаемых из формул (10) и (12) для каждого сетевого элемента в последовательности из L членов, т.е. ВИФСУ при воздействии внутренних и внешних ДСФ

$$P_{ИФСУ}(z_k) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \prod_{l=1}^L k_{ОГ-СЭ_l}) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \prod_{l=1}^L (p_{Ж-СЭ_l} \cdot k_{Г-СЭ_l})). \quad (19)$$

Если в ходе мониторинга необходимо оценивать реальный ИКС $k_{св z_k}^{p.И}$, находящийся в границах между НЗП и ЗП

$$k_{св z_k}^{p.НЗП} < k_{св z_k}^{p.И} < k_{св z_k}^{p.ЗП}$$

(20) то его расчет следует производить с помощью выражения [11, 26]:

$$k_{св z_k}^{p.И} = k_{св z_k}^{p.НЗП} + \log k_{св z_k}^{p.НЗП} \left(1 + \frac{k_{св z_k}^{p.ЗП}}{k_{св z_k}^{p.ЗП} + k_{св z_k}^{p.НЗП}} \right). \quad (21)$$

4. Математическая модель для расчета интегрированного коэффициента структурной устойчивости транспортного направления

В ходе проведения исследования математических моделей для расчета интегрального коэффициента связности получена в обобщенном виде формула (21), удовлетворяющая ограничению (20). Если умножить значения интегрального коэффициента связности $k_{св z_k}^{p.И}$, полученные с помощью формулы

(21) для каждого из транспортных направлений $z_k \in Z$, на соответствующие этому транспортному направлению значения вероятностей ИФСУ (19), то получим математическую модель для расчета вероятностных интегральных коэффициентов структурной устойчивости (ИКСУ) для транспортного направления:

$$P_{ИКСУ}(z_k) = P_{ИФУ}(z_k) \cdot k_{св z_k}^{p.И}. \quad (22)$$

Аналогичным способом, на подобии с (22), появляется возможность получения интегральных математических моделей для расчета вероятностных интегральных коэффициентов по структурной надежности (ИКСН) и живучести (ИКСЖ), как составляющих ИКСУ:

вероятность ИКСН с использованием выражения (17)

$$P_{ИКСН}(z_k) = P_{ФСН}(z_k) \cdot K_{св z_k}^{p.H}; \quad (23)$$

вероятность ИКСЖ с использованием выражения (18)

$$P_{ИКСЖ}(z_k) = P_{ФСЖ}(z_k) \cdot K_{св z_k}^{p.H}. \quad (24)$$

Анализ выражений (22), (23) и (24) показал, в каждом из них имеет место $K_{св z_k}^{p.H}$, так как он позволяет учитывать совместно и раздельно КСНЗП и КСЗП передачи информационных потоков по образованным однотипным основным каналам передачи в зависимости от структуры фрагмента транспортной сети, выделенного для формирования транспортного направления $z_k \in Z$.

Заключение

Уточняя математические модели для мониторинга структурной устойчивости транспортных направлений транспортной составляющей телекоммуникационной сети после ее реконструкции, в настоящей исследовательской работе проделана следующая научно-исследовательская работа:

– приведены уточненные автором математические модели для расчета интегрированного коэффициента структурной устойчивости транспортного направления транспортной сети;

– разработаны математические модели для расчета интегрального коэффициента устойчивости (22) транспортного направления, а также для расчета интегрального коэффициента связности для надежности (23) и интегрального коэффициента связности для живучести (24).

Полученные научные результаты могут быть использованы с применением метода аналогий для иных транспортных сетей из области моделирования и мониторинга различных логистических транспортных систем (автомобильных, железнодорожных и др.).

Литература

1. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
2. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженеров. М.: Энергия, 1980. 342 с.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
4. Федеральный закон № 126-ФЗ от 7 июля 2003 г. «О связи». М.: 2003. 81 с.

5. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
6. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984. 455 с.
7. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. М.: Мир, 1974. 520 с.
8. Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я. Сети электросвязи. М.: Связь, 1977. 360 с.
9. Ананьев А.С., Изаксон Б.К., Кольцов В.В. и др. Каналообразование и управление на первичных сетях связи. Л.: Военная академия связи, 1986. 295 с.
10. ГОСТ Р 58362-2019. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Автоматизация и телемеханизация технологического оборудования. М.: Стандартинформ, 2019. 46 с.
11. Ясинский С.А. Унифицированные математические модели для анализа и синтеза элементов телекоммуникационных сетей. СПб.: Военный университет связи, 2003. 184 с.
12. Буслаев А.П., Кучелев Д.А., Яшина М.В. Динамические системы и математические модели трафика информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 3. С. 22-38.
13. Ясинский С.А., Романенко П.Г., Султанов Р.С. и др. Подход к моделированию структурной устойчивости транспортных направлений телекоммуникационной сети // НТЖ «Информация и Космос». 2023. №3. С. 26-32.
14. Гавлиевский С.Л., Карташевский В.Г., Проскура Д.В. и др. Принципы построения мультисервисной сети ПАО «Ростелеком». М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 228 с.
15. Демчук Д.А., Лебедев А.Т., Любимов А.Г. и др. Военные системы многоканальной электросвязи: Учебное пособие. СПб.: Военная академия связи, 1992. 232 с.
16. Нечипоренко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем. М.: Советское радио, 1968. 256 с.
17. Зайченко Ю.П., Гонца Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. К.: Техника, 1986. 168 с.
18. Пашкеев С.Д., Минязов Р.И., Могилевский В.Д. Машинные методы оптимизации в технике связи. М.: Связь, 1976. 272 с.
19. Рафгарден Т. Совершенный алгоритм. Графовые алгоритмы и структуры данных. Пер. с англ. СПб.: Питер, 2022. 256 с.
20. Дудник Б.Я., Овчаренко В.Ф., Орлов В.К. и др. Надежность и живучесть систем связи. М.: Радио и связь, 1984. 216 с.
21. Щербина Л.П. Систем распределения информации: Курс лекций. Л.: Военная академия связи, 1987. 124 с.
22. Ясинский С.А. Метод базового распределения канального ресурса телекоммуникационных направлений распространения геоинформации с повышенной структурной устойчивостью // НТЖ «Информация и Космос». 2009. №2. С. 58-66.
23. Ясинский С.А., Зюзин А.Н. Уточненная математическая модель для расчета структурной устойчивости направления связи телекоммуникационной сети. М.: Электросвязь, 2021. №11. С. 55-58.
24. Дружинин Г.В. Надежность систем автоматики. М.: Энергия, 1967. 528 с.
25. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности / под ред. Б. В. Гниденко. М.: Советское радио, 1969. 488 с.
26. Борийчук Г.И., Лазаренко В.С., Ясинский С.А. Расчёт функции надёжности сети связи при конечной надёжности элементов // Сборник РДР. Выпуск 8. М.: ЦВТИ МО, 1989. 20 с.

REFINED MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING THE STRUCTURAL STABILITY OF TELECOMMUNICATION NETWORK TRANSPORT ROUTES

Sergei A. Iasinskii, Military Telecommunications Academy, St. Petersburg, Russia, yasinsky777@mail.ru

Alexander P. Vasiliev, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Abstract

Clarifying mathematical models for monitoring the structural stability of the transport direction of the transport component of the telecommunications network after its reconstruction, the following scientific research results are presented in this research paper: mathematical models for calculating the integrated coefficient of structural stability of the transport direction of the transport network are refined; mathematical models for calculating the integral coefficient of connectivity of the transport direction, as well as for calculating integrated coefficients structural reliability and structural survivability of the transport direction. The obtained scientific results can be used using the analogy method for other transport networks from the field of modeling and monitoring of heterogeneous logistic transport systems (automobile, railway, etc.).

Keywords: structural stability, transport direction, stability monitoring, bridge circuit, telecommunication network, integral coefficient of structural stability.

References

- [1] GOST R 53111-2008. The stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. Moscow: Standartinform, 2019. 19 p.
- [2] O. P. Kuznetsov, G. M. Adelson-Velsky, "Discrete mathematics for engineers," Moscow: Energiya, 1980. 342 p.
- [3] V. G. Olifer, N. A. Olifer, "Computer networks. Principles, technologies, protocols," St. Petersburg: Peter, 2010. 944 p.
- [4] Federal Law No. 126-FZ of July 7, 2003 "On communication". Moscow: 2003. 81 p.
- [5] L. R. Ford, D. R. Fulkerson, "Flows in networks," Moscow: Mir, 1966. 276 p.
- [6] M. Swami, K. Thulasiraman, "Graphs, networks and algorithms," Moscow: Mir, 1984. 455 p.
- [7] T. Hu, "Integer programming and flows in networks," Moscow: Mir, 1974. 520 p.
- [8] G. B. Davydov, V. N. Roginsky, A. Ya. Tolchan, "Telecommunication networks," Moscow: Svyaz, 1977. 360 p.
- [9] A. S. Ananyev, B. K. Izakson, V. V. Koltsov et al., "Channeling and management on primary communication networks," L.: Military Academy of Communications, 1986. 295 p.
- [10] GOST R 58362-2019. Main pipeline transportation of oil and petroleum products. Automation and telemechanization of technological equipment. Moscow: Standartinform, 2019. 46 p.
- [11] S.A. Yasinsky, "Unified mathematical models for the analysis and synthesis of elements of telecommunication networks," St. Petersburg: Military University of Communications, 2003. 184 p.
- [12] A. P. Buslaev, D. A. Kucheleev, M. V. Yashina, "Dynamic systems and mathematical models of information traffic," *T-Comm*. 2018. Vol. 12. No. 3, pp. 22-38.
- [13] S. A. Yasinsky, P. G. Romanenko, R. S. Sultanov et al., "An approach to modeling the structural stability of transport directions of a telecommunication network," NTZH "Information and Space," St. Petersburg: LLC "Printing House "NP-PRINT", 2023. No.3, pp. 26-32.
- [14] S. L. Gavlievsky, V. G. Kartashevsky, D. V. Proskuraev et al., "Principles of building a multiservice network of PJSC Rostelecom," St. Petersburg: Hotline – Telecom, 2021. 228 p.
- [15] D.A. Demchuk, A.T. Lebedev, A.G. Lyubimov et al., "Military multichannel telecommunication systems: A textbook," St. Petersburg: Military Academy of Communications, 1992. 232 p.
- [16] V.I. Nechiporenko, "Structural analysis and methods of building reliable systems," Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 256 p.
- [17] Yu. P. Zaichenko, Yu. V. Gonta, "Structural optimization of computer networks," K.: Technika, 1986. 168 p.
- [18] S. D. Pashkeev, R. I. Minyazov, V. D. Mogilevsky, "Machine optimization methods in communication technology," Moscow: Svyaz, 1976. 272 p.
- [19] T. Rafsgarden, "Perfect algorithm. Graph algorithms and data structures," nTranslated from English. St. Petersburg: St. Petersburg, 2022. 256 p.
- [20] B. Ya. Dudnik, V. F. Ovcharenko, V. K. Orlov et al., "Reliability and survivability of communication systems," Moscow: Radio and Communications, 1984. 216 p.
- [21] L. P. Shcherbina, "Information distribution systems: A course of lectures," L.: Military Academy of Communications, 1987. 124 p.
- [22] S. A. Yasinsky, "The method of basic distribution of the channel resource of telecommunication directions for the dissemination of geoinformation with increased structural stability," NTZ "Information and Space", St. Petersburg.: LLC "Printing house "NP-PRINT", 2009. No. 2, pp. 58-66.
- [23] S. A. Yasinsky, A. N. Zyuzin, "A refined mathematical model for calculating the structural stability of the telecommunication network communication direction," Moscow: Telecommunication, 2021. No.11, pp. 55-58 p.
- [24] G. V. Druzhinin, "Reliability of automation systems," Moscow: Energiya, 1967. 528 p.
- [25] R. Barlow, F. Proshan, "Mathematical theory of reliability," Moscow: Sovetskoe radio, 1969. 488 p.
- [26] G. I. Borychuk, V. S. Lazarenko, S. A. Yasinsky, "Calculation of the reliability function of a communication network with finite element reliability," *Collection of DDR*. Issue 8. Moscow: TSVTI MO, 1989. 20 p.