

УДК 621.39

**Подход к моделированию структурной устойчивости
транспортных направлений телекоммуникационной сети**

**An approach to modeling the structural stability of transport directions
of a telecommunications network**

Ясинский / Yasinskii S.

Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Романенко / Romanenko P.

Павел Геннадьевич
(pa-roman@yandex.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи
имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»
МО РФ (ВАС им С. М. Буденного),
начальник кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Султанов / Sultanov R.

Руслан Сергеевич
(ruslan_vax@mail.ru)
ВАС им С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Филин / Filin A.

Андрей Викторович
(Fily@mail.ru)
ВАС им С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры безопасности
инфокоммуникационных систем.
г. Санкт-Петербург

Мережко / Merezhko Yu.

Юрий Александрович
(yurmerezhko@yandex.ru)
ВАС им С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Филин / Filin F.

Федор Викторович
(f.sakhalin@mail.ru)
ВАС им С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры безопасности
инфокоммуникационных систем.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: структурная устойчивость – structural stability; транспортное направление – transport direction; телекоммуникационная сеть – telecommunication network; мостиковая схема – bridge circuit; интегральный коэффициент готовности – integrated readiness coefficient.

После обоснования основных понятий и математической модели транспортной составляющей телекоммуникационной сети предлагается уточненная математическая модель для расчета структурной устойчивости транспортного направления телекоммуникационной сети. На основе этой модели предложен научно обоснованный и практически реализуемый подход к определению функций надежности неразделимых структур в виде мостиковой схемы, позволяющей совместно учитывать независимые и зависимые пути передачи потоков информации, а также количественно оценивать их общую связность через интегральный коэффициент готовности.

After substantiating the basic concepts and mathematical model of the transport component of the telecommunications network, a refined mathematical model is proposed to calculate the structural stability of the transport direction of the telecommunications network. Based on this model, a scientifically sound and practically feasible approach to determining the reliability functions of inseparable structures in the form of a bridge scheme is proposed, which allows taking into account independent and dependent ways of transmitting information flows together, as well as quantifying their overall connectivity through an integral readiness coefficient. When justifying network mechanisms for ensuring the quality of multimedia traffic service, it is proposed to use methods based on algorithms for finding the minimum of the unimodal function to solve inverse optimization problems. The results of a comparative analysis of such algorithms according to the criterion of the minimum number of necessary calculations of the objective function with different permissible error are presented.

Введение

Моделирование структурной устойчивости (СУ) телекоммуникационной сети (ТКС), состоящей из транспортной сети (ТС) и сетей доступа (СД), не может быть осуществлено в полном объеме и наиболее адекватно без предварительного выбора или разработки математической модели (ММ) базовой (первичной) составляющей, то есть ТС.

Вне зависимости от класса решаемой транспортной сетевой задачи в той или иной мере предъявляются требования к СУ направлений связи (НС), телекоммуникационным направлениям (ТКН) или транспортным направлениям (ТН). Однако, для перечисленных возможных направлений (НС, ТКН, ТН) результаты исследований СУ не всегда можно получить с желаемой точностью для количественной оценки.

Проблема заключается в сложности количественного учета влияния числа зависимых путей передачи потоков информации (ЗППИ) на СУ (структурную надежность и живучесть) ТКС, подход к решению которой состоит в моделировании СУ направлений (НС, ТКН, ТН) с использованием структурно-эквивалентных преобразований мостиковых схем (МС) и предложением использовать интегральные коэффициенты готовности (ИКГ) для учета наряду с требуемым коэффициентом связности (КС) по независимым путям передачи потоков информации (НППИ) и КС по ЗППИ.

Основные понятия и математическая модель транспортной составляющей телекоммуникационной сети

Независимо от выбранной технологии построения составляющей ТКС и используемых разнородных многоканальных линий связи (ЛС) или линий передачи (проводных, оптических, спутниковых и др.), топологические структуры их ТС моделируются в виде потокового графа

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

вершины (узлы) которого соответствуют ТУ $a_i \in A$, а ребра (линии) графа соответствуют ЛС или линиям передачи (ЛП) $b_{ij} \in B$, соединяющих ТУ между собой [1–4].

Транспортная сеть – это совокупность сетевых элементов (СЭ) в виде транспортных узлов (ТУ), которые обеспечивают транспортирование (перенос) потоков сообщений (трафика) по линиям передачи (ЛП) или линиям связи (ЛС), т. е. распределение, передачу и прием разного вида потоков информации (телефонного, видео, данных и др.) между сетями абонентского доступа (СД), в которые включены пользователи услугами связи (абоненты).

Так как ТС является преемницей эволюционного развития цифровых первичных сетей связи (ПСС), то с учетом приводимого в стандартах и приказах министерства связи РФ определения термина «ПСС» сформулируем упрощенное с позиции образования и передачи каналов передачи (КП) через УД во взаимодействующие СД определение термина «ТС» как: ТС – это совокупность типовых КП, образованная на базе ТУ и соединяющих их ЛС.

Учитывая, что ТС цифровая, а каждый ее цифровой КП характеризуется заранее определенными возможностями цифровых систем передачи (ЦСП) по образованию типовой скорости передачи (СП), то с учетом известного из [5] термина «КП» дадим следующее уточненное его определение для ТС: КП – это комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу цифровых сигналов электро-связи с нормируемой СП. Каналы передачи образуются ЦСП между СЭ ТС, т. е. между ТУ.

На базе образованных КП транспортной составляющей ТКС формируется требуемое множество каналов передачи данных (КПД), как каналов электро-связи (каналов переноса) [5]. С учетом нормирования СП под КПД будем понимать путь прохождения пакетов с нормированной СП потоков информации (ПИ) через СЭ ТКС, обеспечивающий при подключении оконечных устройств абонентов передачу (перенос) сообщения. Будучи путем, КПД образуется в результате подключения аппаратуры передачи данных или маршрутизаторов к последовательно соединенным типовым КП транспортной составляющей СД и (или) КП транспортной составляющей ТКС, т. е. образуется на базе типовых КП с нормированными СП, которые в основе своей условно относятся к физическому уровню ЭМ ВОС.

Начальный и конечный СЭ ТКС (ТС или СД) соответствуют образованию на подмножестве A графа (1) множества корреспондирующих пар узлов (КПУ) [1–4]:

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

Каждой КПУ $z_k \in Z$ ставятся в соответствие потребности по образованию или аренде КП с нормированными СП для передачи ПИ v_{z_k} в виде совокупного множества

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

где за единицу k -го продукта может приниматься один из заранее обоснованных номиналов СП, например: основной цифровой канал, потоки плеззиохронной цифровой иерархии (Е1, Е3), скорости передачи транспортных модулей синхронной цифровой иерархии (STM-1, STM-4) и др.

Каждая из КПУ $z_k \in Z$ (2) может в себя включать не только один путь передачи ПИ $v_{z_k} \in V$ (3), но и несколько путей передачи ПИ для заданного:

Таблица 1

Классификация КПУ

	Уровни (слои) архитектуры сети связи		
	ТН	ТКН (НД)	НС
Классификация КПУ	КПУ–ТН	КПУ–ТКН (КПУ–НД)	КПУ–НС

- ТН в рамках ТС ТКС;
- направления доступа (НД) между СД, т. е. ТКН, охватывающего всю ТКС.

Кроме ТН и ТКН (НД) в сети связи образуется множество НС. Направление связи – совокупность линий и узлов связи (УС), обеспечивающая связь между двумя пользователями (абонентами). В таблице 1 приведена классификация КПУ в зависимости от уровня (слоя) архитектуры сети связи.

Для повышения структурной устойчивости НС, ТКН или ТН пути передачи ПИ различного формата (пакетного, битового и др.) должны планироваться как структурно независимые и по возможности с разнородными ЛС (радиорелейным, проводным и др.).

В случаях, когда нет возможности физической реализации НППИ для КПУ в виде ТН, а имеется возможность построения частично ЗППИ, то эту возможность при необходимости следует использовать. Это предложение распространяется и на приведенные в таблице 1 другие уровни (слои) архитектуры сети связи, т. е. на КПУ в виде ТКН (НД) и НС.

Пропускная способность u_{ij} ребра b_{ij} характеризуется суммой КП из дискретного ряда канальных емкостей и СП, зависящих от используемых типов ЦСП из заданного перечня средств каналообразования, т. е. характеризуется линейным и узловым ресурсами ТС.

Задача синтеза структуры для потоковой структуры ТС сводится к решению двух основных взаимно увязанных задач [4]:

- определение числа N и местоположения ТУ A из (1);
- распределение ЦСП и арендованных КР с заданными типовыми СП для передачи ИП v_k по ЛС в виде ребер графа $b_{ij} \in B$, которые реализуются узловым и линейным ресурсами ТС и позволяют удовлетворять потребности совокупностей КПУ–ТН в типовых КП с требуемым коэффициентом связности k_{mz}^{mp} , где $k = 1, m$.

В результате решения задачи синтеза ТС формируется потоковая структура, которая не всегда позволяет формировать на ее основе структуру системы тактовой сетевой синхронизации и структуру системы точного времени [4, 6, 7].

Математическая модель для расчета структурной устойчивости транспортного направления телекоммуникационной сети

Устойчивость сети электросвязи вообще, как и надежность, живучесть и помехоустойчивость в частности, принято классифицировать в виде трех основных составляющих:

- объектовая, на всех этапах жизненного цикла сети;
- функциональная, в процессе эксплуатации сети;
- структурная, на этапах системного проектирования (синтеза) и эксплуатации (анализа).

На начальном этапе синтеза ТКС первейшей задачей является учет СУ, который допускается проводить обособленно от решения других сетевых задач по учету объектовой и функциональной устойчивости.

Математические модели учета структурной и функциональной надежности ПСС или ТКС единой сети электросвязи РФ принято разрабатывать на основе расчетов функций надежности (ФН) направлений связи, ТКН и (или) ТН, как множества КПУ (2) из перечня в таблице 1. Эти ММ в основном учитывают возможность формирования множества НППИ, ориентированы на двухполюсные сети и, как следствие, моделируются с помощью двухдольного графа с учётом весовых коэффициентов для рёбер графа (ЛП или ЛС) и вершин графа (УС или ТУ) [1, 2]. Для НС, ТКН или ТН (КПУ в табл. 4) под ФН понимается зависимость их вероятностей безотказной работы от вероятностей безотказной работы составляющих элементов (вершин и ребер) [7, 8].

Существующие ММ расчета ФН для множества КПУ (НС, ТКН, ТН) имеют два основных недостатка [9]:

- при оценке СУ отсутствует возможность количественного учета коэффициента связности по ЗППИ; не всегда имеется возможность учитывать вероятности безотказной работы УС или ТУ в неразделимой структуре сети связи с признаками наличия МС.

Для устранения приведенных выше недостатков вынесем помехоустойчивость в ограничения и останемся на анализе подходов к уточнению ММ для расчета СУ (надежности и живучести) для КПУ (ТКН, ТН, НС) ТКС, т. е. для СУ с ограничением в виде исключения из рассмотрения помехоустойчивости

как отдельной задачи исследования. В данном случае СУ соответствует понятию структурной живучести, характеризуемой (оцениваемой) через показатель оперативной готовности (ОГ) и количественно выражаемой через коэффициент ОГ (КОГ), который в себе учитывает заложенный показатель технической надежности через коэффициент готовности (КГ) [10].

При расчете множества узловых элементов ТУ может описываться совокупностью следующих показателей [10, 11]:

- показатель надежности, как КГ для $a_i \in A$, т. е. $K_{\Gamma}(a_i \in A) = T_o / (T_o + T_b)$, где T_o – среднее время наработки на отказ и T_b – среднее время восстановления работоспособности (безотказной работы) задействованного узлового оборудования ТС;

- показатель живучести, т. е. в нашем случае это показатель устойчивости, как КОГ для $a_i \in A$, т. е. $K_{ог}(a_i \in A) = K_{\Gamma}(a_i \in A) * P(t)_{a_i \in A}$, где $P(t)_{a_i \in A}$ – вероятность сохранения работоспособности узлового оборудования при воздействии внешних дестабилизирующих факторов (ДСФ) во время функционирования ТС.

При расчете СУ множество линейных элементов может описываться совокупностью следующих показателей [10, 11]:

- показатель надежности, как КГ для $b_{ij} \in B$, т. е. $K_{\Gamma}(b_{ij} \in B) = T_o / (T_o + T_b)$, где T_o – среднее время наработки на отказ и T_b – среднее время восстановления работоспособности ЛС или ЛП;

- показатель живучести, как КОГ $K_{ог}(b_{ij} \in B) = K_{\Gamma}(b_{ij} \in B) * P(t)_{b_{ij} \in B}$ для $b_{ij} \in B$, где $P(t)_{b_{ij} \in B}$ – вероятность сохранения работоспособности линейного оборудования при воздействии внешних ДСФ во время функционирования ТС.

В процессе вычисления ФН для КПУ (НС, ТКН, ТН) в качестве ММ принято выбирать взвешенный

ненаправленный граф, где весами являются вероятности безотказной работы (ВБР) элементов НС, ТКН или ТН: $P(t)_{a_i \in A}$ и $P(t)_{b_{ij} \in B}$.

Если учесть, что КГ или КОГ – это вероятности того, что СЭ находится в работоспособном состоянии в любой момент времени с разницей в отсутствии или наличии ДСФ, в этом случае ВБР сетевых элементов может использоваться при расчете ФН для КПУ $z_k \in Z$ (2).

Следовательно, для каждой вершины $a_i \in A$ возможно записать его ВБР как $p_i(a_i \in A)$, а для каждого ребра $b_{ij} \in B$ – как $p_{ij}(b_{ij} \in B)$.

Чаще всего для расчета ФН для КПУ используют параллельно-последовательные структуры (ППС), в которых ФН для последовательных структур рассчитываются перемножением ВБР элементов p_i в последовательной цепи (пути) из ВБР сетевых элементов $p_i(a_i \in A)$ и $p_{ij}(b_{ij} \in B)$ с новым присвоением им учетной последовательной нумерации элементов в пути $l = \overline{1, N_j}$, то есть

$$P_{z_k}(l = \overline{1, N_j}) = \prod_{l=1}^{N_j} p_l; z_k \in Z; j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

где N_j – число элементов в j -м пути [10].

Для параллельных структур с НППИ в рамках ППС функциональные надежности рассчитываются путем перемножения ВБР с отказами элементов по известной из теории надежности формуле:

$$P_{z_k}(j = \overline{1, J}) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - p_j) = 1 - \prod_{j=1}^J q_j; z_k \in Z. \quad (5)$$

Однако на практике очень часто возникает необходимость производить расчет ФН для более сложных структур (неразделимых схем) СЭ с НППИ и ЗППИ,

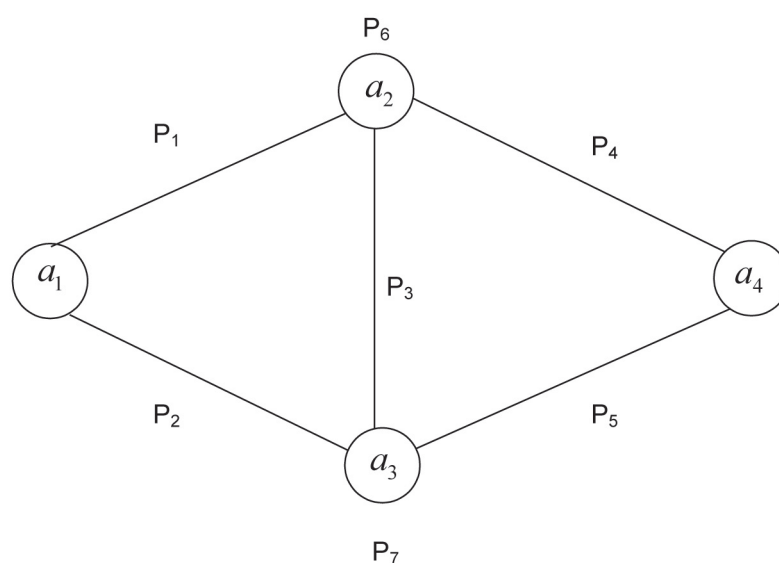


Рис. 1. Мостиковая структура (схема)

которые нельзя отнести к классу ППС, но в них может быть всегда выявлена хотя бы одна МС, приведенная на рисунке 1 [4, 11–15].

Признаком неразделимой схемы есть наличие в ней МС, обнаруживаемой в результате пошагового разложения графа сети. Известные правила преобразования и методы расчета ФН не применимы к МС, к ней применима так называемая теорема «разложения на множители» [8]: «ФН цепи с избыточностью равна произведению вероятности безотказной работы i -го элемента цепи на ФН оставшейся цепи (места подключения i -го элемента замкнуты накоротко) плюс произведение вероятности отказа того же i -го элемента на ФН оставшейся цепи (места подключения i -го элемента разомкнуты)». Например, использование этой теоремы для заданной единственной КПУ $z_{k=1} = (a_1 - a_4) \in Z$ для МС приводит к образованию суммы вероятностных значений двух эквивалентных ППС в виде рисунков 2а и 2б [8, 13].

Анализ применения теоремы разложения на множители на примере МС в работе [8] позволяет выделить следующие три недостатка [10]:

- не учитываются вероятности безотказной работы УЭ, то есть на рисунке 1 вероятности $p_6 = p_7 = 1,0$;
- если одна из составляющей суммы указывает на связность по двум НППИ (рис. 2а), то во второй составляющей за счет стягивания узлов (a_2 с a_3) формируются две последовательно включенные параллельные схемы (рис. 2б), которые наглядно не отражают наличие двух ЗППИ;
- при оценке СУ отсутствует возможность учета коэффициента связности по ЗППИ.

Эти три недостатка устраняются в известной, но сложной в вычислениях и не обеспечивающей возможного количественного расчета КГ и КОГ для КПУ с $k_{св}^{mp} > 1$ «методике определения вероятностных параметров НС в виде непараллельно-последовательного графа» [14]. Однако этот подход из [14] не позволяет одновременно учитывать НППИ и ЗППИ в виде ИКГ и КОГ, что вызывает необходимость проведения исследования с целью модификации известной из [10] «методики определения вероятностных параметров НС в виде непараллельно-последовательного графа» путем «расчета функции надежности сети связи при конечной надежности элементов» [15].

Применение математической модели для расчета структурной устойчивости транспортного направления телекоммуникационной сети

В едином подходе к уточнению ММ для расчета структурной устойчивости ТКН телекоммуникационной сети или ТН транспортной сети в качестве макета простейшего фрагмента структуры сети используется неориентированный граф с МС, на котором принято исследовать эффективность предлагаемых ММ для расчета ФН неразделимых схем с числом ребер $n \geq 4$ графа, не относящегося к двудольному.

Если ТКН или ТН изначально относится к последовательной или параллельной структуре, то для них применимы выражения (4) и (5) соответственно. В противном случае, когда ТКН или ТН невозможно изначально отнести к последовательной или парал-

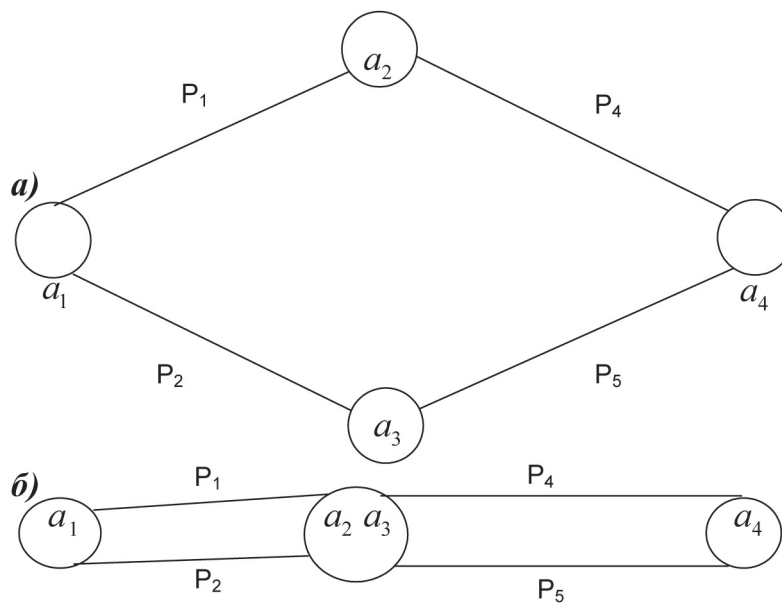


Рис. 2. Две эквивалентные структуры для МС: а) параллельная структура в виде двух НППИ; б) ППС, содержащая два ЗППИ

тельной структуре, а имеется возможность применить для моделирования неразделимый граф с МС, то его всегда можно представить с помощью бинарных отношений на фиксированном множестве. Следовательно, моделирование можно производить с помощью булевой алгебры с последующей минимизацией вычислительной сложности, используя модифицированные карты Карно [15].

Преобразования непараллельно-последовательной структуры (НППС) МС в ППС производятся на основе метода эквивалентного преобразования зависимых путей в независимые пути с последующим использованием для их расчетов выражений (4) и (5) [15].

Рассмотрим в качестве примера НППС в виде МС для ТКН (ТН, НС), т. е. для КПУ $z_1 = (a_1 - a_4)$ на рисунке 1. Преобразуем эту НППС в виде МС в ППС на основе метода эквивалентного преобразования зависимых путей в независимые (рис. 3) [4, 15]. Для упрощения расчетов сделаем допущение, что ВБР вершин графа (УЭ) равны единице, то есть $p_6 = p_7 = 1$, а ВБР ребер графа (ЛП или ЛС) [10]: $p_1 = 0,95$; $p_2 = 0,9$; $p_3 = 0,99$; $p_4 = 0,8$; $p_5 = 0,85$.

$$P_{z_k}(j, l) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - P_{z_k}(l = \overline{1, \dots, N_j})) = 1 - \prod_{j=1}^{J=4} (1 - \prod_{l=1}^{N_j} p_l) \approx \approx 1 - 0,003 = 0,997.$$

Перед проведением расчетной оценки структурной устойчивости ТКС или ТС следует проводить предварительный анализ этих сетей по основным дополнительным (вторичным) критериям устойчивости [11]:

– структура для основных ТН или ТКН должна обеспечивать три НППИ;

– обеспечивается возможность перераспределения КП (ИП) на основных НС (ТКН, ТН) в случае отказов СЭ или изменения оперативной обстановки и (или) обстановки по организации связи.

Следовательно, учет этих двух вторичных критериев оценки СУ может быть реализован через реализацию требований в виде заданных показателей связности (коэффициентов связности) по НППИ и ЗППИ. При этом задание требуемых или расчетные значения коэффициентов связности должно осуществляться перед началом решения задачи по оценке СУ на основе расчета ФН как первичного критерия устойчивости по отношению к КС [10].

Под требуемым (тр.) КС подразумевают число независимых путей (π_j) и (или) число зависимых путей (π'_j) для каждой КПУ $z_k \in Z$, то есть $k_{\text{св.тр.}(z_k)}$ и (или) $k'_{\text{св.тр.}(z_k)}$ соответственно. При этом должно выполняться требование [10]: $k_{\text{св.р.}(z_k)} \geq k_{\text{св.тр.}(z_k)}$ и $k_{\text{св.р.}(z_k)} \geq k'_{\text{св.тр.}(z_k)}$, где: p – расчетный (или реальный) КС; $j = \overline{1, \dots, J}$ – индекс номера пути. Для упрощения исследования остановимся на частном случае, когда $k_{\text{св.тр.}(z_k)} = k_{\text{св.р.}(z_k)}$ и $k'_{\text{св.р.}(z_k)} = k'_{\text{св.тр.}(z_k)}$.

Если требуется учитывать наряду с требуемым КС по независимым путям k_j и КС по зависимым путям k'_j , то вводится понятие ИРС $k_j^* = k_j \cup k'_j$, который находится в границах

$$k_j < k_j^* < k_j + 1 \tag{6}$$

и может быть рассчитан с помощью следующего выражения [4, 10]:

$$k_j^* = k_j + \log_{k_j} \left(1 + \frac{k'_j}{k_j + k'_j} \right). \tag{7}$$

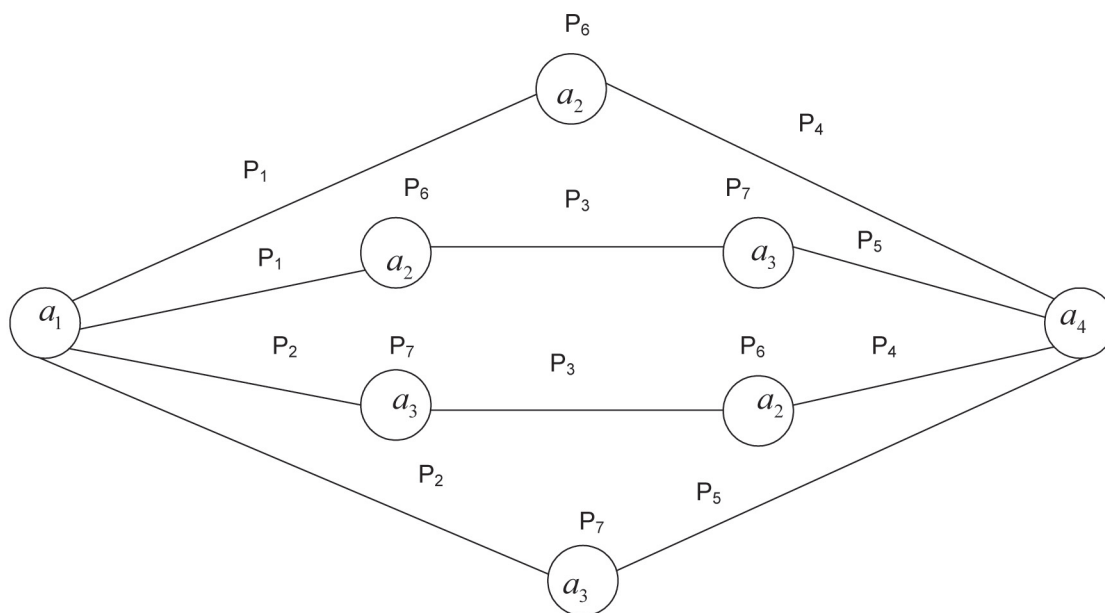


Рис. 3. Эквивалентная МС параллельно-последовательная структура

В качестве примера применительно к преобразованной МС с НППС (рис. 1) в ППС на рисунке 3 с помощью формулы (7), где $k_j=2$ и $k'_j=2$, рассчитан ИКС

$$k_j^* = 2 + \log_2 \left(1 + \frac{2}{2+2} \right) \approx 2,585,$$

который удовлетворяет ограничению (6), так как $k_j = 2 < k_j^* \approx 2,585 < k_j + 1 = 3$ [4, 10].

Таким образом, структурная устойчивость (надежность и живучесть) является одним из комплексных показателей ТКС (ТС и СД), поэтому ее при необходимости стараются повысить на каждом из уровней структурно-физической реализуемости и особенно на уровне ТКН, включающего в себя ТН в интересах образования заданных НС в системе связи [10].

Существующие ММ расчета ФН для множества НС при оценке СУ не позволяют количественно учитывать КС по ЗППИ, а также не всегда учитывают вероятности безотказной работы УС в неразделимых структурах сетей связи [3].

В результате уточнения ММ, позволяющих производить расчет структурной устойчивости КПУ (НС, ТКН, ТН), получено два уточненных подхода к определению ФН неразделимых структур в виде МС и ИКС, учитывающих совместно НППИ и ЗППИ.

Заключение

Структурная устойчивость (надежность и живучесть) является одним из комплексных показателей ТКС (ТС и СД), поэтому ее при необходимости стараются повысить на каждом из уровней структурно-физической реализуемости и особенно на уровне ТКН, включающего в себя ТН в интересах образования заданных НС в системе связи [10].

Существующие ММ расчета ФН для множества НС при оценке СУ не позволяют количественно учитывать КС по ЗППИ, а также не всегда учитывают вероятности безотказной работы УС в неразделимых структурах сетей связи [3].

Таким образом, в результате проведения научных исследований по моделированию СУ транспортных направлений ТКС получен научно обоснованный и практически реализуемый подход к определению ФН для неразделимых структур в виде МС, учитывающих совместно НППИ и ЗППИ. Кроме этого, предложена ММ расчета ИКС для учета наряду с требуемым КС по НППИ и КС по ЗППИ.

Этот подход к моделированию СУ транспортных направлений ТКС предлагается применять для решения подобных транспортных сетевых задач применительно к ТКН и НС.

Литература

1. Давыдов, Г. Б. Сети электросвязи / Г.Б. Давыдов, В.Н. Рогинский, А.Я. Толчан. – Москва : Связь, 1977. – 360 с.

2. Ананьев, А. С. Каналообразование и управление на первичных сетях связи / А.С. Ананьев, Б.К. Изаксон. – Ленинград : ВАС, 1986. – 295 с.

3. Военные системы многоканальной электросвязи : учебное пособие / Д.А. Демчук, А.Т. Лебедев, А.Г. Любимов [и др.]. – Санкт-Петербург : ВАС, 1992. – 232 с.

4. Ясинский, С. А. Унифицированные математические модели для анализа и синтеза элементов телекоммуникационных сетей / С.А. Ясинский. – Санкт-Петербург : Военный университет связи, 2003. – 184 с.

5. Сурков, Ю. П. Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей / Ю.П. Сурков ; под ред. В.Д. Москвитина. – Москва : МК-полиграф, 1996. – 106 с.

6. Бакланов, И. Г. SDH – NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей / И.Г. Бакланов. – Москва : Метротек, 2006. – 736 с.

7. Бакланов, И. Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, В-ISDM, ATM / И.Г. Бакланов. – Москва : Эко-Трендз, 2002. – 150 с.

8. Дружинин, Г. В. Надежность систем автоматики / Г.В. Дружинин. – Москва : Энергия, 1967. – 528 с.

9. Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; перевод с англ. Б.В. Гнеденко. – Москва : Советское радио, 1969. – 488 с.

10. Ясинский, С. А. Уточненная математическая модель для расчета структурной устойчивости направления связи телекоммуникационной сети / С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Электросвязь. – 2021. – № 11. – С. 55–58.

11. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 17 с.

12. Нечипоренко, В. И. Структурный анализ и методы построения надежных систем / В.И. Нечипоренко. – Москва : Советское радио, 1968. – 256 с.

13. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов [и др.]. – Москва : Радио и связь, 1984. – 216 с.

14. Щербина, Л. П. Системы распределения информации / Л.П. Щербина. – Ленинград : ВАС, 1987. – 124 с.

15. Борийчук, Г. И. Расчёт функции надёжности сети связи при конечной надёжности элементов / Г.И. Борийчук, В.С. Лазаренко, С.А. Ясинский // Сборник РДР. – Вып. 8. – 1989. – 20 с.