

# МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-23-27

**Куделя Виктор Николаевич,**  
 ЗАО "Институт Сетевых Технологий",  
 г. Санкт-Петербург, Россия,  
[Kudelia.Viktor@int.spb.ru](mailto:Kudelia.Viktor@int.spb.ru)

**Manuscript received** 14 April 2021;  
**Accepted** 14 May 2021

**Гель Валентин Эдуардович,**  
 ФГКВОУ ВПО "Военная академия связи имени Маршала  
 Советского Союза С.М.Буденного" Министерства  
 обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург,  
 Россия, [gel@rambler.ru](mailto:gel@rambler.ru)

**Вовк Валерий Васильевич,**  
 Главное управление связи ВС РФ, Москва, Россия,  
[GUS\\_I@mil.ru](mailto:GUS_I@mil.ru)

**Ключевые слова:** сеть, устойчивость  
 функционирования, надежность, живучесть

Постоянное совершенствование архитектуры мультисервисных сетей связи (МСС) обусловлена потребностью в сетях, обладающих производительностью в десятки Тбит/с. Технология маршрутного параллелизма относится к технологиям коммутации IP-пакетов и подразумевает обмен пакетами с использованием некоторого множества маршрутов между отправителем и получателем – маршрутной подсистемы. Существующие сети связи являются многополюсными [1,2] и, в этой связи, термин "пропускная способность сети" теряет смысл. Исходя из этого, используется термин "производительность сети". Такая производительность требует развития методов комплексного анализа устойчивости сети и организации её функционирования. То есть устойчивая МСС рассматривается в двух аспектах: структурном и функциональном. При этом устойчивость функционирования определяется структурными характеристиками МСС. В настоящей статье рассматриваются модели устойчивости и функционирования IP-сетей с маршрутным параллелизмом [3], а также методика экспресс-анализа их устойчивости.

#### Информация об авторах:

**Куделя Виктор Николаевич**, ведущий специалист, д.т.н., ЗАО "Институт Сетевых Технологий", г. Санкт-Петербург, Россия  
**Гель Валентин Эдуардович**, начальник научно-исследовательского центра, к.т.н., доцент, ФГКВОУ ВПО "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М.Буденного" Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия  
**Вовк Валерий Васильевич**, начальник управления, управление связи ВС РФ, Москва, Россия

#### Для цитирования:

Куделя В.Н., Гель В.Э., Вовк В.В.. Методика экспресс-анализа устойчивости функционирования мультисервисной сети связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №7. С. 23-27.

#### For citation:

Kudelya V.N., Gel V.E., Vovk V.V. (2021) Method of rapid analysis of stability functioning multiservice communication network. T-Comm, vol. 15, no.7, pp. 23-27. (in Russian)

**Технологическая концепция мультисервисной сети связи с маршрутным параллелизмом**

Технология маршрутного параллелизма относится к технологиям коммутации IP-пакетов и подразумевает обмен пакетами с использованием некоторого множества маршрутов между отправителем и получателем – маршрутной подсистемы. В этом случае мультисервисная сети связи с маршрутным параллелизмом – это распределенные средства управления и коммутации, объединенные протоколом мультимаршрутизации и реализующие несколько служб доставки на основе:

- маршрутного параллелизма доставки потоков IP-пакетов;
- структурно-динамической адаптации к дестабилизирующим факторам (механизмы обеспечения устойчивости функционирования сети);
- многомаршрутной коррекции ошибок в сети (механизмы обеспечения качества обслуживания) [4];
- программируемость структуры сети.

**Модель устойчивости мультисервисной сети связи**

Обобщая различные аспекты устойчивости [1, 2, 5] в работе под устойчивостью функционирования понимается способность сети выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов, то есть способность сети максимально эффективно использовать обобщенную производительность всех исправных элементов сети (сетевых узлов) и пропускную способность предоставляемых ресурсов связи (каналы, тракты и т.д.). Будем считать, что МСС компонуется сетевыми узлами  $n_i, n_i \in N; i = 1, 2, \dots, n$  с одинаковыми характеристиками. Сетевой узел представляет всю совокупность устройств, входящих в узел (включая ресурсы связи) и обеспечивает мультимаршрутизацию IP-пакетов.

Пусть МСС находится в состоянии  $m_v \in E_0^n = \{1, 2, \dots, n\}$ , если в маршрутной подсистеме имеется  $m$  маршрутов между сетевыми узлами  $n_s$  и  $n_t$ . Тогда модель устойчивости МСС определяется структурой из  $N$  сетевых узлов со следующими характеристиками:

Характеристика	Символ	Зависимость	Свойства
Множество маршрутов в маршрутной подсистеме между сетевыми узлами $n_s$ и $n_t$	$M^{(n_s \rightarrow n_t)}$	-	Каждый маршрут в маршрутной подсистеме имеет условный вес
Упорядоченное множество маршрутов в маршрутной подсистеме между сетевыми узлами $n_s$ и $n_t$	$M_v$	$M_v \in M^{(n_s \rightarrow n_t)}$	
Мощность множества маршрутов	$m$	$m =  M^{(n_s \rightarrow n_t)} $	
Мощность допустимого множества функ-	$m_{дон}$	$m_{дон} \leq m$	Число маршрутов способное удовлетворить требования к качеству обслу-

Функционирующих маршрутов			живания МСС, то есть удовлетворяет требованиям принципа оптимальности
Мощность упорядоченного множества функционирующих маршрутов	$m_v$	$m_v \leq m_{дон}$	
Производительность сетевого узла	$\mu_{CV}$	-	$\mu_{CV}$ и $k_{ГCV}$ учитывают характеристики всей совокупности устройств и ресурсов связи по параллельно-последовательной схеме (метод разложения Шеннона-Мура)
Коэффициент готовности сетевого узла	$k_{ГCV}$	-	
Производительность маршрута	$\mu_i$	$\mu_i = \min_1^n \mu_{CV}$	$\mu_i \geq \mu_{зад}$ и $k_{Гi} \geq k_{Гзад}$
Коэффициент готовности маршрута	$k_{Гi}$	$k_{Гi} = \prod_1^n k_{ГCV}$	Заданные значения $\mu_{зад}$ и $k_{Гзад}$ , обеспечивают возможность решения задач коррекции ошибок на множестве маршрутов
Производительность маршрутной подсистемы	$\Omega(m_{дон})$	$\Omega(m_{дон}) = k_{Гi} \times \Delta(m - m_{дон}) \times \varepsilon(m, \mu_i)$ $k = 1, 2, \dots$ $\Delta(m - m_{дон}) = \begin{cases} 1, m \geq m_{дон} \\ 0, m < m_{дон} \end{cases}$	Отказы сетевых узлов из состава маршрутов (вплоть до $N - k$ ) и восстановления отказавших, приводят только к увеличению или уменьшению задержек и/или потерь (искажений) пакетов
Функция производительности	$\varepsilon(m, \mu)$	$\varepsilon(m, \mu) = m_{дон} \times$	

Устойчивая МСС - это сеть, поддерживающая функционирование допустимого количества маршрутов  $m_{дон}$  между  $n_s$  и  $n_t$ . Допустимое количество маршрутов определяется на множестве (избыточности) сетевых узлов в МСС. Количество сетевых узлов переменное и заключено между 0 и  $N - k_{дон}$  ( $k_{дон}$  - минимально допустимое число работоспособных узлов, гарантирующее наличие  $m_{дон}$ ).  $k_{дон}$  обеспечивается системой восстановления. Все исправные узлы включаются в МСС и участвуют в реализации маршрутного параллелизма, что приводит к уменьшению задержек, потерь и искажений пакетов.

Современные сети связи обязательно включают в себя систему восстановления и, в силу естественной избыточности сети, процесс восстановления заключается, как правило, в исключении отказавших и включение восстановленных сетевых узлов. Будем считать, что ремонтные работы в МСС осуществляются системой восстановления, состоящей из некоторого количества устройств. Будем полагать также, что для формирования в МСС виртуальных конфигураций имеются специальные средства (узлы центра). Узлы центра предназначаются для выполнения следующих функций:

- формирование новых структур (подсетей, маршрутных подсистем) МСС за счет оперативного перераспределения сетевых узлов с участков сети с малой загрузкой на участки, требующие восстановления, а также из оставшихся работоспособных и вновь отремонтированных узлов;
- динамическая маршрутизация (формирование и/или корректура маршрутов) МСС с целью достижения соответ-

вия между требованиями к задержкам, потерям (искажениям) и числом маршрутов, используемых для реализации маршрутно-параллелизма.

Таким образом, в МСС с маршрутным параллелизмом заложены гибкие структурные возможности для виртуализации структуры. В данном случае устойчивость МСС рассматривается только в структурном аспекте, то есть, считаем, что в МСС обеспечиваются возможности для достижения необходимого количества параллельно функционирующих маршрутов  $m_{Доп}$ , состоящих из  $k$  исправных сетевых узлов,  $k \in \{k_{Доп}, k_{Доп} + 1, \dots, n\}$ .

**Модель функционирования мультисервисной сети связи**

В отличие от других понятий устойчивости (живучести, надежности) в МСС устойчивость определяется и понятием «функционирование» – возможностью сети адаптироваться к изменению условий функционирования в результате воздействия внешних дестабилизирующих факторов. Исходя из этого, при построении МСС должна обеспечиваться не только возможность обеспечения  $m_{Доп}$  количество маршрутов в маршрутной подсистеме (как следствие обеспечиваться избыточность сетевых узлов  $k_{Доп}$ ) но и рациональное использование  $m_{Доп}$  для обеспечения максимально возможной производительности  $\Omega(m_{Доп})$  и требуемого качества обслуживания. Для МСС с маршрутным параллелизмом это возможность рационального, а в идеале оптимального, распределения потоков IP-пакетов в маршрутной подсистеме (инжиниринг трафика).

В RFC 2702 «Requirements for Traffic Engineering Over MPLS» изложены общие рекомендации Internet Engineering Task Force (IETF) по решению задачи инжиниринга трафика (TE), где в качестве целевой функции оптимизации маршрутов используется выражение:

$$\min(\max k_{Pi})$$

где  $k_{Pi}$  - коэффициент использования  $i$ -го маршрута.

Другим вариантом постановки задачи TE является поиск такого набора маршрутов, в котором значение коэффициента использования не превысит некоторый заданный порог  $k_{И(n_s \rightarrow n_t)3}$ .

В производимом сегодня оборудовании применяется вариант MPLS TE с последовательным рассмотрением потоков и поиском маршрутов по очереди. Он проще в реализации и ближе к стандартам для существующих протоколов маршрутизации процедурам нахождения кратчайшего пути. В этом случае при появлении новых потоков, или изменении интенсивности существующих, или изменение характеристик маршрутов задача инжиниринга трафика может быть не решена.

**Методика экспресс-анализа устойчивости функционирования мультисервисной сети связи**

Исходные данные для экспресс-анализа устойчивости функционирования мультисервисной сети связи с маршрутным параллелизмом представлены в таблице.

Данные	Символ	Примечание
Интенсивность входящего потока	$\lambda$	
Интенсивность входящего потока на $i$ -м маршруте	$\lambda_i$	
Интенсивность обработки пакетов на маршруте	$\mu_i$	Производительность $i$ -го маршрута
Коэффициент готовности маршрута	$k_{Гi}$	
Коэффициент простоя	$k_{Pi}$	$k_{Pi} = 1 - k_{Гi}$
Время простоя маршрута	$T_{Pi}$	Время простоя маршрута, учитывает не только простои в неисправном состоянии (ремонт) оборудования из состава маршрута, но и простои в исправном состоянии, при техническом обслуживании оборудования и т.д.
Объем потока	$V_i$	

Постановка задачи: Оптимизировать коэффициент использования набора маршрутов в маршрутной подсистеме  $K_{И(n_s \rightarrow n_t)}$ . То есть задача ставится практически также как и в RFC 2702, но для маршрутной подсистемы, а именно максимизировать функцию  $K_{И(n_s \rightarrow n_t)} = \prod_{i=1}^r P_i k_{Pi}$ ,  $\sum_{i=1}^r P_i = 1$ , где в этом

случае  $P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}$  - вероятность нахождения пакета в  $i$ -том маршруте.

В МСС задача TE может заключаться и в поиске такого набора маршрутов, в котором значение коэффициента использования маршрута не превысит некоторый заданный порог  $K_{И(n_s \rightarrow n_t)3}$ . То есть требуется определить коэффициент использования набора маршрутов в маршрутной подсистеме с блоком распределения потоков при оптимальном использовании маршрутов. Пусть имеется  $m_{Доп}$  разнородных по производительности и устойчивости функционирования маршрутов. Выберем достаточно большой промежуток времени  $T$  такой, чтобы в течение этого промежутка все маршруты могли функционировать как в исправном, так и неисправном состояниях, т.е.  $T = T_O + T_{Pi}$ , тогда получим  $k_{Pi} = \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Pi}}$ ,  $T_{Oi}$  - время

использования маршрута по назначению. Алгоритм экспресс-анализа включает следующие шаги:

Шаг алгоритма	Содержание шага	Ограничения
Шаг 0	Ввод исходных данных $\mu_i, k_{Гi}, k_{Pi}, T_{Pi}, \lambda_i$	$i = 1, \dots, m_{Доп}$
Шаг 1	Расчет по формуле $K_{И(n_s \rightarrow n_t)} = \prod_{i=1}^{m_{Доп}} P_i \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Pi}}$	Функция $K_{И(n_s \rightarrow n_t)}$ представляет собой произведение коэффициентов, каждый из которых зависит только от одной переменной $\lambda_i$

Шаг 2	Определение коэффициента по формуле $D_i = \mu_i k_{\Gamma_i}$	Искомое решение конкретной задачи может оказаться как внутри ограниченной области $M$ -мерного пространства, так и за её пределами. Однако при ограничении $\lambda < \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} \mu_i k_{\Gamma_i}$ искомое решение находится только в области набора маршрутов
Шаг 3	Определение коэффициента по формуле $C_i = \sqrt{\mu_i k_{\Gamma_i} (1 + \mu_i k_{\Gamma_i} k_{\Pi_i} T_{\Pi_i})}$	
Шаг 4	Расчет вероятности нахождения пакета в $i$ -том маршруте по формуле $P_i = \frac{D_i \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} C_i - C_i \left( \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} D_i - \lambda \right)}{\lambda \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} C_i}$	Известно, что такая функция при условии принятых ограничений в $M$ -мерном евклидовом пространстве является одноэкстремальной и отсюда вероятность нахождения пакета в $i$ -том маршруте, который максимизирует производительность маршрутной подсистемы $m_{\text{Доп}}$ . Формула для $P_i$ определяет для условий максимума $K_{H(n_s \rightarrow n_t)}$ без учета одного из достаточных условий его существования $P_i \geq 0$ .
Шаг 5	Определим коэффициент простоя по формуле $k_{\Pi_i} = \frac{T_{\Pi_i}}{T_{O_i} + T_{\Pi_i}}$	
Шаг 6	Определим коэффициент использования всех маршрутов маршрутной подсистемы по формуле $K_{HIV \max i} = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} K_{HIV i} = \frac{T_{O_i}}{T_{O_i} + T_{\Pi_i}} k_{\Pi_i}$	
Шаг 7	Упорядочим множество $M$ . Мерой качества работы маршрута в этом случае служит максимальный коэффициент использования $i$ -го маршрута при обслуживании потока объемом $V_i$ в порядке увеличения $K_{HIV \max i}$ таким образом, чтобы маршруту с номером 1 соответствовало $K_{HIV \max i} = \max_{m_{\text{Доп}}} \{K_{HIV \max i}\}$ , а маршруту с номером $m_{\text{Доп}}$ - $K_{HIV \max i} = \min_{m_{\text{Доп}}} \{K_{HIV \max i}\}$	Параметром включения $k$ -го маршрута будет такая интенсивность входящего потока $\lambda_{Bk}$ , при которой для выполнения условий максимума функции $K_{H(n_s \rightarrow n_t)}$ при увеличении входящего потока необходимо включать в функционирование $i$ -ый маршрут упорядоченного множества $M_y$ . Параметр $\lambda_{Bm_{\text{Доп}}}$ определяется из формулы для $P_i$ при условии $P_i = 0$
Шаг 8	Расчет $\lambda_{Bm_{\text{Доп}}} = \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} D_i - D_{m_{\text{Доп}}} \frac{\sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} C_i}{C_{m_{\text{Доп}}}}$	
Шаг 9	Определяем подмножество $m_y$ функционирующих маршрутов упорядоченного множества $M_y$ из системы неравенств $\lambda_{B1} \leq \lambda_3 < \lambda_{B(i+1)}, m_y = i, (i+1) \leq m_{\text{Доп}};$ $\lambda_{Bm_{\text{Доп}}} \leq \lambda_3 < \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} \mu_i k_{\Gamma_i}, m_y = m_{\text{Доп}}$	Для $\lambda < \sum_{i=1}^{m_{\text{Доп}}} \mu_i k_{\Gamma_i}$

Далее, определив по заданной интенсивности входящего потока подмножество функционирующих маршрутов  $m_y$ , по формуле для  $P_i$  находим вероятность попадания пакета в маршруты, а по формуле для  $K_{H(n_s \rightarrow n_t)}$  - коэффициент использования маршрутной подсистемы.

Определим подмножество  $m_y$  функционирующих маршрутов и допустимую интенсивность входящего потока  $\lambda_{\text{Доп}}$  по заданной величине  $K_{H(n_s \rightarrow n_t)}$ . Обозначим через  $K_{HIVB_{m_y}}$  средний коэффициент использования, соответствующей параметру  $\lambda_{Bm_y}$ . Подставляя в значение  $P_i$  и  $\lambda_{Bm_y}$ , после нескольких преобразований получаем

$$K_{HIVB1} = K_{HIV \max 1};$$

$$K_{HIVB_{m_y}} = \frac{C_{m_y}}{D_{m_y} \left( \sum_{i=1}^{m_y} D_i - D_{m_y} \frac{\sum_{i=1}^{m_y} C_i}{C_{m_y}} \right)} \sum_{i=1}^k \left( C_i - \frac{C_i^2 D_{m_y}}{D_i C_{m_y}} \right), m_y \geq 2$$

Подмножество функционирующих маршрутов  $m_y$  упорядоченного множества  $M_y$  определяется из системы неравенств

$$\left. \begin{aligned} K_{HIVB1} < K_{HIV3}, m_y = 0; \\ K_{HIVB(i+1)} \leq K_{HIV3} < K_{HIVBi}, m_y = i; \\ K_{HIV3} \leq K_{HIVB_{m_{\text{Доп}}}}, m_y = m_{\text{Доп}} \end{aligned} \right\}$$

Решение  $m_y = 0$  при  $K_{HIVB1} < K_{HIV3}$  означает, что заданный коэффициент при выбранном варианте использования набора маршрутов реализован быть не может. Допустимая интенсивность входящего потока  $\lambda_{\text{Доп}}$  при определенном числе функционирующих маршрутов  $m_y$  и заданном  $K_{HIV3}$  получается из

$$\lambda_{\text{Доп}} \leq \frac{K_{HIV3} \sum_{i=1}^{m_y} D_i - \frac{\sum_{i=1}^{m_y} C_i^2}{D_i} + \sqrt{\left( K_{HIV3} \sum_{i=1}^{m_y} D_i + \frac{\sum_{i=1}^{m_y} C_i^2}{D_i} \right)^2 - 4K_{HIV3} \left( \sum_{i=1}^{m_y} C_i \right)^2}}{2K_{HIV3}}$$

### Литература

1. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
2. *Монахов О.Г., Монахова Э.А.* Исследование топологических свойств регулярных параметрически описываемых структур вычислительных систем // Автометрия. 2008. №2. С. 56-67.



3. Куделя В.Н., Гель В.Э. Технологическая концепция защищённой сети передачи данных с маршрутным параллелизмом // Научно-технический сборник №100. Труды Академии. СПб.: ВАС, 2017. С. 247-262.

4. Viktor Kudelya, Valentine Gel, Valeriy Vovk. Technological model and sustainability assessment methodology of the multiservice

communication network functioning // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №6. С. 70-74.

5. Хорошевский В.Г. Модели функционирования больше-масштабных распределённых вычислительных систем // Электро-связь. 2004. №10. С. 30-43.

## METHOD OF RAPID ANALYSIS OF STABILITY FUNCTIONING MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORK

**Viktor N. Kudelya**, Institute for Networking Technology, Saint-Petersburg, Russia, [Kudelia.Viktor@int.spb.ru](mailto:Kudelia.Viktor@int.spb.ru)  
**Valentine E. Gel**, Military Academy of Communications, Saint-Petersburg, Russia, [gel@rambler.ru](mailto:gel@rambler.ru)  
**Valeriy V. Vovk**, General Directorate of communications, Moscow, Russia, [GUS\\_I@mil.ru](mailto:GUS_I@mil.ru)

### Abstract

Continuous improvement of the architecture of multi-service communication networks (MCN) is due to the need for networks with a capacity of tens of Tbit/s. Existing communication networks are multi-pole [1,2] and, in this regard, the term "network bandwidth" loses its meaning. Based on this, the term "network performance" is used. Such performance requires the development of methods for complex analysis of network stability and organization of its functioning. Usually, the network stability is considered in two aspects: potential and structural. This article discusses the models of stability and functioning of IP networks with route parallelism [3], as well as the method of express analysis of their stability.

**Keywords:** networking, resilience, reliability, survivability, structural switching.

### References

1. I. Ryabinin (2000). Reliability and security of structure-sophisticated systems. SPb.: Politechnika. 248 p.E. .
2. O. Monakhov, E. Monakhova (2008). Analysis of topological properties of the regular parametric-described structures of computer systems. *Avtometriya*. Vol. 2. P. 56-67.
3. V.N. Kudelya, V.E. Gel. Technological concept of a secure data transmission network with route parallelism. *Scientific and technical collection*. No. 100. Proceedings of the Academy. St. Petersburg: VAS, 2017. - pp. 247-262.
4. Viktor Kudelya, Valentine Gel, Valeriy Vovk. (2021). Technological model and sustainability assessment methodology of the multiservice communication network functioning *T-Comm*. 2021. Vol. 15. No. 6. P. 70-74.
5. V. Khoroshevskiy (2004). Models of operating of big distributed computer systems. *Electrosvyas*. No.10. P. 30-43.