

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ КАНАЛОВ СОВРЕМЕННОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

В статье рассмотрена проблема живучести телекоммуникационной сети в условиях действий внешних дестабилизирующих факторов. Представлена зависимость вероятности сохранения работоспособности элементов сети телекоммуникаций от возможного ущерба

**Ключевые слова:** живучесть сети, коэффициент оперативной готовности канала, работоспособность, системы восстановления.

### Введение

Эффективное развитие Украины и ее конкурентоспособность в настоящее время возможны лишь при условии наличия развитой информационной инфраструктуры. Замечено, что страны с сильными экономиками имеют очень развитые телекоммуникационные сети с возможностью передачи информации измеряемых сотнями Гигабит. Отсюда следует вывод, что информационные каналы это артерии экономики страны и высокий материальный достаток ее граждан. Создание эффективного информационного пространства предполагает активное использование телекоммуникационных систем и сетей информационного обмена, широкомасштабную компьютеризацию процессов обработки информации во всех сферах деятельности. Этот процесс, как доказано, уже охватил практически все страны мира и является в настоящее время стержнем их научно-технического, экономического и социального развития.

Телекоммуникации являются неотъемлемой частью производственной и социальной инфраструктуры Украины и предназначены для удовлетворения потребностей физических и юридических лиц, органов государственной власти в телекоммуникационных услугах.

На сегодняшний день самой перспективной частью телекоммуникационных систем является переход к сетям будущего поколения FN (Future Networks), которые в свою очередь используют концептуальные принципы программно-определяемых сетей (Software-defined Networks, SDN). Основной особенностью программно-определяемых сетей, есть их возможность к самовосстановлению и самоорганизации, что подразумевает высокую их живучесть. В связи с таким интенсивным развитием телекоммуникаций, в наше время, обеспечение живучести телекоммуникационных сетей связи становится все более актуальным, так как живучесть сети является одним из важнейших свойств их функционирования.

### Основная часть

Устойчивость телекоммуникационной сети (далее ТКС) по состоянию ее сетевого построения оценивается возможностями сети адаптироваться к изменению условий функционирования в результате воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ). Под ВДФ мы понимаем определенный вид внешних воздействий, параметры которого превышают значения, на которые рассчитан элемент сети при его проектировании.

Сетевое построение определяется:

- возможностью резервирования линий связи;
- выбором различных сред распространения сигналов;
- оптимальностью топологии ТКС (достаточности ее разветвленности);
- обеспечением взаимодействия с сетями других операторов связи.

Перечисленные методы сетевого построения используются в качестве сетевых методов обеспечения устойчивости (надежности и живучести) современных телекоммуникационных сетей.

Надежность сети определяется надежностью каналов связи, организуемых в ТКС и она зависит от надежности оборудования. Канал сети ограничивается точками присоединения к другим ТКС или сетям доступа, к которым присоединяются оконечные линии пользователей.

Живучесть это комплекс научных знаний о закономерностях сохранения системой определённого качества при повреждении ее элементов и о способах обеспечения данного свойства.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации [1].

Повреждения могут быть существенными, приводящими к изменению состояния элементов, и несущественными.

Элементы системы могут находиться в двух состояниях – работоспособном ( $r$ ) и неработоспособном ( $\bar{r}$ ). Переход состояний элементов возможен в обоих направлениях:

$r \rightarrow \bar{r}$  – при повреждении элемента;

$r \leftarrow \bar{r}$  – при восстановлении его работоспособности.

Повреждения являются следствием действия:

- Стихийных бедствий, согласно с [2], а именно землетрясения, цунами, наводнения, ураганы, торнадо, пожары, оползни и т.д.;

- аварийных ситуаций (аварийные повреждения);

- ошибок обслуживающего персонала (эксплуатационные повреждения).

В зависимости от степени сложности организации и класса систем в рамках современной теории катастроф, а также уровня анализа, свойство живучести может проявляться как сложное интегральное качество системы и, соответственно, количественно оцениваться показателями устойчивости, прочности, надежности, адаптивности, отказоустойчивости, помехоустойчивости и т.д. (см. рис. 1).

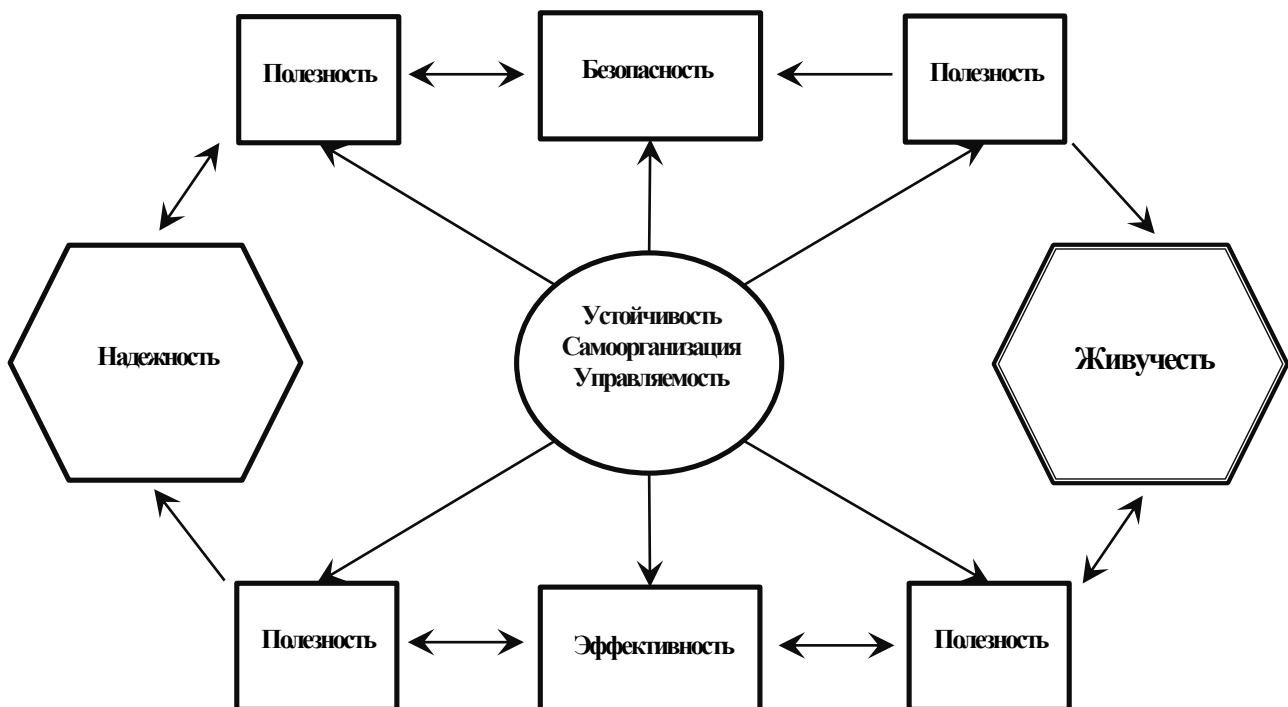


Рисунок 1 Живучесть рассматривается как управляемость при наличии повреждений

Таким образом, живучесть ТКС – свойство, характеризующее способность телекоммуникационной сети эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) или восстанавливать данную способность в течение заданного времени.

### УСЛОВИЯ ЖИВУЧЕСТИ ТКС

Условия живучести телекоммуникационных сетей линейных систем являются справедливыми как для малых, так и для больших возмущений системы. Для нелинейных систем, исследование которых производится с помощью линеаризованных уравнений, условие живучести справедливо для малых возмущений [3].

Для решения вопросов живучести ТКС можно использовать линеаризованное дифференциальное уравнение замкнутой системы:

$$(c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_n) \beta(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) \alpha(t). \quad (1)$$

Полное решение уравнения можно представить суммой вынужденной  $\beta_B(t)$  и переходной  $\beta_{\Pi}(t)$  составляющих:

$$\beta(t) = \beta_B(t) + \beta_{\Pi}(t). \quad (2)$$

Вынужденная составляющая, предоставляющая собой частное решение уравнения, является полезной составляющей управляемой величины и характеризует установившийся режим системы. Переходная составляющая является решением однородного дифференциального уравнения и характеризует переходный режим. Очевидно, что ТКС будет живучей, если переходная составляющая в ней с течением времени затухает.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_{\Pi}(t) = 0 \quad (3)$$

Если же  $\beta_{\Pi}(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  не стремится к нулю, а возрастает или изменяется по закону незатухающих колебаний, то сеть не живучая. Таким образом, для определения живучести необходимо выявить только характер изменения переходной составляющей решения, т.е. достаточно исследовать однородное уравнение замкнутой системы:

$$(c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_{n-1} p + c_n) \beta_{\Pi}(t) = 0 \quad (4)$$

Переходная составляющая (решение однородного уравнения) в случае некрайних корней может быть представлена в виде следующей суммы:

$$\beta_{\Pi}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t} = \sum_{i=1}^n A_i e^{p_i t} \quad (5)$$

где  $A_i$  – начальное значение  $i$ -й компоненты переходной составляющей (постоянная интегрирования);  $p_i$  –  $i$ -й корень характеристического уравнения однородного уравнения замкнутой системы (4)

$$c_0 p^n + c_1 p^{n-1} + \dots + c_{n-1} p + c_n = 0$$

Что бы ТКС была живучей, решение (5) должно удовлетворять требованию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_{\Pi}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n A_i e^{p_i t} = 0 \quad (7)$$

Из формулы (5) видно, что затухание  $\beta_{\Pi}(t)$ , т.е. живучесть сети, зависит от значения корней  $p_1, p_2, \dots, p_n$  характеристического уравнения замкнутой системы (6). Пусть среди них будет  $s$  корней вещественных и  $n - s$  – комплексно-сопряженных. Тогда решение (5) можно записать в виде:

$$\beta_{\Pi}(t) = \sum_{k=1}^s A_k e^{p_k t} + \sum_{i=1}^{(n-s)/2} A_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i). \quad (8)$$

Приведем, как влияют значения корней на первую и вторую суммы формулы (8) при  $t \rightarrow \infty$ . Если все вещественные корни отрицательны ( $p_k < 0$ ), то каждая составляющая первой суммы в формуле (8) представляет затухающую экспоненту и поэтому  $\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^s A_k e^{p_k t} = 0$ . Если вещественные части  $\alpha_i$  всех комплексных корней отрицательны, то каждое слагаемое второй суммы (8) описывает затухающее колебание и поэтому

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{(n-s)/2} A_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) = 0. \quad (9)$$

Отсюда можно сделать вывод, что если все вещественные корни и все вещественные части комплексных корней отрицательны (все корни находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости корней, рис 2, а), то  $\lim_{t \rightarrow \infty} \beta_{\Pi}(t) = 0$  и сеть будет живучая. Если хотя бы один из вещественных корней или вещественная часть пары комплексных корней окажется

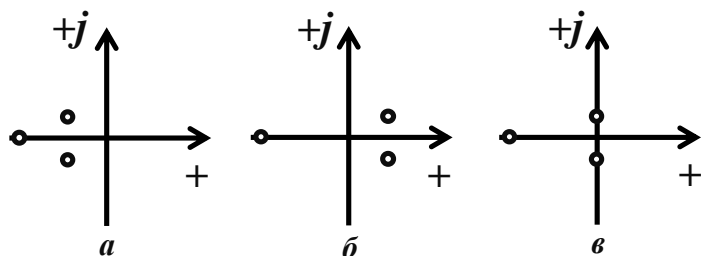


Рисунок 2 Примеры расположения корней характеристического уравнения замкнутой системы на комплексной плоскости:

положительной (рис. 2, б), то сеть будет не живучей, так как соответствующие этим корням составляющие в решении (8)  $A_k e^{p_k t}$  и  $A_i e^{\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i)$  с течением времени будут неограниченно возрастать. Если вещественная часть хотя бы одного корня равна нулю, а вещественные части остальных корней отрицательны (рис. 2, в), то сеть находится на границе живучести.

Таким образом, условием живучести ТКС является отрицательность вещественных частей всех корней ее характеристического уравнения (расположение всех корней характеристического уравнения в левой полуплоскости комплексной плоскости корней).

#### Расчет показателей живучести каналов ткс

В качестве показателя живучести каналов ТКС применяют коэффициент оперативной готовности Ко.г [4] канала электросвязи, определяемый выражением:

$$K_{o.g} = P(T)K_g, \tag{10}$$

где  $K_g$  – коэффициент готовности;  $P(T)$  – вероятность сохранения работоспособности канала ТКС при воздействии ВДФ.

Коэффициент готовности  $K_g$  [4] канала телекоммуникационной сети, можно определить выражением:

$$K_g = \frac{T_o}{(T_o + T_b)}, \tag{11}$$

где  $T_o$  – среднее время наработки на отказ канала ТКС;  $T_b$  – среднее время восстановления работоспособности канала.

Коэффициент оперативной готовности канала электросвязи рассчитывается как вероятность связности между двумя точками подключения к телекоммуникационной сети потребителей по методике, приведенной в [5].

При воздействии ВДФ отказ любого элемента сети связи равновероятен. Поэтому при выбранном возможном уровне ущерба на телекоммуникационной сети после воздействия ВДФ (см. таблицу 1), значение  $P(T)$  для всех элементов сети одинаково.

Таблица 1

Градации уровней ущерба сети в зависимости от возможного уровня воздействия ВДФ на ТКС и соответствующие им уровни нарушения безопасности.

Уровень воздействия ВДФ на ТКС	Ущерб, причиняемый элементам сети воздействием ВДФ, %	Уровни нарушения безопасности ТКС
Высокий	До 50	Высокий
Низкий	До 10	Низкий

Значение  $P(T)$  выбирают из таблицы 2 по уровню возможного ущерба, причиняемого элементам сети ТКС воздействием ВДФ.

Таблица 2

Зависимость вероятности сохранения работоспособности элементов ТКС от ущерба, причиняемого им воздействием ВДФ

Ущерб, причиняемый элементам ТКС воздействием ВДФ, %	Вероятность сохранения работоспособности элементов телекоммуникационных сетей P(T)
До 50	0,5
До 10	0,9

В требованиях к живучести сети электросвязи указывают допустимый уровень снижения показателей связности на основных направлениях связи после воздействия ВДФ. Требования к живучести основных направлений связи, приведенны в таблице 3.

Таблица 3

Требования к живучести основных направлений связи

Уровень ущерба	Ущерб сети связи наносимый воздействием ВДФ, %	Коэффициент оперативной готовности для каналов связи
Высокий	До 50	0,80-0,7
Низкий	До 10	0,9-0,8

Для восстановления показателей связности на ТКС должна быть предусмотрена система восстановления. Наличие системы восстановления определяет потенциальную возможность (даже при максимальных ущербах, наносимых сети при воздействии ВДФ) адаптироваться к изменившимся условиям эксплуатации и, в течение заданного времени развертывания, обеспечить потребителей телекоммуникационными услугами в требуемом объеме.

Задачи, решаемые системой восстановления, подразделяют на три временные составляющие [4]:

1) задачи оперативного восстановления разрушенных основных направлений связи потребителей за нормативное время до 48 ч, реализуемые мобильными и перевозимыми средствами;

2) задачи восстановления среднесрочного характера, реализуемые в совокупности мобильными и подвижными средствами восстановления связи с целью частичного удовлетворения потребностей пользователей (от 10 % до 30 % требуемого числа каналов);

3) задачи восстановления долгосрочного характера, обеспечивающие полное восстановление объектов связи и структуры ТКС.

Основная задача построения системы восстановления состоит в том, чтобы оператор связи обладал необходимым числом подвижных и перевозимых средств связи, которые могут быть использованы для оперативной замены поврежденного оборудования.

Наиболее рациональное построение системы восстановления заключается в том, чтобы максимально использовать оборудование, которое находится в повседневной эксплуатации на малозначимых участках сети связи и может быть оперативно переведено, за отведенное время, на участки, требующие восстановления. Учитывая все вышеперечисленные условия для обеспечения живучести, как пример зонавая ТКС оператора телекоммуникаций будет иметь следующий вид (рис. 3).

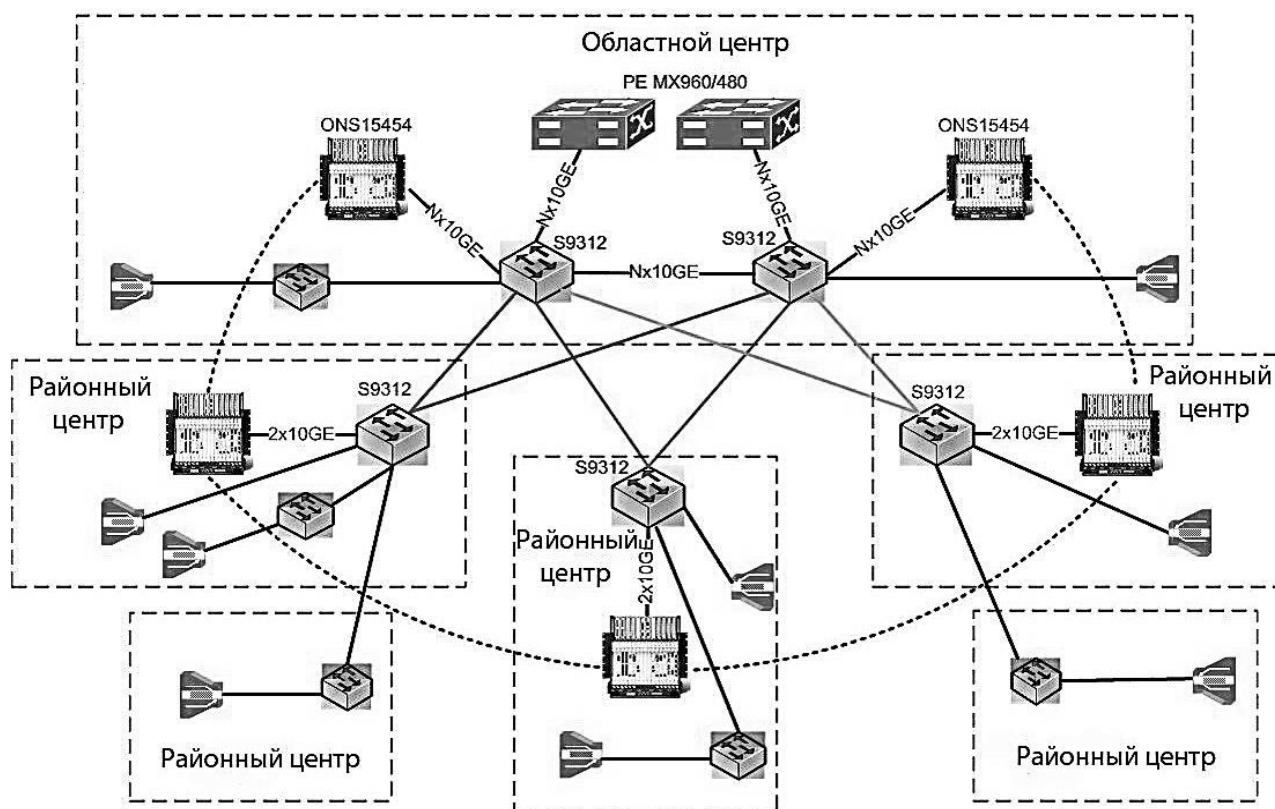


Рисунок 3 Схема организации зонной ТКС

### Выводы

В статье сформулированы определения устойчивости, надежности, живучести ТКС и её условия. Представлена методика расчета показателей живучести телекоммуникационной сети и определены требования к живучести основных направлений связи. Сформулирована основная задача построения системы восстановления, которая может быть использована оператором связи для возобновления функционирования сети и обеспечения услугами потребителей. Приведены градации уровней ущерба сети в зависимости от возможного уровня воздействия ВДФ на ТКС и соответствующие им уровни нарушения безопасности.

Использование методики расчета показателей живучести телекоммуникационной сети позволит перейти к разработке обоснованных рекомендаций по достижению достаточного уровня живучести ТКС, что позволит считать такие сети наиболее перспективными в ближайшие десятилетия.

### Литература

1. Стекольников Ю.И. Живучесть систем – СПб.: Политехника, 2002. – 155с.
2. Disaster management for improving network resilience and recovery with movable and deployable information and communication technology (ICT) resource units // ITU-T Recommendation L.392. – 2016.
3. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Брицкий О.И. Теория автоматического управления. – К., Техніка, 2002. – 688 с.
4. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования // ГОСТ Р 53111-2008.
5. Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Отрох С.И., Ярош В.О. Методика оцінки сталості телекомунікаційної мережі в умовах дії зовнішніх непрогнозованих дестабілізуючих факторів – Зв'язок – 2016 – №5.

Надійшла 01.12.2016 р.

Рецензент: д.п.н., доц. Присяжнюк С.І.