

УДК 621.391

В. Б. ТОЛУБКО, доктор техн. наук, професор;

Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;

С. І. ОТРОХ, канд. техн. наук, доцент;

В. О. ЯРОШ, аспірант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ СТАЛОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНІХ НЕПРОГНОЗОВАНИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Наведено методику розрахунку оцінки сталості телекомунікаційної мережі в умовах дії зовнішніх непрогнозованих дестабілізуючих факторів, забезпечуваної завдяки підвищенню надійності засобів зв'язку та вдосконаленню топології мережі.

Ключові слова: сталість телекомунікаційної мережі; теорія катастроф; біфуркації; коефіцієнт готовності; надійність і живучість мереж зв'язку.

Вступ

Забезпечення сталого функціонування телекомунікаційної мережі України в цілому — завдання загальнодержавної ваги, розв'язання якого поряд зі створенням і розвитком системи централізованого управління зазначеною телекомунікаційною мережею, підвищенням надійності засобів, систем і об'єктів зв'язку, удосконаленням топології мереж зв'язку є розробка ефективної методики оцінювання сталості телекомунікаційної мережі, що зазнає впливу зовнішніх непрогнозованих дестабілізуючих факторів (ДФ).

Головне завдання системи відновлення життєдіяльності мережі полягає в поетапному забезпеченні заданої кількості каналів на заздалегідь позначених найважливіших напрямках зв'язку в інтересах державного управління, оборони, безпеки та охорони правопорядку в разі будь-яких (навіть масових) руйнувань на мережі зв'язку.

Поряд із виконанням головного завдання система відновлення має підтримувати сталість функціонування телекомунікаційної мережі України з необхідною якістю в умовах можливих руйнувань окремих ділянок мережі, ліній і об'єктів зв'язку, коли може йтися про розгортання мобільних засобів зв'язку в районах надзвичайних ситуацій, а також обхідних і резервних мереж зв'язку.

Основна частина

Сталість функціонування телекомунікаційної мережі означає здатність мережі виконувати свої функції при виході з ладу частини її елементів під впливом ДФ, що можуть призвести й до катастрофи. Натомість **катастрофами** називаються стрибкоподібні зміни стану, які виникають у вигляді раптової відповіді системи на поступову (плавну) зміну зовнішніх умов. Зокрема, коли в ролі системи виступає телекомунікаційна мережа, катастрофа може спричинитися до перебудови

цієї мережі або метаморфоз окремих її елементів унаслідок зміни параметрів, від яких вони залежать.

У теорії катастроф широко вживаним є термін **біфуркація**, що означає «розгалуження» і використовується для позначення всіляких якісних трансформацій тих чи інших об'єктів при зміні параметрів.

Еволюційний процес математично описується векторним полем у фазовому просторі. Точка фазового простору задає стан системи. Прикладений до цієї точки вектор вказує на швидкість зміни стану.

У деяких точках абсолютна величина вектора може перетворюватись на нуль. Такі точки називають **положенням рівноваги** (стан, не змінюваний протягом певного часу). **Фазовий простір** системи, що описує взаємозв'язок ДФ і ліній зв'язку (ЛЗ), являє собою достатній квадрант площини (рис. 1). По осі абсцис відкладено кількість ЛЗ, а по осі ординат — кількість ДФ. Точка *P* — положення рівноваги. Точка *A* відповідає рівноважній кількості ЛЗ при кількості ДФ, меншій за рівноважну.

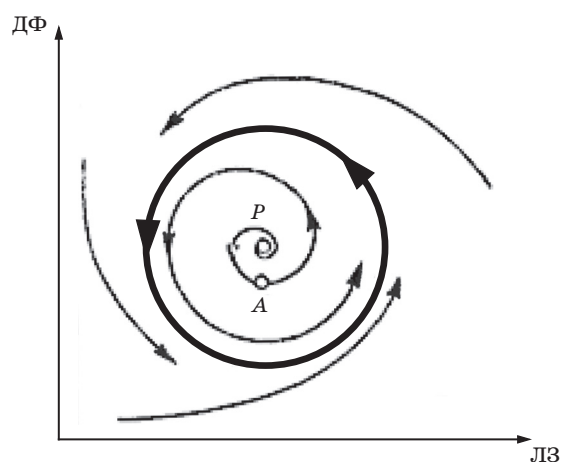


Рис. 1. Фазовий простір моделі ДФ — ЛЗ

Як бачимо, із плином часу в системі встановлюються коливання; рівноважний стан — нестійкий. Установлене коливання зображається замкненою кривою у фазовому просторі. Така крива називається *граничним циклом*.

Криві у фазовому просторі, утворені послідовними станами процесу, називаються *фазовими кривими*. В околі точки, яка не є положенням рівноваги, поділ фазового простору на фазові криві відбувається так само, як і поділ на паралельні прямі: сімейство фазових кривих можна перетворити на сімейство паралельних прямих завдяки гладкій заміні координат. Проте в околі положення рівноваги ситуація дещо складніша. Як показав свого часу А. Пуанкаре, поведінка фазових кривих в околі положення рівноваги в системі загального положення має кілька характерних особливостей (рис. 2). Більш складні випадки зводяться до поданих на рис. 2 у разі малих змін відповідних параметрів.



Рис. 2. Типові фазові портрети в околі точки рівноваги

Системи, що описують реальні еволюційні процеси, як правило, являють собою системи загального положення. Адже такі системи неодмінно залежать від параметрів, які ніколи не бувають відомі. Унаслідок малої зміни всіх її параметрів система загального положення перетворюється на систему загального положення.

Таким чином, усі випадки, складніші, аніж щойно зазначені, взагалі кажучи, не повинні траплятися в природі, і їх, здавалося б, можна й не розглядати. За такого підходу знецінюється більша частина теорії диференціальних рівнянь і взагалі математичного аналізу, де традиційно основну увагу приділяють малоцінним, але складним для дослідження випадкам не загального положення.

Але насправді все зовсім інакше, якщо нас цікавить не сама по собі система, а система як об'єкт, що залежить від одного чи кількох параметрів. Дійсно, розглянемо простір усіх систем (рис. 3), поділений на області, утворені системами загального

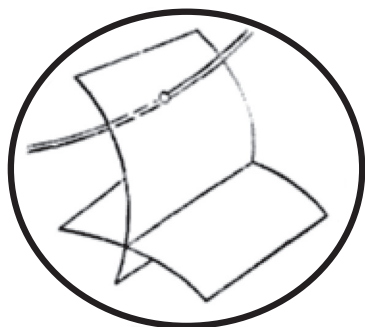


Рис. 3. Однопараметричне сімейство як крива в просторі систем

положення. Поверхні поділу відповідають виродженим системам; при малій зміні параметрів вироджена система стає невиродженою. Розглянемо однопараметричне сімейство систем, зображене кривою на рис. 3. Ця крива може трансверсально (під ненульовим кутом) перетинати межу поділу різних областей невироджених систем.

Таким чином, хоча при кожному індивідуальному значенні параметра систему малим збуренням можна перетворити на невироджену, цього не можна зробити одночасно при різних значеннях параметра: будь-яка крива, наближена до розглядуваної, перетинає межу поділу при близькому значенні параметра (виродження, усунене малим збуренням при даному значенні параметра, знову виникає при деякому близькому значенні).

Отже, вироджені випадки неусувні, якщо розглядається не індивідуальна система, а ціле сімейство. Якщо сімейство однопараметричне, то неусувними є лише найпростіші виродження, які зображаються межами ко-розмірності один (тобто задаються одним рівнянням) у просторі всіх систем. Від складніших вироджених систем, які утворюють множину ко-розмірності два в просторі всіх систем, можна позбутися малим збуренням однопараметричного сімейства.

Якщо нас цікавить двопараметричне сімейство, то можна не розглядати вироджених систем, які утворюють множину ко-розмірностей три, і т. д.

Тим самим виникає ієрархія вироджень за ко-розмірностями і формується стратегія їх дослідження: спочатку слід вивчати випадки загального стану, потім виродження ко-розмірності один, потім — ко-розмірності два і т. д. При цьому дослідження вироджених систем не повинне обмежуватися вивченням картини в момент виродження, але має включати в себе опис перебудов, що відбуваються, коли параметр, змінюючись, проходить через вироджене значення.

Викладені щойно загальні міркування належать А. Пуанкаре і застосовні не лише при дослідженні положень рівноваги еволюційних систем, а й охоплюють більшу частину всього математичного аналізу. Проте успіхи в реалізації наміченої А. Пуанкаре програми з теорії біфуркацій залишаються в більшості розділів аналізу досить скромними, частково через великі математичні труднощі, а частково й унаслідок психологічної інерції аксіоматично-алгебраїчного стилю.

Повернемося до положень рівноваги еволюційних систем. Поки що розв'язаним можна вважати лише питання про перебудову фазових кривих при біфуркаціях положень рівноваги в однопараметричних сімействах загального стану; уже випадок навіть двох параметрів виходить за рамки можливостей сьогоденного математичного апарату.

Результати дослідження загального однопараметричного сімейства наведено на рис. 4 і 5. Зокрема, на рис. 4 зображено однопараметричне сімейство еволюційних процесів із одновимірним фазовим простором (по осі абсцис відкладено значення параметра ϵ , по осі ординат — стан процесу x).

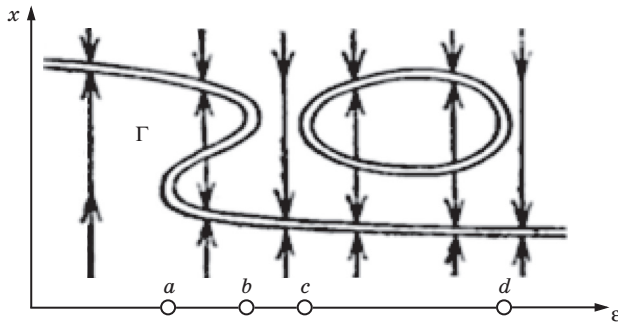


Рис. 4. Крива рівноваги однопараметричного сімейства

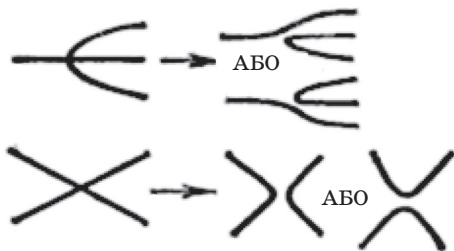


Рис. 5. Перетворення нетипових біфуркацій на типові при малому збуренні сімейства

Для однопараметричного сімейства загального положення рівноваги при всіляких значеннях параметра маємо гладку криву, таку як крива Γ на рис. 4. У загальнішому випадку розмірність многовиду станів рівноваги дорівнює кількості параметрів. Зокрема, це означає, що зображені на рис. 5 ліворуч біфуркації в сімействі загального стану не трапляються: при малому збуренні сімейство Γ перетворюється на гладку криву одного із зображених на рис. 5 праворуч типів.

Проектування кривої Γ на вісь значень параметра в разі однопараметричного сімейства має лише особливості типу складки. При більшій кількості параметрів з'являються й складніші особливості згідно з теорією Уїтні. Наприклад, у загальних двопараметричних сімействах проектування поверхні рівноваги Γ на площину значень параметрів може мати точки зморщок, де зливаються три положення рівноваги.

Таким чином, при зміні параметра виокремлюються особливі, або біфуркаційні, значення параметра (критичні значення проекції a, b, c, d на рис. 4). Поза цими значеннями положення рівноваги гладко залежать від параметрів. При підході параметра до біфуркаційного значення положення рівноваги «зникає», зливаючись з іншим (або ж «із нічого» народжується пара положень рівноваги).

Із двох, що народжуються (чи зникають) разом положень рівноваги одне стійке, а друге — нестійке.

У момент народження (чи зникнення) обидва положення рівноваги рухаються з нескінченною швидкістю: коли значення параметра відрізняється від біфуркаційного на ϵ , обидва близькі положення рівноваги віддалені один від одного на відстань порядку $\sqrt{\epsilon}$.

Перебудову сімейства фазових кривих на площині в загальному однопараметричному сімействі унаочнює рис. 6. Стійке положення рівноваги — вузол, стикається при зміні параметра з нестійким — сідлом, після чого обидва зникають. У момент злиття на фазовій площині спостерігається картина незагального положення — сідло-вузол.

Як впливає з рис. 6, перебудова, по суті, одновимірна: уздовж осі абсцис відбуваються ті самі явища, що й на осі x (див. рис. 4), тоді як уздовж осі ординат перебудови немає зовсім. Таким чином, перебудову через сідло-вузол дістаємо з одновимірної перебудови «надбудовою» осі ординат. Виявляється, усі перебудови положень рівноваги в загальних однопараметричних системах дістаємо з одновимірних перебудов за допомогою аналогічної надбудови.

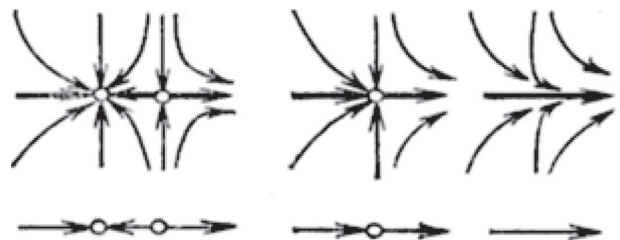


Рис. 6. Сідло-вузол: типова локальна біфуркація в однопараметричному сімействі

Якщо стає положення рівноваги описує встановлений режим у деякій реальній системі, скажімо в телекомунікаційній мережі, то при його злитті з нестійким положенням рівноваги система має зробити стрибок, перескочивши на абсолютно інший режим: при зміні параметра рівноважний стан в даному околі зникає. Стрибки цього роду й призвели до необхідності розробки методики оцінювання сталості телекомунікаційної мережі в умовах дії зовнішніх непрогнозованих ДФ.

Показники сталості (надійності і живучості) телекомунікаційної мережі мають, як відомо, імовірнісний характер, і їх оцінювання здійснюється за допомогою розрахунків на основі показників надійності і живучості елементів реальної телекомунікаційної мережі.

Методика розрахункової оцінки сталості (надійності і живучості) мережі електрозв'язку базується на використанні математичного апарату випадкових графів зі встановленням зв'язності між елементами графа за допомогою методу перебору простих кіл. Мережа зв'язку моделюється

графом мережі, вершинами і ребрами якого є вузли та лінії зв'язку. Вершини графа являють собою вузли зв'язку, а ребра — сукупність ліній зв'язку (ліній передавання), які сполучають вершини графа між собою. Усім елементам графа (вершинам і ребрам) присвоюють ваговий коефіцієнт, що є коефіцієнтом готовності вузла або лінії зв'язку при розрахунку показників надійності мережі зв'язку (при розрахунку показників живучості ваговими коефіцієнтами є коефіцієнти оперативної готовності вузлів і ліній зв'язку). У побудові графа мережі зв'язку виокремлюють два полюси (дві вершини — «витік» і «стік»), які визначають напрям зв'язку.

Метод розрахункового оцінювання зв'язності елементів графа за допомогою перебору простих кіл полягає в тому, що для вибраних полюсів графа мережі згідно з алгоритмом встановлення зв'язку відзначаються всі кола (чи шляхи), по яких може бути встановлено з'єднання. Під **подією зв'язності** розуміється така подія, коли між «витоком» і «стоком» у роботоздатному стані існує хоч би одне просте коло. Якщо між полюсами мережі в роботоздатному стані немає жодного простого кола, то в двополюсній мережі настає подія незв'язності. Під **простим колом** розуміють послідовність ребер і вершин графа без петель і паралелей, які замикають полюси (вибрані вершини) між собою. Далі на графі мережі виділяють усі прості кола μ_{ij}^k між виділеною парою полюсів (вузлів) v_i та v_j мережі.

При заданих коефіцієнтах готовності (чи оперативній готовності) для всіх елементів графа зв'язність двополюсної мережі між виділеними вузлами v_i та v_j устанавлюється методом об'єднання простих кіл з урахуванням ефекту поглинання.

При практичних розрахунках перелік простих кіл або шляхів μ_{ij}^k між вузлами v_i і v_j обмежують тільки тими шляхами, які містять допустиму кількість транзитних ділянок, залежну від допустимого рівня спотворень переданої інформації по лінії зв'язку.

Кількість транзитних ділянок визначає ранг r_{\max} простих кіл. Таким чином, повний перелік простих кіл між вузлами зв'язку складається з урахуванням максимально допустимої кількості транзитних ділянок (обмеження рангу простих кіл).

Зв'язністю p_{ij}^k k -го шляху μ_{ij}^k з переліку всіх кіл μ_{ij}^k називається спільна ймовірність справного стану всіх ребер і вершин, що утворюють це коло:

$$p_{ij}^k = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} (1 - q_a) = \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} p_a, \quad (1)$$

де p_a — коефіцієнт готовності (чи оперативної готовності) a -го елемента послідовності ребер і вершин, що належать шляху μ_{ij}^k ;

$q_a = (1 - p_a)$ — коефіцієнт неготовності (чи оперативної неготовності) a -го елемента послідовності

ребер і вершин, що належать шляху μ_{ij}^k (при проведеному реальному розрахунку цим коефіцієнтом користуватися зручніше, ніж коефіцієнтом p_a).

Ймовірність p_{ij} зв'язності від v_i до v_j — це ймовірність справного стану принаймні одного кола з усіх можливих кіл або (у разі обмеження кількості транзитних ділянок r_{\max}) принаймні одного кола з допустимим рангом:

$$p_{ij} = p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k). \quad (2)$$

У реальних умовах кола часто взаємозалежні, тобто мають спільні ребра і вершини. При цьому ймовірність зв'язності, розрахована за формулою (2), має завищене значення. Справжнє значення дістанемо, якщо при розрахунках за формулою (2) після розкриття дужок усі члени, що мають показники степеня, більші від одиниці, змінимо на одиницю, що відповідає унеможливленню події багатократного врахування коефіцієнта готовності (або оперативної готовності) одного ребра чи однієї вершини. Такі дії позначають символом E і називають **поглинанням**. Формула для розрахунку зв'язності набирає такого вигляду:

$$p_{ij} = E \left\{ p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k) \right\}. \quad (3)$$

Кількість співмножників, що беруть участь у формулах (2) і (3), дорівнює кількості простих кіл, а у тих, що входять до формули (1), дорівнює кількості ребер і вершин в одному колі. Таким чином, показники надійності і живучості мережі електрозв'язку (за ймовірністю зв'язності двополюсного графа) обчислюють згідно з формулою (3).

Вимоги щодо сталості функціонування телекомунікаційної мережі включають у себе вимоги до показника надійності (табл. 1) і вимоги до живучості основних напрямів зв'язку (табл. 2).

Таблиця 1
Технічні норми щодо показника надійності (коефіцієнта готовності) мережі електрозв'язку

Тип мережі електрозв'язку	Коефіцієнт готовності, K_r . Норма, не менш як
Мережа міжміського і міжнародного телефонного зв'язку	0,999
Мережа зоновий телефонного зв'язку	0,9995
Мережа місцевого телефонного зв'язку	0,9999
Мережа передавання даних	0,99

Таблиця 2
Вимоги до живучості основних напрямів зв'язку залежно від збитку, якого зазнає мережа електрозв'язку під дією зовнішніх ДФ

Рівень збитку, що його зазнає мережа зв'язку під дією зовнішніх ДФ, %	Коефіцієнт оперативної готовності для каналів зв'язку
До 50 (високий)	0,80–0,7
До 30 (середній)	0,85–0,75
До 10 (низький)	0,9–0,8

Урахувавши всі наведені вимоги до сталості функціонування телекомунікаційної мережі, подамо узагальнену її архітектуру на рис. 7, скориставшись загальноприйнятими умовними позначеннями.

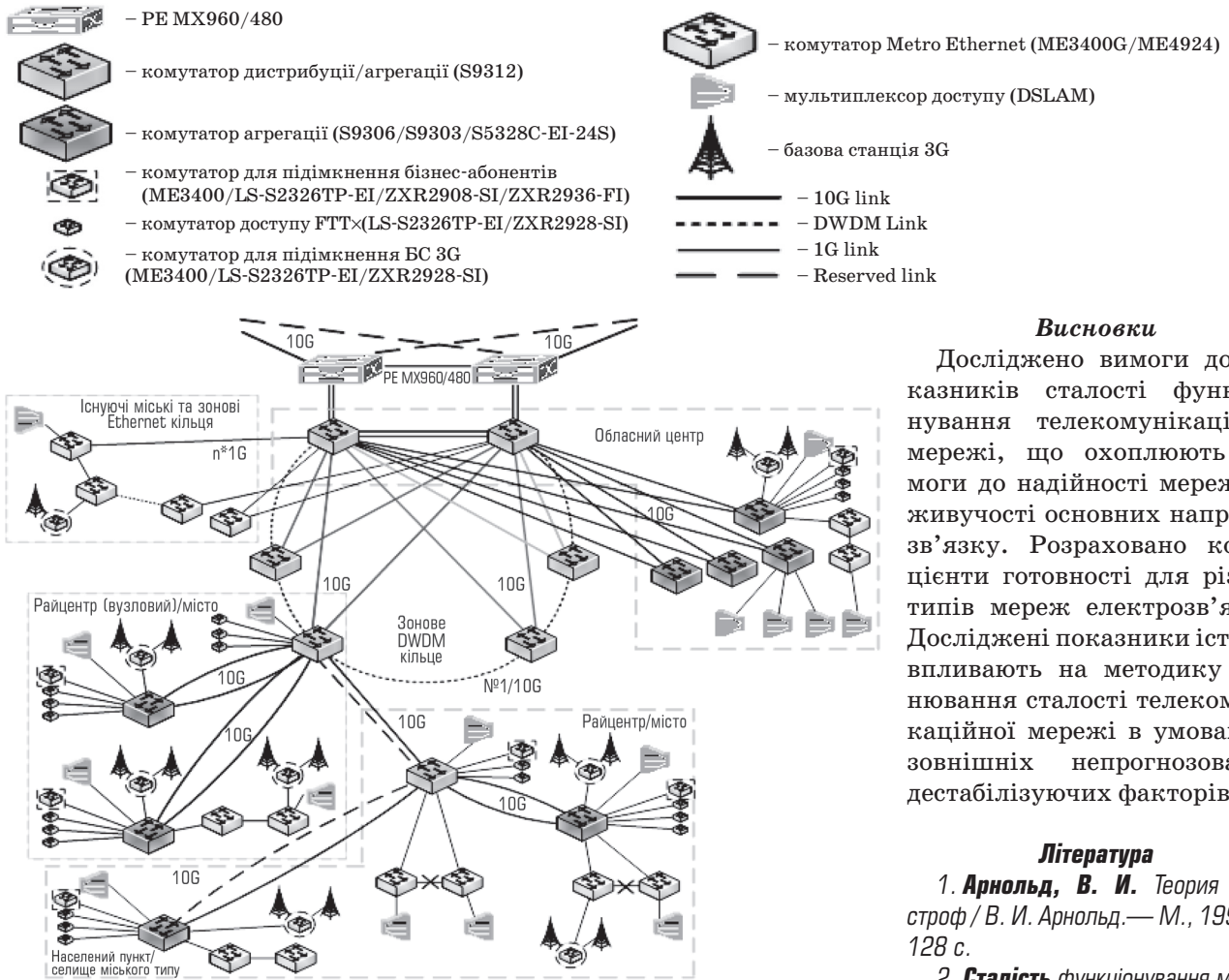


Рис. 7. Узагальнена архітектура телекомунікаційної мережі

Висновки

Досліджено вимоги до показників сталості функціонування телекомунікаційної мережі, що охоплюють вимоги до надійності мережі та живучості основних напрямів зв'язку. Розраховано коефіцієнти готовності для різних типів мереж електрозв'язку. Досліджені показники істотно впливають на методіку оцінювання сталості телекомунікаційної мережі в умовах дії зовнішніх непрогнозованих дестабілізуючих факторів.

Література

1. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд.— М., 1990.— 128 с.
2. Сталість функціонування мережі зв'язку загального користування. ГОСТ Р 53111:2008.

Рецензент: доктор техн. наук, доцент В. Ф. Заїка, Державний університет телекомунікацій, Київ.

В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. И. Отрох, В. А. Ярош
**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ
 В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

Приведена методика расчета оценки устойчивости телекоммуникационной сети в условиях действия внешних непрогнозируемых дестабилизирующих факторов, достигаемой за счет повышения надежности средств связи и совершенствования топологии сети.

Ключевые слова: устойчивость телекоммуникационной сети; теория катастроф; бифуркации; коэффициент готовности; надежность и живучесть сетей связи.

V. Tolubko, L. Berkman, S. Otroh, V. Yarosh
**THE METHOD OF ESTIMATING THE STABILITY OF THE TELECOMMUNICATIONS NETWORK
 UNDER THE ACTION OF EXTERNAL DESTABILIZING FACTORS PREDICTED**

The technique of calculation of the telecommunication network stability in the conditions of action of external destabilizing factors projected by increasing the reliability of communication and improving the network topology is given in the article.

Keywords: stability of the telecommunications network; the theory of catastrophes; bifurcations; availability; reliability and survivability of communication networks.