

УДК 681.324

І.П. Саланда<sup>1</sup>, О.В. Барабаш<sup>2</sup>, А.П. Мусієнко<sup>2</sup><sup>1</sup> Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

## СИСТЕМА ПОКАЗНИКІВ ТА КРИТЕРІЇВ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ РОЗГАЛУЖЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Запропоновано показники та критерії синтезу функціонально стійкої розгалуженої інформаційної мережі на основі графових моделей. За допомогою запропонованих показників та критеріїв можна оцінювати та порівнювати різні структури мереж з високим рівнем зв'язності, а також застосовувати їх для формування методики оптимального використання надмірності системи при парированні наслідків позаштатних ситуацій. Дані показники доцільно використовувати для сучасних та перспективних мереж 5 покоління (5G), які є безпроводними, динамічними, самоорганізуючими, оскільки вони дозволяють під час реструктуризації враховувати елементи, пошкодження яких не впливає на локальну функціональну стійкість мережі.

**Ключові слова:** інформаційні мережі, функціональна стійкість, тотальна зв'язність, мережі 5G.

### Вступ

Дослідження існуючих науково-обґрунтованих підходів підвищення ефективності складних технічних систем, до яких повною мірою відносяться й розгалужені інформаційні мережі (РІМ) дозволили зробити висновок про формування за останні роки нового пріоритетного підходу, пов'язаного із забезпеченням системи властивості функціональної стійкості.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Аналіз функціонування розгалужених інформаційних мереж показав, що елементи мереж, до яких відносяться вузли комутації та лінії зв'язку між ними, піддаються безлічі внутрішніх (відмови, збої, помилки обслуговуючого персоналу) і зовнішніх (пошкодження, перешкоди, несанкціонований доступ) дестабілізуючих факторів.

Відомі властивості інформаційних мереж, такі як стійкість, надійність, живучість, відмовостійкість характеризують функціонування мереж при впливі відмов і пошкоджень, але не дозволяють в повній мірі описати процеси функціонування в умовах значних руйнувань, впливу потоків відмов і несправностей, можливих навмисних впливів, в тому числі і терористичних.

Тому, доцільно розглянути нову властивість РІМ – функціональну стійкість.

Під функціональною стійкістю (ФС) об'єкта будемо розуміти його властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах протидії, а також впливу потоків відмов, несправностей і збоїв [1].

Об'єктивне дослідження функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі неможли-

ве без кількісної оцінки цієї властивості. Різноманітність інформаційних мереж, процесів руйнування та відновлення, складність найбільш повних моделей мереж зв'язку та інші обставини дозволяють зробити висновок про неможливість створення єдиного показника ФС для всіх мереж і їх елементів.

Математична формалізація функціональної стійкості мереж є першим науково-обґрунтованим кроком створення методологічних основ забезпечення функціональної стійкості РІМ. Для науково-обґрунтування та математичної формалізації функціональної стійкості необхідно дослідити формалізацію стійкості взагалі.

Більш перспективним щодо цього є підхід до розгляду стійкості, що використовує внутрішні резерви системи на основі існуючої апаратної, програмної, часової та інформаційної надмірності.

Разом з тим, нечисленні роботи у галузі забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем не дають змоги виробити єдині підходи та започаткувати теоретичні основи забезпечення функціональної стійкості для РІМ. Проблема полягає у відсутності стандартизованого понятійного апарату функціональної стійкості.

**Аналіз основних публікацій.** Поняття функціональної стійкості вперше було введено Машковим О. А., який запропонував підхід щодо забезпечення цієї властивості в динамічних системах на основі перерозподілу наявної надмірності [2]. Запропонований підхід базується на принципах комплексного забезпечення спостережливості, керованості та ідентифікації динамічних об'єктів. Однак для складних організаційних систем даний апарат неприйнятний.

В роботах Кравченка Ю. В. [3] пропонується дещо інший підхід щодо визначення та забезпечення

**Основна частина**

функціональної стійкості для систем спеціального призначення, заснований на вирішенні оптимізаційної задачі з застосуванням матроїдних структур. Проте, такий підхід є вузькоспеціалізованим і надто складним для реалізації внаслідок труднощів повного опису елементів та параметрів РІМ у термінах матроїдів.

Більш близьким можна вважати підхід, запропонований у роботах Барабаша О. В., зокрема у [1, 6, 7, 8], у яких пропонуються показники та критерії для побудови стійких розподілених інформаційних систем. Даний підхід базується на оцінках зв'язності графів мережі.

Поняття зв'язності графів грає фундаментальну роль в аналізі та синтезі структур функціонально стійких інформаційних мереж. Проте аналіз відомих характеристик зв'язності показав, що ці характеристики в деяких випадках є малоефективними в задачах синтезу ФС мереж [9, 10]. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки нових характеристик зв'язності, які б дозволили синтезувати графи структур інформаційних мереж з високим рівнем функціональної стійкості.

Отже, проблема визначення показників та критеріїв функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі потребує обґрунтування відповідних залежностей і підходів та залишається актуальною.

**Метою статті** є розробка системи показників і критеріїв для формалізації процесів забезпечення функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі.

Обравши за основу підхід, запропонований у [1] відзначимо, що особливий інтерес в теорії функціональної стійкості РІМ представляє показник зв'язності –  $\omega(\lambda)$ , тобто найменше число вершин (ребер), видалення яких призводить до незв'язності або одновершинного графа.

В результаті аналізу існуючих характеристик зв'язності розроблено класифікацію характеристик зв'язності, яка максимально враховує усі обмеження та вимоги до структури мережі (рис. 1).

Проте, при пошкодженні деяких вузлів або ліній комутації мережі важливо знати локальну зв'язність між вузлами, які знаходяться на певній відстані від пошкоджених елементів. Великий інтерес становлять графи мережі, в яких пошкодження окремих елементів не впливають на локальну зв'язність між іншими вузлами.

Вибір нижче наведених характеристик зв'язності визначався двома обставинами:

- існуючими показниками функціональної стійкості [6, 7];
- класифікацією характеристик зв'язності [1, 4] (рис. 1).

**1. Тотальна зв'язність.**

У зв'язку з цим доцільно ввести в розгляд новий показник функціональної стійкості – тотальну  $(k, \omega)$ -зв'язність [4], де  $k$  число елементів оптимального руйнування  $\omega$ -зв'язного графа.

Вперше поняття «тотальнозв'язного» графа зустрічається в роботі [4].

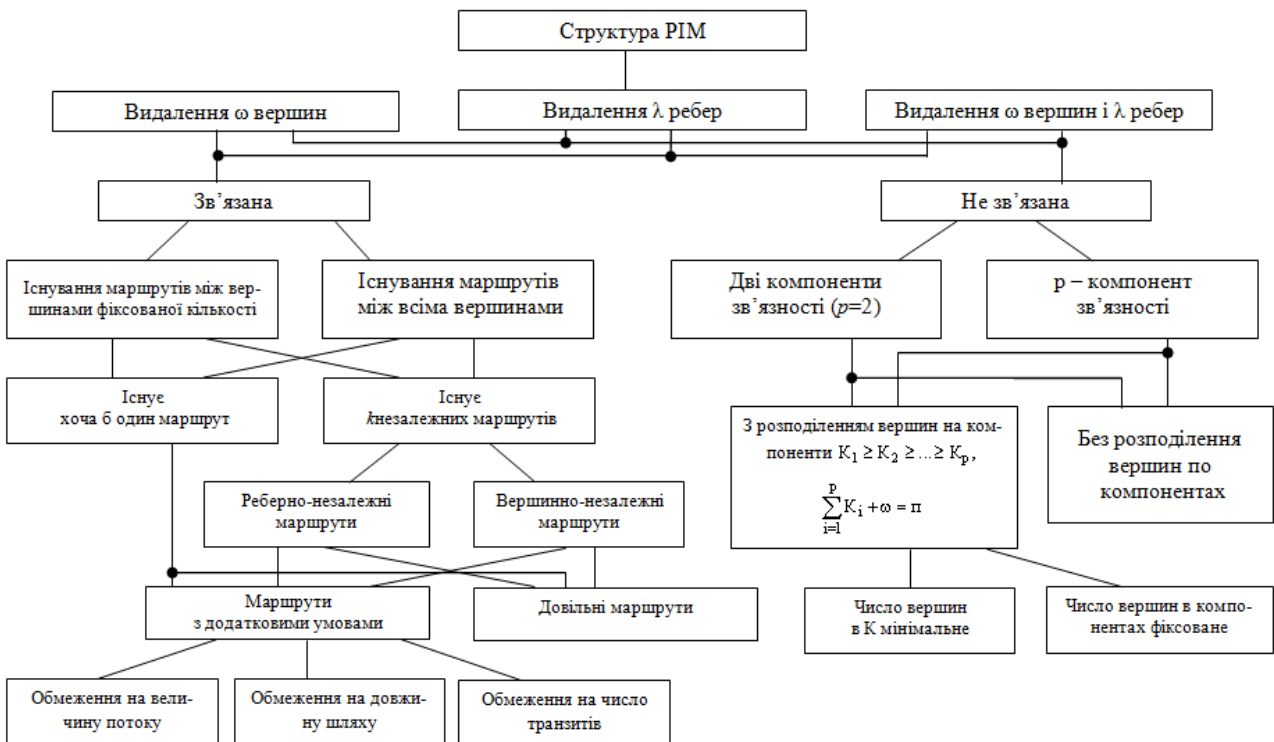


Рис. 1. Класифікація характеристик зв'язності структури РІМ

Введемо деякі означення та позначення:

$\omega$ -поєднаність – максимальне число вершино незалежних маршрутів між будь-якою парою вершин графа[5];

$\lambda$ -сплетеність – максимальне число реберно незалежних маршрутів між будь-якою парою вершин графа[5];

$G[v_x]$  – множина вершин, суміжних з  $v_x$  в графі  $G$ ;

$G^z[v_x]$  – множина вершин, які знаходяться на відстані  $z$  від вершини  $v_x$ .

Граф  $G(V, L)$   $\omega$ -зв'язний – називається  $(k, \omega)$ -тотально зв'язним, якщо при видаленні будь-яких  $k$  ( $k < \omega$ ) вершин  $\{v_i\}$  з графа будь-яка пара вершин із множини  $V \setminus (\{v_i\} \cup G[\{v_i\}])$   $\omega$ -поєднана в підграфі  $G'(V - \{v_i\}, L')$  [4].

Тобто, нас цікавитимуть мережі, які після видалення  $k$  вузлів комутації зберігають задану зв'язність, крім одиничного околу видалених вузлів.

## 2. Тотальна реберна зв'язність.

При синтезі структури мережі ненадійними елементами можуть бути не лише вузли комутації, а й лінії зв'язку.

Тому становлять цікавість мережі, які зберігають заданий рівень ФС при видаленні ребер.

Граф  $G(V, L)$   $\omega$ -зв'язний – називається  $(k, \lambda)$ -тотально реберно зв'язним, якщо при видаленні будь-яких  $k$  ( $k < \lambda$ ) ребер  $\{l_{ij}\}$  в суграфі  $G'(V, L \setminus \{l_{ij}\})$  будь-які дві вершини із множини  $V \setminus (\{v_i\} \cup \{v_j\})$   $\lambda$ -сплетені, тобто  $\lambda$ -реберно зв'язні [4].

Іншими словами, розглядатимемо мережі, вузли яких після видалення ліній зв'язку залишаються  $\lambda$ -сплетеними, крім інцидентних видаленим лініям.

## 3. Показники локальної функціональної стійкості структури.

1. Число  $(k, \omega)$  тотальної зв'язності – максимальне число вершин, видалення яких разом з інцидентними ребрами не змінює локальної  $\omega$ -зв'язності вершин не суміжних з видаленими.

2. Число  $(k, \lambda)$  реберної тотальної зв'язності – оптимальне число ребер, видалення яких не впливає на локальну  $\lambda$ -зв'язність вершин неінцидентних видаленим ребрам.

Для розгалужених інформаційних мереж важко встановити тотальну зв'язність, оскільки необхідно перевірити на локальну зв'язність безліч вершин. Щоб уникнути цієї проблеми досить скористуватись наступними критеріями.

## 4. Критерій тотальної зв'язності:

1) структура буде  $(k, \omega)$ -тотально зв'язною тоді і лише тоді, якщо для будь-якої множини вершин  $V' = (v_1, v_2, \dots, v_k) \subset V$  ( $k < \omega$ ) в підграфі  $G'(V - V', L')$  будь-яка пара вершин із підмножини  $G^2[V']$   $\omega$ -поєднана в  $G'$ [4];

2) структура буде  $(k, \lambda)$ -тотально реберно зв'язною тоді і лише тоді, якщо для будь-якої множини ребер  $L' = \{l_{ij}\} \subset L$ ,  $|L'| = k$ , ( $k < \lambda$ ) в суграфі  $G'(V, L \setminus L')$  будь-яка пара вершин із підмножини  $G[\bigcup_{i,j=1}^k (v_i \cup v_j)]$   $\lambda$ -сплетена в  $G$ [4].

## 5. Обґрунтування даних показників.

Тотальна зв'язність  $(k, \omega)$  характеризує максимально можливе число відмов вузлів комутації, при якому мережа залишається  $\omega$ -локально зв'язною.

Тотальна реберна зв'язність  $(k, \lambda)$  характеризує максимально можливе число ліній зв'язку, після відмови яких, мережа залишається  $\lambda$ -локально зв'язною.

Іншими словами, дані показники дозволяють врахувати елементи, пошкодження яких не впливає на локальну зв'язність між іншими елементами, не суміжними з видаленими.

Врахувавши понятійний апарат ФС та проаналізувавши сказане вище можна сформулювати критерій ФС.

## 6. Критерій локальної функціональної стійкості.

Структура буде локально функціонально стійкою, якщо показники зв'язності задовольняють наступним умовам:

$$\{\omega(G) \geq 2 \bigcap k > 1\} \cup \{\lambda(G) \geq 2 \bigcap k > 1\}.$$

Розглянуті критерії не дозволяють створити ефективні алгоритми для перевірки тотальної зв'язності. Однак в більшості випадків достатньо отримати нижню оцінку для  $k$  при заданій вершинній та реберній зв'язності.

Наведемо алгоритми отримання нижньої оцінки тотальної зв'язності.

## 7. Алгоритм знаходження нижньої оцінки числа видалених вершин.

Нехай заданий  $\omega$ -зв'язний граф  $G(V, L)$ . Виділимо в цьому графа пару несуміжних вершин  $v_x, v_y$  і перевіримо їх  $\omega$ -з'єднаність при умові, що видалені вершини не суміжні з  $v_x$  і  $v_y$ .

### Алгоритм 1.

Крок 1. Для вершин  $v_x$  і  $v_y$  знайдемо  $G^2[v_x]$  і  $G^2[v_y]$ .

Крок 2. Якщо  $v_x$  належить  $G^2[v_y]$  ( $v_y$  відповідно  $G^2[v_x]$ ), то

$$\tau := |G[x] \cap G[y]|,$$

із графа  $G$  видалити вершини

$$G[v_x] \cap G[v_y].$$

Переходимо на крок 1, інакше на крок 3.

*Крок 3.* Між вершинами  $G^2[v_x]$  і  $G^2[v_y]$  знайдемо максимальне число вершино незалежних ланцюгів, які з'єднують ці множини, причому ланцюги не повинні перетинатися і по кінцевих вершинах.

*Крок 4.* В  $G^2[v_x]$  і  $G^2[v_y]$  виберемо підмножини вершин  $V_x$  і  $V_y$ , в яких починається і закінчується побудова незалежних ланцюгів.

*Крок 5.* Для кожної вершини

$$v_i \in G[v_x] (v_j \in G[v_y])$$

знайдемо значення

$$d_{v_i} = \tau_{V_x}(v_i) - 1;$$

$$d_{v_j} = \tau_{V_y}(v_j) - 1,$$

де  $\tau_{V_x}(v_i)$  – число вершин із  $V_x$ , суміжних з  $v_i$ ,

$$k_x := \min(\min(d_{v_i}), |V_x| - (\omega - \tau)),$$

$$k_y := \min(\min(d_{v_j}), |V_y| - (\omega - \tau)),$$

$$k' := \min(k_x, k_y).$$

*Крок 6.* Знайдемо локальну зв'язність  $\delta(v_x, v_y)$  між вершинами  $v_x$  і  $v_y$ .

Обчислимо кінцеві значення  $k_{\text{при}}$  заданій зв'язності  $\omega$  між вершинами  $v_x$  і  $v_y$ :

$$k_{x,y} = k' + (\delta(v_x, v_y) - (\omega - \tau)).$$

Нижня оцінка для числа видалених вершин між вершинами  $v_x, v_y$  в умовах збереження  $\omega$ -зв'язності цих вершин знайдена.

$$\text{Крок 7. } k \leq \min_{v_x, v_y \in V} k_{x,y}.$$

### 8. Обґрунтування алгоритму.

Якщо  $\tau \geq \omega$ , то видалення будь-яких вершин, не суміжних з  $v_x$  і  $v_y$ , не знижує  $\omega$ -поєднаність цих вершин.

Нехай  $\tau < \omega$ , тоді очевидно, що можливе число видалених вершин не більше  $|V_x| - (\omega - \tau)$ .

З іншого боку при видаленні  $\tau_{V_x}(v_i)$  вершин із  $V_x$  може порушитися зв'язність вершин  $v_i$  з  $v_x$  і, відповідно

$$d_{v_i} = \tau_{V_x}(v_i) - 1.$$

Таким чином,  $k_x$  не більше  $\min_i d_{v_i}$ .

Відповідно,  $k \leq \min(k_x, k_y)$ , і якщо локальна зв'язність  $\delta(v_x, v_y)$  більша  $\omega$ , то очевидно

$$k_{x,y} = k' + (\delta(v_x, v_y) - (\omega - \tau)).$$

Звідси випливає, що нижня оцінка  $k$  для  $(k, \omega)$ -тотальної зв'язності не перевищує  $\min_{v_x, v_y \in V} k_{x,y}$ .

Аналогічним чином можна знайти нижню оцінку  $k$  для  $(k, \lambda)$ -тотальної реберної зв'язності.

### 9. Алгоритм знаходження нижньої оцінки числа видалених ребер.

Нехай заданий  $\lambda$ -реберно-зв'язний граф  $G(V, L)$ .

Виділимо в цьому графа пару несуміжних вершин  $v_x, v_y$  і перевіримо їх  $\lambda$ -сплетеність.

#### Алгоритм II.

*Крок 1.* Для несуміжних вершин  $v_x$  і  $v_y$  знайдемо  $G[v_x]$  і  $G[v_y]$ .

*Крок 2.* Між вершинами  $G[v_x]$  і  $G[v_y]$  знайдемо максимальне число  $\lambda$ -реберно-незалежних ланцюгів, які з'єднують ці множини.

*Крок 3.* Для кожної вершини  $v_i \in G[v_x]$  ( $v_j \in G[v_y]$ ) знайдемо значення

$$l_{v_i} = \sigma_{V_x}(v_i) - 1$$

$$l_{v_j} = \sigma_{V_y}(v_j) - 1,$$

де  $\sigma_{V_x}(v_i)$  ( $\sigma_{V_y}(v_j)$ ) – число незалежних ланцюгів, з кінцем у вершині  $v_i$  ( $v_j$ ), суміжних з  $v_i$ ,

$$k_x := \min_i(l_{v_i}),$$

$$k_y := \min_j(l_{v_j}),$$

$$k' := \min(k_x, k_y).$$

*Крок 4.* Знайдемо локальну реберну зв'язність  $\gamma(v_x, v_y)$  між вершинами  $v_x$  і  $v_y$ . Тоді

$$k_{x,y} = k' + (\gamma(v_x, v_y) - \lambda).$$

*Крок 5.* Оцінка  $k$  для всього графа  $G$  обчислюється за формулою

$$\min_{v_x, v_y \in V} k_{x,y}.$$

Обґрунтування запропонованого алгоритму аналогічне попередньому.

Дослідження розроблених показників і критеріїв показали, що основним методом підвищення локальної функціональної стійкості структури розгалуженої інформаційної мережі є підвищення зв'язності структури за рахунок введення надлишкових ліній зв'язку.

### Висновки

В роботі наведена найбільш повна класифікація характеристик зв'язності інформаційних мереж, що враховує різні особливості та обмеження.

Введено в розгляд нові показники та критерії оцінки локальної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі.

Запропонований підхід комплексно використовує зв'язність структури і пропонує алгоритми розрахунку оптимального руйнування заданого числа елементів.

Дані показники та критерії доцільно використовувати для сучасних та перспективних мереж 5 покоління (5G), які є безпроводними, динамічними, самоорганізуючими. До них постійно підключаються та вводяться абонентські пристрої, які не лише є кінцевими, а й виконують функції маршрутизаторів. Такі мережі функціонують під впливом перешкод та завод. Тому увесь час зникають та з'являються лінії зв'язку, підключаються та відключаються вузли. В таких умовах мережа має автоматично реструктуруватися, самостійно налаштовуватись та забезпечувати стійке функціонування.

Разом з тим, коли більшість вузлів є мобільними, то енергетичні характеристики таких вузлів не є незалежними. Вони можуть зв'язуватись (налагоджувати лінії зв'язку) тільки з найближчими (в межах радіуса дії), а не з усіма вузлами.

### Список літератури

1. Барабаш О. В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О. В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
2. Машков О. А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Л. М. Артюшин, О. А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
3. Кравченко Ю. В. Применение метода последовательного увеличения ранга  $k$ -однородного матрицеда в задаче синтеза структуры псевдоспутниковой радионавигационной системы / Ю. В. Кравченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: 2008. – №2(2). – С. 19–22.
4. Попков В.К. Математические модели живучести сетей связи/В.К. Попков. – Новосибирск: Вычислительный центр СО АН СССР, 1990. – 235 с.

5. Нечепуренко М.И. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях/ М.И. Нечепуренко, В.К. Попков, С.М. Майнагашев и др. –Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. – 515 с.

6. Саланда І.П. Методи пошуку оптимальних маршрутів графа структури розгалуженої інформаційної мережі за заданим критерієм оптимальності при різних обмеженнях / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко// Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №2(42). – С. 99–106.

7. Barabash O. Methods of self-diagnosis of telecommunication networks based on flexible structures of test connections / O/Barabash, N. Lukova-Chuiko, A. Musiyenko // Zbornik príspevkov z medzinárodného vedeckého seminára „Riadenie bezpečnosti zložitých systémov“. 23 – 27 februára 2015. – Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika, 2015. – Str. 226 – 231.

8. Обідін Д. М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтелектуалізованої системи автоматичного управління польотом літака. / Д. М. Обідін, О. В. Барабаш // Системи озброєння і військова техніка: Науковий журнал. – Х.: ХУПС, 2012. – № 1 (29). – С. 133 – 136.

9. Кучук Г.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций: монография / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Паинев. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с.

10. Кучук Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення: монографія / Г.А. Кучук. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2013. – 264 с.

Надійшла до редколегії 2.02.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Вишнівський, Державний університет телекомунікацій, Київ.

### СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

И.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусиенко

Предложены показатели и критерии синтеза функционально устойчивой распределенной информационной сети на основе графовых моделей. С помощью предложенных показателей и критериев можно оценивать и сравнивать различные структуры сетей с высоким уровнем связности, а также применять их для формирования методологии оптимального использования избыточности системы при парировании последствий внештатных ситуаций. Данные показатели целесообразно использовать для современных и перспективных сетей 5 поколения (5G), которые являются беспроводными, динамичными, самоорганизующиеся, поскольку они позволяют при реструктуризации учитывать элементы, повреждение которых не влияет на локальную функциональную устойчивость сети.

**Ключевые слова:** информационные сети, функциональная устойчивость, тотальная связность, сети 5G, реструктуризация.

### SYSTEM OF INDICATORS AND CRITERIA FOR THE FORMALIZATION OF PROCESSES OF PROVIDING LOCAL FUNCTIONAL STABILITY OF DISTRIBUTED INFORMATION NETWORKS

I.P. Salanda, O.V. Barabash, A.P. Musienko

The indicators and criteria for the synthesis of a functionally stable distributed information network based on graph models are proposed. With the help of the proposed indicators and criteria, it is possible to evaluate and compare the various structures of networks with a high level of connectivity, and also apply them to formulate a methodology for the optimal use of system redundancy when parrying the consequences of extraordinary events. These indicators should be used for modern and prospective 5G generation networks (5G), which are wireless, dynamic, self-organizing, as they allow the restructuring to take into account the elements, the damage of which does not affect the local functional stability of the network.

**Keywords:** information networks, functional stability, total connectivity, 5G networks, restructuring.