УДК 004.738 (043.2)

І.П. Швець
Національний авіаційний університет, Київ

УПРАВЛІННЯ ЖИВУЧІСТЮ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВПЛИВУ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ

Основний принцип роботи нових мереж (так званих Future Networks) – множинний доступ з часовим розділенням каналів. Якщо раніше в традиційних телекомунікаційних мережах циркулював виключно мовний трафік, а телеграфні та телетайпні повідомлення передавалися по окремим лініям зв'язку, то в сучасних телекомунікаційних мережах циркулює змішаний трафік: Triple Play (мова – відео – дані) або Quadruple Play (мова – відео – дані – мобільні абоненти).

У зв’язку із тенденцією інтенсивного застосування обчислювальної техніки та автоматизованих систем обробки інформації, особливої актуальності набуває проблема забезпечення її безпеки для ефективного передавання інформації по телекомунікаційним мережам нових поколінь. Задача оцінювання живучості інформаційно-комунікаційних систем та мереж, зокрема, телекомунікаційних мереж нових поколінь є актуальною. Більш того, нагальність цієї задачі з плином часу тільки зростатиме.

Дестабілізуючі фактори здійснюють шкідливий вплив на стійкість та живучість мережі як складної технічної системи. Найбільш інформативним підходом до кількісного оцінювання впливу дестабілізуючих факторів на характеристики телекомунікаційної мережі є статистичний підхід з аналізом ключових показників ефективності (KPIs). Цей метод широко використовується для статистичного аналізу та прогнозування параметрів та стану технічних, економічних та соціальних систем [1].

Розглянемо систему управління живучістю безпроводової телекомунікаційної мережі як невід'ємної частини мереж майбутнього покоління (*Future Networks*). Специфікою сучасних безпроводових телекомунікаційних мереж, на відміну від проводових (кабельних та оптоволоконних) є наявність зовнішніх електромагнітних завад як ненавмисного, так і навмисного характеру. Завади будь-якого характеру можна віднести до зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Врахування взаємного впливу дестабілізуючих факторів є нетривіальною задачею. Найбільш доступним та придатним для практичного застосування є статистичний підхід [2], зокрема, кореляційно-регресійний аналіз. Основне призначення лінійної множинної регресії полягає в аналізі зв'язку між кількома незалежними змінними (званими також регресорами) і залежної змінної. Для отримання результатів об'єднуючого характеру доцільно застосовувати узагальнені лінійні моделі [3]. Призначення як традиційних лінійних, так і узагальнених лінійних моделей полягає в вираженні взаємозв'язку між змінною, що спостерігається, Y, та рядом коваріатів (також званих змінними предіктора), X. Обидві моделі розглядають спостереження y_i як такі, що є реалізаціями випадкової величини Y. Узагальнені лінійні моделі складаються з широкого спектру моделей, які включають лінійні моделі як частинний випадок. Припущення стосовно узагальненої лінійної моделі є наступними.

1. Імовірнісний розподіл повністю визначається середнім значенням та дисперсією.

2. Дисперсія змінної Y є функцією середнього значення.

Щоб підкреслити відмінність другої властивості, дисперсію D_{Yi} виражають як $D_{Yi} = \frac{\phi V(\mu_i)}{\omega_i}$, де $\mu_i = E[Y_i]$ – середнє значення залежної i-ї залежної змінної; V (x), так звана дисперсійна функція, є заданою функцією; параметр φ масштабує дисперсію; ω_i - константа, яка визначає вагу або надійність i-му спостереженню.

Враховуючи, що уведені узагальнення моделі формально можна розглядати як множники масштабування, розглянемо задачу множинної лінійної регресії за тими же показниками, що й у звичайному випадку..

Технічні показники функціонування мережі, як правило, представляються таблицями статистичних даних:

$$\begin{pmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(i) & \cdots & y(N) \\ x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(i) & \cdots & x_1(N) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_j(1) & x_j(2) & \cdots & x_j(i) & \cdots & x_j(N) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_k(1) & x_k(2) & \cdots & x_k(i) & \cdots & x_k(N) \end{pmatrix}.$$

У загальному випадку, процедура побудови множинної регресії полягає в оцінюванні параметрів лінійного рівняння. Функціональна залежність результату від факторів впливу представляється рівнянням регресії:

$$\mathbf{E}\left[\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} E[y_1] \\ E[y_2] \\ E[y_3] \\ \vdots \\ E[y_m] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix},$$

або те ж саме в компактному вигляді: $E\left[\vec{y}\right] = \mathbf{X}\vec{\theta}$.

В якості основних характеристик статистичного зв'язку зазвичай використовують матриці коефіцієнтів множинної кореляції і системи рівнянь множинної лінійної або поліноміальної регресії [4].

Розглянемо процес прогнозу параметрів мережі як завдання передбачення *k*-ї змінної Y_k, $k = \overline{1,N}$ по *M* змінним X_m, $m=1,2,\dots,M$; $m \neq k$. У загальному випадку $M \neq N$. При $m=1$ маємо рівняння лінійної або поліноміальної регресії незалежної змінної X_m на залежну змінну Y_k, при $m>1$маємо систему рівнянь множинної регресії змінних $X_1, X_2, \dots, X_m$ на Y_k. (Мається на увазі функціональна, а не статистична залежність.) У розглянутій задачі незалежні змінні $X_1, X_2, \dots, X_m$ – це випадкові величини, які не обов'язково є статистично незалежними.

Змінну Y_k апроксимуємо функцією регресії $\psi(\cdot)$ що містить оцінки *KPIs* й невідомі коефіцієнти. Рівняння моделі лінійної регресії незалежних змінних $X_1, X_2, \dots, X_m$ на залежну змінну Y_k запишемо в наступному вигляді:

$$Y_k = a_{0k} + a_{1k} X_1 + \ldots + a_{mk} X_m + \varepsilon, \tag{1}$$

де ε – помилка апроксимації.

Нехай $X_{1j} = X_1^j$. Тоді можна записати рівняння поліноміальної регресії у вигляді

$$Y_k = a_{0k} + a_{1k}X_1 + a_{2k}X_1^2 \ldots + a_{mk}X_1^m + \varepsilon. \qquad (2)$$

Параметри моделі регресії оцінюються за вибіркою обсягу, взятої з деякою генеральної сукупності. Теоретично генеральна сукупність має нескінченний об'єм або є весь набір даних, який існує в принципі.

Вибірка формується таким чином. За результатами тесту функціонування мережі фіксуємо першу вибірку незалежних змінних $X_{11}, X_{12}, \ldots, X_{1m}$ і розраховуємо залежну змінну Y_1. Потім фіксуємо другу вибірку незалежних змінних $X_{21}, X_{22}, \ldots, X_{2m}$ і розраховуємо залежну змінну. Продовжуємо процедуру до отримання N змінних. Отримуємо вибірку з спостережень:

$$\{Y_1 : X_{11}, X_{12}, \ldots, X_{1m}\}, \{Y_2 : X_{21}, X_{22}, \ldots, X_{2m}\}, \ldots, \{Y_N : X_{N1}, X_{N2}, \ldots, X_{Nm}\}.$$

Система рівнянь множинної лінійної регресії набуває вигляду:

$$\left.\begin{aligned} Y_1 &= a_{01} + a_{11}X_{11} + \ldots + a_{m1}X_{1m} + \varepsilon_1 \\ Y_2 &= a_{02} + a_{12}X_{21} + \ldots + a_{m2}X_{2m} + \varepsilon_2 \\ &\ldots \\ Y_k &= a_{0k} + a_{1k}X_{k1} + \ldots + a_{mk}X_{km} + \varepsilon_k \\ &\ldots \\ Y_N &= a_{0N} + a_{1N}X_{N1} + \ldots + a_{mN}X_{Nm} + \varepsilon_N \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

де $\{a_{0k}, a_{1k}, \ldots, a_{mk}\}$, $k = \overline{1, N}$ – невідомі коефіцієнти;

$\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_k, \ldots, \varepsilon_N\}$ – випадкові помилки, які логічно вважати нормальними однаково розподіленими з параметрами $\{0, \sigma_\varepsilon^2\}$.

Для отримання оцінок за методом найменших квадратів необхідно мінімізувати суму S_k квадратів відхилень в кожній точці. Найкраще наближення відповідає мінімальній величині виразу

$$S_k = \sum_{k=1}^{N} \left(Y_k - a_{0k} - a_{1k}X_{k1} - \ldots - a_{mk}X_{km}\right)^2. \qquad (4)$$

Величина S_k є мірою помилки, пов'язаної з прив'язкою наявних даних до обраної моделі регресії. Мінімум S_k досягається диференціюванням останнього виразу за коефіцієнтами $\{a_{0k}, a_{1k}, \ldots, a_{mk}\}$, $k = \overline{1, N}$ прирівнюванням відповідних похідних нулю

і розв'язанням системи рівнянь відносно $\{a_{0k}, a_{1k}, ..., a_{mk}\}$,.
Отримуємо систему рівнянь для оцінки частинних коефіцієнтів регресії:

$$\left.\begin{array}{l} \overline{Y}_1 = \overline{\alpha}_{01} + \overline{\alpha}_{11} X_{11} + \ldots + \overline{\alpha}_{m1} X_{1m} \\ \overline{Y}_2 = \overline{\alpha}_{02} + \overline{\alpha}_{12} X_{21} + \ldots + \overline{\alpha}_{m2} X_{2m} \\ \qquad \ldots \\ \overline{Y}_k = \overline{\alpha}_{0k} + \overline{\alpha}_{1k} X_{k1} + \ldots + \overline{\alpha}_{mk} X_{km} \\ \qquad \ldots \\ \overline{Y}_N = \overline{\alpha}_{0N} + \overline{\alpha}_{1N} X_{N1} + \ldots + \overline{\alpha}_{mN} X_{Nm} \end{array}\right\}. \qquad (5)$$

Тут $\overline{\alpha}_{0k}, \overline{\alpha}_{1k}, \ldots \overline{\alpha},_{mk}$ – оцінки для $\{a_{0k}, a_{1k}, ..., a_{mk}\}$.

Оцінки є незміщеними і ефективними, тобто мають мінімальну дисперсію для вибірки $X_1, X_2, ..., X_m$ серед всіх лінійних оцінок для прогнозування змінних Y_k, $k = \overline{1, N}$.

Регресійні коефіцієнти представляють вклади кожної незалежної змінної в прогнозування залежної змінної. Для відбору остаточного рівняння регресії зазвичай використовують два протилежних критерії.

1. Щоб зробити рівняння корисним для передбачення, спостерігач повинен прагнути включити в модель по можливості більше незалежних змінних з тим, щоб можна було більш надійно визначити прогнозовані величини.

2. Через витрати, пов'язані з отриманням інформації при великій її кількості і подальшою перевіркою, необхідно прагнути, щоб рівняння включало якнайменше незалежних змінних.

Введемо поняття відсутніх значень. Представимо систему рівнянь моделі множинної лінійної регресії (3) в матричної формі:

$$\mathbf{Y} = \overline{\mathbf{X}}\mathbf{B} + \mathbf{E}, \qquad (6)$$

де $\overline{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \cdots & X_{1m} \\ 1 & X_{21} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{N1} & \cdots & X_{Nm} \end{pmatrix}$ – так звана матриця плану.

Для регресійній моделі, по суті, це матриця незалежних змінних, доповнена першим стовпцем вагових коефіцієнтів поточних спостережень; $\mathbf{B}^{T} = \{\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_m\}$ – вектор параметрів рівняння регресії; $\mathbf{E}^{\mathrm{T}}=\{\varepsilon_1,\varepsilon_2,\ldots,\varepsilon_k,\ldots,\varepsilon_N\}$ – вектор помилок оцінювання, що має багатовимірний гаусівський розподіл з нульовим вектором математичних сподівань і матрицею дисперсій виду $\sigma^2\mathbf{I}$; $\mathbf{I}$ – одинична матриця; Т – символ транспонування.

Тоді рівняння (4) можна представити в матричному вигляді як

$$S=\left(\mathbf{Y}-\overline{\mathbf{X}}\mathbf{B}\right)^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{Y}-\overline{\mathbf{X}}\mathbf{B}\right) \tag{7}$$

Вектор оцінок за методом найменших квадратів є рішення системи нормальних рівнянь

$$\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{X}}\right)\mathbf{B}=\mathbf{X}\mathbf{Y}, \tag{8}$$

розв'язок якої має вигляд

$$\mathbf{B}=\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{X}}\right)^{-1}\left(\mathbf{X}\mathbf{Y}\right)\cdot \tag{9}$$

З урахуванням того, що матриця дисперсій вектора помилок оцінювання описується виразом $\sigma^2\mathbf{I}$, кореляційна матриця вектора **B** дорівнює $\mathbf{R}_{\mathrm{B}}=\sigma^2\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{X}}\right)^{-1}$.

Відзначимо також, що при збільшенні кореляції між різними ключовими показниками ефективності матриця $\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{X}}$ буде мати діагонально-домінантну структуру, тобто діагональні елементи будуть превалювати над сумами елементів за відповідними рядками. При цьому процедури пошуку рішення рівнянь (6) і (7) спрощуються.

чевидно, в даному випадку простіше замість оптимальної оцінки як вихідної величини, яка визначається матричних рівнянням, шукати оптимальну оцінку як рішення двоїстого йому різницевого рівняння. Коефіцієнти різницевого рівняння визначаються статистикою спостережень і завад і в загальному випадку є змінними величинами, залежними від часу. Перевагою такого підходу є те, що якщо навіть не вдається отримати аналітичний розв'язок різницевого рівняння, то завжди можна отримати його чисельне рішення на обчислювальній машині. Більш того, рішення можна отримувати в реальному масштабі часу з урахуванням знову одержуваної інформації про зміни параметрів спостережень і перешкод.

Слідуючи [4], побудуємо ітераційний алгоритм розв'язання рівняння (6) у вигляді

$$\mathbf{F}\mathbf{B}\left[\overline{\mathbf{X}}(\mathrm{k})-\overline{\mathbf{X}}(\mathrm{k}-1)\right]=\mathbf{G}\left[\mathbf{Y}-\mathbf{E}-\overline{\mathbf{X}}(\mathrm{k})\mathbf{B}\right], \tag{10}$$

де **F** та **G** – матричні множники, визначники яких не дорівнюють нулю, або ненульові скалярні множники.

Ці множники вибираються таким чином, щоб забезпечити максимальну швидкість збіжності без втрати стійкості алгоритму (10). Для оптимального вибору значень **F** та **G** можна застосувати до рівняння (10) операцію *z*-перетворення

$$\mathbf{FB}\left[\overline{\mathbf{X}}(z)\left(1-z^{-1}\right)\right]=\mathbf{G}\left[\mathbf{Y}-\mathbf{E}-\overline{\mathbf{X}}(z)\mathbf{B}\right], \tag{11}$$

і обчислити корені характеристичного рівняння, які повинні бути по модулю менше одиниці. Тоді загальний розв'язок рівняння (11) при необмеженому зростанні числа ітерацій $k\to\infty$ асимптотично сходиться до точного рішення рівняння (6). Швидкість збіжності залежить від величини максимального по модулю кореня характеристичного рівняння. Задаючись величиною модуля відносної помилки рішення, можна оцінити потрібне число ітерацій як локальну або нелокальну характеристику ефективності пошуку рішення.

Конкретизуючи чисельні значення результату y_{i}, i=1,2,…,N проаналізуємо ключові показники ефективності інформаційно-комунікаційних мереж.

Ключовими параметрами є затримка передачі, пропускна здатність, втрати пакетів і рівень безпеки. Ці параметри мають найбільший вплив на результуючу якість сервісу. В роботі [1] відзначається, що число *KPIs*, які обирають для аналізу, має бути мінімальним, причому у всіх випадках недоцільно брати більше 20 таких показників. Ці міркування враховані при завданні набору *KPIs*.

У якості параметрів задачі, що оптимізуються, обрано такі:

– затримка передачі τ;
– пропускна спроможність C_p;
– втрати пакетів при передачі даних L_p;
– рівень безпеки та захисту даних при передачі по мережі D_{sp};
– якість *Web*-сервісу;
– якість передачі аудіо (звукові файли, звичайна й *IP*-телефонія);
– швидкість і надійність обміну файлами по протоколу *FTP*;
– швидкість і надійність роботи електронної пошти (*E-mail*);
– якість передачі відео.

Розглянуто гіпотетичну мережу *WLAN IEEE* 802.11*n*, дані для розрахунку параметрів якої взяті з роботи [1]. Для розрахунків використовувалася програма множинного кореляційного аналізу, наведена в [4] і модифікована для даної задачі.

У табл. 1 наведені частинні коефіцієнти кореляції параметрів, що оптимізуються. За цими коефіцієнтами кореляції в подальшому з використанням рівнянь (1)–(3) можна розраховувати частинні коефіцієнти регресії.

Таблиця 1

Коефіцієнти взаємної кореляції параметрів, що оптимізуються

Параметр	τ	C_p	L_p	$\mathbf{D_{sp}}$	**Web**	Аудіо	*FTP*	*E-mail*	Відео
τ	1,0	0,98	0,69	0,89	0,75	0,85	0,27	0,17	0,87
C_p	0,98	1,0	0,68	0,86	0,76	0,64	0,75	0,22	0,89
L_p	0,69	0,68	1,0	0,69	0,36	0,50	0,63	0,34	0,84
D_{sp}	0,89	0,86	0,69	1,0	0,77	0,56	0,61	0,78	0,82
Web	0,75	0,76	0,36	0,77	1,0	0,30	0,57	0,30	0,53
Аудіо	0,85	0,64	0,50	0,56	0,30	1,0	0,44	0,36	0,67
FTP	0,27	0,75	0,63	0,61	0,57	0,44	1,0	0,16	0,79
E-mail	0,17	0,22	0,34	0,78	0,30	0,36	0,16	1,0	0,30
Відео	0,87	0,89	0,84	0,82	0,53	0,67	0,79	0,30	1,0

Між основними ключовими параметрами виявляється сильна кореляція. Це пояснюється тим, що вони дають значний вплив на вимоги до живучості. Виняток становить електронна пошта, оскільки, на відміну від потокового аудіо, відео, Web-сервісу і передачі файлів по протоколу FTP, для неї не критичні ні смуга пропускання каналу, ні затримка доставки. Однак необхідно відзначити, що параметр D_{sp} – рівень безпеки та захисту даних є критичним практично для всіх представлених параметрів, оскільки навіть для таких видів еластичного трафіку, як електронна пошта, захист даних є невід'ємною вимогою забезпечення якості сервісу *QoS*.

Результати кореляційного аналізу служать також ключовим індикатором моніторингу та регулювання потокових даних і *Web*-сервісу. Це необхідно для забезпечення безпечної передачі інформації по мережі, прогнозування і запобігання перевантажень контрольованого мережного сегмента. Таким чином, поточний моніторинг і управління рівнем живучості мережі, які є невід'ємною частиною завдання загального управління якістю сервісу, можна успішно здійснювати статистичними методами, зокрема, методом кореляційно-регресійного аналізу.

Крім того, необхідно відзначити, що повністю скомпільована програма розрахунків займає в пам'яті обчислювального пристрою від 80 до 500 кілобайт в залежності від масштабу мережі і обсягу оброблюваної вибірки. Оскільки в даний час практично будь-який мережний вузол, по суті, являє собою спеціалізований обчислювач або навіть багатопроцесорну систему, завдання апаратурної реалізації запропонованого методу може вирішуватися порівняно просто.

Основний недолік будь-якого з методів оцінювання $\bar{\mathbf{X}}$ та $\mathbf{\Sigma}$ (або, що еквівалентно, матриці кореляцій $\mathbf{R}$), коли відсутні деякі значення, пов'язаний з тим, що їх статистичні властивості за рідкісним винятком невідомі. Крім того, застосування таких методів часто призводить до зміщених оцінок. Компроміс між цими критеріями може бути досягнутий за рахунок вибору "найкращого" рівняння, що включає оптимальну кількість незалежних змінних. В роботі для пошуку "найкращого" рівняння регресії застосований кроковий метод (покрокова регресія).

З огляду на все це елементи вибірки та/або змінні з відсутніми значеннями повинні бути видалені так, щоб забезпечити баланс між рештою числа змінних і числом елементів, що залишилися, тобто, максимізувати число комплектних елементів вибірки.

Отже, якщо елемент містить багато пропусків, його потрібно видалити. З іншого боку, слід видалити змінну, якщо її значення невідомо для більшості елементів. Після цього можна звичайним чином використовувати метод найменших квадратів або процедури багатовимірного статистичного аналізу

Одним з рішень є покрокова регресія (пряма), коли незалежні змінні одна за одною включаються в підмножину згідно попередньо заданому критерію. У той же час деяка змінна може бути замінена іншою змінною, яка не входить в набір, або видалена з нього. Сукупність критеріїв, що визначають, які змінні включати, замінювати і видаляти, називається покроковою процедурою.

За допомогою покрокової процедури виходить упорядкований список предикторів. Наприклад, якщо p=5, такий список може мати вигляд X_2,X_5,X_1,X_4 і X_3. Для визначення «найкращої» підмножини з цього списку вибираються $m \leq p$ перших змінних так, щоб

a) вони, можливо, краще передбачали Y і $\overline{\mathbf{X}}$,

b) їх число t було якомога менше.

Іншими словами, економний набір складається зі змінних впорядкованого списку, які мають найбільш високу здатність до прогнозування. У прикладі, наведеному вище, такий набір міг би складатися тільки з змінних X_2 і X_3, якби регресія по ним була майже такою ж «якісною», як і регресія з X_2,X_5,X_1,X_4 та X_3.

Процедура визначення числа t називається правилом зупинки. Методика безперервної діагностики мережі, тобто аналізу впливу дестабілізуючих факторів на загальну ефективність функціонування мережі полягає в розбитті процесу на наступні взаємопов'язані етапи:

1. Проводиться діагностика на фізичному рівні для виключення помилок і правильної інтерпретації результатів подальшого тестування.

2. Проводиться діагностик термінальних вузлів мережі шляхом стресового тестування мережі в двох режимах:

– режим калібрування з навантаженням тільки на мережу для виявлення помилок апаратної і програмної реалізації;

– режим з навантаженням тільки на мережу для виявлення проблем взаємодії станцій, вузьких місць на сервері і в каналах зв'язку.

3. На наступному етапі проводиться діагностика каналів зв'язку і серверів з використанням аналізаторів протоколів і аналізаторів серверів. Спільна обробка і аналіз отриманих в процесі тестування швидкісних характеристик, трендів характеристик мережного трафіку і лічильників серверів також здійснюється статистичними методами. Така методика дозволяє встановити причини неправильного функціонування того чи іншого каналу зв'язку (або сервера) та дати кількісні оцінки впливу внутрішніх та зовнішніх дестабілізуючих факторів на ключові показники ефективності мереж.

За результатами теоретичного аналізу та обчислювального експерименту встановлено, що між основними ключовими параметрами впливу дестабілізуючих факторів на якість сервісу інформаційно-комунікаційної мережі виявляється сильна кореляція. Однак параметр D_{sp} – рівень безпеки та захисту даних є критичним практично для всіх представлених параметрів, оскільки навіть для таких видів еластичного трафіку, як електронна пошта, захист даних є невід'ємною вимогою забезпечення якості сервісу *QoS*. Завдяки використанню імовірнісного підходу отримані статистичні характеристики стійкості мережі до впливу дестабілізуючих факторів: вектор математичних сподівань та матрицю кореляції. При стаціонарності (або хоча б локальній стаціонарності на інтервалі спостереження) вхідних сигналів, шумів та завад можна отримати асимптотичні оцінки та зробити прогноз живучості з задовільною точністю. Однак при наявності суттєвої нестаціонарності отримані оцінки можуть ставати не спроможними. Відповідно, інтервал, на якому точність прогнозу може лишатися у припустимих межах, ставатиме занадто малим для практичних застосувань. Цей недолік випливає з іманентних властивостей нестаціонарних процесів, обумовлених відсутністю позитивного визначення нестаціонарності. Обмеження, притаманні звичайним методам множинної кореляції та регресії, долаються при застосуванні послідовного (покрокового) кореляційно-регресійного аналізу. При уточненні моделі нестаціонарності водночас зменшуватиметься й обчислювальна складність. Зокрема, при застосуванні моделі процесу зі стаціонарним математичним сподіванням та з нестаціонарною дисперсією квадратичного зростання обчислювальна складність буде асимптотично знижуватися до поліноміальної.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Kreher R. (2006). UMTS Performance Measurement: A Practical Guide to KPIs for the UTRAN Environment. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, of Computational Statistics: Concepts and Methods (2nd Ed.), Springer- Southern Gate, Chichester, 227 pp.

2. Gentle J. E., Härdle W. K., Mori Y. (Eds.) (2012). Handbook Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 1192 pp.

3. Deb A. Control systems analysis and identification / CRC Press, 2018. – 364 p.

4. Afifi A. (1979) Statistical Analysis, Second Edition: A Computer Oriented Approach 2nd Edition /A. A. Afifi, S. P. Azen. - Academic Press; 2 ed. – 442 pp.