

УДК 621.391.3

Жебка В.В., к.т.н.; Власенко В.О., аспірант; Зіненко Ю.М., здобувач

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ УПРАВЛЯЮЧОЇ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖІ

Zhebka V.V., Vlasenko V.A., Zinenko Yu. M. Informational-entropy method for determining the amount of control information in a network.

In the article, the entropy problems in closed, open and combined control systems are investigated. A method for determining the amount of control information in a network is proposed. The described method allows to find the necessary minimum of information, in which the network parameters will have the specified accuracy. If the amount of information in the control system is smaller, then the accuracy of the parameters will be less than the specified value. The information-entropy method allows to determine the amount of control information in the control system of any network. Such an assessment using other practical methods is almost impossible to obtain, as a limited amount of input data, especially for networks that use different technologies. Practical value is provided by the ability to take into account the capacity of the control information with a list of requirements for the accuracy of the parameters of the main network.

Key words: control system, entropy, control information, network parameters, information-entropy method.

Жебка В.В., Власенко В.О., Зіненко Ю.М. Інформаційно-ентропійний метод визначення кількості управляючої інформації в мережі.

У статті досліджено питання ентропії в замкнених, розімкнених та комбінованих системах управління. Запропоновано метод визначення кількості управляючої інформації в мережі. Описаний метод дозволяє знайти необхідний мінімум інформації, при якому параметри мережі матимуть задану точність. Якщо кількість інформації в системі управління буде меншою, то точність параметрів буде менше заданої. Інформаційно-ентропійний метод дозволяє визначити нетрадиційним способом кількість керуючої інформації у системі управління будь-якої мережі. Таку оцінку за допомогою інших практичних методів майже неможливо отримати, так як обмежена кількість вихідних даних, особливо для мереж, на яких застосовуються різні технології. Практична цінність забезпечується можливістю врахування ємності управляючої інформації з переліком вимог до точності параметрів основної мережі.

Ключові слова: система управління, ентропія, управляюча інформація, параметри мережі, інформаційно-ентропійний метод.

Жебка В.В., Власенко В.А., Зіненко Ю.Н. Информационно-энтропийный метод определения количества управляющей информации в сети.

В статье исследованы вопросы энтропии в замкнутых, разомкнутых и комбинированных системах управления. Предложен метод определения количества управляющей информации в сети. Описанный метод позволяет найти необходимый минимум информации, при котором параметры сети будут иметь заданную точность. Если количество информации в системе управления будет меньше, то точность параметров будет меньше заданной. Информационно-энтропийный метод позволяет определить количество управляющей информации в системе управления любой сети. Такую оценку с помощью других практических методов почти невозможно получить, так как ограниченное количество исходных данных, особенно для сетей, на которые применяются разные технологии. Практическая ценность обеспечивается возможностью учета емкости управляющей информации с перечнем требований к точности параметров основной сети.

Ключевые слова: система управления, энтропия, управляющая информация, параметры сети, информационно-энтропийный метод.

Вступ

З розвитком обчислювальної техніки і засобів зв'язку настала епоха безпроводних мереж і розподілених обчислень. Безпроводні сенсорні мережі, як елемент інфокомунікаційної структури, дозволяє розширити інфокомунікаційні можливості та надає користувачу доступ зокрема до таких послуг як спостереження стану фізичних параметрів контрольованого об'єкту чи явища.

Проте, кількість управляючої інформації в таких системах буде різко зростати з наданням послуг. Головним завданням для системи управління такими мережами є визначення необхідної кількості управляючої інформації, яка повинна повністю забезпечити роботу мережі з належною точністю параметрів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Нехай стан процесу функціонування мережі в кожний даний момент часу характеризується сукупністю станів x_1, x_2, \dots, x_n , які назвемо координатами процесу. Координати процесу завжди мають відхилення відносно бажаних значень, тобто містять випадкові складові.

Одним з основних завдань управління функціонуванням мережі є зменшення відхилень процесу від бажаного. При цьому, вимога до точності управління підвищується.

Необхідно зазначити, що в літературі з теорії інформації, часто отримання інформації про який-небудь процес подібне до поняття про зміну ентропії самого цього процесу. Нагадаємо, що поняття приросту ентропії стану процесу є величина відхилення відносно деякого бажаного проходження процесу. Отже, зміна ентропії стану процесу є об'єктивною характеристикою. Ця зміна не може бути досягнута тільки шляхом отримання інформації, тобто «відображенням» або «зображенням» процесу. Для зміни ентропії необхідна організована зміна процесу управління.

Отримання певної кількості інформації необхідне, але ще недостатнє для здійснення управління.

На рис. 1. зображена замкнута схема процесу управління. Інформація про керований процес (блок 1), (координати X_i) приймається за допомогою системи отримання інформації (блок 2). Отримана інформація обробляється в системі передачі і обробки інформації (блок 3). Оброблена інформація надходить в систему формування управляючих впливів Z_i – виконавчу систему (блок 4).

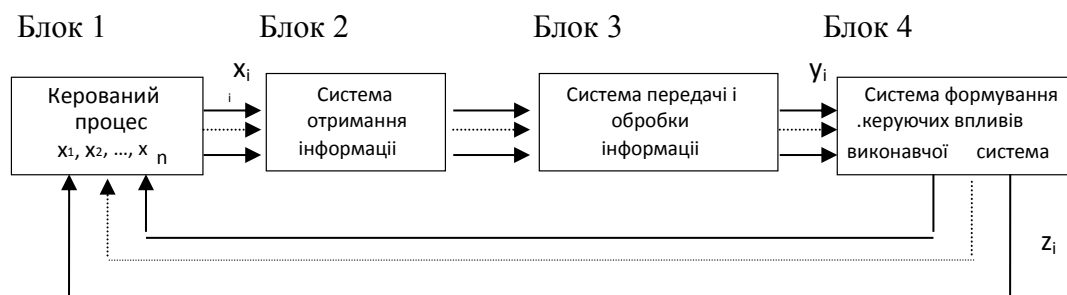


Рис. 1 Замкнена схема процесу управління

Управляючі впливи X_i впливають на керований процес в напрямку зменшення ентропії процесу.

При розгляді передачі і перетворення інформації величини x_1, x_2, \dots, x_n потрібно трактувати як вхідні величини системи отримання і перетворення інформації, а y_1, y_2, \dots, y_n – як вихідні величини цієї системи. Отже, кількість переданої і перетвореної інформації виражається логарифмом відношення щільності імовірності вхідних величин після отримання сигналу на виході.

Кількість інформації залежить від вхідних і вихідних величин. Для загального опису процесу передачі і перетворення інформації зручно розглядати математичне очікування або середню кількість інформації при передачі однієї величини ($x \rightarrow y$) і виражається формулою:

$$I = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]. \tag{1}$$

Величина $M_y[H_y(x)]$ є усередненою характеристикою ефекту дії завад, а також запізнення при передаванні сигналу.

Отже, середня кількість інформації при передачі $x \rightarrow y$ дорівнює різниці ентропії розподілу ймовірностей вхідної величини до отримання сигналу і усередненої ентропії розподілу ймовірностей цієї величини після отримання сигналу.

Значимо, що величини x_1, x_2, \dots, x_n так само як і величини y_1, y_2, \dots, y_n розглядаємо як компоненти n -мірних векторів і передавання $x_1, x_2, \dots, x_n \rightarrow y_1, y_2, \dots, y_n$ можна називати передаванням n -ого вектора $x \rightarrow y$.

Можна показати, що ентропія випадкового вектора x , яка має нормальний закон розподілу, дорівнює:

$$H(x) = \log \sqrt{(2\pi e)^n |R^{xx}|}, \tag{2}$$

де $|R^{xx}|$ – кореляційний визначник даного вектора.

Математичне очікування кількості інформації при передачі вектора $x \rightarrow y$ при нормальному розподілі вхідних і вихідних величин:

$$I = -\frac{1}{2} \log \frac{|R|}{|R^{xx}| \cdot |R^{yy}|}. \tag{3}$$

Якщо вихідний вектор не залежить від вхідного, то $R_{\mu\nu}^{xy} = 0$, $|R| = |R^{xx}| \cdot |R^{yy}|$, і кількість інформації дорівнює нулю: $I=0$. Для одновимірного випадку:

$$|R^{xx}| = R_{11}^{xx} = \sigma_x^2; \quad |R^{yy}| = R_{11}^{yy} = \sigma_y^2;$$

$$|R| = \begin{vmatrix} R_{11}^{xx} & R_{11}^{xy} \\ R_{11}^{xy} & R_{11}^{yy} \end{vmatrix} = R_{11}^{xx} R_{11}^{yy} - (R_{11}^{xy})^2$$

і вираз (3) можна представити у вигляді:

$$I = -\frac{1}{2} \log(1 - r^2), \quad \text{де } r = \frac{R_{11}^{xy}}{\sigma_x \sigma_y}.$$

При розгляді понять передачі інформації в системах управління, необхідно проаналізувати інформаційні процеси при перетворенні координат і втрати інформації при проходженні сигналу через послідовно ввімкнені системи.

У системах отримання передачі і обробки інформації часто здійснюється перетворення координат. Перетворення координат:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

.....

$$y_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

називається взаємно однозначним, якщо перетворення

$$\frac{D(y_1, y_2, \dots, y_n)}{D(x_1, x_2, \dots, x_n)} = \begin{vmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \dots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{vmatrix}$$

відмінне від нуля. Тут f_1, f_2, \dots, f_n – деякі функції, що диференціюються.

Зазначимо, що середня кількість інформації, яку передають, не змінюється при взаємно однозначному перетворенні координат.

Інформація проходить послідовно від системи отримання інформації, до системи передачі, обробки інформації і виконавчу систему. Система передачі, обробки інформації і виконавча система не мають безпосереднього впливу з боку керованого процесу, бо передбачається лише однонаправлена дія управляючих координат z_i на керований процес.

Якщо ж керований процес надає безпосередній зворотний вплив на управляючі координати (виконавчу систему), то його можна привести до випадку однонаправленої дії додаткової інформації в систему отримання інформації.

Середня кількість інформації при проходженні послідовно сполучених систем може тільки убавати або (у граничному разі відсутності додаткових завад) залишатися незмінною:

$$I_{xz} \leq I_{xy},$$

де: $I_{xz} = M[H(x)] - M_z[H_z(x)]$ – середня кількість інформації при передачі $x \rightarrow y \rightarrow z$;

$I_{xy} = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]$ – середня кількість інформації при передачі $x \rightarrow y$.

Звичайно, в теорії інформації розглядається передача інформації через розімкнені системи. Для процесів управління характерні замкнені контури циркуляції інформації.

Розглянемо загальну схему процесу управління, представлену на рис.1. Відзначимо, що модель системи такого типу є адаптивною і відповідно, практично обробляє усі плинні прогнозовані збурення, які впливають на виконавчу систему.

Контур циркуляції в даній системі можна подати у вигляді:

$$x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow x \text{ або } x \rightarrow z \rightarrow x.$$

Для отримання загальних співвідношень, справедливих для будь-яких ланцюгів замкненого контура (в які можуть входити і люди-оператори), необхідно використовувати досить загальне поняття передачі інформації. Розімкнемо контур в якій-небудь точці, наприклад, в точці з'єднання вимірювальної системи (системи отримання інформації) з керованим процесом (об'єктом). Іншими словами, припинимо надходження інформації від керованого процесу до вимірювальної системи. Подамо на вхід вимірювальної системи інформацію, тобто деяке значення x від стороннього джерела. Тоді після проходження сигналу через систему управління і керований об'єкт на виході утвориться значення x' . Таким чином, в розімкненій системі має місце передача інформації типу $x \rightarrow x'$.

Як відомо з основних співвідношень теорії інформації, кількість інформації при передачі $x \rightarrow x'$ дорівнює:

$$I = M[H(x)] - M_x[H_x(x')], \quad (4)$$

де $H(x)$ – ентропія x ,

$M_x[H_x(x')]$ – усереднене за x значення ентропії після отримання сигналу x' .

Для скорочення запису використані позначення:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = H(x),$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – координати (параметри) керованого процесу.

Співвідношення (1) можна представити у вигляді

$$I = H(x) - H_x(x') + S, \quad (5)$$

де $S = M[H(x)] - M_x[H_x(x')]$.

Величина S називається приростом ентропії приведених шумів. Зміст цієї величини наступний. Величина $H_x(x')$ є ентропією координат на виході (ентропія процесу) при заданому сигналі x на вході. Ця ентропія має кінцеву величину внаслідок впливу різного роду похибок і завад, причому вона відображає сумарний ефект дії похибок і завад вимірювачів, системи передачі і перетворення інформації, виконавчої системи, а також збурюючих сил безпосередньо на керований процес. Дія цих завад, ніби приведена до виходу контуру – керованим координатам x' . Член $M_x[H_x(x')]$ – це та ж величина, усереднена за вхідною величиною x .

Таким чином, приріст ентропії приведених завад S є різниця ентропії завад, приведених до виходу, і тієї ж ентропії, усередненої за вхідними величинами.

Якщо замкнути контур дискретного управління, то на вхід сприймаючої системи будуть впливати координати керованого процесу в деякий момент часу $t-1$, а величиною x' будуть координати того ж керованого процесу в момент часу t , то величини x та x' будуть мати:

$$x = x(t-1); x' = x(t).$$

Величини $H(x')$ і $H_x(x')$ при замкненому контурі дискретного управління звертаються до значень ентропії керованого процесу відповідно в $(t-1)$ -й і t -й моменти часу.

Рівняння (1) приймає вигляд:

$$I(t) = H(t-1) - H(t) + S(t),$$

або

$$H(t) - H(t-1) = S(t) - I(t), \quad (6)$$

де $H(t-1)$ і $H(t)$ – значення ентропії керованого процесу відповідно в $(t-1)$ -й і t -й моменти часу;

$I(t)$ – кількість інформації, передана за відповідний інтервал часу від джерела до одержувача (яким є той же керований процес).

Отже, приріст ентропії, керованого дискретним чином процесу, за інтервал дискретності дорівнює різниці приросту ентропії приведених завод і кількості інформації, переданої в замкненому контурі ($x(t-1) \rightarrow x(t)$) за той же інтервал часу. Позначимо індексом 0 початковий момент часу і отримаємо:

$$H(t) = H(0) - \sum_{i=0}^{t-1} I(i) + \sum_{i=0}^{t-1} S(i). \quad (7)$$

Ентропія керованого дискретним чином процесу дорівнює різниці початкової ентропії цього процесу, складеної з сумарним приростом ентропії завод, і сумарної кількості інформації, переданої через контур ($x(t-1) \rightarrow x(t)$).

Для стаціонарного процесу $H(t) = H(t-1)$ і $S(t) = I(t)$.

Тому, для підтримки стаціонарного керованого процесу необхідно передавати через контур управління протягом інтервалу дискретності кількість інформації, яка дорівнює відповідному приросту ентропії приведених завод. Зазначимо, що для некерованого процесу кількість інформації $I(t)$ дорівнює нулю, $H(t) - H(t-1) = S(t)$, тобто приріст ентропії приведених завод дорівнює приросту ентропії некерованого процесу за відповідний інтервал часу.

Отже, для управління процесом функціонування мережі необхідно передавати протягом інтервалу дискретності управління, управляючу інформацію, обсяг якої визначається як сума необхідного зменшення ентропії процесу функціонування мережі за цей інтервал часу і сумарного приросту ентропії некерованого процесу за цей же інтервал часу.

У загальному випадку, якщо процес характеризується вектором $\{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$, то ентропія дорівнює:

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot \log p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n.$$

Оскільки важко визначити заздалегідь реальний закон розподілу $p(x)$, зробимо припущення, що $p(x)$ має нормальний закон розподілу. У цьому випадку ентропія, як відомо, визначається як:

$$H = \log (4,13 \sigma).$$

Таким чином, приріст (зменшення) ентропії буде визначатися як:

$$H(t) - H(t-1) = \log \frac{\sigma_1(t)}{\sigma_1(t-1)} + \dots \log \frac{\sigma_n(t)}{\sigma_n(t-1)}, \quad (8)$$

і для оцінки кількості інформації, яка передається в системі управління мережею, ми повинні оцінити відношення дисперсій відхилення параметрів повідомлень, що досліджуються в мережі в різних ситуаціях, а така оцінка може бути зроблена за вимогами до параметрів основної мережі.

Як відомо, складні системи схильні до дії незакономірних збурень, що різко змінюються. Тому система управління повинна підтримати вимогу до точності параметрів мережі, незважаючи на стохастичний характер зовнішніх збурень. Системи управління, що володіють такими властивостями, називаються інваріантними (тобто не змінюють свої параметри).

Таким чином, блок 1 (рис. 2) відповідно відображає джерело стохастичних збурень, блоки 2, 3 і 4 – безпосередньо систему управління (отримання інформації, передачі і обробки інформації, виконавча система), а блок 5 – це керований процес, тобто керована інформаційна мережа. Скорочено цей контур може бути представлений у вигляді:

$$X \rightarrow Y \rightarrow Z.$$

Як відомо, технічна реалізація абсолютно інваріантних систем складна. Їх потрібно розглядати як граничні характеристики, до яких прагнуть, але досягнути важко. Тому в ряді систем досягається інваріантність не повна, а часткова, або система інваріантна до ε , де під ε слід розуміти похибку системи. Системою інваріантною до ε назовемо таку систему, в якій зберігаються межі абсолютно інваріантної системи і існує динамічна похибка σ , що характеризує міру інваріантності. Користуючись основними визначеннями, згідно теорії інформації, можна вказати таку абсолютно інваріантну систему, яка буде відрізнятися від вихідної наявністю динамічної похибки σ при максимально необхідній кількості інформації ΔH . Порівняння таких систем для однієї множини вхідних сигналів дозволить отримати оцінку інваріантності. При цьому ΔH і буде мірою ε -інваріантності для даного типу множини вхідних сигналів.

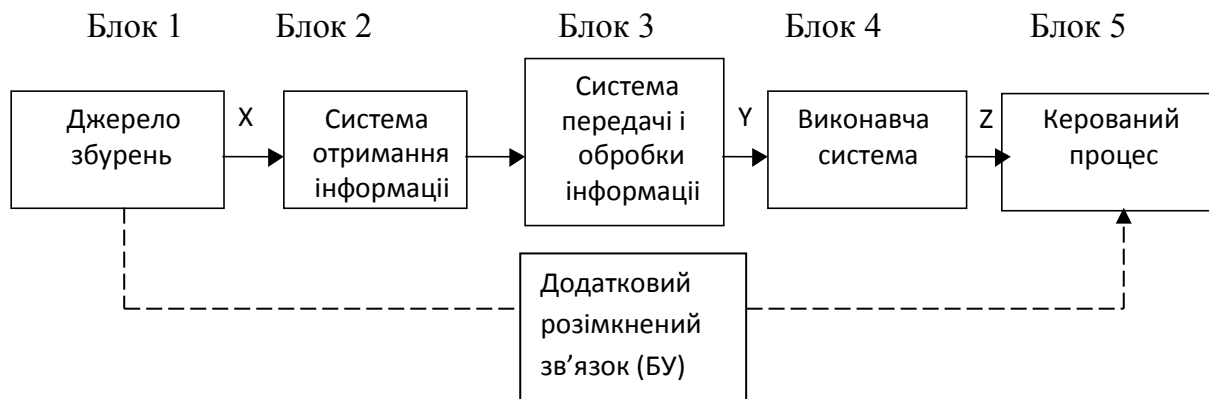


Рис. 2 Інваріантна система управління в розімкнутому вигляді

Використовуючи оцінки інваріантності до ε , отримаємо вираз, що визначає необхідну кількість інформації ΔH :

$$\Delta H = K \left(\log \frac{\sigma_1}{\sigma_1} + \log \frac{\sigma_2}{\sigma_2} + \dots + \log \frac{\sigma_n}{\sigma_n} \right), \quad (9)$$

де σ_i – можливі середньоквадратичні відхилення параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$\bar{\sigma}_i$ – середньоквадратична допустима похибка параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$i=1, 2, \dots, n$;

K – коефіцієнт, який залежить від типу каналу зв'язку, що використовується.

Необхідно зазначити, система управління інформаційною мережею повинна володіти як можливістю адаптації до стійких плинних змін режиму, так і властивістю інваріантності, що дозволяє системі бути нечутливою до випадкових збурень. Таким чином, система управління повинна мати комбіновану структуру, яка об'єднує описані вище адаптивну (замкнену) і інваріантну (розімкнену). Структура її представлена на рис. 3, де БУ – блок узгодження.

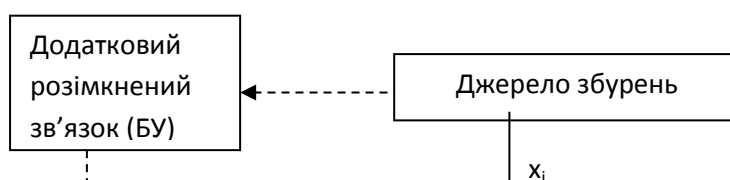


Рис. 3. Структура комбінованої системи управління

Описаний метод дозволяє знайти необхідний мінімум інформації, при якому параметри мережі матимуть задану точність. Якщо кількість інформації в системі управління буде меншою, то точність параметрів буде менше заданої.

Очевидно, з точки зору теорії інформації і динамічної точності, необхідно, щоб система управління забезпечувала задану точність параметрів мережі при мінімальному обсязі управляючої інформації.

Отже, з двох систем управління переваги будуть надані тій, яка вимагає меншу кількість управляючої інформації, це дозволяє знизити вимоги до якості каналів передавання даних, що використовуються системами управління.

Висновок

Тому інформаційно-ентропійний метод дозволяє визначити нетрадиційним способом кількість керуючої інформації у системі управління будь-якої мережі. Таку оцінку за допомогою інших практичних методів майже неможливо отримати, так як обмежена кількість вихідних даних, особливо для мереж, на яких застосовуються різні технології. Практична цінність забезпечується можливістю врахування ємності управляючої інформації з переліком вимог до точності параметрів основної мережі. Така оцінка визначається деякою дисперсією відхилення від математичного очікування. Чим більші вимоги до точності параметрів управляючої мережі, тим більша потрібна ємність управляючої інформації.

Запропонована комбінована система управління (рис. 3) дозволяє управляти мережею у двох режимах, одночасно забезпечуючи як властивості адаптивності, так і інваріантності параметрів мережі.

Зазначимо, що перший режим (назвемо його адаптивним) використовується у всіх системах управління. Він визначається тим, що виконує контроль параметрів мережі, на підставі якого система управління приймає рішення. Структура такої системи представлена на рис. 1.

Другий режим (розімкнена система) дозволяє усунути аварійні ситуації, тому що аналізує прогнозовані збурювальні фактори, враховуючи які, виконує коригування параметрів мережі. Структура такої системи представлена на рис. 2.

І, нарешті, комбінована структура (рис. 3) дозволяє реалізувати обидва режими. Кількість інформації, яка передається та обробляється системою управління з одного боку, визначає основні властивості керованої мережі, а з іншого – зумовлює її структуру та основні властивості.

Список використаної літератури

1. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев // Журнал УФН. - 1997. - №5. – С. 449–530.
2. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев // Журнал УФН. - 1999. - №1. – С. 358–365.
3. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация / М.В. Волькенштейн - Москва: Наука, 1986. – 139 с.
4. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами - Москва: Наука, 2003. – 426 с.
5. Стеклов В.К. Постановка задачі оцінки обсягу управляючої інформації у системі управління інтелектуальною мережею / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, Ю.О. Лев, С.І. Міщенко // Одеса: Информатика и связь. - 1996. - №1. - С. 75-87.
6. Стеклов В.К. Оценка объёма управляющей информации в информационных сетях / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман // Электросвязь. - 2000. - № 6. - С. 34-37.

Автори статті

Жебка Вікторія Вікторівна – к.т.н., доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Власенко Вадим Олександрович – аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна,
Зіненко Юрій Миколайович – здобувач, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Zhebka Viktoriya Viktorivna – candidate of science (technic), assistant professor of Department of Application Programming, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Vlasenko Vadim Oleksandrovyeh – postgraduate student, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Zinenko Yurii Mykolaiovych – applicant, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 12.08.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Б.Ю. Жураковський