

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВННЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

В статті проаналізовані особливості організації інфокомунікаційних мереж. Представлено обґрунтування процесів їх проектування. Докладно розглянуто поставлені задачі та алгоритми для процесів оптимізації інфокомунікаційні мережі.

Ключові слова: параметри ефективності мережі, синтез телекомунікаційної мережі, затримка інформації, ймовірність помилки

Вступ і постановка задачі

Одним з найважливіших та суттєвих завдань при оптимізації мереж зв'язку є визначення основних показників системи, які характеризують її якість. Їх можна назвати **зовнішніми або вихідними параметрами системи**. Позначимо ці параметри як $\alpha_1, \Delta_2, \dots, \alpha_n$. До них належать, і середньоквадратична помилка ξ , достовірність повідомлень, затримка переданої інформації, ймовірність помилки $P_{\text{пом}}$ при передаванні дискретних повідомлень, середній час безвідмовної роботи $\Delta t_{\text{сер}}$, вартість C та ін. Проектування значення деяких з параметрів $\alpha_1, \Delta_2, \dots, \alpha_n$ мають бути фіксованими, а інші можуть у процесі проектування змінюватися в певних межах (варіювати). Зовнішніми варійованими параметрами є $\alpha_1, \Delta_2, \dots, \alpha_n$ ($de n \leq n$).

Розглянуто вплив на якість системи монотонного збільшення одного з цих параметрів, наприклад α_i , за інших рівних умов, тобто незмінних умов роботи системи і незмінних значень всіх інших параметрів системи. Очевидно, при цьому можливий лише один з випадків, коли із зростанням якість системи:

поліпшується;

погіршується;

не змінюється;

змінюється немонотонно (тобто спочатку погіршується, а потім поліпшується або, навпаки, спочатку поліпшується, а потім погіршується).

На даному етапі проектування не вдається за тих або інших причин установити характер залежності якості системи від значень параметра α_i .

Очевидно, у третьому випадку параметр α_i не впливає на якість системи і може при проектуванні взагалі не враховуватися. Надалі, якщо при монотонному збільшенні параметр α_i набуває значення першого або другого випадку, цей параметр називається **показником якості системи** і позначається k_i . У всіх інших випадках α_i не належить до класу показників якості і називається просто **варійованим параметром системи**.

Таким чином, показником якості k_i ($i = 1, 2, \dots, m$) системи є така числова характеристика системи, яка пов'язана з її якістю строгою монотонною залежністю – чим більше (чим менше) величина k_i , тим краща система при інших рівних умовах.

Взагалі, навіть не аналізуючи дії системи, можна сказати, які зовнішні змінні параметри можуть при заданих вихідних даних розглядатися як показники якості (наприклад ймовірність помилки, затримка, пропускна здатність, надійність і вартість). Навпаки, кількість транзитних вузлів, кількість абонентів у мережі тощо не належать до показників якості.

При вирішенні питання про те, чи даний показник a , може бути показником якості, враховується вплив цього показника на якість системи за інших рівних умов, зокрема, при зберіганні всіх інших показників системи.

Навіть відносно такого показника, як вартість C , не можна було б стверджувати, що «чим менше вартість, тим краща система», тому що при зменшенні вартості можуть погіршуватися такі найважливіші показники якості, як ймовірність помилки, затримка та ін. Але при цьому виникає питання – у чому зміст визначених, зазначених вище способом, показників якості k_1, \dots, k_m із сукупності $\{a_1, \dots, a_n\}$ зовнішніх параметрів системи, якщо врахувати, що часто прагнення поліпшити в процесі проектування один із показників k_i призводить до зміни одного

або більше інших показників, і, отже, «інші рівні умови» не мають місця. Проте, як буде показано далі, введення показників якості k_1, \dots, k_m дає можливість у процесі проектування виключити безумовно гірші варіанти побудови системи, завдяки чому можна не тільки уникнути прийняття безумовно гіршого розв'язку, але і часто полегшити і прискорити знаходження оптимального (кращого) розв'язку [6].

З урахуванням вищевикладеного сукупність $D = \{D_1, \dots, D_l\}$ усіх вихідних даних можна поділити на підгрупи:

сукупність $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ умов;

сукупність $O_s = \{O_{s1}, \dots, O_{sq}\}$ обмежень на структуру і параметри проектованої мережі;

склад сукупності (вектори) $K = k_1, \dots, k_m >$ показників якості системи;

сукупність $O_k = \{O_{k1}, \dots, O_{kr}\}$ обмежень, які накладаються на показники якості.

Сукупність O_s містить обмеження, що накладаються на структуру і параметри $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$ системи. Ці обмеження можуть бути типу рівностей ($x_i = x_{i0}$), нерівностей $x_i \leq x_{im}$ або $x_{imin} \leq x_i \leq x_{im}$, дискретності ($x_i = 1, 2, 3 \dots$), зв'язку [$\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = 0$ або $\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = 0$], та іншого характеру, наприклад, «мережа не повинна містити транзитних вузлів визначеного типу».

До умов Y роботи системи належать різні характеристики мережі або системи зв'язку.

Вектор $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$ містить сукупність показників якості системи, які враховуються в процесі синтезу. При визначенні вихідних даних відомо лише склад цієї сукупності, тобто вказується, що варто розуміти під k_1 , під k_2 і т. д.; чисельні ж значення складових k_1, k_2, \dots, k_m (вектори K) залежать від структури і параметрів системи і у процесі синтезу варіюються. Надалі символ C_k буде означати, що мова йде не про величину складового вектора K' , а лише про склад цього вектора.

Обмеження O_k , що накладаються на величини показників якості k_1, \dots, k_m , можуть бути типу рівності ($k_1 = k_{10}$), нерівності ($k_1 \leq k_{im}, k_1 > 0$) і зв'язку (наприклад $\Phi_j(k_1, \dots, k_m) \leq 0$).

Зазначимо, що розподіл вихідних даних на умови Y , обмеження O_s і показники якості k_1, \dots, k_m є умовним, так як залежно від постановки задачі проектування ту саму числову характеристику можна розглядати або як показник якості, або як умову, або як обмеження. Наприклад, кількість керуючої інформації $I_{кер}$, необхідну системі керування для забезпечення заданої точності параметрів керованої мережі, можна розглядати, з одного боку, як показник якості, а з іншої – як умову роботи системи керування. Ряд показників якості (наприклад імовірність помилки, затримка переданої інформації, надійність) у процесі проектування часто доводиться переводити в розряд обмежень (типу рівностей або нерівностей). Проте, незважаючи на деяку умовність розподілу вихідних даних на умови, обмеження і показники якості, такий розподіл взагалі є корисним.

Система (варіант побудови системи) S , що задовольняє сукупності $\{Y, O_s\}$ вихідних даних, називається **допустимою**. При цьому може існувати не одна допустима система, а деяка множина допустимих M_d систем. Допустима система, що задовольняє сукупності обмежень O_k , називається **строго допустимою**. Інакше кажучи, строго допустимою називається система, що задовольняє усій сукупності $D = \{Y, O_s, C_k, O_k\}$ вихідних даних. Може існувати не одна, а деяка множина $M_{сд}$ строго допустимих систем. З усіх строго допустимих систем оптимальною (найкращою) вважається та система S_{opt} , що має найкраще (серед за-здальгідь установлених) значення вектора K показників якості. Отже, для вибору оптимальної системи попередньо обирають (обґрунтовують) критерій переваги (критерій оптимальності), і, як правило, за ним одне значення вектора K вважають кращим (або гіршим) за інше його значення [6].

Нещодавно при проектуванні не прагнули до пошуку обов'язково оптимальної системи: задача проектування вважалася успішно вирішеною, якщо вдавалося знайти (спроєктувати) будь-яку строго допустиму систему. Проте в останні роки стає усе більш актуальною задача створення не тільки строго допустимих, але й оптимальних систем. Це пояснюється тим, що з кожним роком зростають вимоги до телекомунікаційних мереж. Тому вважається суттєвим не

просто задовольнити вихідним вимогам O_k , що пред'являються до показників якості системи, але і поліпшити ці показники.

Часто пошук оптимальної системи називається (коротко) **синтезом системи**.

З викладеного випливає, що задачу синтезу можна сформулювати так: знайти таку систему i^1 , що задовольняє сукупності $\{Y, O_5, C_k, O_k\}$ вихідних даних і має при цьому значення $K = \langle k_i, \dots, k_m \rangle$ показників якості, найкраще як заздалегідь обраний критерій переваги (критерій оптимальності системи).

Комбінований процес сполучення математичних і евристичних методів назовемо **інженерним синтезом**.

Синтез складних систем, як правило, має бути векторним.

Векторним називається синтез з урахуванням декількох показників якості, тобто за зазначенням вектора $K = \langle k_i, \dots, k_m \rangle$ показників якості. Відзначимо, що векторний синтез називають *векторною оптимізацією, оптимізацією за векторним критерієм або багатокритеріальною оптимізацією*. На відміну від цього, синтез, що провадиться за єдиним показником якості ($m = 1$), називається **скалярним**.

Глобальним є синтез з урахуванням усіх суттєвих показників якості, включаючи економічні і конструктивні. Якщо при синтезі враховуються не всі суттєві показники якості, то він називається частковим. У тому, що інженерний синтез має бути векторним і глобальним, неважко переконатися з наступних міркувань. Інженерний синтез завершається розробкою системи, оптимальної з погляду її практичного застосування. Отже, у процесі цього синтезу враховують усі суттєві для нього показники якості. Якщо не врахований хоча б один із суттєвих для практичного застосування показників якості, система не може вважатися оптимальною [1].

Звідси випливає, що інженерний синтез завжди має бути глобальним. При інженерному синтезі не може бути такої ситуації, щоб суттєвим був тільки один показник якості: завжди буде щонайменше два суттєвих показники – вартість C та показник, що характеризує основний ефект, що досягається при застосуванні системи (ефективність системи). На практиці кількість суттєвих показників якості більше двох. Звідси випливає, що глобальний синтез, а отже й інженерний синтез, завжди є векторним.

При математичному синтезі на відміну від інженерного для того, щоб зробити чисто математичне розв'язання задачі можливим або спростити його, іноді відмовляються від урахування деяких суттєвих показників, наприклад, не враховують (кількісно) економічні і конструктивні показники [3]. Тому математичний синтез може бути як глобальним, так і частковим.

Синтез телекомунікаційної мережі, системи зв'язку або пристроїв звичайно містить розв'язання таких основних задач: синтез оптимальної структури мережі (системи); вибір оптимальних значень параметрів мережі або системи, наприклад, затримки переданої інформації, достовірності, мінімальної кількості керуючої інформації в системі керування, що забезпечує задану точність параметрів керованої мережі, та інше, або **оптимізацію параметрів**,

вибір оптимального варіанта побудови мережі (системи) із скінченної кількості N цілком визначених варіантів S_1, S_2, \dots, S_n або дискретний вибір мережі (системи).

Таким чином, синтез телекомунікаційної мережі (системи і пристрою) звичайно складається з синтезу структури, оптимізації параметрів і дискретного вибору мережі (системи).

Задача векторного синтезу полягає у знаходженні такої системи S , що задовольняє сукупності $\{Y, O_5, C_k, O_k\}$ вихідних даних і має при цьому значення вектора $K' = \langle k_1, \dots, k_i, \dots, k_m \rangle$ показників якості, найкраще як обраний критерій переваги. При цьому під показником якості k_i ($i = 1, 2, \dots, m$) розуміємо числову характеристику системи, пов'язану з її якістю монотонної залежності: чим більше (менше) величина K_i , тим краще система за інших рівних умов, тобто при незмінних $\{Y, O_5, C_k, O_k\}$ і незмінних значеннях інших $(m - 1)$ показників

якості. Для зручності порівняння значень вектора K , що відповідають різним варіантам побудови системи, зручно попередньо привести всі показники якості $k_1, \dots, k_i, \dots, k_m$ до стандартного виду. Показник якості k_1 вважається стандартним (або поданим у стандартному вигляді), якщо він задовольняє умові:

$$k'_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, m), \quad (1)$$

і чим менше (а не більше) величина k_i , тим краще система (при сформульованих вище інших рівних умовах). З (1) випливає, зокрема, що ідеальною відносно показника якості k_i системою є така система, у якої $k_i = 0$.

Якщо деякий показник якості K'_i не є стандартним, то його завжди можна привести до стандартного вигляду K_i . Дійсно, нехай, наприклад, невід'ємний показник якості K'_i такий, що може змінюватися в межах

$$k'_{i \min} \leq k'_i \leq k'_{i \max} \quad (2)$$

і чим більше величина k'_i , тим краща система. Тоді як еквівалентний йому стандартний показник якості можна вибрати величину

$$K_i = k'_{i \max} - k'_i \quad (3)$$

Якщо $K'_i \rightarrow \infty$, то замість (3)

$$k_i = 1/k'_i \quad (4)$$

Нарешті, якщо невід'ємний показник k_i задовольняє умові (2) (при цьому він менший, тим краща система), тоді

$$k_i = k'_i - k'_{i \min} \quad (5)$$

Коли $k'_{i \min} = 0$, значення набуває $k_i = k'_i$, тобто вихідний показник якості k'_i є стандартним і, отже, перетворювати його не потрібно.

Очевидно, такі найбільш поширені показники, як затримка, ймовірність помилки, відношення сигнал/шум, середній квадрат помилки тощо, мають стандартний вигляд і перетворень не потребують. Якщо показником якості k'_i є ймовірність P_n деякої події і чим більше ця ймовірність (наприклад ймовірність ураження цілі), тим краща система. Тоді, як випливає з (3),

$$k_i = 1 - P_n = P_{\text{пп}}, \quad (6)$$

де $P_{\text{пп}}$ – ймовірність протилежної події (наприклад, ймовірність непошкодження цілі).

Заміна нестандартних показників якості відповідними їм стандартними показниками не призводить до зміни результатів синтезу, але спрощує одержання цих результатів.

Основне спрощення полягає в тому, що в m -мірному просторі показників якості k_1, k_2, \dots, k_m кожній сукупності $\langle k_1, k_2, \dots, k_m \rangle$ показників якості відповідає деякий m -мірний вектор $K = \langle k_1, k_2, \dots, k_m \rangle$, проведений із початку координат. При цьому цілком ідеальної системою, тобто системою, кращою відносно всіх показників якості k_1, k_2, \dots, k_m , відповідає нульове значення у векторі K , тобто точка, що збігається з початком координат.

Очевидно, що жодна реальна система не може мати нульовий вектор K , тому що не існує системи, ідеальної в усіх відношеннях. У кращому випадку можуть існувати системи, ідеальні

лише в деяких відношеннях, тобто нульові значення мають лише деяких із m показників якості. Тому, якщо за математичним синтезом одержимо

$$K = 0, \quad (7)$$

то це свідчитиме про некоректну постановку задачі синтезу надмірної ідеалізації задачі (зневагу дуже суттєвими обмеженнями). Звідси випливає: при коректній постановці задачі векторного синтезу множина M_d допустимих систем (рішень) не включає початок координат.

Особливості при дискретному виборі системи

При дискретному виборі сукупність строго допустимих систем відображає у просторі R^m показників якості задане дискретною множиною M_{cd} точок (систем), і задача синтезу полягає у виборі такої точки цієї множини, яка має найкраще значення вектора K .

При оптимізації параметрів варіюється сукупність (вектор) $X = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ параметрів системи S і потрібно вибрати таке значення x цієї сукупності, при якому вектор $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$ має найкраще (стосовно обраного критерію переваги) значення. У загальному випадку кожний із показників якості k_1, \dots, k_m може залежати від усіх n параметрів:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= F_1(x_1, \dots, x_n) \\ \dots \\ k_m &= F_{1m}(x_1, \dots, x_n) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Ці залежності називають *цільовими функціями*.

У силу накладених обмежень O_s параметри x_1, \dots, x_n мають задовольняти деяким обмеженням типу рівностей, нерівностей і дискретності. При цьому обмеження типу рівностей або нерівностей накладаються не тільки на значення кожного з параметрів окремо, але і на зв'язки між ними. Наприклад, обмеження можуть мати вигляд:

$$f_j(x_1, \dots, x_n) = a(j = \overline{1, p}), \quad (9)$$

$$f_j(x_n, \dots, x_n) = a_j(j = p + 1, p + 2, \dots). \quad (10)$$

Очевидно, ці співвідношення можуть бути записані також у вигляді:

$$\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = 0 (j = \overline{1, p}), \quad (11)$$

$$\Phi_j(x_1, \dots, x_n) \leq 0 (j = p + 1, \dots, q), \quad (12)$$

де $\Phi_j(x_1, \dots, x_n) = f_j(x_1, \dots, x_n) - a_j$.

Функції $\Phi_j(x_1, \dots, x_n)$ називаються звичайно функціями зв'язку або функціями обмежень.

Крім того, мають бути задані обмеження на показники якості k_1, \dots, k_m

$$\left. \begin{aligned} k_1 &\leq k_{1m}, \\ \dots \\ k_m &\leq k_{mm}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Оптимізації параметрів складається з двох основних етапів.

На першому (попередньому) етапі, виходячи із сукупності $\{Y, O_s, C_k\}$ вихідних даних, знаходять вигляд цільових функцій і функцій зв'язку.

При цьому, очевидно, необхідно мати вихідні дані про структуру, системи, яку можна розглядати як частину умов Y або обмежень O_s .

На другому (основному) етапі оптимізують параметри системи, тобто відшуковують таке значення $\hat{x} = \langle \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n \rangle$ сукупності параметрів системи, що задовольняють обмеженням (11), (12) та (13), забезпечуючи найкраще значення вектора $K = \langle k_1, \dots, k_m \rangle$.

Відзначимо, що істотною є та обставина, що при оптимізації параметрів у математичному відношенні задача зводиться до дослідження поведінки цільових функцій (8), тобто функцій скінченної кількості змінних x_1, \dots, x_n при урахуванні обмежень, що накладаються на ці змінні.

Розглянемо формулювання задачі оптимізації параметрів у m -мірному просторі R^m показників якості. Зі співвідношень (7) і (8) випливає, що при оптимізації параметрів, крім простору R^m показників якості k_1, \dots, k_m можна розглядати також простір R^n варійованих параметрів x_1, \dots, x_n , простір R^q обмежень.

Оптимізацію параметрів для кожного варіанта S побудови системи, або кожену систему S (повністю) визначимо сукупністю $X = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ значень своїх параметрів, тобто

$$S = S(x) = S(x_1, \dots, x_n). \quad (14)$$

У свою чергу кожній системі Y відповідає визначене значення вектора $K = \langle k_1, \dots, k_n \rangle$ показників якості.

Будемо вважати, що залежність між S і K взаємоднозначна, і позначимо її

$$K = K(S). \quad (15)$$

Тоді в просторі R^m показників якості кожній системі S відповідатиме одна, і тільки одна точка $A(S)$, у якій вектор показників якості $R(S)$, і навпаки, кожному значенню вектора $K(S)$, тобто кожній точці $A(S)$, буде відповідати одна, і тільки одна система S . Оскільки на можливі значення вектора параметрів $x = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, а отже, і на можливі (допустимі) системи S накладені обмеження (наприклад вигляду (8)), тоді припустимі значення вектора K в просторі R^m обмежені деякою m -мірною областю M_d . Вигляд цієї області залежить як від обмежень (8), так і від вигляду цільових функцій (7), тобто визначається сукупністю $\{Y, O_s, C_k\}$ вихідних даних, прийнятих при формулюванні задачі синтезу.

Якщо показники якості задовольняють визначеним обмеженням (ці обмеження визначаються при рішенні кожної конкретної задачі), то з області M_d має бути виділена строго допустима область M_{cd} , що задовольняє цим обмеженням. При дискретному синтезі сукупності строго припустимих систем відповідає в просторі R^m скінченна множина точок. На відміну від цього при оптимізації параметрів множина відповідних точок у просторі R^m (у не виродженому випадку) нескінченна і має потужність континуум (неперервної множини). При цьому задача оптимізації параметрів складається у виборі такої точки (системи) із множини M_{cd} , якій відповідає найкраще (стосовно обраного критерію переваги) значення вектора K .

Розглядаючи особливості постановки задачі оптимізації при синтезі структури впливає, те, що з технічної точки зору синтез структури відрізняється від оптимізації параметрів тим, що в процесі синтезу структура системи варіюється настільки істотно, що ці варіації не можна звести до зміни скінченної кількості параметрів системи [2]. Більш строго, з математичної точки зору, синтез структури відрізняється від оптимізації параметрів тим, що в процесі оптимізації варіюється не сукупність $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$ деяких чисел (параметрів), а оператор системи. При цьому залежності показників якості k_1, \dots, k_m від варіантів побудови системи вже не можна описати цільовими функціоналами. Вигляд цих функціоналів дуже складний. Обмеження, що накладаються при синтезі структури, також можуть мати більш складний характер, чим при оптимізації параметрів, тому що ці обмеження накладаються не тільки на

значення деяких чисел x_1, \dots, x_n або зв'язків між ними, але і на вигляд функціональних залежностей або зв'язків між цими залежностями.

У просторі R^m показників якості задача синтезу структури зводиться, як і при оптимізації параметрів, до наступного. При заданій сукупності $\{Y, O_s, C_k, O_k\}$ вихідних даних сукупність усіх строго припустимих точок (систем) утворить деяку область $M_{сд}$. Кожній точці A цієї області відповідають цілком визначені системи Y і показник якості $K(S)$. Тому синтез структури зводиться до вибору з усіх точок області $M_{сд}$ такої точки, у якій вектор K має найкраще (відносно обраного критерію переваги) значення. Відмінність синтезу структури від оптимізації параметрів полягає в тому, що вигляд області $M_{сд}$ тепер визначається не сукупністю цільових функцій (7) і обмежень (8), а більш складними співвідношеннями (цільовими функціоналами, обмеженнями інтегрального вигляду тощо). Таким чином, можна сформулювати загальні риси й особливості дискретного вибору системи, синтезу структури й оптимізації параметрів. В усіх цих випадках строго припустимим системам (варіантам побудови системи) у просторі задача зводиться до вибору такої із цих точок, якій відповідає найкраще (відносно обраного критерію пропозиції) значення вектора K . Для цього узагальнення між трьома основними видами синтезу (оптимізації), можна сформулювати ряд загальних положень, правдивих для всіх цих видів. Варто лише пам'ятати про різний зміст поняття «система S ». При дискретному виборі можливо лише скінченна кількість цілком визначених варіантів S_1, \dots, S_n побудови системи S .

При оптимізації параметрів кожний варіант побудови системи S (кожна система S) цілком визначається скінченною кількістю n параметрів x_1, \dots, x_n тобто $S=S(x_1, \dots, x_n)$. При синтезі структури варіанти побудови системи S можуть відрізнятися не тільки чисельними значеннями скінченної кількості параметрів, але і можуть мати більш принципові розходження. Проте й при синтезі структури, якщо які-небудь два варіанти S_1 і S_2 побудови системи (дві системи) відрізняються тільки значеннями своїх параметрів або навіть значенням тільки одного з параметрів, ці варіанти (системи) вважаються різними (незбіжними). Це зумовлено тим, що задача синтезу структури полягає не тільки в тому, щоб визначити принцип побудови системи, але і щоб для знайденого принципу встановити (вибрати) цілком визначені чисельні значення всіх параметрів системи. Тому при синтезі структури знижується вибір варіанта побудови системи, включаючи вибір значень усіх параметрів системи.

Література:

1. Власенко В.О., Розробка методик визначення параметрів OFDM-сигналів в сучасних мобільних мережах / Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Панкратова О.С. – Сучасний захист інформації. – 2016. – № 3
2. Ярош В.О. Методика розрахунку функції виживання телекомунікаційних мереж при багатократній дії дестабілізуючих факторів – Сучасний захист інформації. – 2016. – № 3.
3. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. - JohnWiley&SonsTtd, 2011. – С.137.
4. Шелухин О.И., Оптимизация параметров телекоммуникационных сетей методом регуляризации Тихонова / Пружинин А.В., Осин А.В., – Информационно-измерительные и управляющие системы, 2006, т.4, №6, с.63-72.
5. Патюков В.Г. Оценка погрешности в доплеровских системах / Патюков Е.В., Рычков Е.Н. – Журнал радиоэлектроники: электронный журнал.
6. Беркман Л.Н., Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку / Стеклов В.К., Кільчицький С.В. – Київ, Техніка, 2004 – 576 с.

Надійшла 03.12.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Рудницький В.М.