

УДК 681.7.068:004.7

В. П. Кожем'яко, д. т. н., проф.; В. І. Маліновський**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ У
ГЕОІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

У статті запропоновано математичну модель розподілу потоків для геоінформаційно-енергетичних мереж (ГІЕМ) на основі теорії масового обслуговування. Проведено комп'ютерне моделювання динаміки змін імовірностей інформаційних та енергетичних запитів у середовищі MathCad. Ця модель дозволяє визначати основні характеристики геоінформаційно-енергетичних мереж і описує процеси розподілу інформаційної й енергетичної складових, що є перспективним у задачах розробки топології мереж.

Ключові слова: геоінформаційно-енергетична мережа (ГІЕМ), завантаження мережі, інформаційно-енергетичний канал, потік запитів, функція розподілу ймовірності.

Вступ

Геоінформаційно-енергетичні мережі (ГІЕМ) [1, 2] – це сучасні високотехнологічні комплексні апаратно-програмні рішення, які передбачають аналіз, обробку і прийняття рішення як у інформаційній, так і в енергетичній сферах, оптимальне управління й перерозподіл інформаційних і енергетичних просторово (географічно) рознесених ресурсів, що забезпечується інтелектуальними системами, розташованими в локальних центрах керування. Інформація й енергія при цьому розглядається в спільному інформаційно-енергетичному полі [1].

Постановка завдання

Під час розробки й дослідження топології геоінформаційно-енергетичних мереж постають завдання визначення основних характеристик основних вузлів мережі: пропускних здатностей вузлів і каналів передавання, середнього числа абонентів, необхідної швидкодії обробки (агрегації) інформаційного трафіку й величин енергетичного навантаження кінцевих і проміжних сегментів. Також виникають більш глобальні задачі ефективного управління енергетичними ресурсами, оптимізації інформаційних і енергетичних потоків (визначення найменших довжин інформаційно-енергетичних каналів), збільшення швидкодії ГІЕМ і можливості оперування їх у реальному часі. Крім того виникають завдання системного енергозбереження (визначення шляхів для енергетичних потоків з найменшими енергетичними втратами та застосування перспективних енергозберігаючих технологій, наприклад, світлодіодних освітлювачів), вирішення яких неможливе без отриманих адекватних даних основних параметрів мережі ГІЕМ: пропускної здатності і швидкості обчислень, швидкості обслуговування запитів від кінцевих користувачів, імовірності відмови. Під час визначення яких необхідною є розробка універсальної математичної моделі, яка врахувала б показники розподілу як інформаційних, так і енергетичних потоків.

Як і будь-які інші мережі, ГІЕМ описуються за допомогою методів теорії масового обслуговування. У роботі [4] було запропоновано математичний апарат опису процесів, який дозволяє визначати основні показники інформаційної складової. Але для вирішення завдань опису геоінформаційно-енергетичних мереж, крім інформаційних параметрів мережі, необхідним є визначення ще й енергетичних: завантаженості енергетичними запитами, швидкості обслуговування запитів енергетичного керування, часу простою при запиті на енергетичну комутацію тощо. Тому необхідною є розробка моделі на основі теорії масового обслуговування, яка описує процеси розподілу інформаційно-енергетичних потоків у ГІЕМ і дозволяє проводити їх комплексну оцінку.

Принципи утворення й розподілу інформаційно-енергетичних потоків у ГІЕМ

Основні принципи обробки інформації в геоінформаційно-енергетичних системах були визначені в роботі [5]. Запропонована автором у [5] модель способу обробки інформації базується на паралельно-ієрархічному Q -перетворенні [6] під час обробки й передачі потоків інформації в ГІЕС, ГІЕМ. Згідно з цією моделлю передбачається виконувати паралельну обробку й передачу даних по волоконно-оптичному кабелю від центру обробки (центру керування ГІЕМ) до кінцевого вузла геоінформаційно-енергетичної мережі, і у зворотному напрямку. Паралельно-ієрархічна модель обробки й передачі передбачає стійке кодування й високошвидкісну обробку даних, що робить її придатною для застосування в геоінформаційно-енергетичних середовищах [5].

Ці принципи відповідають концепціям створення більшості відомих геоінформаційно-енергетичних мереж і можуть використовуватися як базова модель розподілу.

Геоінформаційно-енергетичні мережі можна розглядати в якості багатоканальних мереж із чергами, у яких процеси інформаційного та енергетичного обміну добре відтворюються за допомогою моделей теорії масового обслуговування. При цьому під параметрами, які характеризують *енергетичні потоки й складові* ГІЕМ, є інформаційні запити на комутацію та перерозподіл енергії живлення. Модель мереж із чергами не може бути застосована безпосередньо для опису фізичного енергетичного параметру (струму, оптичного випромінювання тощо), оскільки він не може бути затриманий в часі й поставлений в чергу.

Оскільки в ГІЕМ передбачено значну кількість інформаційно-енергетичних взаємозв'язків, то такі ГІЕМ підпадають під *модель багатоканальних мереж масового обслуговування із чергами* [7]. У такій моделі присутня n -кількість каналів, на які надходить потік запитів з інтенсивністю λ . Інтенсивність обслуговування по одному каналу дорівнює μ ,

відношення інтенсивностей загального та одиничного рівнів дорівнює $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ [7]. У такому випадку має виконуватись умова [7]:

$$\lambda_i = \lambda, \quad i=0,1,2,\dots;$$

$$\mu_i = \begin{cases} i\mu, & \text{при } i \leq n; \\ n\mu & \text{при } i > n. \end{cases}$$

Умова $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < n$ визначає імовірність одиничного запиту [7]:

$$\begin{cases} p_i = \frac{\rho^i}{i!} p_0, & i < n; \\ p_i = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{\rho^{i-n}}{n^{i-n}} p_0 & i > n, \end{cases} \quad (1)$$

де p_0 – імовірність простою всіх каналів ГІЕМ, яка визначається як [7]:

$$p_0 = \frac{\rho^{n+1}}{(n-1)!(n-\rho)^2} p_0. \quad (2)$$

Середнє число зайнятих каналів k_{sz} [7]:

$$k_{sz} = \frac{\rho^{n+1}}{n!(1-\rho/n)^2}. \quad (3)$$

Середнє число запитів визначене як $k_s = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$ [7]. Час інформаційних запитів очікування в черзі [7]:

$$t_z = \frac{k_{sz} + \rho}{\mu n}. \quad (4)$$

Формули (1) – (4) визначають основні характеристики ГІЕМ під час їхньої оцінки та порівняння за допомогою моделі багатоканальної мережі масового обслуговування із чергами.

Математична модель розподілу потоків

Грунтуючись на викладених у [5] твердженнях, для інформаційно-енергетичних потоків у геоінформаційно-енергетичних мережах можна виділити такі положення:

1. Інформаційні зв'язки в ГІЕМ є двосторонніми (двонаправленими), а енергетичні – однонаправленими (від енергостанції до кінцевих і проміжних вузлів);
2. Кількість інформаційних зв'язків наближено дорівнює кількості енергетичних (забезпечення умови автономності, згідно з концепцією оптичних геоінформаційно-енергетичних технологій [8]), за винятком відкритих оптичних каналів, що носять суто інформаційний характер;
3. Інформаційний обмін відбувається згідно з процесом обробки черги запитів двосторонньої направленості, енергетичний – у відповідності до напрямків надходження команд керування на органи управління енергетичним розподілом.

На основі цього, з урахуванням багатоканальної моделі ММО, можна записати модель утворення й розподілу інформаційно-енергетичних потоків у оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах.

При n_{inf} – кількості інформаційних каналів та n_{pow} – кількості енергетичних з відповідними потоками запитів λ_{inf} та λ_{pow} та одиничними інтенсивностями μ_{inf} та μ_{pow} , за умови, що кількість як інформаційних каналів, так і енергетичних значно більша за кількість вузлів мережі i . $\mu_{inf} = n_{inf} \mu$, $\mu_{pow} = n_{pow} \mu$ за умови, що $i > n$. У наближенні прийmemo

$\mu_{inf} = \mu_{pow} = \mu_i$. Імовірність одиничного інформаційного запиту (для двостороннього інформаційного каналу з густиною запитів або функцією завантаження мережі $\rho_{inf} = \frac{2\lambda_{inf}}{\mu_i}$)

можна визначити як:

$$p_{inf} = \frac{2\lambda_{inf}^i}{\mu \cdot 2\mu \cdot \dots \cdot n_{inf} \mu \cdot (n_{inf} \mu)^{i-n_{inf}}} p_{0inf} = \frac{2\rho_{inf}^i}{n! n^{(i-n_{inf})}} p_{0inf} = \frac{2 \cdot \rho_{inf}^{n_{inf}}}{n!} \cdot \frac{\rho_{inf}^{i-n_{inf}}}{n^{i-n_{inf}}} p_{0inf}, \quad (5)$$

де p_{0inf} – імовірність простою всіх інформаційних каналів ГІЕМ.

Аналогічно для однонаправленого енергетичного $\rho_{pow} = \frac{\lambda_{pow}}{\mu_i}$.

$$p_{pow} = \frac{\lambda_{pow}^i}{\mu \cdot 2\mu \cdot \dots \cdot n_{pow} \mu \cdot (n_{pow} \mu)^{i-n_{pow}}} p_{0pow} = \frac{\rho_{pow}^i}{n! n^{(i-n_{pow})}} p_{0pow} = \frac{\rho_{pow}^{n_{pow}}}{n!} \cdot \frac{\rho_{pow}^{i-n_{pow}}}{n^{i-n_{pow}}} p_{0pow} \quad (6)$$

Імовірність простою всіх інформаційних p_{0inf} та енергетичних p_{0pow} каналів ГІЕМ:

$$\begin{cases} p_{0inf} = \frac{p_{inf}^{n_{inf}+1}}{(n_{inf}-1)!(n_{inf}-\rho_{inf})^2} p_0 \\ p_{0pow} = \frac{p_{pow}^{n_{pow}+1}}{(n_{pow}-1)!(n_{pow}-\rho_{pow})^2} p_0 \end{cases}, \quad (7)$$

де p_0 – імовірність повного простою всіх каналів ГЕМ, $p_0 = 1 - (p_{ipow} + p_{iinf})$; середнє число зайнятих інформаційно-енергетичних каналів k_{Sz}

$$\begin{cases} k_{Szinf} = \frac{p_{inf}^{n_{inf}+1}}{n_{inf} n_{inf}! (1 - \rho_{inf} / n_{inf})^2} \\ k_{Szpow} = \frac{p_{pow}^{n_{pow}+1}}{n_{pow} n_{pow}! (1 - \rho_{pow} / n_{pow})^2} \end{cases}. \quad (8)$$

Середнє число запитів визначається як: для інформаційного потоку $k_{inf} = \rho_{inf}$ та для енергетичного $k_{pow} = \rho_{pow}$. Час інформаційних запитів очікування в черзі

$$t_z = \frac{k_{Szinf} + \rho_{inf}}{\mu_{inf}}. \quad (9)$$

Якщо позначити через $p_{inf}(t)$ – функцію розподілу інформаційних потоків мережі ГЕМ, а через $p_{pow}(t)$ – функцію розподілу енергетичних потоків, які визначають p_{inf} , p_{pow} – імовірності їх виникнення, то для інформаційної та енергетичної складової можна записати модель утворення й розподілу потоків:

$$\begin{cases} \frac{dp_{inf}(t)}{dt} = -(\lambda_{iinf} + \mu_i) p_{iinf}(t) + \lambda_{i-1inf} p_{i-1inf}(t) + \mu_{i+1} p_{i+1inf}(t) \\ \frac{dp_{pow}(t)}{dt} = -(\lambda_{ipow} + \mu_i) p_{ipow}(t) + \lambda_{i-1pow} p_{i-1pow}(t) + \mu_{i+1} p_{i+1pow}(t) \end{cases}, \quad (10)$$

де $p_{inf}(t)$, $p_{pow}(t)$ – функції розподілу ймовірностей виникнення інформаційних та енергетичних потоків (запитів) у часі t від центру керування ГЕМ.

За допомогою рівняння (10) при заданих значеннях λ_{0inf} , λ_{0pow} та μ можливим є визначення динаміки розподілу інформаційних та енергетичних потоків у мережі ГЕМ на основі моделі масового обслуговування.

За допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MathCad було отримано графіки змін імовірностей одиничних інформаційного й енергетичного запитів від відповідних їм імовірностей простою p_{0inf} та p_{0pow} (рис. 1) за умов, що інформаційний обмін є двостороннім з густиною запитів $\rho_{inf} = \frac{2\lambda_{inf}}{\mu_{inf}} = 0.4$, при середній інтенсивності потоку $\mu_{inf} = 50$ і кількості потоків $\lambda_{inf} = 10$ при кількості основних інформаційних каналів $n_i = 4$, а енергетичний – однонаправленим з густиною запитів $\rho_{pow} = \frac{2\lambda_{pow}}{\mu_{pow}} = 0.25$, при середній інтенсивності потоку $\mu_{pow} = 40$ і кількості потоків $\lambda_{pow} = 5$ і кількості енергетичних каналів $n_i = 4$.

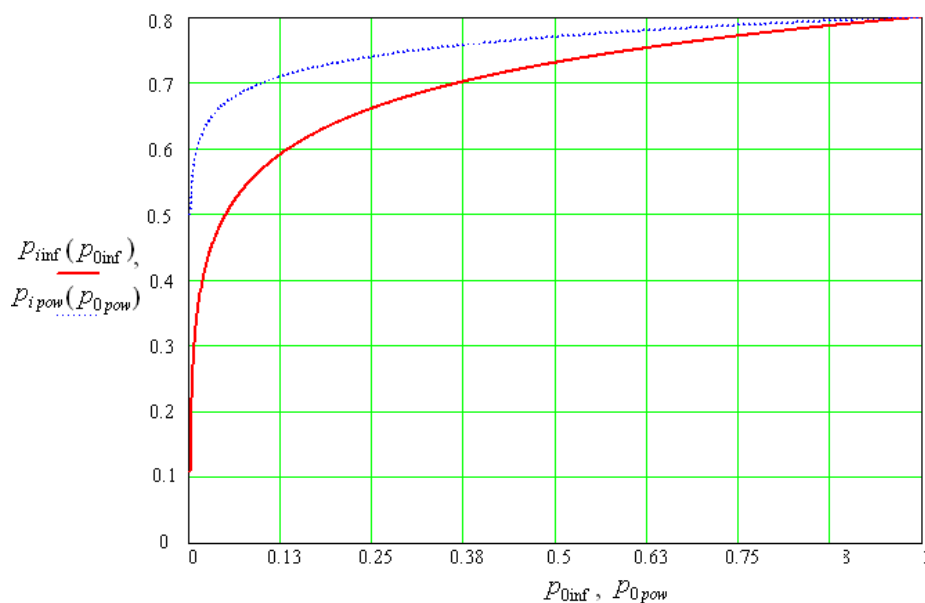


Рис. 1. Графік змін імовірностей одиничних інформаційного p_{inf} та енергетичного p_{pow} запитів від відповідних імовірностей простою p_{0inf} та p_{0pow}

Для дослідження динаміки змін імовірностей p_{inf} і p_{pow} , ріст інтенсивності запитів λ_{inf} , λ_{pow} можна задати за допомогою графу (рис. 2).

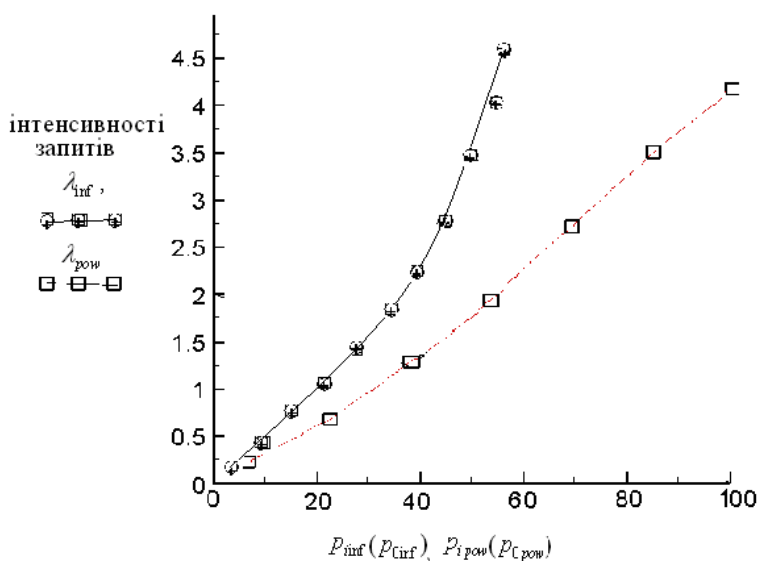


Рис. 2. Граф росту інтенсивностей запитів λ_{inf} , λ_{pow}

При зміні початкових умов моделі, зокрема збільшенні інтенсивності потоків $\mu_{inf} = 70$, і кількості потоків $\lambda_{inf} = 20$ (для інформаційних каналів), і $\mu_{pow} = 60$ і кількості потоків $\lambda_{pow} = 15$ (для енергетичних), при одночасному їхньому збільшенні до $n_i = 10$, була отримана наступна залежність імовірностей (рис. 3).

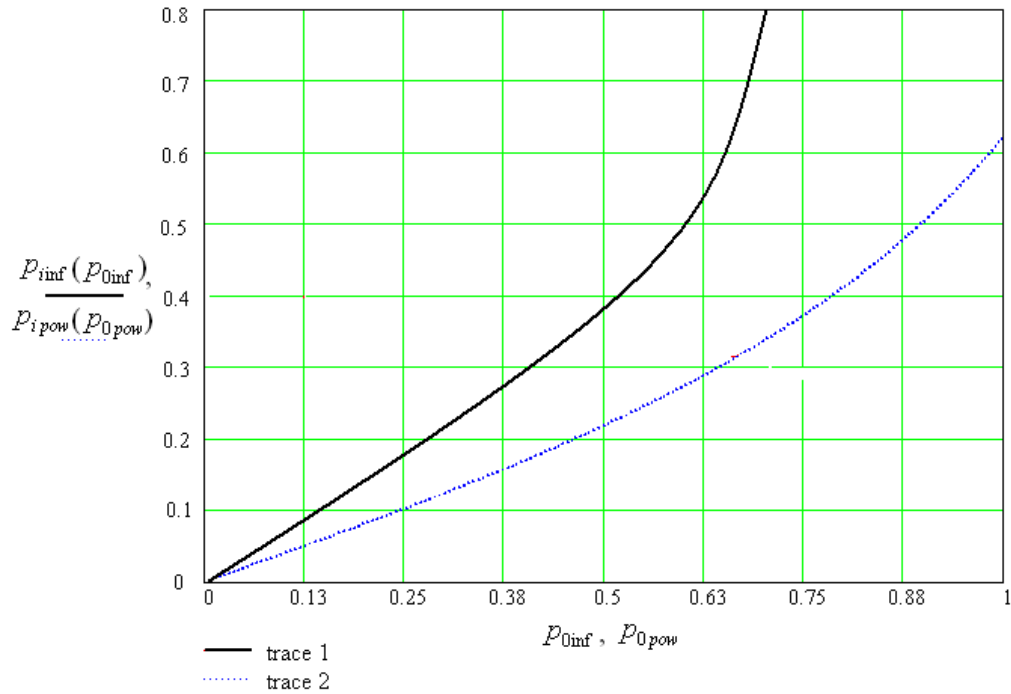


Рис. 3. Зміна ймовірностей одиничних інформаційного p_{inf} та енергетичного p_{pow} запитів при збільшенні параметрів моделі μ_{inf} , λ_{inf} , μ_{pow} , λ_{pow} та n_i

Враховуючи, що виникнення інформаційно-енергетичних потоків знаходиться в i -ий момент часу в певній кількості каналів n_{inf} та n_{ipow} із всієї їхньої сукупності $N_{inf-pow} = n_{inf} + n_{ipow}$ та визначений характер змін імовірностей простою всіх інформаційних p_{0inf} та енергетичних p_{0pow} каналів (рис. 3), можна записати наближення для системи рівнянь (10):

$$\begin{cases} \frac{dp_{0inf}(t)}{dt} = -\lambda_{0inf}p_{0inf}(t) + \mu p_{1inf}(t) \\ \frac{dp_{0pow}(t)}{dt} = -\lambda_{0pow}p_{0pow}(t) + \mu p_{1pow}(t) \end{cases} \quad (11)$$

Причому на рис. 3 спостерігається більша крутизна характеристики для ймовірності інформаційних запитів p_{inf} (верхня крива), що зумовлено більшим ростом інтенсивностей запитів від інформаційних вузлів мережі. Адже останніх значно більше, ніж енергетичних, тим більше, що згідно з принципами розподілу потоків інформаційний обмін у ПЕМ є двостороннім (повна дуплексна організація зв'язків), що передбачає коефіцієнт 2 у формулі (5).

Середня затримка під час очікування визначається формулою [9]:

$$T_c = \sum_{i=1}^V \left(\frac{\lambda_i}{\mu} \right) \left[\frac{1}{\mu B_i - \lambda_i} \right], \quad (12)$$

де B_i – швидкість передачі одиничного каналу ланки мережі.

Обмеженням під час виконання розрахунків є виконання нерівності $0 \leq \lambda_i / \mu < B_i$ [9]. Для дослідження динаміки росту середньої затримки T_c застосовують формулу [9]:

$$\frac{dT_c}{d\lambda_i / \mu} = \frac{B_i}{f(B_i - \lambda_i / \mu)^2} \quad i = 1, n, \quad (13)$$

де $f(B_i - \lambda_i / \mu)$ – функція розподілу трафіку мережі в часі.

Динаміка росту середньої затримки є позитивною $\frac{dT_c}{d\lambda_i / \mu} > 0$ при всіх значеннях $i = 1, n$.

Для вирішення задачі оптимізації розподілу потоків у мережі ГІЕМ доцільно використовувати розподіл по маршрутам найменшої довжини l_i . Для цього необхідним є знаходження найкоротшого шляху між вузлом-джерелом j і вузлом-адресатом k і відправлення потоку в цьому напрямі. Існує ряд ефективних алгоритмів пошуку найкоротших шляхів w_{jh} , одним з яких є алгоритм Флойда [9]. Сутність цього методу оптимізації розподілу потоків пов'язана із зіставленням довжини з i -им каналом, величина якої [9]:

$$l_i \cdot \Delta \frac{dT_c}{d\lambda_i / \mu} = \frac{B_i}{f(B_i - \lambda_i / \mu)^2}, \quad (14)$$

коли потік в каналі дорівнює величині λ_i / μ . Знайдена в такий спосіб довжина є лінійною швидкістю зростання T_c при нескінченно малому збільшенні потоку в каналі. Такі довжини можна використати для пошуку потоків по найкоротших маршрутах.

Якісним показником для оцінки динаміки завантаженості мережі ГІЕМ може бути усереднені функції розподілу інформаційних $f_{inf}(t, \lambda)$ та енергетичних $f_{pow}(t, \lambda)$ потоків (рис. 4), які характеризують динаміку росту завантаженості мережі ГІЕМ в часі і визначаються інтегралом функції розподілу інформаційно-енергетичних потоків:

$$\begin{aligned} f_{inf}(t, \lambda) &= - \int_t^{\Delta t} \lambda_{0inf} p_{0inf}(t, \lambda) dt \\ f_{pow}(t, \lambda) &= - \int_t^{\Delta t} \lambda_{0pow} p_{0pow}(t, \lambda) dt \end{aligned} \quad (15)$$

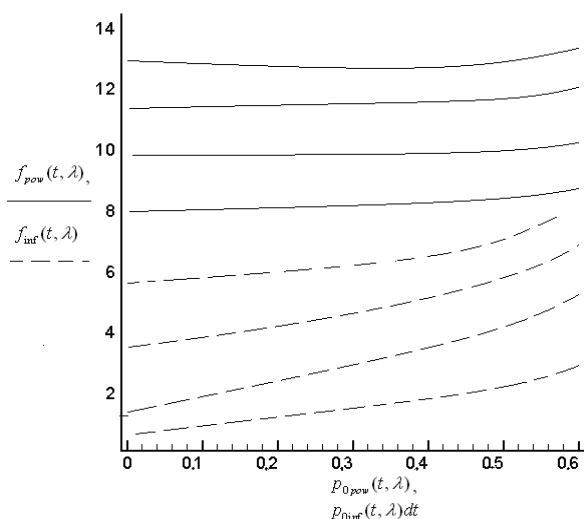


Рис. 4. Графік функцій розподілу інформаційних $f_{inf}(t, \lambda)$ та енергетичних $f_{pow}(t, \lambda)$ потоків

Аналізуючи характер зміни кривих для функцій розподілу інформаційних $f_{inf}(t, \lambda)$ та енергетичних $f_{pow}(t, \lambda)$ потоків (рис. 4), можна спостерігати, що динаміка росту функції

розподілу інформаційних потоків є більшою $f_{inf}(t, \lambda)$ (сімейство 4-ьох кривих, рис. 4, знизу), що підтверджують отримані результати на рис. 3 і ще раз свідчать про те, що інтенсивності росту інформаційної складової ГІЕМ мають більш спрямований і динамічний характер.

Паралельний ріст функції розподілу енергетичних $f_{pow}(t, \lambda)$ потоків ГІЕМ свідчить про збільшення енергетичного навантаження ГІЕМ з боку кінцевих пристроїв, що ініціюють інформаційні запити. Це є цілком справедливим, адже збільшення інформаційного навантаження й числа каналів неможливе без збільшення енергетичного.

Структури усіх відомих ГІЕМ мають ієрархічний характер, тобто всі інформаційно-енергетичні потоки мережі зводяться до центру керування, який є центральним вузлом мережі. Тому можна стверджувати, що найбільша завантаженість буде саме в сегменті центру керування, оскільки як інтенсивності потоків $\lambda_{0inf}, \lambda_{0pow}$, так і $p_{0inf}(t, \lambda)$, $p_{0pow}(t, \lambda)$ – функції розподілу ймовірностей у цьому сегменті, які для зручності простіше задавати за експоненціальним $p_{0inf}(t, \lambda) = 1 - e^{-\lambda t}$ [7] або законом розподілу Пуасона $p_{0inf}(t, \lambda) = \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!}$ [7]. Функції розподілу інформаційно-енергетичних потоків тут також матимуть найбільші значення:

$$f_{inf}(t, \lambda) \rightarrow f_{inf}(t, \lambda)_{\max} \quad f_{pow}(t, \lambda) \rightarrow f_{pow}(t, \lambda)_{\max} \quad (16)$$

На рис. 5 показано приріст функцій розподілу інформаційно-енергетичних потоків.

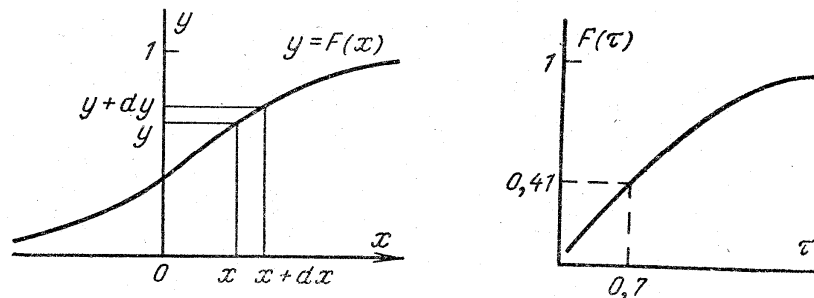


Рис. 5. Графік приросту функцій розподілу інформаційно-енергетичних потоків

Максимуми $f_{inf}(t, \lambda)_{\max}$, $f_{pow}(t, \lambda)_{\max}$ характеризуватимуть стан завантаження як критичний для мережі ГІЕМ. Зважаючи на це, необхідним є використання в цих сегментах швидкісних магістральних ліній на основі бінарного провідника, який забезпечить якнайбільші енергетичну й інформаційну пропускну здатності й високу швидкість інформаційної передачі, що значно зменшить час затримки, а відповідно зменшить і завантаженість мережі.

Висновки

Завдання визначення характеру розподілу потоків у геоінформаційно-енергетичних мережах потребує рішення не тільки з боку інформаційної складової, а й енергетичної. Запропонована математична модель дозволяє імовірнісними методами визначити такі показники ГІЕМ, як завантаженість, середній час перебування запитів у черзі, середнє число зайнятих інформаційно-енергетичних каналів, імовірності простою. У статті запропоновано математичну модель розподілу інформаційно-енергетичних потоків на основі теорії мереж масового обслуговування й отримані графічні залежності для основних динамічних характеристик ГІЕМ шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MathCAD. Перспективним є застосування цієї моделі при проектуванні та масштабуванні геоінформаційно-енергетичних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптико–електронна геоінформаційно-енергетична система тотального тестування і оптимального управління науково-освітніми і бібліотечними ресурсами для створення і розвитку централізованої бази знань / В. П. Кожем'яко, О. Г. Домбровський, І. Д. Івасюк, О. В. Шевченко, С. В. Дусанюк, С. С. Білан, А. В. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 1 (9). – С. 5-11. – ISSN 1681-7893.
2. Кожем'яко В. П. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична система управління інфраструктурою регіону / В. П. Кожем'яко, О. А. Бойко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 1 (13). – С. 176 – 180. – ISSN 1681-7893.
3. Кожем'яко В. П. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична система біомедичного призначення / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, О. В. Шевченко, В. В. Дмитрук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. № 2 (12). – С. 192 – 196.
4. Кожем'яко В. П. Методи моделювання геоінформаційно–енергетичної системи тотального тестування і оптимального управління науково-освітніми і бібліотечними ресурсами / В. П. Кожем'яко, С. В. Дусанюк, Л. О. Волонтир // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – №1 (13). – С. 169 – 175. – ISSN 1681-7893.
5. Шевченко О. В. Паралельно-ієрархічні методи передачі та обробки інформації у автоматизованій геоінформаційно-енергетичній системі: Дис. канд. техн. наук: 05.13.16 / Шевченко Ольга Вікторівна. – К., 2007. – 168с.
6. Кожем'яко В. П. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера ; [Монографія] / В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 160 с.
7. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики: Учебное пособие для вузов 2-е изд. / Ю.М. Коршунов. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
8. Кожем'яко В. П. Принципи побудови та структурна організація каналів для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж / В. П. Кожем'яко, В. І. Малиновський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, ВНТУ. – 2008. – № 1. – С. 95 – 101.
9. Васильев В. И. Системы связи: Учебное пособие для вузов / В. И. Васильев, А. П. Буркин, В. А. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1987. – 280 с

Кожем'яко Володимир Прокопович – д. т. н., професор, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, E-mail: kvp@vstu.vinnica.ua.

Малиновський Вадим Ігорович – аспірант, інженер кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, тел.: 8(0432) 58-63-25, моб.: 80977962176, E-mail: tirexlink@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.