DOI: 10.18372/2310-5461.41.13524

УДК 004.942(045)

О. А. Ладигіна, аспірант
Центральноукраїнський національний технічний університет
orcid.org/0000-0003-2886-2238
e-mail:ladyginaoa@ukr.net;

М. М. Гузій, канд. техн. наук, доцент
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-4807-8862
e-mail: nn05@ukr.net

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ВЕРИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАФІКУ

Вступ

Зростання складності комп'ютерних систем і мереж потребує вирішення проблеми розробки адекватних методів аналізу і синтезу таких систем з метою отримання достовірних оцінок їх характеристик, реалізації завдань їх оптимізації відповідно до обраного критерієм якості обслуговування [1]. Збільшення трафіку викликає збільшення інтенсивності виникнення колізій, внаслідок чого зменшується ефективна пропускна здатність каналу, тому необхідно застосувати нові підходи для оптимізації трафіку в комп'ютерній мережі [2].

Постановка проблеми та огляд останніх досліджень і публікацій

Постійно розробляються і впроваджуються нові алгоритми, технології, які певною мірою покращують якість передачі трафіку в комп'ютерних мережах. Наслідком цього є істотне ускладнення архітектури мереж [3].

Кількісна сторона процесів обслуговування потоків повідомлень в системах розподілу інформації є предметом теорії трафіку, на основі якої розробляються науково-обґрунтовані методи оцінки характеристик якості обслуговування з урахуванням характеру трафіку. Теорія трафіку оперує не з самими системами розподілу інформації, а з їх математичними моделями. Різноманіття видів і топології мереж, структур систем і способів виділення мережного ресурсу для обслуговування трафіку вимагає розробки моделей, які враховують реальний характер потоків повідомлень і деталі обслуговування нестаціонарного трафіку [1].

Побудувати єдину модель, яка б давала відповіді на всі питання щодо функціонування комп'ютерних мереж практично неможливо, також кожен з існуючих методів має свої переваги і недоліки. Тому спільно використовують різні методи, що сприяють підвищенню якості моделей: тестування, моделювання та верифікація.

В області верифікації відбуваються зміни — розроблений метод формальної верифікації (перевірка моделі) стає теоретичною основою ефективних алгоритмів, що дозволяють перевіряти правильність програмно-апаратних систем. Для верифікації цим методом система представляється найпростішою моделлю обчислень з системою переходів з кінцевим числом станів. Перевірка моделі зводиться до вичерпного аналізу всього простору станів моделі і не вимагає доказів теорем на основі формальних математичних аксіом і правил виведення, характерних для класичних підходів до верифікації [4].

Мета статті — визначення головних особливостей застосування типового алгоритму вирішення завдань верифікації, побудованого на алгоритмі і загальної методики верифікації, запропонованих у [5], за допомогою логіко-математичної моделі нестаціонарного трафіку, побудованій методом квантування і марковській апроксимації [2].

Виклад основного матеріалу

Основні особливості методу верифікації моделей нестаціонарного трафіку [5] та алгоритму вибору оптимальних квантованих значень показуються для двох поширених випадків вибору метрики просторів порівняння: дискретного (метрика простору Евкліда) і безперервного (метрика простору Гілберта) випадків.

На рис. 1 суцільна лінія являє собою нормоване безрозмірне математичне сподівання $m(t_k)$ еталонного трафіку, представленого в гільбертовому просторі як парабола, нормована на нормованому інтервалі нестаціонарності [0,1]:

$$m(t_k) = t_k \cdot (2 - t_k) \quad (1)$$

де t_k — k-й момент часу з безрозмірного нормованого інтервалу [0,1] часу нестаціонарності.

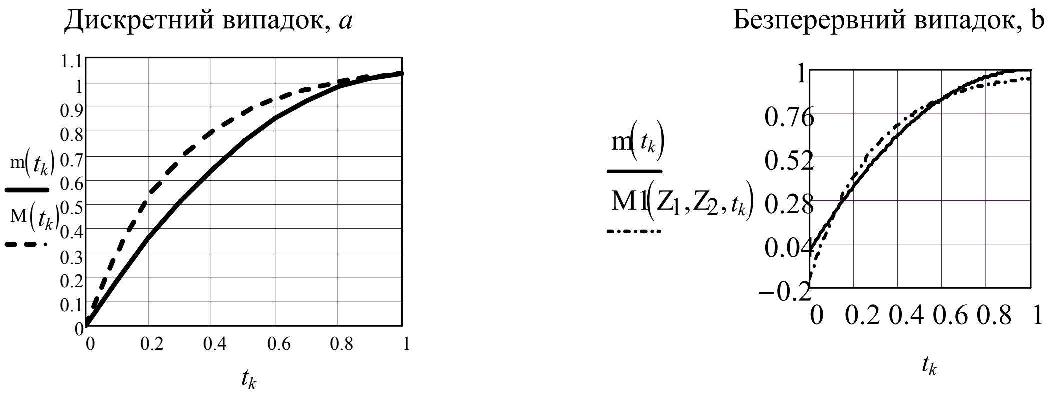

Рис. 1. Ілюстрація нормування значень трафіку та інтервалу часу нестаціонарності

Штрихпунктирна лінія показує нормоване безрозмірне математичне сподівання $M(t_k)$ модельного трафіку, представленого в тому самому нормованому гілбертовому просторі:

$$M(t_k) = Z_2 - (Z_2 - Z_1) P_{10} e^{-\eta 1 \cdot t_k}, \tag{2}$$

де Z_1, Z_2 — квантовані значення трафіку; P_{10} — початкове значення імовірності першого стану трафіку, η1 — інтенсивність зміни першого стану трафіку.

У цій роботі обрана мінімальна розмірність моделі: $n = 2$, при якій існує всього два стани трафіку, що визначаються двома квантами трафіку Δ1, Δ2 і трьома рівнями квантування трафіку: z0 = 0, z1 = 0,5, z2 = 1.

Ці значення використовуються у визначенні інтенсивності зміни трафіку і оптимальних квантованих значень трафіку Z_1, Z_2 для двох станів. Всі значення трафіку, які потрапляють в інтервали квантування

$$\Delta 1 = z1 - z0,\ \Delta 2 = z2 - z1$$

замінюють квантованим значенням Z_1 і відповідно Z_2.

При квантуванні континуальний простір зміни трафіку замінюється дискретним простором з кінцевим числом станів. Надалі квантовані значення трафіку розглядаються як реалізації дискретного трафіку, які мають місце з вірогідністю дискретних станів трафіку.

При $n = 2$ існує всього лише одна інтенсивність зміни трафіку – інтенсивність η1 переходу трафіку з першого стану в другий. За визначенням η1 є величина, зворотна середньому часу до перетину математичним очікуванням еталонного трафіку першого рівня квантування. Більш точно фізичний зміст η1 можна визначити так: інтенсивність η1 зміни трафіку на першому інтервалі є нормована за довжиною першого інтервалу Δ1 швидкість v1 зміни трафіку: η1 = v1 / Δ1 = 1/t1.

Тому для визначення η1 необхідно вирішити рівняння щодо нормованого часу t до перетину обвідної трафіку рівня квантування z1 вигляду:

$$t \cdot (2 - t) = z_1 \ \left| \begin{array}{l} \text{solve}, t \\ \text{float}, 4 \end{array} \right. \rightarrow \begin{pmatrix} .2929 \\ 1.707 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Розв'язання рівняння (3) показано у системі Mathcad для випадку, коли перший рівень квантування z1 = 0.5. Оскільки другий корінь параболи t2 = 1.707 не належить нормованому інтервалу часу, він з розгляду виключається і рішенням служить перший корінь t1 = 0.2929.

Отже, шукана інтенсивність для випадку z1 = 0.5, t1 = 0.2929 дорівнює η1 = 3.414.

Оскільки події, які полягають у попаданні значень трафіку в той чи інший інтервал квантування, утворюють певну групу подій, то для ймовірностей станів трафіку справедлива умова нормування:

$$P_1(t) + P_2(t) = 1. \tag{4}$$

Складання за логіко-математичною моделлю динаміки трафіку у вигляді графа диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена щодо імовірностей станів трафіку, що описують динаміку трафіку:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\eta_1 P_1(t), \tag{5}$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \eta_1 P_1(t).$$

Імовірності станів пов'язані умовою нормування (4), тому необхідно вирішувати систему (6) з двох різних рівнянь: диференціального рівняння (5) і алгебричного рівняння (4):

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\eta_1 P_1(t), \tag{6}$$

$$P_1(t) + P_2(t) = 1.$$

У початковий момент часу t_0 значення трафіку може бути в будь-якому інтервалі, тому справедливі початкові умови загального вигляду $P_1(t_0) = P_{10}$, $P_2(t_0) = P_{20}$.

Застосування до системи (6) прямого перетворення Лапласа дає:

$$sP_1(s) - P_{10} = -\eta_1 P_1(s),$$

$$P_1(s) + P_2(s) = \frac{1}{s}. \qquad (7)$$

Вирішення системи з двох алгебричних рівнянь (7) відносно невідомих $P_1(s)$, $P_2(s)$ імовірностей станів $S1$, $S2$ виконується методом підстановки в друге рівняння ймовірності першого стану, в результаті:

$$P_1(s) = \frac{P_{10}}{(s + \eta_1)},$$

$$P_2(s) = \frac{1}{s} - \frac{P_{10}}{(s + \eta_1)}. \qquad (8)$$

Формули (8) у цьому простому випадку вже являють собою суми простих раціональних дробів, тому проміжних перетворень не потрібно.

Застосування зворотного перетворення Лапласа до формул (8) дає:

$$P_1(t) = P_{10} e^{-\eta_1 t},$$

$$P_2(t) = 1 - P_{10}\, e^{-\eta_1 t}. \qquad (9)$$

Імовірності станів і квантованих значень трафіку використовуються для модельного визначення математичного очікування і дисперсії обвідної нестаціонарного трафіку з урахуванням того, що ймовірності станів через нестаціонарність трафіку залежать від часу. У результаті виходить:

$$M(t) = \sum_{i=1}^{2} Z_i P_i(t) = Z_2 + (Z_1 - Z_2)\, P_{10}\, e^{-\eta_1 t}, \qquad (10)$$

$$D(t) = \sum_{i=1}^{2} Z_i^2 P_i(t) - M^2(t). \qquad (11)$$

Формула (10) показує, що квантування і марковська апроксимація призводять до моделей математичного сподівання нестаціонарного трафіку у вигляді лінійної комбінації експонент. З формули (10) випливає, що для забезпечення адекватності модельного трафіку еталонному трафіку квантовані значення повинні розглядатися як керовані змінні. При цьому початкові ймовірності станів і інтенсивності зміни трафіку виступають в якості некерованих змінних — констант рішення оптимальних задач, які повинні бути визначені вихідними даними.

Далі викладена оптимізація квантованих значень трафіку з метою досягнення найкращого наближення модельних і еталонних моментів трафіку. Квадрат відстані між першими початковими моментами еталонного та модельного нестаціонарного трафіку представлений у вигляді:

для дискретного випадку (12)

$$\varepsilon(Z_1, Z_2)^2 = \sum_{tk=0}^{1}\Big[t_k(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)P_{10}e^{-\eta t_k}\big]\Big]^2;$$

для безперервного випадку: (13)

$$\varepsilon(Z_1, Z_2)^2 = \int_0^1\Big[t_k(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)P_{10}e^{-\eta t_k}\big]\Big]^2 dt_k.$$

Із формул (12), (13) випливає, що вибором квантованих значень Z_1 і Z_2 можна забезпечити найкраще наближення моментів еталонного трафіку. А також їх можна розглядати як критерії оптимізації квантованих значень в нелінійних задачах оптимізації без обмежень.

Нелінійна задача оптимізації вирішується в такій постановці: відомий вираз критерію оптимізації квантованих значень Z_1, Z_2 у вигляді функціоналу (12) або (13), класичним методом пошуку мінімуму (12) або (13) потрібно знайти Z_{1opt}, Z_{2opt}, які доставляють мінімум функціоналу (12) або (13):

$$\min_{Z_1, Z_2} \varepsilon^2(Z_1, Z_2) = \varepsilon^2_{\min}(Z_{1opt}, Z_{2opt}) \qquad (14)$$

Диференціюючи функціонали (12), (13) за параметрами Z_1, Z_2, отримують систему з двох рівнянь оптимізації значень Z_1, Z_2:

для дискретного випадку: (15)

$$\sum_{t_k=0}^{1}\Big[\big[t_k\cdot(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)\cdot\big(P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)\big]\big]\cdot\big(P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)\Big] = 0$$

$$\sum_{t_k=0}^{1}\Big[\big[t_k\cdot(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)\cdot\big(P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)\big]\big]\cdot\big(1 - P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)\Big] = 0$$

для безперервного випадку: (16)

$$\int_0^1\big[t_k\cdot(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)\cdot P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big]\big]\cdot\big(P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)dt_k = 0$$

$$\int_0^1\big[t_k\cdot(2-t_k) - \big[Z_2 - (Z_2 - Z_1)\cdot P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big]\big]\cdot\big(1 - P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\big)dt_k = 0$$

Ці рівняння доводяться до канонічної форми системи з двох лінійних алгебричних рівнянь:

$$a_{11}Z_1 + a_{12}Z_2 = b_1, \qquad (17)$$

$$a_{21}Z_1 + a_{22}Z_2 = b_2.$$

де елементи матриці A і вектора B визначаються такими формулами:

$$A := \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \qquad B := \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \qquad (18)$$

Для дискретного випадку:

$$a_{11} = \sum_{t_k=0}^{1}(P_{10}e^{-\eta\cdot t_k})^2;$$

$$a_{12} = \sum_{t_k=0}^{1}(1 - P_{10}e^{-\eta t_k})P_{10}e^{-\eta\cdot t_k};$$

$$a_{21}=\sum_{t_k=0}^{1}P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k});$$

$$a_{22}=\sum_{t_k=0}^{1}(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k})^2; \qquad (19)$$

$$b_1=\sum_{t_k=0}^{1}[t_k(2-t_k)]P_{10}e^{-\eta\cdot t_k};$$

$$b_2=\sum_{t_k=0}^{1}[t_k(2-t_k)](1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}).$$

Для безперервного випадку:

$$a_{11}=\int_0^1\left(P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\right)^2dt_k;$$

$$a_{12}=\int_0^1\left[\left(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)\left(P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)\right]dt_k;$$

$$a_{21}=\int_0^1\left(P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)\left(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)dt_k;$$

$$a_{22}=\int_0^1\left[\left(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)^2\right]dt_k; \qquad (20)$$

$$b_1=\int_0^1\left[t_k\cdot(2-t_k)\right]\left(P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)dt_k;$$

$$b_2=\int_0^1\left[t_k(2-t_k)\right]\left(1-P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right)dt_k.$$

При використанні правила Крамера, отримують оптимальні квантовані значення керованих змінних

$$Z_{10}=\frac{|A1|}{|A|} \qquad Z_{20}=\frac{|A2|}{|A|} \qquad (21)$$

де | A |, | A1 |, | A2 | — визначники системи рівнянь (17).

Підставляючи оптимальні квантовані значення (21) у функціонал (12) або (13), визначається мінімальне значення (14).

Приклад 1. Особливості визначення оптимальних квантованих значень і мінімального середньоквадратичного відхилення моментів першого порядку нестаціонарного трафіку при вхідних даних: P_{10} = 0.95, P_{20} = 0.05, η1 = 3.414.

За формулами (19), (20) обчислюють параметри системи алгебричних рівнянь для дискретного випадку:

a11 = 0.903 a12 = 0.078 b1 = 0.031

a21 = 0.078 a22 = 0.941 b1 = 0.969

для безперервного випадку:

a11 = 0.132 a12 = 0.137 b1 = 0.108

a21 = 0.137 a22 = 0.594 b1 = 0.559

Підставляючи ці значення у формули для визначників системи рівнянь (17), знаходять значення для дискретного випадку:

|A| = 0.844 |A1| = -0.046 |A2| = 0.873

для безперервного випадку:

|A| = 0.06 |A1| = -0.013 |A2| = 0.059

Ці значення визначників використовуються у формулах (21) і визначають оптимальні квантовані значення для дискретного випадку:

Z_{10} = –0.054 Z_{20} = 1.034

для безперервного випадку:

Z_{10} = –0.213 Z_{20} = 0.9905

За допомогою формули (14) з оптимальними квантованими значеннями Z_{10}, Z_{20} знаходять мінімальні значення цільового функціоналу та середньоквадратичної похибки моделювання математичного сподівання еталонного трафіку для дискретного випадку:

$$\varepsilon^2_{\min}(Z_1,Z_2)=1.624\cdot10^{-7},$$

$$\sigma_{\min}=\sqrt{1.624\cdot10^{7}}=0.04\ \%. \qquad (22)$$

для безперервного випадку:

$$\varepsilon^2_{\min}(Z_1,Z_2)=2{,}587\cdot10^{-3}, \qquad (23)$$

$$\sigma_{\min}=\sqrt{2{,}587\cdot10^{3}}=5{,}086\ \%.$$

Мінімальне значення середнього коефіцієнта варіації похибки на інтервалі нестаціонарності для дискретного випадку:

$$V_{\min}=\frac{\sigma_{\min}}{m_0}=\frac{0.04\ \%}{0.667}=0.06\ \%,$$

для безперервного випадку:

$$V_{\min}=\frac{\sigma_{\min}}{m_0}=\frac{5{,}086}{0{,}667}=7{,}625\ \%,$$

де середнє значення трафіку на інтервалі нестаціонарності визначено за формулою:

$$m_0=\int_0^1[t_k\cdot(2-t_k)]dt_k. \qquad (24)$$

Як зазначено раніше, інтенсивності зміни трафіку і початкові ймовірності в задачах оптимізації виступають в ролі некерованих параметрів. Незважаючи на це, є корисним перевіряти їх вплив на оптимальне рішення, оцінити чи є можливість оптимізації їх значень для подальшого поліпшення рішення.

Для розгляду особливостей і принципів такої перевірки цільові функціонали представляють у вигляді функцій інтенсивності η1.

Для дискретного випадку (23)

$$F5(Z_1,\eta1)=\sum_{t_k=0}^{1}\left[t_k(2-t_k)-\left[Z_{20}-(Z_{20}-Z_1)\cdot P_{10}\cdot e^{-\eta\cdot t_k}\right]\right]^2.$$

Для безперервного випадку (24)

$$F5(Z_{10},Z_{20},\eta1)=\int_0^1\left[t_k\cdot(2-t_k)-\left[Z_{20}-(Z_{20}-Z_{10})P_{10}e^{-\eta\cdot t_k}\right]\right]^2dt_k$$

знаходять графічним методом (рис. 2) мінімуми функціоналів по η1 при оптимальних квантованих значеннях трафіку.

Для дискретного випадку η1opt = 3.045 і для безперервного випадку η1opt = 2.81. За цих оптимальних значеннях інтенсивностей мінімальні значення функціоналів відповідно рівні для дискретного випадку:

F5 (Z1, Z2, η1opt) min = 1.447 10–6> 1.624 10–7,

для безперервного випадку:

F5 (Z1, Z2, η1opt) min = 2.993 10–3> 2.587 10–3.

Дискретний випадок, *a* Безперервний випадок, *b*

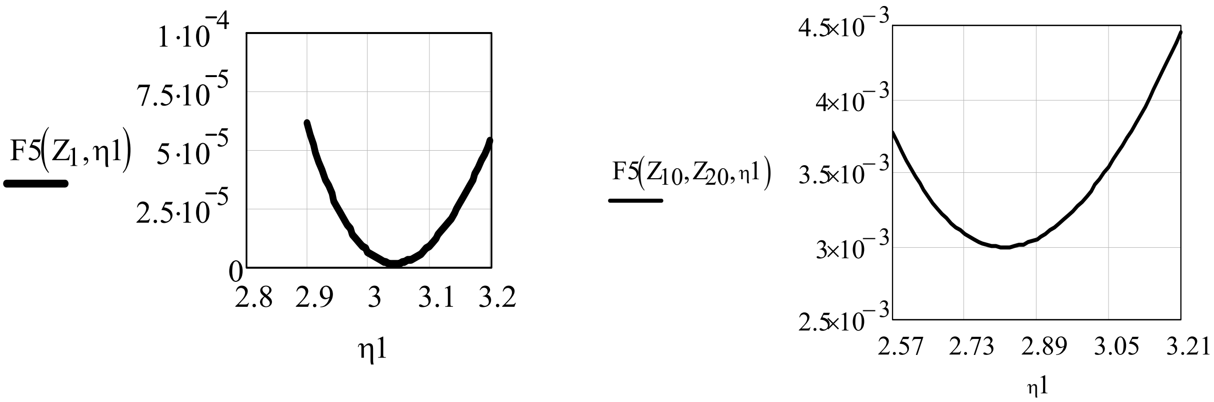

Рис. 2. Пошук оптимальних значень η1

Отже, підбором η1 оптимальне рішення поліпшити не можна. Розбіжність оптимальних рішень зумовлена, нелінійної залежністю цільового функціоналу від η1.

Для розгляду впливу параметра P_{11} на оптимальне рішення цільові функціонали представляють у вигляді функції параметра P_{11}:

для дискретного випадку (25)

$$F6(P_{11}) = \sum_{t_k=0}^{1}\left[t_k \cdot (2 - t_k) - \left[Z_{20} - (Z_{20} - Z_1) \cdot P_{11} \cdot e^{-\eta \cdot t_k}\right]\right]^2;$$

для безперервного випадку (26)

$$F6(P_{11}) = \int_0^1 \left[t_k \cdot (2 - t_k) - \left[Z_{20} - (Z_{20} - Z_{10}) \cdot P_{11} \cdot e^{-\eta \cdot t_k}\right]\right]^2 dt_k \cdot$$

Аналогічно виконуються дослідження впливу зміни параметра P_{11} на оптимальне рішення.

У просторі Евкліда наближення виконується за кінцевим числом точок інтервалу нестаціонарності трафіку, тому накопичена відносна похибка (22) має значно менше значення порівняно з відносною похибкою (23). Водночас рис. 3 наочно ілюструє те, що апроксимація трафіку в просторі Евкліда реально виконується гірше.

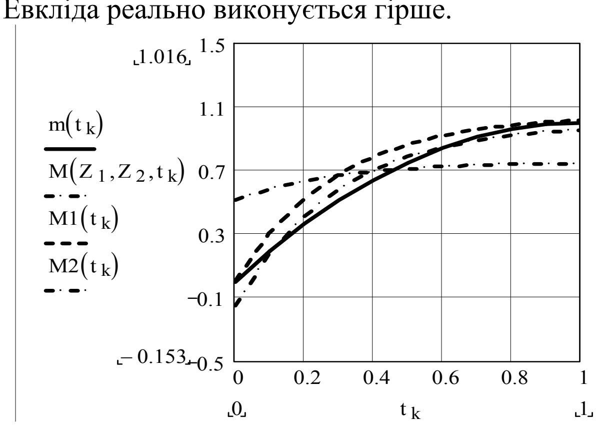

Рис. 3. Порівняння моделей трафіку

Висновки

Порівняння початкових моментів модельних та еталонного трафіків показує, що навіть для найгіршого випадку, при *n* = 2, досягається цілком задовільна адекватність моделювання початкового моменту нестаціонарного трафіку.

Застосування запропонованої системи критеріїв адекватності дозволяє всебічну перевірку адекватності моделей, дає можливість виконати також оцінку впливу некерованих змінних на оптимальні рішення.

Особливо слід звернути увагу на нелінійні ефекти, пов’язані із застосуванням розкладання в ряд по показовим функціям і використанням інтенсивностей зміни трафіку як показників експонент.

Верифікація методом перевірки моделі може істотно підвищити надійність систем для критичних застосувань — багато помилок виявляються на ранніх етапах технологічного циклу, що підвищує якість розробок.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бельков Д. В** Система формирования трафика компьютерной сети на основе самоорганизованной критичности. *Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе (САИТ-2015)*. 2015. №1(8)-2(9). С.99-105.

2. **Ігнатов В. О., Гузій М. М., Ладигіна О. А.** Оптимізація моделей нестаціонарного поліноміального трафіку комп'ютерної мережі. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. №3(47). С.36-40.

3. **Ладигіна О. А.** Дослідження методів та моделей управління трафіком в комп'ютерних мере-

жах. *Проблеми інформатизації та управління*. 2011. №4(36). С.60-66.

4. **Карпов Ю.Г.** Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. БХВ Петербург, 2010. 560 с.

5. **Ладигіна О. А**. Верифікація моделей нестаціонарного поліноміального трафіку. *Наукоємні технології*. 2018. № 4. Т.40. С. 410-414.

Ладигіна О. А., Гузій М. М.

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ВЕРИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАФІКУ

Мета роботи полягає в визначенні основних особливостей застосування типового алгоритму вирішення завдань верифікації, побудованого на алгоритмі і загальної методики верифікації за допомогою логіко-математичної моделі нестаціонарного трафіку, побудованій методом квантування і марковській апроксимації. Багатомірний закон розподілу всіх значень агрегованого трафіку на інтервалі нестаціонарності передбачається гаусівським. Для оцінювання точності апроксимації трафіку вводиться поняття еталонного трафіку і використовується порівняння перших двох моментних характеристик обвідної модельного і еталонного трафіків. Це дозволяє порівнювати багатомірні гаусові розподіли еталонного та модельного нестаціонарного трафіку. У ролі еталонних моделей обвідної агрегованого трафіку вибрано канонічне розкладання обвідної за ступенями поліному. Для проведення верифікації отриманих моделей запропоновано у якості критеріїв адекватності моделі еталонного трафіку використовувати цільові функціонали, які визначають точність і достовірність моделювання трафіку. Проведені дослідження показали що квантування і марковська апроксимація призводять до моделей математичного сподівання нестаціонарного трафіку у вигляді лінійної комбінації експонент. Для забезпечення адекватності модельного трафіку еталонному трафіку квантовані значення повинні розглядатися як керовані змінні. При цьому початкові ймовірності станів і інтенсивності зміни трафіку виступають в ролі некерованих змінних - констант рішення оптимальних задач, які повинні бути визначені вихідними даними. Слід звернути увагу на нелінійні ефекти, пов’язані із застосуванням розкладання в ряд по показовим функціям і використанням інтенсивностей зміни трафіку як показників експонент. Застосування запропонованої системи критеріїв адекватності дозволяє всебічну перевірку адекватності моделей, дає можливість виконати також оцінку впливу некерованих змінних на оптимальні рішення. Верифікація методом перевірки моделі може істотно підвищити надійність систем для критичних застосувань — багато помилок виявляються на ранніх етапах технологічного циклу, що підвищує якість розробок.

Ключові слова: нестаціонарний трафік; верифікація моделей трафіку; гетерогенні комп’ютерні мережі; простір Евкліда; простір Гілберта.

Ladygina O., Guzii N.

OPTIMIZATION OF METHODS OF VERIFICATION FOR UNSTEADY TRAFFIC MODELS

The purpose of the work is to identify the main features of the application of a typical algorithm for solving verification problems, built on an algorithm and a general verification method using a logical-mathematical model of unsteady traffic, constructed using the quantization method and Markov approximation. The multidimensional law of distribution of all values of the aggregated traffic in the nonstationarity interval is assumed Gaussian. To assess the accuracy of the approximation of traffic, the concept of reference traffic is introduced and a comparison of the first two moment characteristics of the bypass model and reference traffic is used. This allows you to compare multi-dimensional Gaussian distributions of reference and model unsteady traffic. The canonical decomposition of a bypass according to the degree of a polynomial was chosen as a reference model of the bypass aggregated traffic. To verify the obtained models, it is proposed to use target functionals, which determine the accuracy and reliability of traffic modeling, as criteria for the adequacy of the reference traffic model. Studies have shown that quantization and Markov approximation lead to the expectation model of unsteady traffic as a linear combination of exponentials. In order to ensure the adequacy of model traffic of reference traffic, quantized values should be considered as controlled variables. At the same time, the initial probabilities of the states and intensity of traffic change act as uncontrollable variables - constants solving optimal tasks that must be determined by the initial data. Attention should be paid to non-linear effects associated with the use of expansion in a row in exponential functions and the use of traffic change intensities as exponent indicators. The application of the proposed system of adequacy criteria allows for a comprehensive check of the adequacy of the models, it also makes it possible to carry out an assessment of the influence of uncontrollable variables on optimal solutions. Verification by the model verification method can significantly improve the reliability of systems for critical applications — many errors turn out to be in the early stages of the production cycle, which improves the quality of development.

Keywords: non-stationary traffic; verification of traffic patterns; heterogeneous computer network; Euclidean space; Hilbert space.

Ладыгина О. А., Гузий Н. Н.
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТРАФИКА

В данной работе изложены основные особенности применения типового алгоритма решения задач верификации, построенного на алгоритме и общей методики верификации с помощью логико-математической модели нестационарного трафика, построенной методом квантования и марковской аппроксимации. Многомерный закон распределения всех значений агрегированного трафика на интервале нестационарности предполагается гауссовским. Для оценки точности аппроксимации трафика вводится понятие эталонного трафика и используется сравнение первых двух моментных характеристик обводной модельного и эталонного трафиков. Это позволяет сравнивать многомерные гауссовые распределения эталонного и модельного нестационарного трафика. В качестве эталонных моделей обводной агрегированного трафика выбрано каноническое разложение обводной по степени полинома. Для проведения верификации полученных моделей предложено в качестве критериев адекватности модели эталонного трафика использовать целевые функционалы, которые определяют точность и достоверность моделирования трафика. Проведенные исследования показали, что квантование и марковская аппроксимация приводят к моделям математического ожидания нестационарного трафика в виде линейной комбинации экспонент. Для обеспечения адекватности модельного трафика эталонном трафика квантованные значения должны рассматриваться как управляемые переменные. При этом начальные вероятности состояний и интенсивности изменения трафика выступают в роли неуправляемых переменных - констант решение оптимальных задач, которые должны быть определены исходными данными. Следует обратить внимание на нелинейные эффекты, связанные с применением разложения в ряд по показательным функциям и использованием интенсивностей изменения трафика как показателей экспонент. Применение предложенной системы критериев адекватности позволяет всестороннюю проверку адекватности моделей, дает возможность выполнить также оценку влияния неуправляемых переменных на оптимальные решения. Верификация методом проверки модели может существенно повысить надежность систем для критических приложений — много ошибок оказываются на ранних этапах технологического цикла, повышает качество разработок.

Ключевые слова: нестационарный трафик; верификация моделей трафика; гетерогенные компьютерные сети; пространство Евклида; пространство Гильберта.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2019 р.
Прийнято до друку 11.03.2019 р.