

ПРИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ЧАСТОТ У СОТОВИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Питання призначення оптимальної кількості частот базовим станціям (БС) на етапі проектування сотових мереж зв'язку (СМЗ) часто вирішується аналітичним шляхом для припускаемого профілю телефонного навантаження від абонентів мережі. Нормованим вхідним параметром у розрахунках при цьому є ймовірність втрати викликів у годину найбільшого навантаження. Задача призначення частот вирішується, як правило, разом із вирішенням задачі розміщення БС на обслуговуємі території, або самостійно, але після етапу територіального розміщення БС. Більшість методик розрахунку частотного плану СМЗ враховують формулу Ерланга для систем без повторних викликів. За реальних же умов функціонування СМЗ: наявності повторних викликів, випадкової тривалості розмови, наявності загальних каналів виклику та доступу, впливу завмирань і накладень сигналів у радіоканалах зв'язку тощо, число розмовних каналів, яке забезпечує обслуговування абонентів мережі із заданою якістю, може відрізнитися від розрахованого на етапі проектування. Для детального розгляду даного питання були розроблені стохастичні моделі СМЗ та абонентського доступу (АД) до її ресурсу і поставлений експеримент з імітаційного моделювання АД, у ході якого визначалась необхідна для забезпечення якісного зв'язку кількість розмовних каналів (РК) на БС.

Конфігурація обслуговуючої системи

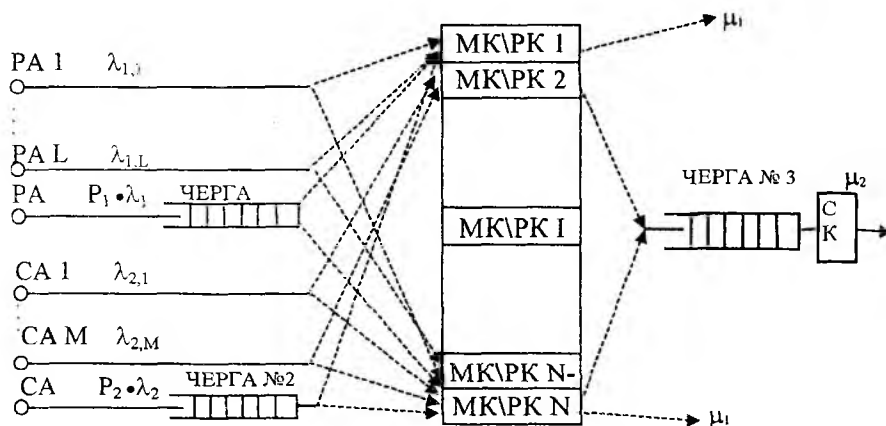
Елементами стохастичної моделі абонентська станція (АС) — БС — центральна станція (ЦС), яку можна побудувати на основі аналізу системних рішень, що застосовуються у більшості діючих сотових систем зв'язку, є (рис. 1):

- група маркерних — розмовних каналів (МК/РК): $1 \dots N$;
- службовий канал (СК);
- черга № 1: формується на вході у маркерний канал (МК);
- черга № 2: формується на вході до групи РК;
- черга № 3: формується на вході у СК.

Модель потоку заявок

Складаючи модель потоку заявок, домовимося у подальшому, що первинні потоки заявок (потоки неблокованих заявок)

підпорядковуються пуассонівському закону розподілу із параметрами-середніми інтенсивностями — відповідно: λ_1 для РА та $\lambda_2 = 0,25\lambda_1$ для СА. Таке співвідношення потоків враховує той факт, що абоненти фіксованої телефонної мережі викликають РА частіше, аніж навпаки, і виклики від РА до РА складають реально близько 1 %, так що взагалі можуть бути включені у потік заявок від РА до СА.



РА I — рухомий абонент; СА I — стаціонарний абонент;

РА — уявний рухомий абонент; СА — уявний стаціонарний абонент.

Рис. 1

Формування моментів надходження первинних заявок від РА t_{1j} та СА t_{2j} може здійснюватися однаковим чином. Реалізацію потоку однорідних подій: $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1j}$ визначимо у вигляді:

$$\begin{cases} t_{11} = \zeta_{11}, \\ \vdots \\ t_{1j} = \zeta_{11} + \dots + \zeta_{1j}; \end{cases} \quad (1)$$

де $\zeta_{11}, \zeta_{12}, \dots, \zeta_{1j}$ — j -мірний випадковий вектор.

Функція густини розподілу інтервалу ζ_{1j} між викликами для $j > 0$ за умови, що потік є простішим, має вигляд:

$$f(z) = \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 z), \quad (2)$$

$$\text{та } f_1(z_{11}) = \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot z_{11}), \quad (3)$$

для першого інтервалу ζ_{11} ;

$$z_{1j} = -\lambda_1^{-1} \cdot \ln(R_j), \quad (4)$$

R_j — випадкове число із рівномірним законом розподілу на $(0,1)$ [3].

Крім основних потоків заявок від РА та СА, у СМЗ можна виділити ще три потоки:

потік від групи РА, яким було відмовлено у наданні РК;

потік від групи СА, яким було відмовлено у наданні РК;

потік від групи СА, яким були виділені розмовні канали на ЦС.

Останній потік існує на вході у СК. По відношенню до цих потоків повторних викликів приймемо наступне.

Відмова виклику від РА може настати у силу: зайнятості МК, накладення пакету доступу на глибокі завмирання у МК, відсутності вільного РК на ЦС, зіткнення пакетів доступу від двох, або більше, абонентів у МК. Відмова СА може виникнути тільки за причини відсутності вільних РК на ЦС у момент надходження заявки.

Врахування останніх трьох потоків призводить до того, що сумарний потік викликів на вході системи є заздалегідь непуассонівським.

Щоб уникнути можливих порушень стабільної роботи системи, пов'язаних із утворенням значних концентрацій заявок на обслуговування, введемо випадкову часову затримку V повторної генерації заявки на обслуговування. Регулярна затримка повторної генерації заявки могла б викликати повторне зростання інтенсивності потоку на вході обслуговуючої системи. Для рівномірного розподілу V на інтервалі: $t_{1j} + \tau'_n, \dots, t_{1j} + T_{\max} - 2\tau'_n$ середнє значення $\bar{V}$ визначається згідно з формулою

$$\bar{V} = \frac{T_{\max} - \tau'_n}{2}, \quad (5)$$

де τ'_n — змінна довжина пакету доступу; $T_{\max}$ — максимальний час чекання абонентом встановлення з'єднання, а момент повторної генерації заявки

$$t'_{1j} = t_{1j} - \bar{V} \cdot \ln(R_j) + \tau'_n. \quad (6)$$

Момент повторної генерації t'_{2j} встановлюється незалежно від t'_{1j} за законом (6) із заміною τ'_n на $\tau_{\text{СК}}$ і t'_{1j} на t'_{2j} .

Аналіз роботи СК діючих сотових систем зв'язку показує, що моменти надходження заявок у СК можна описати законом

$$t_{3j} = \hat{t}_{2j} + s \cdot \tau_{\text{СК}}, \quad (7)$$

де s — випадкове число із середнім значенням

$$s = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{max}}}{\tau_{\text{СК}}} \right), \quad (8)$$

$\tau_{\text{СК}}$ — довжина пакету виклику і мінімальний час перебування абонента у черзі № 3; $\hat{t}_{2j}$ — момент часу, у який фіксується зайняття вільного РК на БС для потоків первинного та повторного викликів.

У більшості випадків [1] можна покласти, що черга № 3 відноситься до типу "першим прийшов — першим вийшов". Тоді моменти (7) будуть визначатися тільки для першого із черги абонента.

Середня продовжуваність розмови та тривалість перебування заявки у системі

Достатнє для практичних випадків наближення дає використання для опису розподілу тривалості розмови абонентів t_p показникового закону:

$$\begin{cases} P(t_p \leq T_{\text{max}}) = 1 - \exp(-\mu \cdot t_p), \\ P(t_p > T_{\text{max}}) = 0; \end{cases} \quad (9)$$

де μ — інтенсивність обслуговування абонента (на рис. 1 показані реальні інтенсивності μ_1 і μ_2).

Більшість сотових систем зв'язку належить до систем масового обслуговування із обмеженим часом чекання. При цьому, як свідчать дані статистики, максимальний час чекання встановлення з'єднання будь-яким абонентом із числа активних T_{max} становить близько 120 секунд.

Моделювання функціонування АД в умовах завмирань

Розгляд процесу обміну сигналами взаємодії між БС та РА в умовах діючих у каналах МК та СК завмирань сигналів проведемо за наступних обмежень: якщо за час передачі пакету доступу чи виклику мало місце завмирання будь-якої тривалості заглубішки більше даної величини, то відбувається втрата пакету взаємодії. Статистика завмирань встановленої глибини визначається, як відомо, величиною

енергетичного запасу q^2 і моделлю флуктуації амплітуди сигналу у каналі передачі¹. Величина q^2 є керованим параметром. Після вибору у якості моделі флуктуації обвідної сигналу релєєвської моделі [4], важливо встановити часову динаміку процесу завмирань. Відомо [5], що інтервали між завмираннями для релєєвської моделі мають закон розподілу вигляду

$$f(\tau_{\text{инт.з}}) = \frac{1}{\bar{\tau}_{\text{инт.з}}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{\text{инт.з}}}{\bar{\tau}_{\text{инт.з}}}\right), \quad (10)$$

коли сама величина $\tau_{\text{инт.з}}$ визначається як:

$$\tau_{\text{инт.з}i} = -\bar{\tau}_{\text{инт.з}} \cdot \ln R_i, \quad (11)$$

$$\text{де } \bar{\tau}_{\text{инт.з}} = \frac{c \cdot \sqrt{q^2}}{\sqrt{2\pi} \cdot v_{\text{ра}} \cdot f_m}; \quad (12)$$

f_m — максимальне значення доплеровського зсуву частоти f_0 несучого коливання [5]; $v_{\text{ра}}$ — швидкість руху РА.

Вводячи поняття квазіперіоду завмирань T_z

$$T_z = \tau_{\text{инт.з}} + \tau_z, \quad (13)$$

де τ_z — продовжуваність завмирань із середнім значенням $\bar{\tau}_z$

$$\bar{\tau}_z = \frac{c \cdot \left(\exp\left(\frac{1}{q^2}\right) - 1 \right) \cdot \sqrt{q^2}}{\sqrt{2\pi} \cdot f_0 \cdot v_{\text{ра}}}, \quad (14)$$

використаємо для генерування τ_z закон (11) із відповідною заміною $\bar{\tau}_{\text{инт.з}}$ на $\bar{\tau}_z$.

Таким чином, описана процедура формування інтервалів завмирань не відрізняється від процедур формування моментів надходження заявок в обслуговуючу систему, розглянутих вище.

¹ Замість величини q^2 часто зручно використовувати зворотню величину $\rho^2 : \rho^2 = q^{-2}$, яка набуває від'ємних значень, коли вимірюється в дБ.

Організація й управління машинним експериментом

Задача моделювання АД вирішувалась у складі розробленого спеціалізованого програмного комплексу, який спочатку був задуманий як програмна система з відкритою архітектурою. За своїми загальними функціональними можливостями даний комплекс належить до інтегрованих систем, які організуються навколо бази даних. До складу комплексу входять наступні модулі:

модуль підтримки мультипроцесорних систем, який забезпечує повноцінну підтримку серверів масштабу підприємств;

модуль підтримки розподіленої обробки даних, який дозволяє використовувати ресурси ЕОМ обчислювальної мережі для розрахунку моделей;

модуль підтримки транзакцій із точками збереження, який дозволяє продовжувати розрахунок моделі від моменту можливого збою обладнання без втрати розрахунків;

модуль управління задачами, який дозволяє динамічно підключати задачі DLL, установлені у системі, і забезпечує інтерфейс користувачу для взаємодії із ними;

інтерфейс доступу до бази даних, який дозволяє працювати із базою даних за технологією "клієнт-сервер".

Комплекс передбачає наявність комп'ютера типу IBM PC AT із конфігурацією не нижчою від: процесор INTEL Pentium-90 МГц, оперативна пам'ять об'ємом 32 Мб і більше, накопичувач на жорсткому магнітному диску та кольоровий графічний дисплей. Із стандартного програмного забезпечення комплекс використовує 32-розрядну операційну систему Windows 95.

Результати експерименту

До показників ефективності моделей АД і СМЗ, які викликають інтерес, можна віднести:

ймовірність відмови викликам абонентів P_1 для напрямку РА—БС;

ймовірність відмови викликам абонентів P_2 для напрямку БС—РА;

процентний зміст P_1 у крузі «Завмирання — блокування РК—зіткнення пакетів»;

процентний зміст P_2 у крузі «Завмирання—блокування РК»;

середня довжина черги у напрямку БС — РА: $L_{БС-РА}$;

середня довжина черги у напрямку РА — БС: $L_{РА-БС}$;

середнє значення часу чекання для РА: τ_1 ;

середня затримка у наданні СК: τ_2 ;

середня тривалість перебування у черзі СА: τ_3 ;

коефіцієнт завантаження РК: K .

У процесі моделювання визначались залежності перелічених вище показників ефективності від числа розмовних каналів на БС N для відомого ряду інтенсивностей потоків викликів від рухомих та стаціонарних абонентів:

$$\lambda_1 = 400; 500; 600; 700; 800 \frac{\text{викл}}{\text{год}}, \lambda_2 = 100; 125; 150; 175; 200 \frac{\text{викл}}{\text{год}}. \text{ При цьому}$$

розглядались цікаві для практики випадки, коли на БС діють один і два маркерних канали. Позначення КППП на графіках означає установлену кількість послідовних повторних передач пакету доступу у МК. Коли КППП дорівнює 0 (рис. 4, 9), довжина пакету доступу становить 75 мс. Максимальна тривалість займання МК рухомим абонентом в умовах діючих завмирань може становити 225 мс: КППП при цьому дорівнює трьом, що відповідає трьом послідовним повторам передачі пакету.

Ймовірності P_1 та P_2 (рис. 2-5) представляють тут ймовірності первинних відмов викликам, коли заявки на обслуговування вперше надходять в обслуговуючу систему.

Залежність P_2 від числа РК вказує на те, що переважаючу роль у блокуванні каналів на ЦС виконує потік від РА. Урахування потоку від СА потребує виділення на ЦС додаткового числа РК для задовільнення загальних вимог до якості обслуговування.

Таким чином, наведені графіки дозволяють формулювати вимоги до необхідного числа РК на БС СМЗ, виходячи із значень тих показників якості, яким віддається перевага. Результати відносяться до частотного діапазону 450 МГц, в якому у теперішній час працює скандинавська система NMT-450.

Для більшості діючих СМЗ за припустиму прийнята величина ймовірності відмови викликам абонентів для будь-якого напрямку зв'язку рівна 10 % [2]. Не розкриваючи повного змісту цієї величини у позначеннях можливих її складових, проведемо аналіз необхідного на БС частотного ресурсу для отримання ймовірностей відмов P_1 і P_2 менших за 10 %.

Як впливає із графіків залежності величин P_1 і P_2 від N , перехід від КППП=0 до КППП=3 мало впливає на значення P_1 , які лежать нижче від 10 %, навіть для низькоінтенсивних потоків, коли

$$\lambda_1 = 400-500 \frac{\text{викл}}{\text{год}}. \text{ У той же самий час використання на БС двох МК}$$

замість одного приводить до зменшення необхідного числа частотних каналів на БС майже на два канали: при цьому додатковий МК, як зазначалось вище, не потребує виділення додаткових частот у спектрі передачі БС і реалізується комплектами прийомо/передавачів, які

утворюють необхідну кількість РК. Використання процедури доступу РА до БС із величиною КППП, що дорівнює трьом, може бути корисним для скорочення часу чекання РА встановлення з'єднання τ_1 в умовах діючих у МК замирань. Графік на рис. 6 показує скорочення часу τ_1 шляхом переходу до процедури доступу із КППП=3. Використання повторних послідовних передач пакету доступу у багатьох випадках може бути кориснішим, аніж збільшення частотних каналів на БС, або встановлення додаткового обладнання для організації МК.

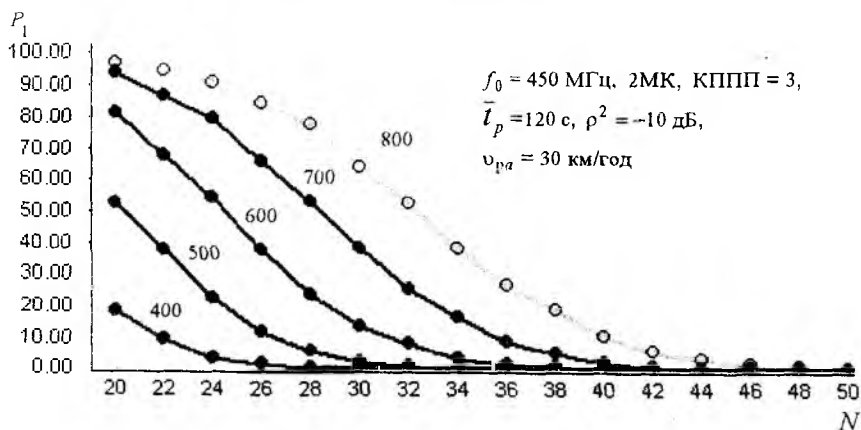


Рис. 2

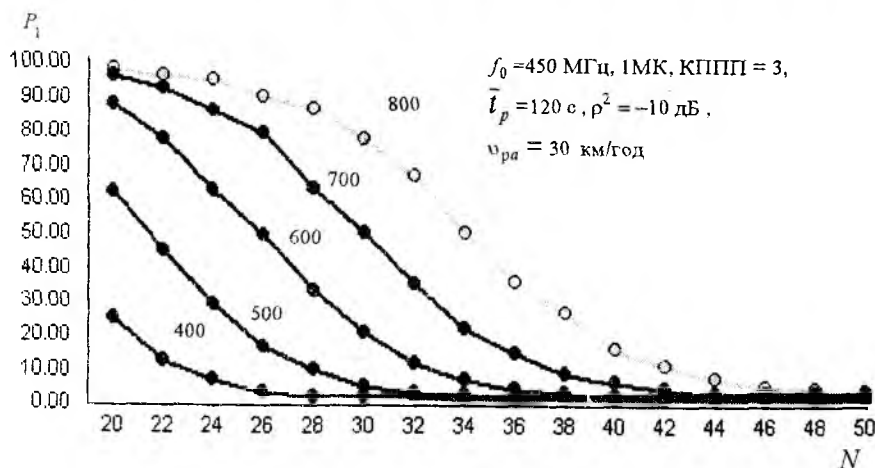


Рис. 3

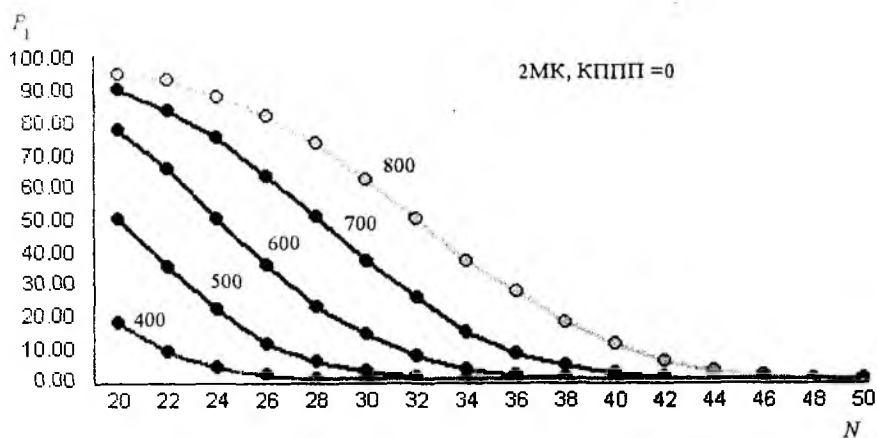


Рис. 4

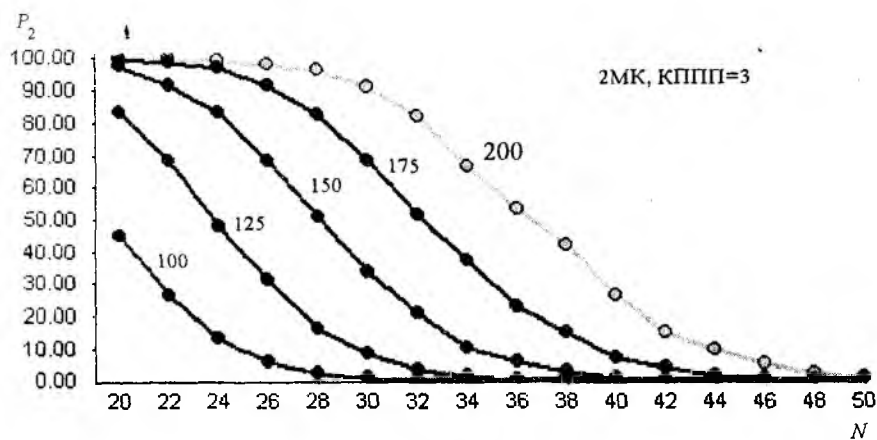


Рис. 5

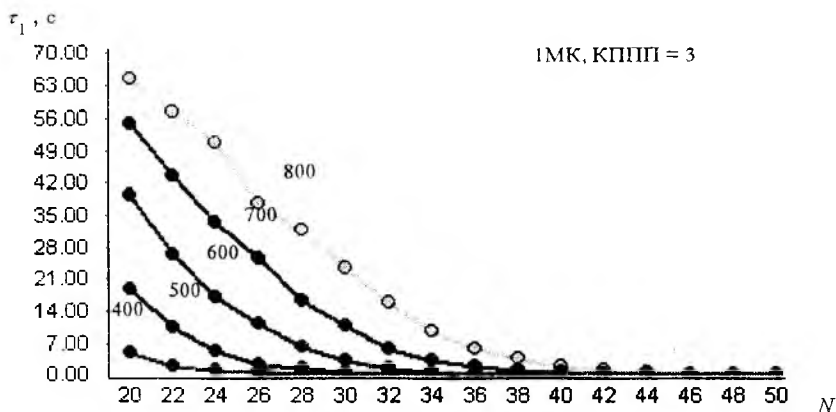


Рис. 6

Один процент від значення P_1 на діаграмі рис. 7 припадає на подію, яка пов'язана із втратою пакетів доступу після їх зіткнення у МК. Можливість такої втрати, як зазначалось вище, практично виключена для пакетів виклику, які направляються у бік РА (дивись рис. 9). Аналіз діаграм процентного змісту P_1 показує на незначну залежність долі пакетів від РА, що зазнають зіткнення у МК, від числа РК, коли $P_1 \leq 10\%$.

Шляхом аналізу графічних залежностей можна, наприклад, показати, що для обслуговування потоку заявок від абонентів СМЗ загальною інтенсивністю $1000 \frac{\text{ВИКЛ}}{\text{год}}$ на БС необхідно організувати 43 РК, а

для обслуговування потоку заявок загальною інтенсивністю $750 \frac{\text{ВИКЛ}}{\text{год}}$ необхідне число РК скорочується до 34.

Графік на рис. 8 вказує на те, що РА має більш високий пріоритет в отриманні РК при малому числі РК на БС. Цей випадковий пріоритет забезпечується, на відміну від СА, встановленою інтенсивністю викликів від РА: вона майже вчетверо вища за інтенсивність викликів від СА.

Характер залежності величини τ_3 від N , як впливає із рис. 10, аналогічний характеру залежності величини τ_1 від N . Як і для верхніх графіків, тривалість моделювання роботи СМЗ на ЕОМ, у результаті якого цей графік був отриманий, складала близько 36 годин.

Аналізуючи наведені результати моделювання, можна сформулювати вимоги щодо організації якісного обслуговування абонентів СМЗ у частині, яка стосується призначення необхідного числа РК базовим станціям СМЗ, виходячи із незмінного телефонного навантаження, яке створюють РА й абоненти фіксованої телефонної мережі у зоні однієї БС. Відомими при цьому є характеристики стандарту сотової системи зв'язку, характеристики поширення радіохвиль того діапазону, який використовує даний стандарт, та характеристики мобільності РА.

Процентний зміст P_i



Рис. 7

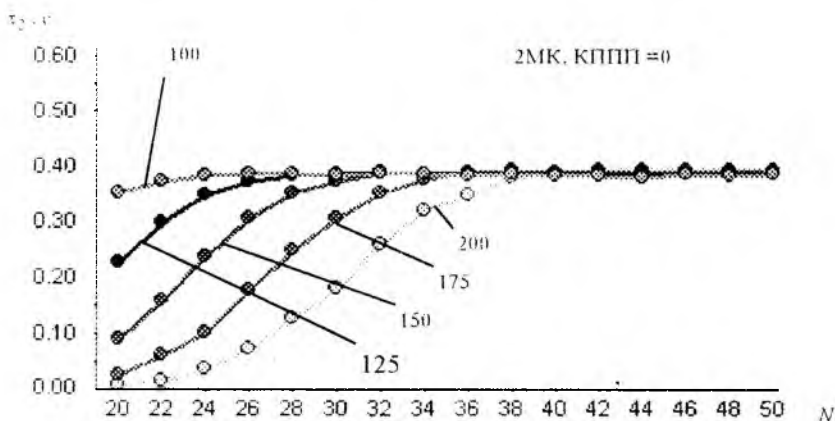


Рис. 8

Процентний зміст P_2

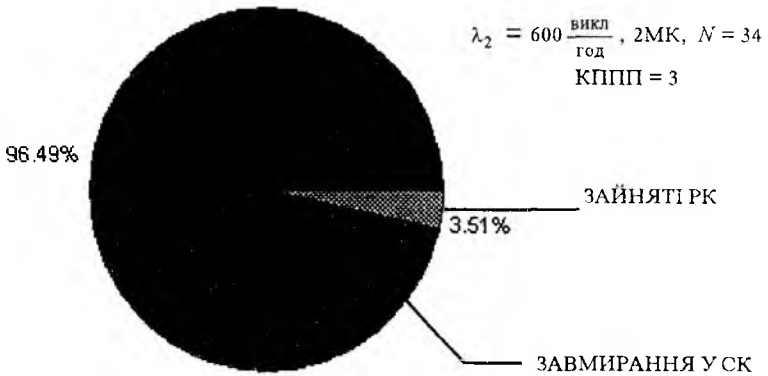


Рис. 9

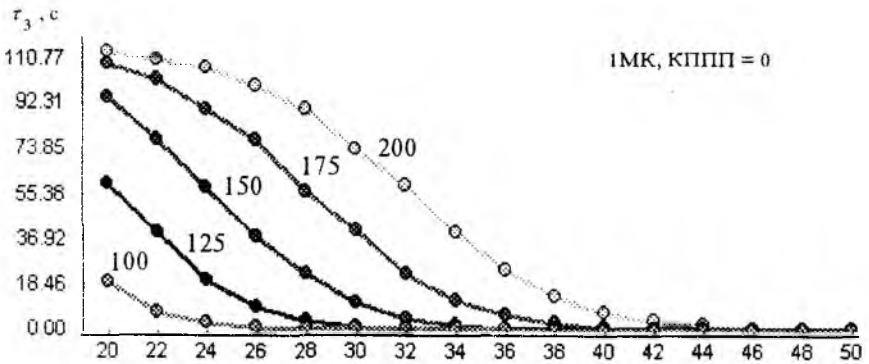


Рис. 10

N

Список літератури: 1. Варакін Л.Е. Сотовые системы подвижной связи // Зарубежная радиоэлектроника, 1986, № 2. 2. Ліфшиц А.Л., Мальц Е.А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания. М., Сов. радио, 1978, 248 с. 3. Варакін Л.Е., Лукьянова О.Л., Трубин В.Н. Состояние и перспективы развития систем подвижной связи // Электросвязь, 1986, № 12. 4. Левін Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М.: Радио и связь, 1989, 656с. 5. Сети связи с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса. М.: Связь, 1979, 520 с.

Харківський державний технічний
 університет радіоелектроніки

Надійшла до редколегії 03.09.98