

## ЙМОВІРНІСНО-ЧАСОВИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ У ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ

### Постановка проблеми

Широке застосування безпроводових систем передачі інформації (БСПІ) дозволяє створювати телекомунікаційні мережі (ТКМ) на великих територіях, включаючи віддаленні та трудно досяжні населені пункти, ділянки шляхів та магістралей. А користувачі таких ТКМ отримують можливість бути дійсно мобільними, тобто, не тільки легко та швидко змінити місце доступу до мережі, а й користуватися своїми абонентськими терміналами під час руху.

Водночас, оцінка якості функціонування ТКМ в теперішній час зводиться до визначення одного з чотирьох класів наскрізного (із кінця в кінець) QoS [1, 2, 4]. Якість обслуговування ТКМ, які побудовані на базі БСПІ, як правило, приймається на рівні «середній», який характерний для безпроводової рухомої телефонії стандарту GSM [2]. При цьому основними якісними та кількісними характеристиками являються:

- затримка передачі мовної інформації із кінця в кінець та в односторонньому напрямку;
- час встановлення з'єднання;
- ймовірність втрати пакетів;
- суб'єктивна оцінка якості мови у відповідності до рекомендацій МСЕ Р.800 та Р.830;
- загальна оцінка якості передачі (R);
- оцінка якості мови, що сприймається слухачем.

При суттєвому зростанні потреб достовірної передачі великих обсягів інформації в реальному часі (передача мультимедійних даних) з широким використанням БСПІ актуальною стає проблема динамічної оцінки якості функціонування ТКМ з урахуванням ймовірнісно-часових станів їх елементів. При цьому використання зазначених традиційних показників не дозволяє враховувати вплив на якість інформаційного обміну (ІО) динаміки ймовірнісно-часових станів елементів ТКМ, яка обумовлена динамічними властивостями абонентів мережі, сигнально-завадового оточення та надійністю термінального обладнання. Тому на сучасному етапі актуальним є розробка методів оцінки якості функціонування ТКМ, що базуються на використанні БСПІ в динамічних умовах.

**Метою статті** є розробка методу оцінки якості функціонування ТКМ, що базуються на використанні БСПІ, який враховує динамічні можливості елементів мереж на основі ймовірнісно-часового підходу з використанням марковської моделі, що описує відповідну динаміку елементів ТКМ.

ТКМ на базі БСПІ складається з окремих безпроводових ліній інформаційного обміну (БЛІО). Загальна структура типової БЛІО може бути представлена у вигляді, зображеному на рис. 1. Елементами БЛІО (а так само і ТКМ в цілому) є: базова станція (БС), яку в переважній більшості випадків можна вважати нерухомою, абонентський термінал (АТ), який може функціонувати під час руху та джерело завад (ДЗ), під яким будемо розуміти не лише джерело електромагнітного випромінювання, що створює активні завади, а також точка перевідбиття радіохвиль або перепона на шляху розповсюдження радіохвиль (будівля або рухомий об'єкт, який з'явився на шляху між БС та АТ, що обумовлено рухом останнього).

Між елементами БС та АТ здійснюється односторонній або двосторонній обмін інформацією. У загальному випадку дана система може складатися з  $N$ -ї кількості елементів,

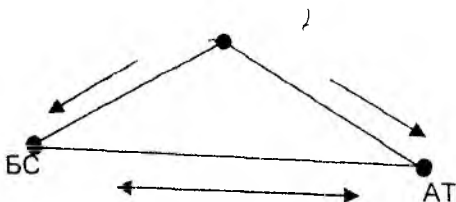


Рис. 1

рис. 1. Елементами БЛІО (а так само і ТКМ в цілому) є: базова станція (БС), яку в переважній більшості випадків можна вважати нерухомою, абонентський термінал (АТ), який може функціонувати під час руху та джерело завад (ДЗ), під яким будемо розуміти не лише джерело електромагнітного випромінювання, що створює активні завади, а також точка перевідбиття радіохвиль або перепона на шляху розповсюдження радіохвиль (будівля або рухомий об'єкт, який

які в сукупності утворюють ТКМ. З урахуванням інформаційної взаємодії та просторової і часової динаміки елементів ТКМ можна розглядати як складну динамічну систему, для якої сукупність відповідних станів щодо кожного елементу системи в деякий момент часу  $t$  характеризує стан ТКМ в цілому у цей же момент часу. Зміна станів окремих елементів у часі визначає динаміку станів ТКМ. У процесі функціонування переходи ТКМ зі стану в стан відбуваються у детерміновані та випадкові моменти часу. Детерміновані зміни станів пов'язані з алгоритмом функціонування обладнання, діями обслуговуючого персоналу (оператора) або користувачів. Випадкові зміни станів можуть бути викликані дією завад або відмовленнями (повними або тимчасовими) щодо елементів ТКМ.

Складність процесу переходів ТКМ зі стану в стан обумовлена специфікою функціонування її елементів. Ця специфіка полягає в тому, що радіоелектронні системи та пристрої, які є елементами ТКМ, крім повних відмовлень, піддані тимчасовим відмовленням. Під тимчасовим відмовленням елементів ТКМ розуміється тимчасове зниження якості функціонування, при якому показники якості QoS лежать поза встановленими межами. Тимчасові відмовлення обумовлені відхиленням умов ведення ІО за часом від умов, що необхідні для нормального функціонування пристрою чи системи. Причинами цього можуть бути зміна умов поширення радіохвиль, дія ненавмисних та навмисних завад, взаємні завади тощо.

З урахуванням не тільки повних, але й тимчасових відмовлень елементів розглянута модель ТКМ достатньо повно описує ІО, який здійснюється в мережі утвореної з БСПІ. Використання моделей елементів із двома та трьома станами дозволяє в довільний момент часу  $t$  характеризувати ТКМ при рішенні кожної конкретної задачі кінцевою безліччю несумісних станів, тобто вектором станів

$$H^T = [H_1 \quad H_2 \quad \dots \quad H_i \quad \dots \quad H_M], \quad (1)$$

де  $M$  – число несумісних станів ТКМ.

Вибір та опис станів ТКМ є евристичною задачею, яка залежить від числа елементів, їх взаємодії та алгоритму функціонування, особливостей місцевості та інших.

Як відомо [6, 7], для складних технічних систем у якості моделей, що описують процес зміни станів у (1) застосовують відповідні марковські моделі. Оскільки переходи елементів ТКМ зі стану в стан можуть відбуватися в будь-який випадковий момент часу та не залежать від того, в якому стані вони знаходились раніше, то більш адекватною до реальності може служити модель у вигляді дискретного марковського процесу.

Така модель описує зміну дискретних станів ТКМ (1), причому зміна станів відбувається у випадкові моменти часу. Використання імовірісно-часового підходу пов'язане з визначенням відповідної моделі щодо дискретного марковського процесу, для опису якого необхідно задати [6, 7] імовірності станів ТКМ в початковий момент часу (вектор початкових імовірностей станів ТКМ)

$$P(t_0)^T = [P_1(t_0) \quad P_2(t_0) \quad \dots \quad P_M(t_0)] \quad (2)$$

та матрицю перехідних імовірностей станів ТКМ

$$P_n(t, t + \Delta t) = \begin{pmatrix} P_{11}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{1j}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{1M}(t, t + \Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{ij}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{iM}(t, t + \Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{M1}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{Mj}(t, t + \Delta t) & \dots & P_{MM}(t, t + \Delta t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Як відомо, безпосереднє визначення матриці перехідних ймовірностей станів (3) для кінцевого інтервалу часу для дискретного марковського процесу неможливо. Тому при обчи-

сленні ймовірностей станів використовують локальні характеристики, якими є інтенсивності відповідних переходів зі стану в стан. Стосовно запропонованої моделі щодо малих інтервалів часу  $\Delta t$  відповідні ймовірності переходу визначатимуться у вигляді [6]:

$$\begin{aligned} P_{ij}(t, t + \Delta t) &= 1 + a_{ij}(t)\Delta t + o(\Delta t) \text{ при } i = j \\ P_{ij}(t, t + \Delta t) &= a_{ij}(t)\Delta t + o(\Delta t) \text{ при } i \neq j \end{aligned} \quad (4)$$

де  $a_{ij}(t)$  – інтенсивність переходів зі стану  $H_i$  у стан  $H_j$ ;

$o(\Delta t)$  – члени вище першого порядку малості відносно величини інтервалу  $\Delta t$ .

З урахуванням цього ймовірності станів ТКМ, для заданих інтенсивностей переходів (4), в будь-який момент часу  $t$  визначатимуться відповідним векторно-матричним рівнянням

$$\frac{d}{dt}P(t) = A^T P(t), \quad P(t_0) = P_0, \quad (5)$$

де  $P(t)^T = [P_1(t) \ P_2(t) \ \dots \ P_M(t)]$  – вектор ймовірностей станів ТКМ у довільний момент часу  $t$ ;  $t_0$  – початковий момент часу;  $A(t)$  – матриця інтенсивностей переходів.

В період нормальної експлуатації можна передбачити, що інтенсивність переходів змінюється за часом незначно. Тоді, для окремого випадку, можна записати  $A(t) = A = const$ , а рівняння (5) має розв'язок у вигляді

$$P(t) = \exp(Vt)P_0, \quad (6)$$

де  $V = A^T$ .

У якості прикладу запропонованого аналізу розглянемо БЛЮ, яка є частиною ТКМ, та представлена на рис. 1. Припустимо, що БЛЮ у будь-який момент часу може знаходитися в одному з трьох станів:

$H_1$  – працездатний стан БЛЮ – стан у якому здійснюється двохсторонній ІО з заданими показниками якості (QoS);

$H_2$  – стан тимчасового відмовлення БЛЮ – якісні показники ІО нижче допустимих за рахунок дії завод, багатопроміневої, появи перепон на шляху розповсюдження радіохвиль;

$H_3$  – стан повного відмовлення БЛЮ – стан в якому має місце відмовлення апаратури, що забезпечує ІО (апаратури БС та/або АТ).

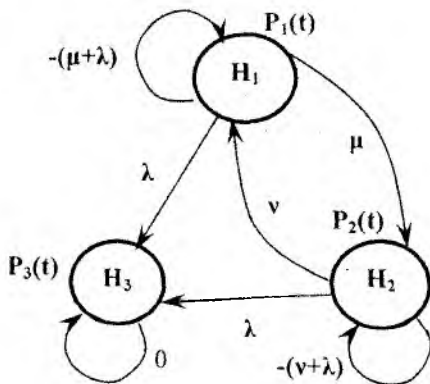


Рис. 2

Процес зміни станів БЛЮ за часом можна представити орієнтовним графом станів (рис. 2). На рис. 2 представлено:  $\lambda$  – інтенсивність переходу БЛЮ зі стану  $H_1$  у стан  $H_2$  ( $H_1 \rightarrow H_2$ ) і зі стану  $H_2$  у стан  $H_1$  ( $H_2 \rightarrow H_1$ );  $\mu$  – інтенсивність переходу зі стану  $H_1 \rightarrow H_3$  і зі стану  $H_2 \rightarrow H_3$ ;  $\nu$  – інтенсивність переходу зі стану  $H_2 \rightarrow H_1$ ;  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$  – ймовірності відповідних станів в довільний момент часу.

Інтенсивність переходів зі стану  $H_1$  до  $H_3$  та з  $H_2$  до  $H_3$  можна оцінити виходячи з технічних характеристик БСП. Так, наприклад, якщо в якості показника якості ІО вибрати інтенсивність відмовлень елементів, то для різних типів сучасних БСП її значення знаходяться в діапазоні [3, 4] –  $\lambda = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ . Якість ІО можна оцінювати й іншими показниками QoS або скористатися інтегральним показником.

Значення  $\mu$  і  $\nu$  можна визначити на основі аналізу типового циклу функціонування БЛЮ в умовах дії завод змінної інтенсивності від часу (рис. 3) [5].

Припустимо, що у момент часу  $t_0$ , якому передував момент порушення ІО через дію завади, автоматичні пристрої БС та АТ намагаються відновити ІО за рахунок збільшення потужності сигналу, перестройки на іншу частоту або використання іншого просторового каналу.

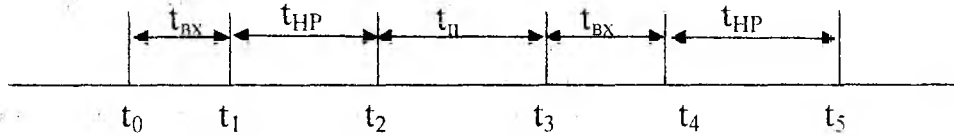


Рис. 3

У момент часу  $t_1$  БЛІО починає нормально функціонувати. У момент  $t_2$ , з причини дії завади або появи перепони, БЛІО перейшла у режим простою, тобто імовірність ІО стала нижче припустимої. Інтервал часу  $t_{П} = t_3 - t_2$  необхідний автоматичним пристроям БС та АТ для визначення погіршення якості ІО перед початком роботи програми зміни режиму функціонування БЛІО для захисту від завади.

У момент  $t_3$  починається відновлення ІО. Час  $t_{BX}$  необхідний для відпрацювання вибраної програми захисту від завади. У момент  $t_4$  ІО відновлений. Далі процес циклічно повторюється.

Усі розглянуті часові інтервали мають випадковий характер. Тому інтенсивність процесу  $\mu$  переходу БЛІО з стану ІО до стану ІО в умовах дії завад і навпаки  $\nu$  можна характеризувати відповідними інтенсивностями переходів:

$$\mu = \frac{1}{\bar{t}_{HP}}; \nu = \frac{1}{\bar{t}_{BX} + \bar{t}_{П}}, \quad (7)$$

де  $\bar{t}_{BX}$  – середній час відновлення ІО;  $\bar{t}_{HP}$  – середній час нормальної роботи лінії ІО;  $\bar{t}_{П}$  – середній час простою лінії ІО, обумовлений завадою.

Розв'язок рівняння (5) з обліком (6) визначатиметься імовірностями станів БЛІО:

$$P_1(t) = \frac{(1 - P_{30})\nu}{\mu + \nu} e^{-\lambda t} + (P_{10} - \frac{(1 - P_{30})\nu}{\mu + \nu}) e^{-(\lambda + \mu + \nu)t}; \quad (8)$$

$$P_2(t) = \frac{(1 - P_{30})\mu}{\mu + \nu} e^{-\lambda t} + (P_{20} - \frac{(1 - P_{30})\mu}{\mu + \nu}) e^{-(\lambda + \mu + \nu)t}; \quad (9)$$

$$P_3(t) = 1 + (P_{30} - 1)e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

де  $P_{10} = 1$ ,  $P_{20} = 0$ ,  $P_{30} = 0$  – елементи вектора (2), що визначають імовірність початкових станів БЛІО.

Вирази (8) – (10) визначають імовірності станів БЛІО для безперервного часу щодо заданих відповідних значень інтенсивностей переходів зі стану у стан з урахуванням динаміки елементів ТКМ.

Описаний метод дозволяє на основі розв'язання загальних рівнянь (5) або часткових результатів (8) – (10) проводити відповідну оцінку якості ІО з урахуванням динамічних умов функціонування та надійності обладнання ТКМ.

### Висновки

На основі використання ймовірнісно-часового підходу та марковської моделі, щодо зміни станів ТКМ, розглянуто метод оцінки якості ІО, який на відміну від відомих дозволяє враховувати динаміку елементів ТКМ та її вплив на показники якості ІО. Використання даного методу передбачає такі основні етапи:

1. На основі заданої структури ТКМ та аналізу очікуваної динаміки та заводової обстановки, здійснюється побудова відповідної структури моделі ТКМ.

2. По обраній структурі моделі ТКМ визначаються відповідні стани (здійснюється опис вектору станів (1)).

3. На підставі технічних характеристик елементів ТКМ, їх ймовірного взаємного положення за часом та обраного показника якості функціонування (QoS) визначаються елементи матриці інтенсивностей переходів ТКМ зі стану у стан.

4. Визначається та розв'язується векторно-матричне рівняння (5).

5. Будується графіки динаміки ймовірностей відповідних станів ТКМ та проводиться їх аналіз.

На основі аналізу надаються рекомендації щодо використання окремих БСПІ в умовах очікуваної динаміки та заводової обстановки для забезпечення необхідного рівня показника QoS.

**Список літератури:** 1. *Беллами Дж.* Цифровая телефония: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Берлина, Ю.Н. Чернышова. М.: Эко-Трендз, 2004. 640 с. 2. *Семенов Ю.В.* Проектирование сетей связи следующего поколения. СПб.: ОАО "Гипросвязь", 2005. 240 с. 3. *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 288 с. 4. *Сюваткин В.С.* и др. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / Под ред. В.В. Крылова. СПб.: БВХ-Петербург, 2005г. 368 с. 5. *Чечоткін Д.Л.* Методика оцінки якості функціонування авіаційної лінії інформаційного обміну з урахуванням мінливості умов радіоелектронного подавлення // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. 2006. №32. С. 132-136. 6. *Ярлыков М. С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985г. 342с. 7. *Грушенко М.В., Поспелов Б.Б., Мисик Ф.Ф., Яковлев В.Ю.* Оцінка ефективності авіаційних радіоелектронних комплексів / Навч. посібник. Харків. МОУ ХУПС, 2007р. 91с.

*Харківський національний  
університет радіоелектроніки*

*Надійшла до редколегії 05.09.2009*