

УДК 621.391

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕРФЕЙСІВ МАРШРУТИЗАТОРІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ, ПОБУДОВАНА З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТА SIMULINK



[О.С. ЄРЕМЕНКО](#), [Т.М. ЛЕБЕДЕНКО](#), [С.А. КАПЛУН](#), [В.О. КОСТЕНКО](#)

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Abstract – In this article, the simulation model of functioning of the interfaces of telecommunication network routers is proposed. One of the key stages in the development and improvement of analytical models and queuing techniques on the interfaces of telecommunication network routers is their experimental verification, which can be carried out both with a wide range of simulation model packages, as well as in full-scale experiment or laboratory research. Such studies are related to the analysis of the adequacy of the proposed solutions – models and methods, and to the assessment of the effectiveness of the results obtained according to these solutions. Along with network simulators, in practice, the Simulink package is actively used, which is a graphical simulation environment that allows the use of block diagrams to construct dynamic models, including discrete, continuous and hybrid, as well as nonlinear systems. The presented model is constructed using the Simulink package integrated into the MATLAB environment. Its main functional capabilities include the change in the number of packet flows and queues to be formed; regulation of the flows characteristics (class, average intensity), interface (bandwidth) and queues (allocated bandwidth of the interface, discipline of service); modeling the router interface by various queuing systems, such as $M(t)/M(t)/1$, $M(t)/D(t)/1$, etc.; providing a wide functionality for monitoring the queues utilization of the router interface, depending on the observation time, the operation mode of the interface (stationary/non-stationary), the initial queue utilization, the flow patterns and the discipline of service used; the possibility of analyzing the dynamics of change in the end-to-end Quality of Service parameters, for example, the average end-to-end packet delay. Using the proposed simulation model, the adequacy of corresponding analytical models and comparison of the effectiveness of queuing and routing solutions from the point of view of the key Quality of Service parameters can be performed.

Анотація – В даній статті запропоновано імітаційну модель функціонування інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Представлена модель побудована за допомогою використання пакета Simulink, інтегрованого в середовище MATLAB. До її основних функціональних можливостей варто віднести можливість зміни кількості потоків пакетів та черг, що формуються; регулювання характеристик потоків, інтерфейсу та черг; моделювання інтерфейсу маршрутизатора різними системами масового обслуговування; моніторинг завантаженості черг інтерфейсу маршрутизатора; аналіз динаміки зміни міжкінцевих показників якості обслуговування. Запропонована імітаційна модель дозволяє перевіряти адекватність відповідних аналітичних моделей, а також порівнювати ефективність рішень щодо управління чергами та маршрутизації з точки зору основних показників якості обслуговування.

Аннотация – В данной статье предлагается имитационная модель функционирования интерфейсов маршрутизаторов телекоммуникационных сетей. Представленная модель построена с помощью использования пакета Simulink, интегрированного в среду MATLAB. К основным ее функциональным возможностям следует отнести возможность изменения количества потоков пакетов и формируемых очередей; регулирования характеристик потоков, интерфейса и очередей; моделирования интерфейса маршрутизатора различными системами массового обслуживания; мониторинг загрузки очередей интерфейса маршрутизатора; анализ динамики изменения межконцевых показателей качества обслуживания. Предложенная имитационная модель позволяет проверять адекватность соответствующих аналитических моделей, а также сравнивать эффективность решений по управлению очередями и маршрутизации с точки зрения основных показателей качества обслуживания.

Вступ

Одним з ключових етапів розробки та вдосконалення аналітичних моделей і методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі (ТКМ) є їх експериментальна перевірка, яка може проводитися як за допомогою широкого спектру пакетів імітаційного моделювання, так і в ході натурного або

лабораторного дослідження. Подібні дослідження пов'язані, по-перше, з аналізом адекватності запропонованих рішень – моделей та методів, а по-друге, з оцінкою достовірності та ефективності отриманих за допомогою цих рішень результатів.

Використання аналітичних моделей, як правило, не затратне за часом, що дозволяє дослідити мережні процеси для досить широкої множини вихідних даних: мережних структур, характеристик трафіка, дисциплін обслуговування, стратегій маршрутизації тощо, проте отримані результати розрахунків не завжди мають високу адекватність та точність. Методи натурального (лабораторного) експерименту вимагають наявності доступу до реального мережного (комутаційного) обладнання, організація експлуатації якого в дослідницьких цілях є досить проблемним моментом та пов'язана з додатковими матеріальними та часовими затратами. Тому компромісним варіантом у цьому випадку є використання функціоналу імітаційного моделювання, представленого, наприклад, пакетами NS2, NS3, OPNET, OMNET і т.і. Результати якісного порівняння основних пакетів імітаційного моделювання ТКМ наведені в табл. 1 [1, 2].

Поряд з мережними симуляторами (табл. 1) на практиці активно використовується пакет Simulink, який представляє собою графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, в т.ч. нелінійні системи. Застосування пакету Simulink передбачає реалізацію множини переваг. До них, наприклад, варто віднести ергономічний графічний інтерфейс та простоту використання, засновану на реалізації принципів візуального програмування з використанням бібліотеки стандартних функціональних блоків. Проте основою перевагою пакета Simulink є його тісна інтеграція з системою MATLAB [3-12] та рядом інших пакетів розширення. Доступ до широкого функціоналу MATLAB дозволяє й пакету Simulink використовувати такі потужні і важливі для розв'язання мережних задач інструменти (Toolboxes/Blocksets), як Control System Toolbox, Optimization Toolbox, Differential Equations Toolbox, Digital Signal Processing Blockset та багато інших. Ще однією ключовою перевагою пакета Simulink є те, що при роботі в середовищі Simulink надається можливість модернізувати та вдосконалювати бібліотечні блоки, а також створювати та поповнювати свої власні бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних як на мові MATLAB, так і на мовах C ++, Fortran або Ada.

При моделюванні та дослідженні динамічних систем, як наприклад представлених в роботах [13-20] рішеннях задач динамічного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ, дослідник може обрати метод розв'язання диференціальних рівнянь, задати модельний час (з фіксованим або змінним кроком), стежити в реальному часі за процесами, які протікають в системі, що досліджується. З цією метою активно використовуються спеціальні пристрої моніторингу, візуалізації, аналізу і обробки результатів досліджень, що входять до складу бібліотеки пакета Simulink. З їх допомогою можна представляти отримані результати у вигляді 2D/3D-графіків або таблиць. Таким чином, метою даної статті є побудова та опис імітацій-

ної моделі функціонування інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ з використанням пакета Simulink.

Таблиця 1. Порівняння існуючих програмних пакетів імітаційного моделювання ТКМ

Назва	Мова програмування	Операційна система (ОС)	Доступні модулі моделювання	Масштабованість	Кількість вузлів ТКМ при моделюванні
NS2, NS3	C++, OTCL, Python	GNU/Linux, FreeBSD, Mac OS X, Windows	Проводові та безпроводові мережі	Обмежена	До 3000
QualNet	C++	UNIX, Window-MAC, Linux	Проводові та безпроводові мережі	Висока	500-20000
GloMoSim	C	Windows, Linux, Sun SPARC Solaris	Проводові та безпроводові мережі	Висока	До 10000
NetSim	C, Java	Windows	Проводові, безпроводові, сенсорні мережі	Достатня	–
OMNET++	C++	Windows, Linux, Mac OS X та інші Unix-подібні ОС	Проводові та безпроводові мережі	Достатня	–
OPNET	C, C++	Windows	Проводові та безпроводові мережі	Висока	210 – 290
TOSSIM	Python, C++, NesC	Linux, Cygwin для Windows	Емуляція безпроводових сенсорних мереж TinyOS	Достатня	До 850
J-SIM	Java	Windows, MAC OS X, Linux	Проводові, безпроводові, сенсорні мережі	Достатня	До 1000
NTCUns	C++	FreeBSD, Linux	Проводові та безпроводові мережі	Середня	До 4096
DRMSim	Java	UNIX, Linux, Mac OS	Моделювання динамічної маршрутизації	Висока	До 10000
SSFNet	Java, C++	Linux, Solaris, Windows	Моделювання Internet протоколів та мереж	Дуже висока	До 100000
GrooveNet	C++	Linux	Моделювання ТКМ та трафіку	Висока	–
TraNs	Java, C++	Linux, Windows	Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs)	Висока	До 3000

I. Динамічна модель завантаженості черг на інтерфейсі маршрутизаторів ТКМ

При імітаційному моделюванні функціонування інтерфейсів маршрутизатора ТКМ основна увага буде приділятися таким важливим задачам:

- організація черг пакетів, задання їх кількості та типу, визначення дисциплін обслуговування пакетів;
- розподіл між створеними чергами пакетів різних потоків та пропускної здатності інтерфейсу в цілому;
- динамічний аналіз завантаженості черг (їх довжини) та затримок пакетів як на окремих маршрутизаторах, так і вздовж обраного шляху (маршруту).

За основу дослідження приймемо аналітичні моделі роботи інтерфейсів маршрутизаторів, представлених в роботах [13-20]. Вони описують за допомогою нелінійних диференціальних рівнянь вплив характеристик потоку та дисциплін обслуговування пакетів на динаміку зміни в часі середніх значень довжини черги та затримок пакетів як для стаціонарного, так і для нестаціонарного (перехідного) режимів роботи інтерфейсів. Моделі засновані на використанні стаціонарної точкової апроксимації нестаціонарного потоку (Pointwise Stationary Fluid Flow Approximation, PSFFA) [13-15]. Наприклад, при моделюванні роботи j -ї черги на i -му інтерфейсі маршрутизатора ТКМ за допомогою системи масового обслуговування (СМО) $M(t)/M(t)/1$ нелінійне диференціальне рівняння, яке описує динаміку зміни середньої довжини черги на даному інтерфейсі, прийме таку форму:

$$\frac{dq_{i,j}(t)}{dt} = -\varphi_{i,j} \left(\frac{q_{i,j}(t)}{q_{i,j}(t)+1} \right) + \lambda_{i,j}, \quad (1)$$

де $q_{i,j}(t)$ – середня довжина j -ї черги на i -му інтерфейсі маршрутизатора в момент часу t ; $\lambda_{i,j}$ – середня інтенсивність агрегованого потоку пакетів, що надходить в j -ту чергу на i -му інтерфейсі маршрутизатора; $\varphi_{i,j}$ – пропускна здатність i -го інтерфейсу, яка виділена для j -ї черги.

В свою чергу, згідно з (1) та формулою Літла, можна отримати систему нелінійних диференціальних рівнянь, що відображають динаміку зміни середньої затримки пакетів в j -й черзі i -го інтерфейсу на маршрутизаторі ТКМ:

$$\frac{d\tau_{i,j}(t)}{dt} = 1 - \varphi_{i,j} \left(\frac{\tau_{i,j}(t)}{\lambda_{i,j}\tau_{i,j}(t)+1} \right). \quad (2)$$

Для випадку СМО $M(t)/D/1$ апроксимація PSFFA приймає форму:

$$\frac{dq_{i,j}(t)}{dt} = -\varphi_{i,j} \left((q_{i,j}(t)+1) - \sqrt{(q_{i,j}(t))^2 + 1} \right) + \lambda_{i,j}, \quad (3)$$

тоді як середня затримка пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів визначається наступним чином

$$\frac{d\tau_{i,j}(t)}{dt} = 1 - \varphi_{i,j} \left((\lambda_{i,j}\tau_{i,j}(t) + 1) - \sqrt{(\lambda_{i,j}\tau_{i,j}(t))^2 + 1} \right). \quad (4)$$

II. Опис імітаційної моделі функціонування інтерфейсів маршрутизаторів, побудованої з використанням пакета Simulink

Базуючись на аналітичних моделях (1)-(4) та можливостях пакета Simulink, в рамках проведеного дослідження була розроблена імітаційна модель функціонування інтерфейсу маршрутизаторів. Загальна структура схеми імітаційної моделі представлена на рис. 1.

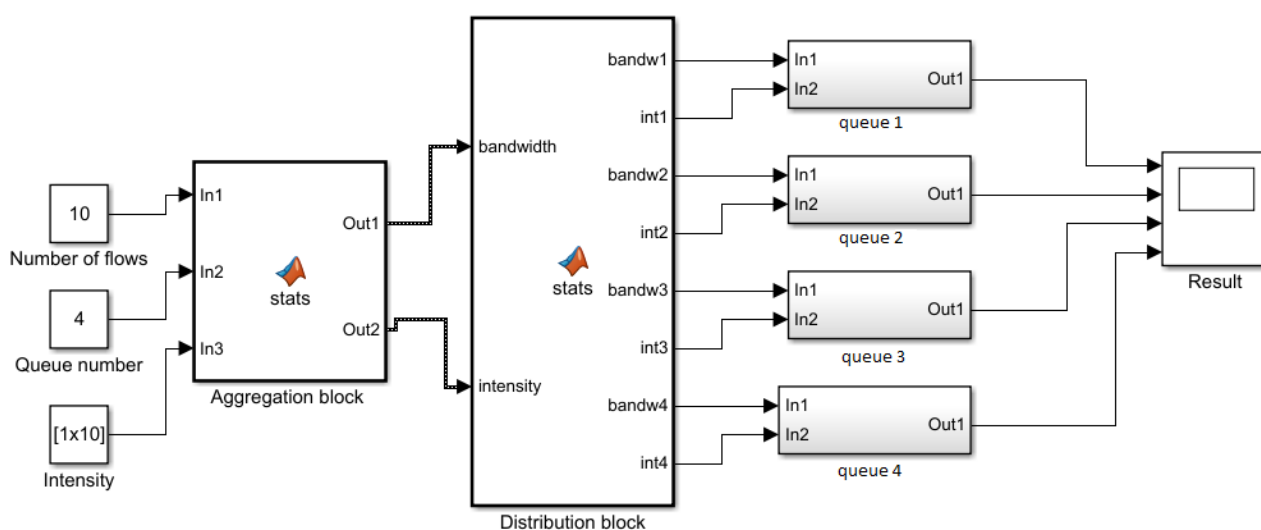


Рис. 1. Узагальнена структурна схема імітаційної моделі функціонування інтерфейсу маршрутизатора ТКМ (Interface model)

Блок агрегування (Aggregation block) відповідає за обробку вихідних даних (кількості та класу черг; числа, класу та інтенсивностей потоків пакетів) та розв'язання задач щодо управління чергами з точки зору їх формування та розподілу між ними пропускну здатності інтерфейсу. Через те, що в більшість відомих аналітичних моделей управління чергами покладені оптимізаційні рішення [13-20], то блок агрегації використовує функціонал Optimization Toolbox. Так рішення щодо оптимального агрегування потоків і розподілу пакетів за чергами було реалізовано за допомогою блоків MATLAB Function, які дозволяли додавати функції MATLAB в Simulink-модель. В даному випадку блок агрегування (рис. 1) реалізував роботу підпрограм `intlinprog`, `quadprog` та `fmincon`. Наприклад, на рис. 1 продемонстровано варіант вихідних даних (In1÷In3), коли на інтерфейс надходило десять потоків

пакетів, які розподіялись між чотирма чергами. Результатом аналітичних розрахунків є вектори – $Out1$ та $Out2$ з координатами, відповідно, $\varphi_{i,j}$ та $\lambda_{i,j}$.

На рис. 1 блок розподілення (Distribution block) здійснює розподіл вхідних даних за окремими чергами. Наприклад, вихідний параметр $bandw1$ визначає виділену для першої черги пропускну здатність, а параметр $int1$ – сумарну інтенсивність потоків пакетів, що направлені до цієї ж черги.

Блоки $queue1 \div queue4$ забезпечували імітацію динаміки зміни стану інтерфейсу з точки зору завантаженості кожної з його черг, ґрунтуючись на розв'язанні нелінійних диференціальних рівнянь (1) за допомогою можливостей Differential Equations Toolbox. Схема блоку динаміки зміни стану інтерфейсу ($queue1$), який реалізує роботу системи $M(t)/M(t)/1$, показана на рис. 2.

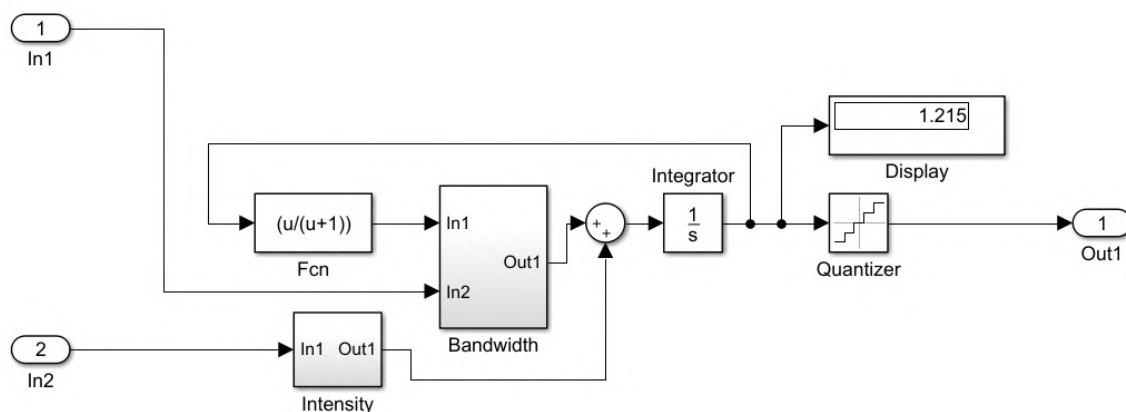


Рис. 2. Схема блоку динаміки зміни стану інтерфейсу $queue1$

На вхід блоку $queue1$ подаються параметри інтенсивності агрегованого потоку та пропускну здатності інтерфейсу, виділеної цій (першій) черзі, що надходять з Distribution block (рис. 1). Ці параметри передаються на підсистеми «Bandwidth» (рис. 3 а) та «Intensity» (рис. 3 б), які відповідають за передачу значень інтенсивності та пропускну здатності для розв'язання диференціального рівняння в підсистемі «Fcn».

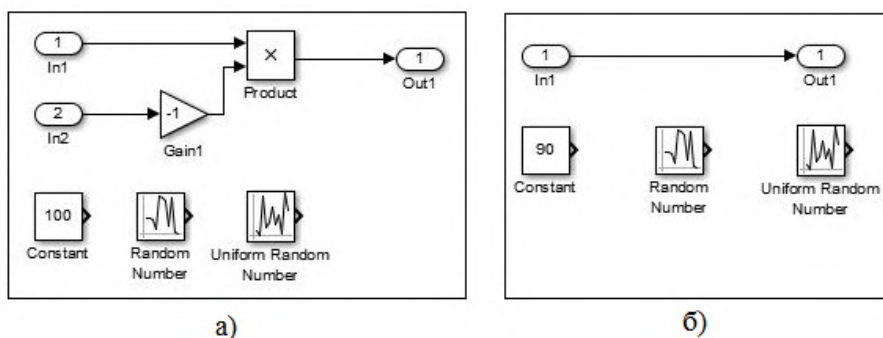


Рис. 3. Зміст підсистем «Bandwidth» (а) та «Intensity» (б)

Особливістю даного блоку запропонованої моделі є те, що інтенсивності вхідних потоків та пропускної здатності інтерфейсів можуть задаватись як вручну за допомогою блоку «Const», так і за допомогою генераторів випадкових чисел з рівномірним (Uniform Random Number) або нормальним розподілом (Random Number).

В підсистемі функцій «Fcn» задавався вид нелінійного диференціального рівняння (1) або (3). Наприклад, якщо використовувалась аналітична модель (1), то вид підсистеми «Fcn» показано на рис. 4.

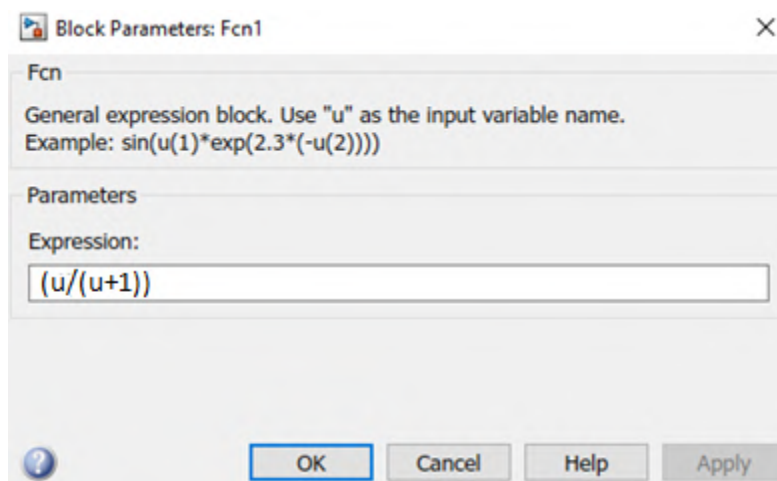


Рис. 4. Приклад завдання виду диференціального рівняння (1) в підсистемі «Fcn»

Результат розв'язання диференціального рівняння відбувається в підсистемі «Integrator», в якому також задається початкове значення середньої довжини черги на інтерфейсі. Підсистема «Quantizer» забезпечує квантування вхідного параметру з однаковим кроком за рівнем для більш наглядного формування результату на графіку.

Розглянемо наступний приклад, в якому вихідними виступали наступні дані:

- кількість потоків, що надходять на інтерфейс – 10;
- кількість сформованих черг – 4;
- пропускна здатність інтерфейсу – 100 1/с;
- Тип PSFFA: $M(t)/M(t)/1$;
- початкове значення середньої довжини кожної з черг – 0 пакетів.

На основі результатів розрахунку, які відображені в табл. 2, був проведений аналіз динаміки зміни середньої довжини кожної з чотирьох черг.

Відповідно до отриманих у Aggregation block результатів (табл. 2) за допомогою блоків queue1÷queue4 досліджена динаміка зміни середньої довжини кожної з черг (рис. 5 – рис. 8). Результати аналізу візуалізовані блоком «Result» (рис. 1)

Таблиця 2. Вихідні дані і результати розрахунку для заданого прикладу

Характеристики потоків			Параметри черг			
Номер потоку	Клас потоку	Середня інтенсивність потоку (1/с)	Номер черги	Клас черги	Середня інтенсивність потоку в черзі (1/с)	Виділена пропускна здатність (1/с)
1	1,4189	12,1238	1	1	12,6332	22,1689
7	0,3571	0,5093				
2	4,2176	11,8901	2	4	11,8901	21,4355
4	7,9221	10,4876	3	7	27,7693	37,0697
6	6,5574	11,2967				
8	8,4913	4,4308				
10	6,7874	1,5541				
3	9,1574	6,2756	4	10	9,534	19,3259
5	9,5949	2,7390				
9	9,3399	0,7387				

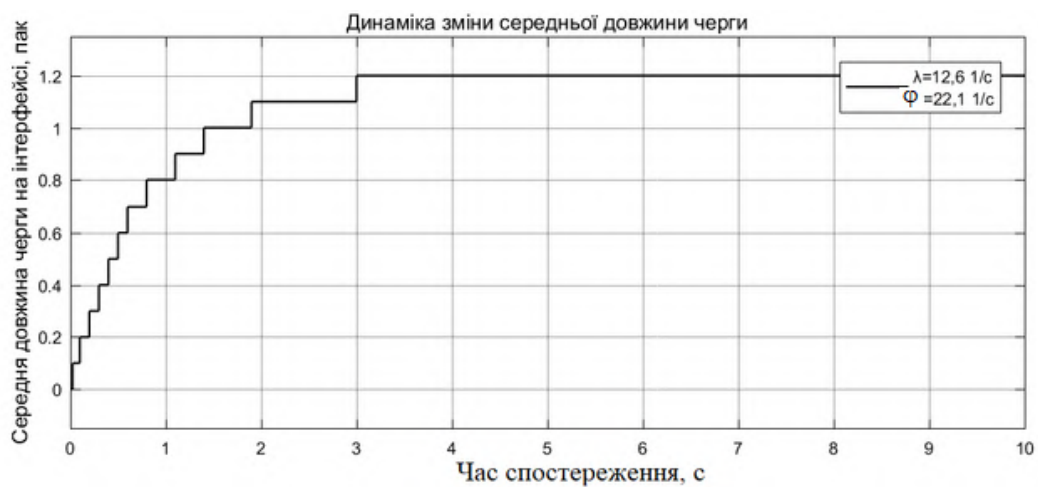


Рис. 5. Аналіз динаміки зміни середньої довжини першої черги на інтерфейсі, який працює за СМО $M(t)/M(t)/1$ при виділеній пропускній здатності 22,1 1/с та середній інтенсивності потоку пакетів в 12,6 1/с

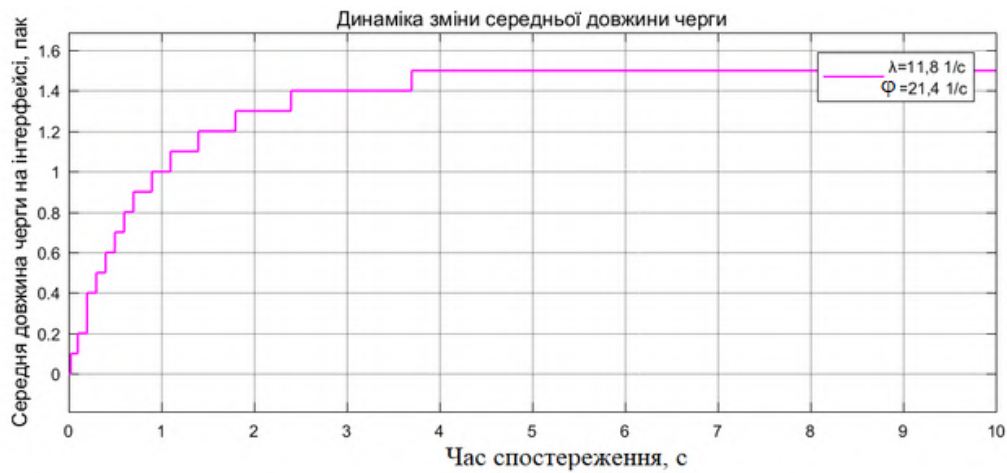


Рис. 6. Аналіз динаміки зміни середньої довжини другої черги на інтерфейсі при виділеній пропускній здатності 21,4 1/с та середній інтенсивності потоку пакетів в 11,8 1/с

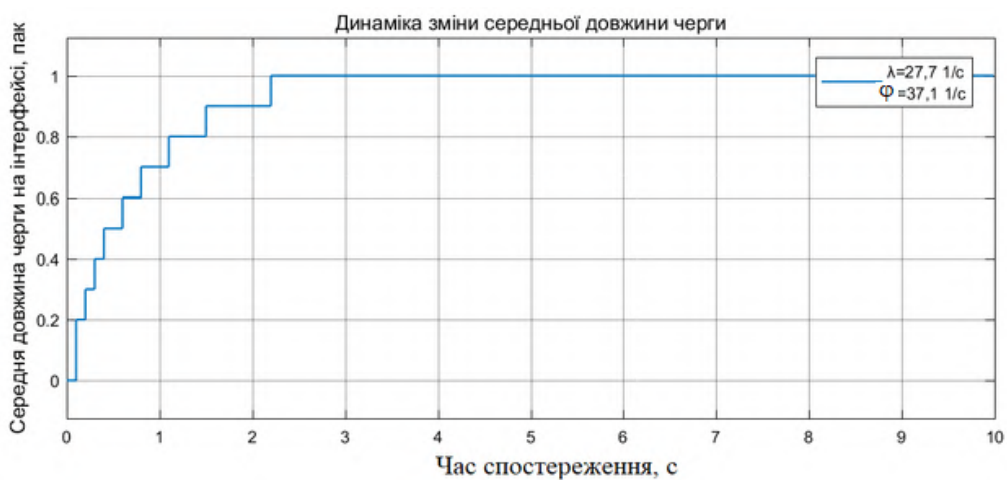


Рис. 7. Аналіз динаміки зміни середньої довжини третьої черги на інтерфейс при виділеній пропускній здатності 37 1/с та середній інтенсивності потоку пакетів в 27,7 1/с

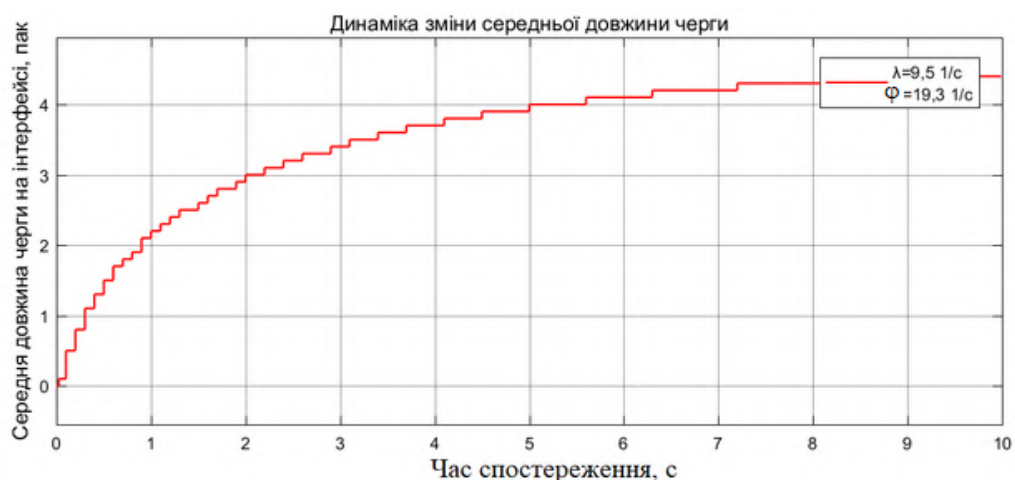


Рис. 8. Аналіз динаміки зміни середньої довжини четвертої черги на інтерфейсі при виділеній пропускній здатності 19,3 1/с та середній інтенсивності потоку пакетів в 9,5 1/с

Отримані результати дослідження дозволяють проаналізувати вплив інтенсивності потоку, виділеної пропускної здатності інтерфейсу на динаміку зміни середньої довжини черги та на час нестационарного режиму роботи інтерфейсу.

Крім того, на рис. 9 показана схема застосування запропонованої моделі (рис. 1) для оцінки міжкінцевих показників якості обслуговування [21-26], наприклад, середньої міжкінцевої затримки пакетів вздовж деякого шляху. На рис. 9 показано випадок, коли шлях утворювали три маршрутизатори (інтерфейси).

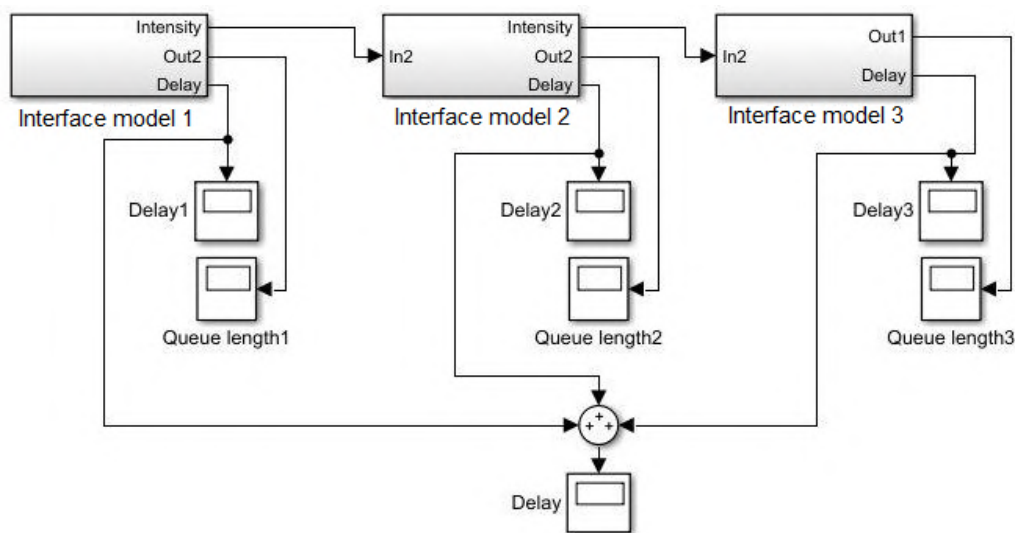


Рис. 9. Схема застосування запропонованої моделі (Interface model) для оцінки міжкінцевих показників якості обслуговування

Виходи Delay блоків Interface model (рис. 9) забезпечують за аналогією з роботою підсистеми «Fcp» отримання розв'язання диференційного рівняння (2) або (4) з метою оцінки в часі середньої затримки пакетів на кожному з інтерфейсах. Блоки Delay1÷Delay3 дозволяють отримати ці ж результати в графічному вигляді. Результатом роботи самостійного блоку Delay (рис. 9) є графічна залежність середньої міжкінцевої затримки пакетів від часу спостереження.

Висновки

Запропонована імітаційна модель функціонування інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Модель побудована з використанням пакета Simulink, інтегрованого в середовище MATLAB. До основних її функціональних можливостей варто віднести наступне:

- зміна кількості потоків пакетів та черг, що формуються;
- регулювання характеристик потоків (класу, середньої інтенсивності), інтерфейсу (пропускної здатності) та черг (виділяємої пропускної здатності інтерфейсу, дисципліни обслуговування);
- моделювання інтерфейсу маршрутизатора різними системами масового обслуговування, такими як $M(t)/M(t)/1$, $M(t)/D(t)/1$ та ін.;

- надання широкого функціоналу з моніторингу завантаженості черг інтерфейсу маршрутизатора в залежності від часу спостереження, режиму роботи інтерфейсу (стаціонарний/нестационарний), початкової завантаженості черги, використовуваних моделей потоку та дисципліни обслуговування;
- можливість аналізу динаміки зміни міжкінцевих показників якості обслуговування, наприклад, середньої міжкінцевої затримки пакетів.

За допомогою запропонованої імітаційної моделі можна перевіряти адекватність відповідних аналітичних моделей, а також порівнювати ефективність рішень щодо управління чергами та маршрутизації з точки зору основних показників якості обслуговування.

Список літератури:

1. *Kabir M.H.* Detail comparison of network simulators / M.H. Kabir, S. Islam, M.J. Hossain, S. Hossain // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2014. – Vol. 5, Issue 10. – P. 203-218.
2. *Mishra V.* Analysis and comparison of different network simulators. / V. Mishra, S. Jangale // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. Special Issue for International Technological Conference-2014. – 2014. – P. 1-5.
3. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН. Пресс, 2005. – 800 с.
4. *Чен К.* MATLAB в математических исследованиях: Пер. с англ. / К. Чен, П. Джиглин, А. Ирвинг. – М.: Мир, 2001. – 346 с.
5. *Ануфриев И.Е.* MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. *Дьяконов В.П.* MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.
7. *Tyagi A.K.* MATLAB and SIMULINK for Engineers (Oxford Higher Education) / A.K. Tyagi. – Oxford University Press, 2012. – 492 p.
8. *Klee H.* Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®. Third Edition / H. Klee, R. Allen. – CRC Press, 2017. – 852 p.
9. *Perutka K.* MATLAB for Engineers – Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics / K. Perutka. – InTech, 2011. – 524 p.
10. *Moore H.* MATLAB for Engineers. 5th Edition / H. Moore. – Pearson, 2017. – 688 p.
11. *Hahn B.* Essential MATLAB for Engineers and Scientists, Sixth Edition / B. Hahn, D.T. Valentine. – Academic Press, 2016. – 428 p.
12. *Лемешко А.В.* Особенности проведения лабораторного эксперимента по исследованию процессов управления очередями в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, М.В. Семеняка, Али С. Али // Цифрові технології. Збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 10. – С. 5-17.
13. *Xu K.* Time-Varying Performance Analysis of Multihop Wireless Networks With CBR Traffic / K. Xu, D. Tipper, Y. Qian, P. Krishnamurthy, S. Tipmongkonsilp // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2014. – Vol. 63, Issue 7. – P. 3397–3409. doi: 10.1109/tvt.2013.2297382
14. *Alnowibet K.A.* Nonstationary Erlang Loss Queues and Networks: PhD Thesis / K.A. Alnowibet. – North Carolina State University, 2004. – 140 p.

15. Wang W.-P. A Simple Approximation for modeling Nonstationary Queues / W.-P. Wang, D. Tipper, S. Banerjee // Proceed-ings of IEEE INFOCOM '96. Conference on Computer Communications, 1996. – P. 255–262. doi: 10.1109/infcom.1996.497901
16. Еременко А.С. Анализ влияния состояния интерфейса на динамику загруженности очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети / А.С. Еременко, Т.М. Лебеденко, Е.В. Старкова // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – Київ: ДУТ, 2015. – №3. – С. 45-51.
17. Лемешко А.В. Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, А.С. Еременко // Проблеми телекомунікацій. – 2016. – № 1 (18). – С. 3–21. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2016/1/1/161_lemeshko_dynamic.pdf.
18. Yeremenko O.S. Investigation of Queue Utilization on Network Routers by the Use of Dynamic Models / O.S. Yeremenko, T.M. Lebedenko, T.V. Vavenko, M.V. Semenyaka // 2015 IEEE Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). – Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics. Ukraine, Kharkiv, October 13–15, 2015. – P. 46-49. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357265.
19. Lemeshko O.V. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes / O.V. Lemeshko, O.S. Yeremenko // 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), 2016. – P. 225-230. DOI: 10.1109/SST.2016.7765664.
20. Yeremenko O. Development of the dynamic tensor model for traffic management in a telecommunication network with the support of different classes of service / O. Yeremenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, Issue 9 (84) – P. 12–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85602.
21. Barreiros M. QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations. 2nd Edition / M. Barreiros, P. Lundqvist. – Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 2016. – 254 p.
22. Szigeti T. End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks. 2nd Edition / T. Szigeti, C. Hattingh, R. Barton, K. Briley. – Cisco Press, 2013. – 1040 p.
23. White R. Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks. 1st Edition / R. White, E. Banks. – Addison-Wesley Professional, 2018. – 832 p.
24. White R. Navigating Network Complexity: Next-generation routing with SDN, service virtualization, and service chaining / R. White, J.E. Tantsura. Addison-Wesley Professional, 2015. – 320 p.
25. Monge A.S. MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services. / A.S. Monge, K.G. Szarkowicz. – O'Reilly Media, 2016. – 920 p.
26. Stallings W. Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud / W. Stallings. – Addison-Wesley Professional, 2015. – 544 p.