УДК 681.3

Точилін В. В.

ПРОГРАМНО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СИСТЕМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ТА МОЖЛИВІСТЬ ЇХ РОЗШИРЕННЯ МЕРЕЖАМИ ПЕТРІ

Міжнародний науково-навчальний центр ЮНЕСКО інформаційних технологій та систем

Проаналізовано та узагальнено напрями розвитку імітаційного моделювання комп'ютерних мереж; виділено загальні принципи побудови таких моделей та програмних технологій їх реалізації; доведена доцільність використання мереж Петрі в системах імітаційного моделювання комп'ютерних мереж

Вступ

Розвиток комп'ютерних комунікацій ставить все більш високі вимоги до інфраструктури передачі даних. Однак, розробка, проектування та запровадження сучасних комп'ютерних мереж (КМ) потребує значних фінансових витрат. Отже, необхідною умовою створення нових та модернізації вже існуючих комп'ютерних мереж є всебічне дослідження їх майбутніх характеристик продуктивності вже на етапі проектування.

Під характеристиками продуктивності комп'ютерних мереж розуміють як якісні, так і кількісні оцінки. До основних кількісних оцінок КМ слід відносити пропускну здатність, час затримки доставки пакету даних, завантаженість каналу передачі, тощо. Під якісними оцінками – характеристики поведінки мережі при штатних умовах експлуатації а також в критичних та аварійних ситуаціях.

Найбільш розповсюдженим підходом до проектування комп'ютерних мереж на теперішній час є використання методу експертних оцінок, у відповідності з яким спеціалісти у сфері телекомунікаційних технологій, на основі наявного досвіду, здійснюють проектування комп'ютерної мережі. Це дозволяє мінімізувати витрати вже на етапі проектування та швидко оцінити вартість реалізації. Однак, рішення, отримані з використанням експертних оцінок носять суб'єктивний характер.

Останнім часом широке розповсюдження отримав більш сучасний підхід, за яким передбачається розробка імітаційної моделі та моделювання поведінки КМ за допомогою спеціалізованих програмно-інструментальних засобів.

Імітаційні моделі (ІМ) відтворюють процеси, що протікають в комп'ютерних мережах: процеси отримання доступу до мережних служб програмним забезпеченням, формування пакетів певних протоколів, затримки, пов'язані з обробкою та транспортуванням даних [1].

Результатом роботи імітаційної моделі є зібрані під час спостереження за поточними подіями кількісні та якісні оцінки комп'ютерної мережі [5].

Безперечною перевагою імітаційних моделей є можливість дослідження відтворених процесів в прискореному масштабі часу. В результаті за досить короткий проміжок часу можна дослідити функціонування КМ протягом тривалого періоду, а також реакцію КМ на критичні ситуації (аварійні та позаштатні).

Аналіз програмно-інструментальних системи імітаційного моделювання комп'ютерних мереж

Існує велика кількість програмних пакетів [8, 9] та технологій, які полегшують процес створення імітаційної моделі КМ та її аналізу. Серед них є, як вузькоспеціалізовані, призначені для вирішення конкретних задач, так і універсальні програмні системи. З допомогою таких універсальних систем можна описати широке коло мереж – від локальної мережі офісу до складової ділянки глобальної комп'ютерної мережі.

Узагальнюючи аналіз досить великої кількості вказаних систем можливо виділити

базові принципи імітаційного моделювання мереж:

- імітаційна модель КМ будується на основі її топології та моделей її елементів: каналів зв'язку(фізичного середовища), обладнання передавання даних, методів доступу, протоколів. Імітаційні моделі елементів представлені у вигляді конструктивних блоків.
- робоче навантаження створюється джерелами трафіка; при цьому, кожен вузол мережі може містити декілька джерел трафіка.
- при дослідженні моделі оцінки продуктивності КМ відслідковуються під час імітаційного моделювання; статистична обробка цих параметрів є додатковою функцією загальної оцінки мережі.

Для забезпечення дії цих принципів моделювання всі програмні системи ІМ комп'ютерної мережі повинні базуватись на застосуванні наступних чотирьох функціональних модулях:

1. Графічний модуль побудови топології проектованої мережі. За допомогою цього модуля відбувається процес створення та редагування топології мережі на основі конструктивних блоків КМ та їх зв'язків.

Конструктивні блоки обладнання передавання даних створюються на основі реального обладнання (маршрутизаторів, комутаторів, мостів, тощо) та аналізу його функціонування.

Сукупність конструктивних блоків утворює базу блоків програмно-інструментальної системи.

Оскільки створити базу конструктивних блоків, яка б описувала все наявне обладнання, протоколи та методи доступу неможливо, програмно-інструментальні системи надають інтерфейс (*API*), з допомогою якого можливо самостійно створювати блоки нетипового або відсутнього в базі обладнання, протоколів тощо.

2. Модуль збору та накопичення інформації про топологію та обладнання вже існуючої мережі, і автоматичної побудови на основі отриманої інформації моделі.

Даний модуль здійснює "опитування" активного обладнання мережі, використовуючи протокол *ICMP* та *SNMP*. За результатами опитування можлива автоматична побудова топології існуючої комп'ютерної мережі. Слід відзначити, що у зв'язку з обмеженістю бази конструктивних блоків підтримуваного обладнання, а також деякими особливостями топології проектованої мережі, побудована таким чином топологія КМ може неадекватно відображати мережу, що моделюється. На даному етапі потрібен контроль з боку оператора програмно-інструментальної системи.

Вкажемо ще на одну важливу властивість, яка може бути включена до даного модуля, – отримання реальних даних по трафіку: завантаженості каналів і затримок передачі пакетів, які виникають в реальній мережі.

3. Модуль імітації та аналізу отриманих оцінок продуктивності.

Цей модуль здійснює імітаційне моделювання процесів, які протікають в побудованій моделі комп'ютерній мережі та відображає отримані оцінки продуктивності, такі як: період затримки проходження пакетів через ту чи іншу ділянку мережі, пропускна здатність та коефіцієнт завантаженості каналу тощо.

За допомогою цього модуля можна здійснювати якісну оцінку КМ: її реакції на позаштатні ситуації та поведінку при зростанні вимог до пропускної здатності.

4. Модуль аналізу та відображення статистичної інформації.

Цей модуль призначається для обробки великого об'єму інформації, отриманої в результаті імітаційного моделювання та подання її в зручному для аналізу та прийняття рішень вигляді.

В різних програмних комплексах існують також і інші, допоміжні модулі, покликані надавати додаткові послуги у створенні моделі, моделюванні та при прийнятті рішень.

В процесі роботи нами були досліджені найбільш популярні програмні системи імітаційного моделювання комп'ютерної мережі (табл. 1.).

Таблиця 1. Сучасні інструментально-програмні засоби для аналізу та проектування телекомунікаційних систем та мереж

№	Назва	Компанія виробник	Операційна система
1	***Visual Simulation Environment***	*Orca Computer, www.orcacomputer.com*	*Windows, Unix*
2	***OMNeT++***	*Technical University of Budapest, Department of Telecommunications (BME-HIT) http://www.omnetpp.org/*	*Windows, Unix*
3	***QualNet (GloMoSim)***	*Scalable Network Technologies, Inc. http://www.scalable-networks.com/*	*Windows, Unix*
4	***ns2***	*Information Sciences Institute http://www.isi.edu/nsnam/ns/*	*Windows (з обмеженими можливостями), Unix*
5	***OPNET Modeler***	*OPNET Technologies, Inc. http://www.opnet.com/*	*Windows, Linux*
6	***NetCracker***	*NetCracker Tech. http://www.netcracker.com*	*Windows, Unix*
7	***NetSim***	*Tetcos http://www.tetcos.com/*	*Windows*

Visual Simulation Environment – об'єктно-орієнтована система моделювання локальних і глобальних мереж. До складу якої входять наступні модулі: *VSE Editor, VSE Simulator, VSE Output Analyzer.*

VSE Editor потрібен для побудови схем мереж. Цей модуль дозволяє створювати імітаційну модель проектованої мережі. *VSE Simulator* проводить аналіз моделі КМ та генерує оцінки продуктивності. Модуль *VSE Output Analyzer* проводить аналіз отриманих оцінок продуктивності та формує звіти у зручному для користувача вигляді.

OMNeT++ модульне середовище моделювання з відкритою архітектурою. Має розвинений графічний інтерфейс. *OMNeT++* використовується для моделювання комунікаційних протоколів (*IP, IPv6, MPLS,* тощо), мобільних комп'ютерних мереж, мереж *ad-hoc* тощо. *OMNeT ++* отримав широке розповсюдження в науковому середовищі, а також в комерційних організаціях.

QualNet (GloMoSim) – інструмент моделювання комп'ютерної мережі. *QualNet* складається з наступних модулів. *QualNet Animator* дозволяє проектувати модель мережі, застосовуючи велику бібліотеку компонентів, а також візуально показує рух трафіку. *QualNet Simulator* – імітатор поведінки моделі комп'ютерної мережі. За допомогою *QualNet Designer* та *QualNet Analyzer* можливо отримати результати моделювання. Пакет *GloMoSim* являється академічною, безкоштовною версією *QualNet.*

ns2 – найстаріший та найпопулярніший програмний продукт, який розповсюджується через відкриту ліцензію (*GPL*). За рахунок безкоштовності та відкритості вихідних кодів *ns2* отримав широке розповсюдження в науковому і студентському середовищі.

ns2 не має зручного інтерфейсу для користувачів, проте за своєю потужністю та гнучкістю не поступається, а іноді й перевершує своїх комерційних аналогів.

Пакет має зручний інтерфейс (*API*), а також детальну документацію створення власних блоків, які описують активне мережене обладнання, лінії зв'язку і протоколи передачі даних.

OPNET Modeler – найбільш популярний комерційний пакет проектування і моделювання локальних і глобальних мереж, комп'ютерних систем, програмного забезпечення та розподілених систем. Має найбільшу базу компонентів мережного обладнання, каналів зв'язку та протоколів.

Project Editor графічно представляє топологію системи комунікацій. Це дуже розвинений редактор, який має велику кількість діалогових вікон, а також набори сценаріїв «якщо», які допомагають користувачеві при створенні моделі комп'ютерної мережі.

Node Editor графічний редактор, за допомогою якого можливо описати протоколи та алгоритми обробки трафіку на вузлі комп'ютеронї мережі.

Process Editor – редактор, за допомогою якого можливе створення конструктивних блоків протоколів передачі даних.

Для проектування бездротових комп'ютерних мереж *OPNET Technologies* пропонує спеціалізований пакет OPNET *Modeler Wireless Suite*. Цей пакет дозволяє проектувати мережі з застосуванням наступних технологій: *MANET, IEEE* 802.11 *WLAN, 3G/4G, Ultra Wide Band, IEEE* 802.16 *WiMAX, Bluetooth*, та *Satellite*.

NetCracker – інструмент мережного проектування.

Продукт складається з ядра системи *NetCracker Framework*, який написаний на платформі *J2EE*, та великої кількості модулів призначених для моделювання та обслуговування КМ, а також містить базу даних з великим переліком мережного обладнання.

У *NetCracker* існує майстер створення конструктивних блоків обладнання, який дає можливість розробнику визначити нові дослідні зразки обладнання і використовувати їх для мережі, що проектується.

NetSim – програмне забезпечення моделювання мережі, призначене для використання в навчальному процесі. Воно містить модулі для збору інформації про топологію вже існуючої та проектування нової КМ. Підтримує наступні мережні технології: *aloha, slotted aloha, Ethernet, Token Ring, Token Bus, W Lan, X.25 Frame Relay, ATM, TCP (Tahoe, reno)*.

Програмно-інструментальні системи імітаційного моделювання КМ є складними програмними продуктами, ринкова вартість яких коливається в межах від 8000 до 45000 доларів. Крім, того математичні методи та алгоритми, які реалізовані в цих продуктах здебільшого є ноу-хау корпорацій, які їх розробляють.

Постановка задачі

Якість результатів моделювання в значній мірі залежить від точності та якості моделей конструктивних блоків. Також, на результати впливає наявність конструктивних блоків, моделюючих обладнання та протоколи, які застосовуються в КМ.

Отже, для якісного моделювання КМ програмно-інструментальний засіб повинен мати якісну та повну базу конструктивних блоків.

Створенням конструктивних блоків займаються, здебільшого, корпорації – власники програмно-інструментальних засобів. Для створення відсутніх блоків програмно-інструментальний засіб пропонує інтерфейс *API*.

Однак, слід відмітити, що створення таких блоків вимагає значних зусиль. Процес створення блока, що відповідає за роботу нового обладнання або протоколу, потребує поглибленого знання принципів побудови моделей і блоків, наданого *API*, принципів роботи і експлуатаційних параметрів описуваного обладнання або протоколу, а також навичок програмування.

Складність створення імітаційних моделей елементів комп'ютерних мереж визначається також швидкістю впровадження нових технологій в існуючі програмні системи моделювання. Наприклад, в жодному з досліджених продуктів, окрім одного з них (*OPNET Modeler Wireless Suite*) не була присутня технологія бездротової мережі на базі протоколу *IEEE* 802.16 (*WiMAX*).

Виникає актуальне завдання створення універсального середовища для проектування конструктивних елементів імітаційних моделей комп'ютерної мережі, що, в свою чергу, дає можливість значно спростити та прискорити впровадження нових мережних технологій.

Дослідження

Конструктивно таке середовище базується на інтерфейсі *API* програмно інструментального засобу і надає універсальну,

незалежну від програмно-інструментального засобу, платформу побудови моделей конструктивних елементів.

Вивчення та узагальнення фахової літератури дозволяє зробити узагальнюючий висновок, що найбільш ефективним в рамках створення платформи універсального середовища може бути застосована математична модель, що базується на мережах Петрі.

Мережа Петрі це орієнтовний граф з заданим початковим станом та має вузли двох типів: "позиція" і "перехід"[6,7].

Однак у класичній мережі Петрі відсутні часові чинники, тому для аналізу продуктивності елементів КМ застосовується розширенні часові (ЧМП) та стохастичні (СМП) мережі Петрі. У часовій мережі Петрі час спрацювання „переходу" відповідає детермінованому значенню, а в стохастичних мережах Петрі цей час асоціюється з імовірним експотенційно розподіленим значенням інтервалу [7].

Для опису паралельних процесів, які відбуваються в комп'ютерних мережах, стохастичні мережі Петрі є найбільш придатними, оскільки модель СМП є найбільш адекватною до реальної функціонуючої системи. Результатом цього є більш точні прогнозовані характеристики поведінки системи, що проектується [3].

Суттєвим є те, що мережі Петрі є також і графічним засобом моделювання. Як графічний засіб мережі Петрі можуть застосовуватись для наглядного відображення процесів які відбуваються в моделі системи подібно до блок-схем, структурних схем та мережних графіків [6].

Існує велика кількість моделей конструктивних елементів КМ: обладнання передавання даних, методів доступу, протоколів [10, 11].

Аналіз програмних засобів моделювання за допомогою мереж Петрі

Для створення якісної моделі конструктивного елементу КМ на основі мереж Петрі потрібно використовувати програмні засоби проектування.

В процесі роботи нами досліджено існуючі програмні продукти, які дають змогу та забезпечують роботу з моделями побудованими на основі мереж Петрі. Було розглянуто та виділено такі програмні продукти, які забезпечують повний цикл від створення та редагування моделі до отримання кількісних оцінок часу та продуктивності.

Аналіз та узагальнення існуючих програмно-інструментальних систем проводився за наступними критеріями:

типи мереж Петрі, з якими працює програмний продукт та виділені з них: стохастичні та часові мережі Петрі;

можливості програмних продуктів здійснювати простий і розширений аналіз продуктивності моделі та видавати числові характеристики;

наявність графічного редактора, за допомогою якого можливе створення й редагування графів мереж Петрі;

можливість анімації проходження маркерів по графу, що забезпечує доступну наочність роботи моделі;

наявність операційних систем, на платформах яких може функціонувати продукт;

забезпечена ліцензія на їх розповсюдження.

Узагальнені характеристики програмних продуктів за виділеними критеріями зведені нами в табл. 2.

Таблиця 2. Сучасні інструментально-програмні засоби для аналізу та проектування імітаційних моделей на базі мереж Петрі

№	Назва продукту	СМП	ЧМП	ПАП	РАП	ГР	АнМ	операційна система	ліцензія
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ExSpect	+	+	+	+	+	+	MS Windows	КЛ
2	F-net	+	+	+	+	+	+	MS Windows OS/2	КЛ
3	GreatSPN	+	+	-	+	+	+	SUN Linux	КЛ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	HiQPN-Tool	+	-	-	+	+	+	SUN	ВЛ
5	HPSim	+	+	+	-	+	+	MS Windows	ВЛ
6	INA	-	+	+	+	-	-	SUN Linux MS Windows	ВЛ
7	Petri Net Toolbox	+	+	+	+	+	+	MS Windows	КЛ
8	PROTOS	+	+	+	-	+	+	SUN HP-UX Linux MS Windows	КЛ
9	SPNP	+	-	-	+	+	-	MS Windows	КЛ
10	StpnPlay	+	+	+	-	+	-	MS Windows	ВЛ
11	TimeNET	+	+	+	+	+	+	SUN Linux	КЛ
12	WebSPN	+	-	-	+	+	+	Linux	ВЛ

Примітки:
СМП- стахастичні марежі Петрі
ЧМП - часові марежі Петрі
ПАП - простий аналіз продуктивності
РАП - розширений аналіз продуктивності
ГР - наявність графічного редактора
АнМ - можливість анімації маркерів марежі Петрі

КЛ - інструментально-програмниый засіб з комерційною ліцензією
ВЛ - інструментально-програмниый засіб з ліцензією вільного розповсюдження

Програмні продукти, які в найбільшій мірі відповідають визначеними нами критеріям розглянемо більш детально.

GreatSPN інструментально-програмний засіб розроблений в *Dipartimento di Informatica, Università di Torino* (Італія). Пакет дозволяє моделювати та робити аналіз продуктивності на базі мереж Петрі. Має комерційну ліцензію, але використання цього пакету можливе безкоштовно в освітніх та некомерційних цілях. *GreatSPN* складається з багатьох окремих програм-модулів які взаємодіють між собою для побудови і аналізу моделей на базі мереж Петрі. Можлива робота окремих модулів на різних станціях для підвищення продуктивності. *GreatSPN* має відкритий інтерфейс для розробки додаткових модулів. Цей продукт написано за допомогою мови програмування *C* а графічний інтерфейс базується на бібліотеці *Motif*. Графічний редактор пакету включає ієрархічне відображення моделі, дозволяє обертати та збільшувати модель на екрані, а також, виводити зображення моделі на принтер.

TimeNet це графічний інтерактивний інструментально-програмний засіб для моделювання за допомогою стохастичних мереж Петрі. Він був розроблений в *Institut für Technische Informatik* при *Technische Universität Berlin*, Германія, студентами, програмістами та магістрами під керівництвом проф. *Günter Hommel*. Розробка почалася в 1991 році. Прототипом цього інструменту, був пакет *DSPNexpress*. *TimeNet* написано за допомогою мови програмування *C++*, а графічний інтерфейс базується на бібліотеці *Motif*.

INA (*Integrated Net Analyzer*) був розроблений в *Humboldt-Universität zu Berlin* під керівництвом проф. *Peter. H. Starke*. у 2003 році. Програма написана за допомогою мови програмування *MODULA-2*. Цей продукт не має графічного редактора, але для створення та редагування графів мережі Петрі можна використовувати графічні редактори інших продуктів (наприклад, *PED: Hierarchical Petri Net Editor*). Для розширення можливостей пакета було впроваджено інтерфейс для зовнішніх модулів на базі мови програмування *tcl* (*inatcl/TkINA*).

Цікаву технологію пропонують розробники пакета ***WebSPN*** з *Univesity of Messina Mathematics' Department's research group* під керівництвом проф.

Antonio Puliafito (Італія). Пакет складається з двох часин. Клієнта – звичайного *web*-браузера з підтримкою *Java* 1.1, або спеціального клієнта написаного за допомогою *Java Development Kit* 1.1.*x*., та, сервера який знаходиться в публічному доступі в мережі *Internet.* За допомогою клієнта можливе створення та редагування графа мережі Петрі. Потім данні про структуру моделі потрапляють на сервер, де проводиться аналіз. На сервері завжди знаходиться найновіша розробка пакету, а користувача системи позбавлено необхідності інсталяції пакета на локальному комп'ютері.

HPSim розроблена *Henryk Anschuetz* у 2001 році, в процесі навчання і позиціонується як навчальний інструмент для студентів. Ця програма написана за допомогою *„C++ on Microsoft Visual studio".*

Висновки

Застосування визначеної системи критеріїв та результати аналізу наявних програмних продуктів дало можливість зробити наступні висновки по їх застосуванню в якості перспективних напрямків імітаційного моделювання комп'ютерних мереж:

– на сьогоднішній день існує великий клас програмних продуктів, принципово можливих для побудови і аналізу імітаційних моделей комп'ютерних мереж (продукти розроблені в країнах Західної Європи та США;

– існує потреба узагальнити процес створення моделей конструктивних елементів КМ. І в якості такого узагальненого середовища була запропонована математична модель, що базується на мережах Петрі;

– програмно-інструментальні системи для аналізу систем на базі мереж Петрі є складними системами з розвинутою системою допоміжних модулів для створення, редагування, аналізу моделей тощо; розробка нових, оригінальних вітчизняних продуктів на базі мереж Петрі для імітаційного моделювання комп'ютерних мереж є нагальним завданням розвитку національної науки.

Список літератури

1. *Вишневский В. М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

2. *Гладун А. Я., Ластовченко М. М.* Анализ производительности мультипроцессорных коммуникационных систем высокоскоростных систем связи. – Труды 2-ой Межд. Конф. UKRTELECOM'95, Одесса, 1995. – С. 73 – 78.

3. *Гриценко В. И., Гладун А.Я.* О применении временных и стохастических сетей Петри в задачах оценки производительности высокоскоростных сетей связи. Кибернетика и вычислительная техника. Сложные системы управления. – К., 1994. Вып. 103.

4. *Клейнрок Л.,* Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений, М.: Наука, 1970.

5. *Олифер Н. А., Олифер В. Г.* Средства анализа и оптимизации локальних сетей. Центр информационніх технологий, 1998 .– http://www.citforum.ru/nets /optimize/

6. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем, М.: Мир, 1984.

7. *Мурата Т.* Сети Петри: Свойства, анализ, приложения, ТИИЭР, Т. 77, №4, апрель 1989.

8. A Collection of Modelling and Simulation Resources http://www.idsia.ch/ ~andrea/simtools.html

9. Google directory Science, Software, Simulation http://www.google.com/Top/Science/Software/Simulation/.

10. *Kmollo M.* "Performance analysis using stochastic Petri nets", IEEE Trans, Computers, vol. C-31, no. 9, pp. 913 – 917, sep. 1982.

11. *Reinhard German.* Performance Analysis of Comunication Systems, New York, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.