

## САПР КОМБІНОВАНИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

*У роботі досліджено побудову системи автоматизованого проектування (САПР) комбінованих локальних мереж CANDY Frameworks, які складаються з офісної мережі та мережі для автоматизації будівель, створених із використанням численних відомих дротових та бездротових мережних стандартів. Технічні вимоги до проектування таких мереж досить часто мають супротивно-компромісний характер та стосуються здебільшого таких позицій, як продуктивність (QoS, Quality of Service), ефективне енергоспоживання та оптимальність з точки зору вартості та видатків мережного рішення.*

*This paper discusses architecture of a computer-aided design (CAD) of combined networks CANDY Frameworks for offices and building automation systems based on diverse wired and wireless network standards. The design requirements on these networks are often contradictory and often have to consider such factors as performance, energy and cost efficiency for a network solution altogether.*

### 1. ОБ'ЄКТ ПРОЕКТУВАННЯ – КОМБІНОВАНА МЕРЕЖА

Сучасне проектування дротових, бездротових та мобільних мереж можливе тільки на основі використання високоефективних моделей та методів, котрі описані у попередніх публікаціях [1 – 4]. Якість САПР бездротових мереж насамперед визначається математичними моделями, на яких вони базуються. Завдяки застосуванню адекватних моделей досягається підвищення продуктивності та поліпшення параметрів якості обслуговування мережі QoS (Quality of Service) при оптимізації її вартості, прибутковості та підвищенні точності рішень. Система CANDY (Computer Aided Network Design utility) Framework [1 – 4] є САПР комбінованих мереж у будівлях, які складаються з ділянок мереж офісної комунікації та мереж автоматизації типу: LAN Ethernet, WLAN IEEE802.11, WiMAX IEEE 802.16, WSN 802.15.4, LON (Local Operating Network), KNX (Konnex/ European Installation Bus) тощо (рис. 1). Окрім того, можлива побудова мереж автоматизації (HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning) на основі суто офісних мереж Ethernet. Ефективне та економічне проектування подібних мереж передбачає ретельно продуману інтеграцію засобів та сумісність інтерфейсів [1].

---

<sup>4</sup>Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

## 2. МЕРЕЖІ АВТОМАТИЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ

До складу комбінованих мереж можуть також входити різноманітні типи мереж автоматизації на основі так званих «польових шин» (fieldbus) із заданими властивостями [1, 5]. Зазначені мережі мають шинну топологію, їхня архітектура підтримує наступні рівні взаємодії моделі OSI:

Польовий рівень 1 (Field Level), який включає пристрої типу сенсорів и датчиків

Автоматизаційний рівень 2 (Automation Level), який включає контролери, мости та шлюзи

Рівень менеджменту (Management Level), або додатків, який поєднує програмні засоби конфігурації, менеджменту та моніторингу мереж автоматизації (часто на основі компонентних фреймворків OSGi, Web та Web Services).

Важливими тенденціями у розвитку мереж автоматизації є застосування локальних мереж Ethernet 802.3 для підтримки споріднених до них мереж типу PROFINET (рівні 1 та 2). Альтернативою до використання мереж Ethernet 802.3 є мережі Powerline Homeplug AV, AV2 (Universal Powerline Association, 2005; Standard P1901, 2010) із бітовою швидкістю 200 до 600 Мбіт/с. Досить часто використовується WLAN (у т.ч. новітній стандарт IEEE 802.11n), що дозволяє говорити про суцільну інтеграцію офісних мереж та мереж автоматизації.

## 3. БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

Інтерес до мереж автоматизації зростає щороку завдяки їхній високій вартості та відносній простоті інсталяції. Однією з найбільш перспективних галузей використання зазначених мереж WSN (Wireless Sensor Networks) є галузь автоматизації будівель та приміщень [4, 6, 7], наприклад, автоматизовані системи для вимірювання температури та контролю освітленості (temperature, illumination control). Потрібна кількість дротових сенсорів (wired sensors) для керування кліматом у такому інтелектуальному будинку (Intelligent House, див. рис. 1) може бути значною, що неминуче призводить до високих витрат праці на інсталяцію та, у деяких випадках, навіть до реконструкції будівлі із метою прокладання кабельних систем. Тому економічну та ефективну альтернативу дротовим сенсорам із використанням польових шин складають сучасні бездротові пікомережі WSN (Wireless Sensor Networks).

Високе енергоспоживання є недоліком для усіх бездротових сенсорів, незважаючи на наочні переваги їхнього використання [8, 9]. Зазначені мережі досить критичні із точки зору енергоресурсів, оскільки

заміна кількох сотень сенсорів, які вийшли з ладу, досить недешева збоку витрат та необхідної праці для обслуговуючого персоналу. Батареї мають обмежену енергоємність та розряджуються у залежності від потужності передавання та частоти відправлення повідомлень (рис. 2).

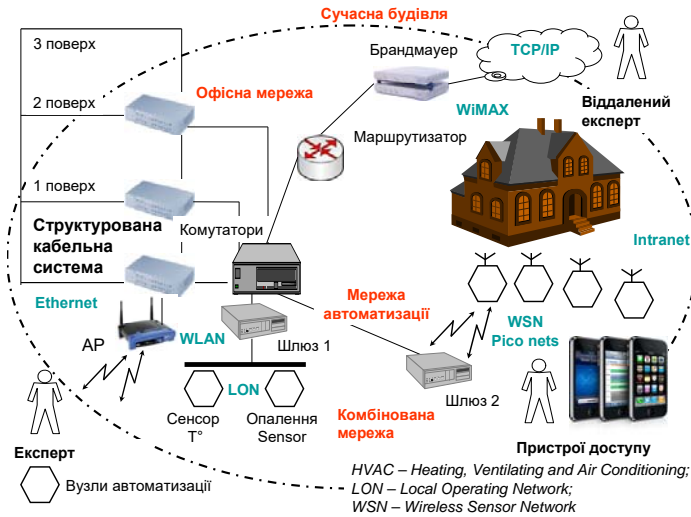


Рис. 1. Приклад комбінованої мережі у будівлях

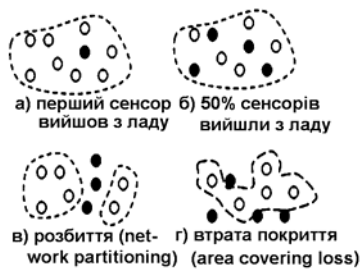


Рис. 2. Від перших відмов до часткової деградації функцій WSN

Тому надзвичайно важливою є проблема забезпечення ефективного енергоспоживання та енергоменеджменту (енергетична ефективність вузлів) мережі WSN. Термін служби WSN можна значно збільшити за рахунок використання пристроїв Energy Harvesting, що забезпечують відбір енергії з ефіру, сонячного випромінювання, електромагнітного смогу. Тим не менш, інтенсивність зовнішніх альтернативних джерел енергії непостійна та залежить від часу доби, ненасної по-

годи та рівня електромагнітного смогу. Тому створюються нові методи [7 – 9] доступу до середовища (шар MAC), оптимізуються протоколи маршрутизації (шар NWK) та безпеки (шар SEC). Також йдеться про ефективні додатки (шар APL), які агрегують дані та надають можливості швидкого передавання дуже коротких телеграм (1 мс) із малим Duty Cycle (0.1-1%). Однією з досліджуваних нами можливостей покращення WSN з точки зору енергоспоживання є оптимізація топології на рівні РНУ [13 – 15].

#### 4. АРХІТЕКТУРА САПР

Архітектуру САПР комбінованих мереж у будівлях, що складаються з мереж офісної комунікації та мереж автоматизації LAN Ethernet, WLAN IEEE802.11, WiMAX IEEE 802.16, WSN, LON, CAN тощо [16, 17] наведено на рис. 3. У складі зазначеної САПР CANDY Framework наявні наступні модулі, які реалізовані як вільно-інкапсульовані додатки на платформах Eclipse Rich Client Platform (ERCP plug-ins), JRE (Java Runtime Environment), Application Server, Middleware (Apache, Tomcat/JSP, Java Server Pages, EJB, Enterprise Java Beans), Web Services (Apache Axis 2), як це показано на рис. 3. Модулі системи мають наступне призначення [1, 4, 13, 15].

Модуль 1. Менеджер проекту CANDY Project Manager (CPM) використовується для описання маршруту проектування та є специфічним для системи CANDY. Він дозволяє проводити описання даних проекту та умов його створення. У програмі введені відповідні елементи для опису робочих потоків (Workflow) та їхнього контролю в рамках CANDY. Для опису алгоритму проектування використовують стандартні мови WPD (Workflow Process Definition Language) та PNML (Petri Net Markup Language) із наступними тегами: <Seq>, <Par>, <Switch>, <Tasks> [1].

Модуль 2. Редактор CANDY Network Editor (CNE) є графічним інструментом для проектування топології мереж і складається з двох частин: текстове введення даних проекту та графічне введення топології мережі (рис. 4). Вбудований редактор мовою NDML (Network Design Markup Language) [1, 10] дозволяє здійснювати введення топології мережі у графічному режимі, при цьому можуть бути визначені всі пристрої, зокрема ПК, шлюзи, маршрутизатори, комутатори, концентратори, точки доступу, базові станції, кабелі, СКС, вузли автоматизації, а також зв'язки між ними. Редактор NDML нотує списки компонентів та поєднань мережі у форматі NDML.

Модуль 3. CANDY Component Browser (CCB) дозволяє переглядати як бази даних мережевих продуктів та й сформовану БД проекту мережі. Модуль працює сумісно з модулем CANDY Bill Reporter

(СВР). База даних (БД) компонентів має функцію поновлення та містить актуальні дані про сучасні мережні продукти, компоненти та їхню вартість. Бази даних проектів містять записи про використані мережні продукти (sensor nodes, hot spots, gateways, routers, switches, hubs, cables, automation nodes), кабельні системи (coaxial cabling, UTP, STP, fiber glass, plugs, radio, patch panels, media converters), з вартості первинних робіт з встановлення, налагодження та про провайдерів Інтернет. Для вирішення задач проектування мереж зокрема використовуються методи, які описані у [18 – 23]. Для вирішення задач оптимізації продуктивності, енергетичної ефективності та вартості комбінованих локальних мереж використовуються наступні засоби [1, 4].

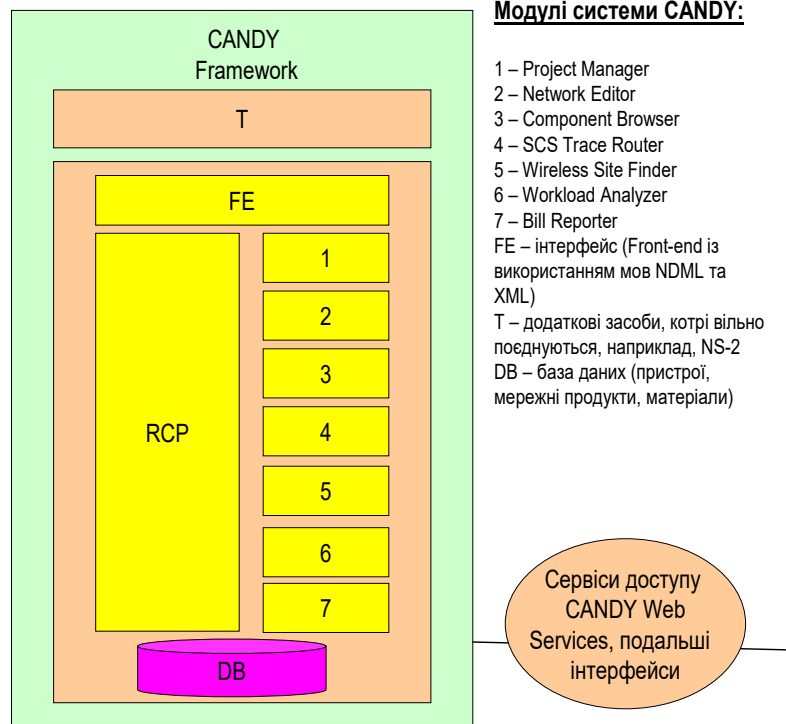


Рис. 3. Архітектура системи CANDY Framework

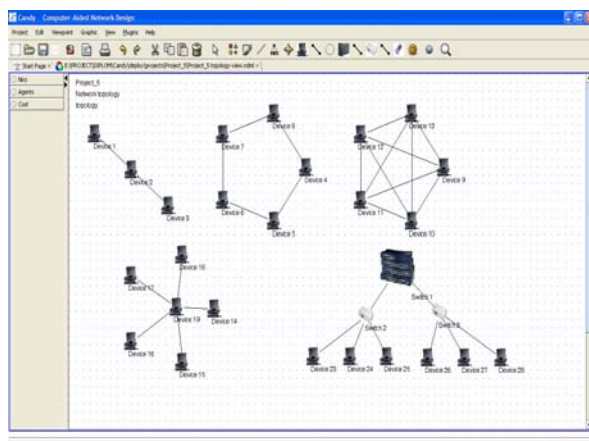


Рис. 4. Редактор топології CANDY Network Editor із підтримкою мови NDML

Модуль 4. CANDY Trace Router (CTR) застосовується для автоматичного трасування структурованої кабельної системи, СКС (Structured Cabling System), локальної мережі будівлі при заданих розташуваннях серверних приміщень (комутатори, шлюзи, маршрутизатори, кроспанелі) у специфічних форматах САПР (IFCXML для AutoCAD) [1, 11]. СКС для сучасних обчислювальних мереж складається з первинної, вторинної та третинної областей. CANDY Trace Router оптимізує проведення кабелю Ethernet LAN IEEE802.3 з урахуванням бездротових ділянок стандартів WLAN IEEE802.11. Проблема проведення кабельних систем для комп'ютерних мереж розв'язується із використанням дерева мінімального дерева Дайкстра та деяких подільших алгоритмів: алгоритму динамічного програмування Беллмана – Форда, так званих «жадібних» алгоритмів (greedy algorithms), хвильового алгоритму Лі, алгоритмів штрафних функцій.

Модуль 5. CANDY Wireless Site Finder (CSF) призначений для проектування та розрахунку бездротової частини, який підтримує функції імпорту форматів AutoCAD, Python CAD, NDML, IFCXML, PDF, які містять поверхові плани, географічні карти та плани місцевості, також підтримується експорт стандартних форматів XML, JPEG, BMP та PNG, комфортабельний менеджмент, видалення та коректування об'єктів та перешкод [1 – 4]. На рис. 5 зображено узагальнену модель бездротової мережі для використання у САПР. Реалізовані функції автоматичного розміщення точок доступу, базових станцій або сенсорів, розрахунку та візуалізації емпіричних моделей поширення Free Space Loss, Multi Wall, COST 231 Walfish Ikegami, Dominant Path

Prediction [12], Line of Sight Models, візуалізації послаблення, приймальної потужності, бігової швидкості та покриття на основі даних з необхідного розподілу частот та перешкод у специфічних форматах САПР (IFCXML [11] для AutoCAD).

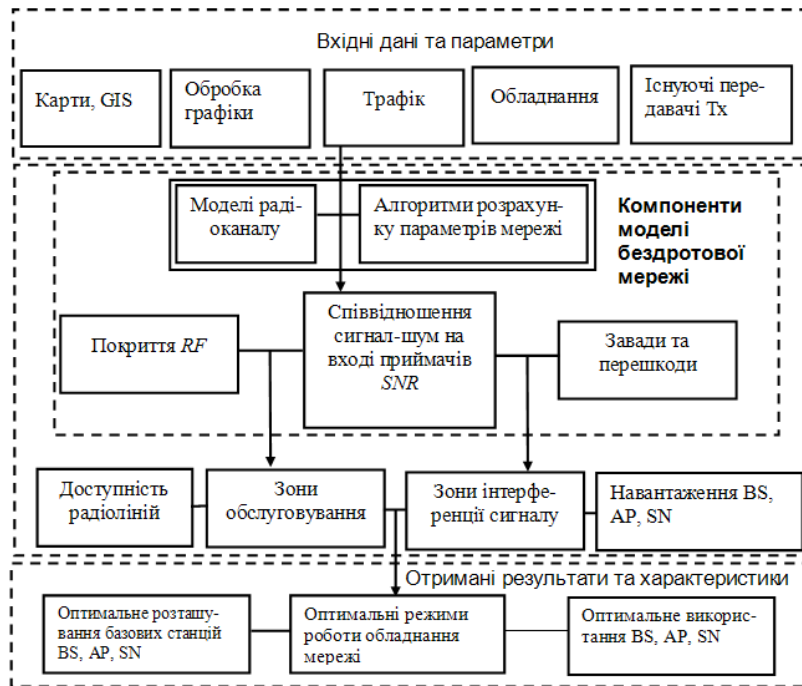
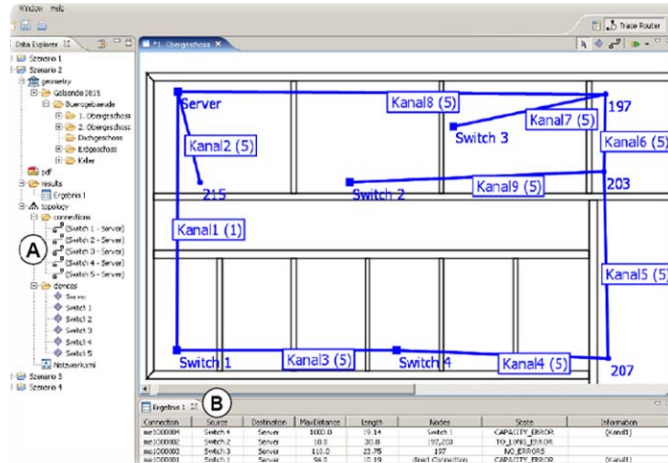


Рис. 5. Узагальнена модель бездротової мережі для використання у САПР

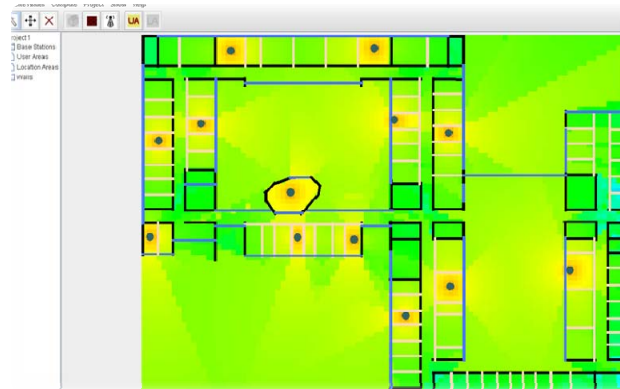
Модуль 6. Приклад з проектування засобами CANDY Framework наведений на рис. 6. Для здійснення подійного моделювання, багатоваріантного аналізу TCP/IP-інфраструктури за допомогою засобів мережного моделювання NS-2, OMNet++ тощо [22, 23] необхідний модуль CANDY Workload Analyser (CWE). Для визначення навантаження мережі використовуються методи експертних оцінок трафіку та алгоритм обходу дерева для визначеного проекту мережі, поданого у вигляді СКС.

Модуль 7. CANDY Bill Reporter (CBR) як засіб розрахунку вартості мережі базується на даних з використаних компонентів, про СКС та мережні продукти, які містяться у БД (див. CANDY Component Browser, CCB). CBR дозволяє розраховувати динамічні цільові функції

(ЦФ) вартості мережі  $K(t)$  для визначеного періоду експлуатації, надавати прогнозу із поточної вартості та рентабельності модифікації. Так, для звичайних офісних локальних мереж (Ethernet, WLAN) та дротових мереж автоматизації (LON, KNX) найважливішим є дотримання умов мінімуму вартості при забезпеченні обмежень з якості обслуговування (QoS).



а) інфраструктура: трасування СКС для Ethernet



б) проектування бездротової частини: послаблення сере-

Рис. 6. Проектування комбінованих мереж у системі CANDY Framework



## 5. ВИСНОВКИ

Технічні вимоги до проектування таких мереж досить часто мають супротивно-компромісний характер та стосуються здебільшого таких позицій, як продуктивність (QoS, Quality of Service), ефективне енергоспоживання та оптимальність з точки зору вартості та видатків мережного рішення. Для сучасних комбінованих мереж, які включають WSN, надзвичайно важливою є також проблема забезпечення ефективного енергоспоживання та енергоменеджменту (енергетична ефективність вузлів).

Тому цільова функція загальної вартості мережі має вигляд:

$$K = K(N_1, N_2, QoS(DR), L, t), \quad (1)$$

де  $N_1$  – оптимальна кількість введених у дію мережних пристроїв (комутаторів, маршрутизаторів тощо),  $N_2$  – оптимальна кількість введених у дію бездротових точок доступу (wireless access points) та бездротових сенсорних вузлів (wireless sensor nodes) при оптимальному розташуванні WLAN, WSN (Wireless Sensor Networks), яке отримане за допомогою методів моделювання фізичного рівня,  $QoS, DR$  – прийнятний рівень якості обслуговування QoS, насамперед, швидкість передавання даних (data rate),  $L$  – оптимальна суцільна довжина СКС. СВР використовує константи конфігурації  $\{a, \alpha, \varphi, \gamma, \eta, \theta, \mu, w, z\}$ , визначені у [1], які виражають, зокрема, коефіцієнт амортизації мережі або окремих мережних компонентів.

1. Luntovskyy, Andriy. *Integration Concepts for Computer-Aided Design Tools for Wired and Wireless Local-Area Networks* // Монографія. – Shaker Verlag Aachen, 2008. – 196 p. (ISBN 978-3-8322-6968-5, англійською мовою). 2. Лунтовський А.О. *Технології розподілених програмних додатків* // Монографія. – К.: ДУІКТ, 2010. – 474 с. (ISBN 978-966-2970-51-7). 3. Лунтовський А.О., Мельник І.В. *Проектування та дослідження комп'ютерних мереж* // Навч. посібник. – К.: ВМУРОЛ, 2010. – 362 с. (ISBN 978-966-388-315-1). 4. Лунтовський А.О. *Основы проектирования и оптимизации беспроводных сетей* // Монографія. – К.: ДУІКТ, 2010. – 202 с. (ISBN 978-966-2970-52-4, російською мовою). 5. N.P.Mahalik. *Fieldbus Technology* // Монографія. – Springer Berlin-Heidelberg, 2010, 595 p. (ISBN 978-3642072840, англійською мовою). 6. H. Karl, A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks* // Монографія. – Wiley, 2005 (англійською мовою). 7. B. Otis, J. Rabaey. *Ultra-low Power Wireless Technologies for Sensor Networks* // Монографія. – Springer, 2007 (англійською мовою). 8. ZigBee WPAN (Online 2010): <http://www.ieee802.org/15/>. 9. Self-powered Wireless Sensors EnOcean (Online 2010): <http://www.enocean.com/>. 10. NDML (Online 2010): <http://www.rn.inf.tu-dresden.de/>. 11. IAI IFCXML (Online 2010): <http://www.iai-tech.org/>. 12. AWE Communications (Online 2010): <http://www.awecom-munications.com/>. 13. A.Luntovskyy, S.Uhlig, D.Guetter, *Cross-Layered Wireless*

*Network Planning and Modeling Methods and Tools, 5th IEEE and ACM ICWMC, June 2009, Leipzig, pp.1417-1421 (англійською мовою).* 14. A.Luntovskyy, V.Vasyutynskyy, *On Computer-Aided Design of Energy Efficient Wireless Sensor Networks, IEEE and ACM supported IWCMC 2010, Caen, France, June 28-July 2, 2010, ID: 1569263815, pp. 311-315 (англійською мовою).* 15. A.Luntovskyy, V.Vasyutynskyy, K.Kabitzsch, *Propagation Modeling and Placement Algorithms for Wireless Sensor Networks, IEEE ISIE 2010, Bari, Italy, July 4-7, 2010, ID: BD-011827 (англійською мовою).* 16. Семенко А.І. Сучасний стан створення безпроводних телекомунікаційних систем // Вісник національного університету «Львівська політехніка», №645 «Радіоелектроніка та телекомунікації», 2009, – С.56-67. 17. Семенко А.І., Царина Д.О. LTE – технологія завтрашнього дня // Зв'язок, №4(80), 2010, С. 34-39 (російською мовою). 18. Семенко А.І. Проектування лінії радіорелейного зв'язку з автоматичним регулюванням потужності передавача // Зв'язок, №4(64),2006, – С.45-48. 19. Семенко А.І. Особливості проектування телекомунікаційних систем з широко-смуговим шумоподібним сигналом // Вісник ДУІКТ, Спецвипуск. 2007 р., – С.108-114. 20. Семенко А.І. Автоматичне регулювання потужності передавачів в лінії радіорелейного зв'язку // Вісник ДУІКТ, том 3, № 3-4, 2005, – С.50-51. 21. Семенко А.І., Порошин І.А., Симаков В.А., Паламарчук А.А. Автоматическая стабилизация мощности немодулированных генераторов СВЧ. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с. 22. OMNeT++ (Online 2011): <http://www.omnetpp.org/>. 23. Network Simulator NS-2 (Online 2011): <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.