

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ HDL-МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІОПТИМАЛЬНИХ І РЕГУЛЯРНИХ ТОПОЛОГІЙ МЕРЕЖ НА КРИСТАЛІ

Національний технічний університет України «КПІ»

*Проведено аналіз квазіоптимальних і регулярних топологій мереж на кристалі шляхом їх синтезу та HDL-моделювання. Результати моделювання та порівняння ресурсовитрат показали ефективність квазіоптимальних топологій при проектуванні мереж із кількістю вузлів і з'єднувальних ліній, що не можуть бути досягнуті при використанні типових регулярних топологій.*

### Вступ

У зв'язку із стрімким розвитком електроніки, мережі на кристалі (МНК) отримують широкого розповсюдження [1]. МНК – це множина обчислювальних модулів, об'єднаних загальною підсистемою зв'язку, яка складається з роутерів і з'єднань між ними. Підсистема зв'язку МНК займає значні ресурси кристала і є енергоємною, що на тлі все зростаючих вимог до ресурсоемності і швидкості передачі даних мережею обумовлює необхідність пошуку оптимальних рішень її побудови [1, 2].

Згідно з [3] найбільш коштовними із ресурсів при реалізації МНК є фізичні канали передачі, буферна пам'ять а також перемикальна частина роутерів. Тому важливою характеристикою МНК є її топологія, котра в свою чергу значною мірою визначає структуру роутерів, алгоритм маршрутизації і витрати з'єднувальних ресурсів. У загальному випадку топологія МНК являє собою неорієнтований зв'язний граф, що складається з вершин (роутерів) і ребер (фізичних ліній зв'язку між ними) і фактично описує, яким чином роутери з'єднані між собою і скільки ліній зв'язку задіяні для цього [1].

Наразі найбільшого поширення отримали регулярні топології, такі як *mesh*, *torus*, *hypercube*, *spidergon*, *chordal ring*, *butterfly fat tree (BFT)* та деревоподібна [1, 2]. Це обумовлено тим, що регулярні топології мають просту структуру з'єднань, роутерів та наперед визначені алгоритми маршрутизації. Однак їм притаманне обмеження в кількості вузлів, до яких вони можуть бути застосовані. Так, наприклад, топології *mesh* і *torus* ефективні для мереж квадратної форми з кількістю вузлів, що дорівнюють натуральним числам у степені 2 (4, 9, 16, 25, ...), а, наприклад, створити мережу з 11 роутерів взагалі не уявляється мож-

ливим. Також регулярні топології мають фіксовану кількість з'єднань і тому у розробника немає належних інструментів з регулювання ресурсних витрат. Таким чином, існує необхідність в нових, більш гнучких підходах, здатних запропонувати ефективні топології для мереж із довільною кількістю вузлів і конфігурованою кількістю з'єднувальних ліній.

### Квазіоптимальні топології МНК як альтернатива регулярним

В [4] запропоновано новий підхід, заснований на використанні при побудові МНК нерегулярних топологій, оптимізованих за критерієм мінімізації середньої відстані між роутерами і кількості з'єднань при заданих діаметрі і максимальній кількості портів роутерів. Запропоноване рішення дає змогу синтезувати низку квазіоптимальних (інакше – псевдооптимальних, оптимальних за деякими критеріями) топологій МНК з заданим числом вузлів і конфігурованою кількістю з'єднувальних ліній. Дані топології належать до нерегулярних мереж. Їх недоліком є відсутність регулярних алгоритмів маршрутизації, що призводить до підвищення ймовірності дедлоків. При цьому маршрутизація реалізується за допомогою таблиць маршрутизації, які потребують додаткових ресурсів пам'яті ( $N$  комірок розміром  $\lfloor \log_2 (St + 1) \rfloor$  для кожного роутера), що є несуттєвими у порівнянні із витратами на буфери віртуальних каналів. Крім того, спрощуються апаратні затрати на реалізацію блоку маршрутизації (процедура маршрутизації зводиться до простої вибірки відповідного номеру наступного порту маршрутизатора в залежності від вузла призначення). Підвищення ймовірності дедлоків частково компенсується використанням *wormhole* роутерів з віртуаль-

ними каналами і адаптивними методами формування таблиць маршрутизації. Зокрема, в [5] застано алгоритм пошуку найкоротшого шляху із урахуванням завантаження проміжних роутерів.

### Комп'ютерне моделювання щодо порівняння пропускної здатності

Для оцінки ефективності запропонованих квазіоптимальних топологій і порівняння їх із типовими регулярними топологіями за швидкодією, затратами логіки, регістрів, блоків пам'яті та з'єднувальних ресурсів необхідне проведення моделювання.

Існує два принципово різних підходи до моделювання МнК. Перший належить до симуляції і полягає в тестуванні моделі розповсюдження даних в МнК. Так, в [6] представлена залежність швидкості паралельної обробки даних від параметрів МнК і аналізується вплив на неї затримок при передачі даних із збільшенням розмірності мережі. У [7] передача даних в МнК представлена як низка паралельно виконуваних процесів, описаних мовою С. Недоліком зазначених підходів є використання ними спрощеної мережевої моделі без урахування багатьох параметрів мережі; крім того, вони не пристосовані до моделювання МнК із квазіоптимальною топологією.

В [8] розроблено високорівневу Java модель МнК, що надає змогу з високою точністю проводити симуляцію мереж як із регулярною, так і з квазіоптимальною топологією. Хоча дана модель дає можливість проводити моделювання за порівняно невеликі проміжки часу, вона не може бути синтезованою у апаратурі і не дає можливості оцінити ресурсні витрати.

Для більш точного моделювання і оцінки ресурсовитрат використовується другий підхід – емуляція роботи МнК, описаних та синтезованих за допомогою мов опису апаратури (наприклад, *Verilog* або *VHDL*) в середовищі спеціалізованих програмних засобів моделювання апаратури (наприклад, у пакеті *Modelsim*). Даний підхід дає можливість отримати результати максимально наближені до реальної системи, хоча вимагає великих витрат часу на моделювання та синтез. Крім того, оскільки фактично відбувається синтез МнК в апаратурі, існує можливість оцінки ресурсних витрат.

У праці [9] використовується *Verilog* бібліотека з відкритим вихідним кодом *Netmaker* [10]. З її допомогою, шляхом модифікації модуля побудови зв'язків між вузлами і модуля маршрутизації, згенеровано мережі з топологіями mesh, torus, деревоподібною та низка МнК з квазіоптимальними топологіями з кількістю з'єднувальних ліній від 8 до 18 для 9-ти вузлів. Проведено моделювання МнК при різних значеннях навантаження, визначено пропускну здатність МнК з різними топологіями та відповідні показники транспортної затримки.

За результатами моделювання у [9] сформульовано такі висновки: в деяких випадках регулярні топології дають кращу пропускну здатність, ніж квазіоптимальні за рахунок регулярної структури, а відтак – простих алгоритмів маршрутизації та меншої вірогідності дедлоків. Однак, при створенні МнК із кількістю вузлів, яка не забезпечується регулярною топологією, зазвичай застосовують топологію з більшою кількістю роутерів, частина з яких залишається непід'єднаною до обчислювального вузла. І навіть коли існують регулярні топології для необхідної кількості вузлів, у більшості випадків розробники обмежені невеликою кількістю альтернатив можливих рішень і обирається топологія, що є надлишковою. Використання ж квазіоптимальних топологій дає можливість будувати МнК із заданою кількістю вузлів і заданим числом з'єднувальних ліній, що дає змогу гнучко регулювати витрати ресурсів відносно необхідної пропускної спроможності.

У бібліотеці *Netmaker* використовуються *wormhole* роутери з віртуальними каналами (рис. 1 а) [3, 10], однак є потреба в моделюванні простих мереж на основі класичних *wormhole* роутерів без віртуальних каналів (рис. 1 б) [11]. Це вимагає повної переробки *IP*-ядра роутера. Крім того, є потреба в якісній оцінці витрат з'єднувальних ресурсів, логіки та регістрів на реалізацію різних топологій. На жаль, бібліотека *Netmaker* орієнтована на проведення моделювання, синтез, тому оцінка ресурсовитрат є ускладненою.

Для проведення моделювання було застосовано роутер, розроблений та описаний у [12]. Даний маршрутизатор можна віднести до *wormhole* роутерів зі спрощеною структурою та *FCFS* (*First Come First Serve*) арбітражем,

оскільки декілька черг на вхідних портах роутера замінені однією спільною, а роль комутаційної частини роутера відіграють вхідний та вихідний блоки (рис. 2 а, б). Роутер легко синтезується і добре підходить для проведення моделювання. На базі спрощеного роутера згенеровано мережі з топологіями *mesh*, *torus*, деревоподібною та низка МнК з квазіоптимальними топологіями з кількістю з'єднувальних ліній від 8 до 18 для 9-ти вузлів при різній інтенсивності введення пакетів в мережі та проведено їх моделювання в середовищі *Modelsim*. На рис. 3а наведено графіки залежностей між транспортною затримкою та навантаженням на мережу.

Результати моделювання корелюють із тими, що були отримані при моделюванні мереж на базі *wormhole* роутерів з віртуальними каналами *Netmaker*: пропускна здатність мереж зростає зі збільшенням кількості з'єднувальних ліній [9]. Однак поріг насичення мереж знаходиться в межах 0.04 – 0.1, що приблизно у 5 разів менше, ніж при моделюванні із *Netmaker*. Це пояснюється спрощеною структурою роутерів та послідовним round-robin алгоритмом обслуговування вхідних портів [12]. Виявилася ще одна особливість – моделювання мереж на основі спрощених роутерів показало, що квазіоптимальні топології дають кращу пропускну спроможність, ніж регулярні із тією же самою кількістю з'єднувальних ліній, хоча при моделюванні із *Netmaker* топології *mesh* і *torus*, навпаки, показали кращу пропускну спроможність, ніж відповідні їм квазіоптимальні [9]. Це пояснюється тим, що в умовах спрощеної структури і відсутності механізму віртуальних каналів та паралельного обслуговування портів, менша ефективність алгоритмів маршрутизації компенсується меншою середньою відстанню між роутерами.

### Комп'ютерне моделювання щодо порівняння ресурсовитрат

Витрати ресурсів на реалізацію підсистеми зв'язку МнК оцінюються трьома параметрами – з'єднувальними ресурсами *FPGA* кристалу (кількістю локальних, блочних, безпосередніх, *C4*, *C12*, *R4*, *R20* з'єднань, а також перемичок *R20/C12* та глобальних і локальних ліній тактування), витратами логіки та витратами регістрів.

Оцінка ресурсовитрат на побудову досліджуваних топологій для 9 вузлів проводилась в середовищі *Altera Quartus II*. Було синтезовано роутери, з'єднання між ними, а також інтерфейсні порти для підключення обчислювальних *IP*-ядер. Тобто, сама підсистема зв'язку представляється «чорним ящиком», до якого можна підключити обчислювальні ядра, при цьому вона забезпечить їх взаємодію. Результати синтезу підсистем зв'язку МнК з топологіями *mesh*, *torus*, деревоподібною та з квазіоптимальними топологіями з кількістю з'єднувальних ліній від 8 до 18 для 9-ти вузлів наведено в табл. 1 (квазіоптимальна топологія з 18 з'єднаннями ідентична *torus* і вимагає на реалізацію ті ж самі ресурси). Ще один важливий параметр – витрати комірок пам'яті. Вони однакові для всіх топологій і складають 42624 *block memory bits*, оскільки застосовується однакова кількість роутерів із глибиною черги 128 флітів.

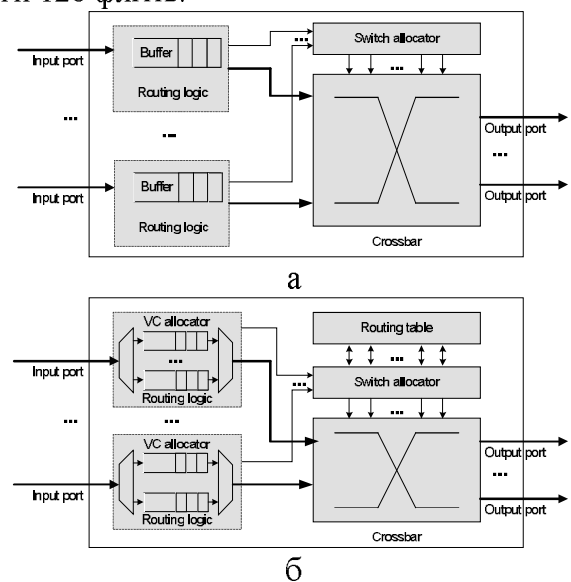


Рис. 1. Схема *wormhole* роутера з віртуальними каналами (а) та без віртуальних каналів (б)

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:

1. Збільшення кількості з'єднань суттєво впливає на ресурсовитрати при синтезі МнК; наприклад, різниця у витратах ресурсів на топологію *torus* (максимальні) та квазіоптимальну із 8 з'єднаннями (мінімальні) складає приблизно 21%. Це пояснюється тим, що незадіяні вихідні порти роутерів не синтезуються, а вхідні синтезуються частково (рис. 2 б).

2. Ресурсовитрати на топології із однаковою кількістю з'єднань відрізняються

незначним чином, що свідчить про те, що надлишкові витрати на таблиці маршрутизації в квазіоптимальних топологіях компенсують-

ся витратами на блок маршрутизації у відповідних їм регулярних топологіях.

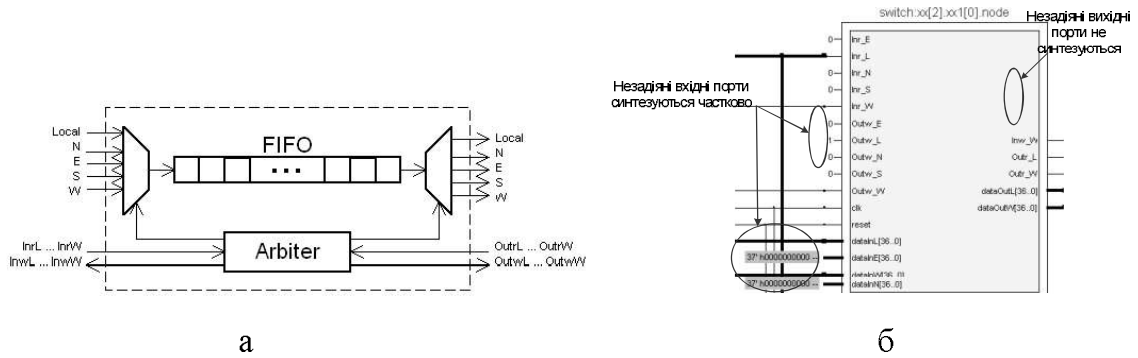
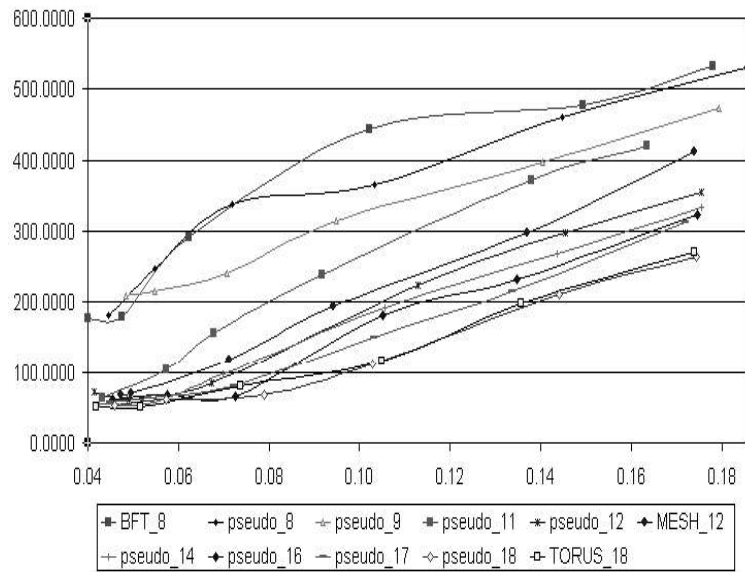
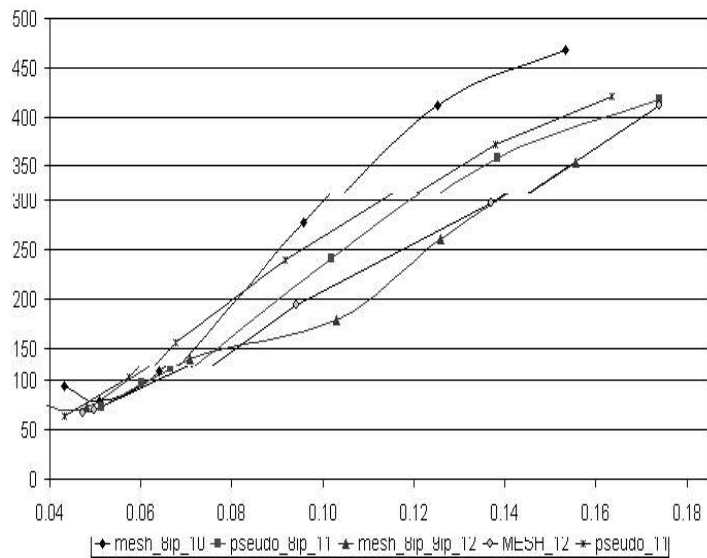


Рис. 2. Спрощений роутер МНК: а) схема; б) RTL-зображення



а



б

Рис. 3. Результати моделювання регулярних і квазіоптимальних топологій МНК: а) для регулярних топологій МНК; б) для квазіоптимальних топологій МНК

Результати синтезу регулярних і квазіоптимальних топологій МНК з 9 IP

Topol. Param.	8 tree	8 pseudo	9 pseudo	11 pseudo	12 mesh	12 pseudo	14 pseudo	16 pseudo	18 torus	Total
Logic utilization	3027	3009	3093	3257	3322	3383	3467	3607	3733	64000
Total registers	2145	2143	2224	2334	2409	2411	2518	2679	2750	64000
Local interconnects	1776	1785	1812	1848	1905	1917	1951	2017	2042	85200
Block interconnects	4669	4545	4719	5090	5218	5241	5457	5719	5991	354748
Direct links	805	815	841	824	864	802	824	785	894	354748
C4 interconnects	2696	2949	2884	3128	3189	3047	3153	3559	3797	237000
C12 interconnects	806	743	871	787	844	863	856	853	874	13114
R4 interconnects	4311	4261	4321	4690	4779	4820	5303	5514	5513	400724
R20 interconnects	666	631	640	676	662	674	691	709	731	14058
R20/C12 interconnect drivers	1128	1030	1168	1119	1162	1194	1204	1219	1261	22436
Global clocks	2	2	2	2	2	2	2	2	2	16
Spine clocks	10	14	10	10	12	6	10	10	10	416

### Моделювання топологій МНК з 8 вузлами

Важливою проблемою є створення МНК із кількістю обчислювальних вузлів, що не забезпечується регулярною топологією (наприклад, 8). В таких випадках, зазвичай, застосовують топологію з більшою кількістю роутерів, частина з яких залишається непід'єднаною до обчислювального вузла, або, якщо це можливо, регулярну топологію із менш оптимальною геометрією з'єднань. Так, задача синтезу МНК за допомогою регулярної топології *mesh* може бути вирішена застосуванням прямокутної *mesh* 2x4 (кількість з'єднань – 10, діаметр – 4 хопи, середня відстань – 2 хопи) або квадратної *mesh* 3x3 із одним допоміжним роутером, непідключеним до обчислювального ядра (кількість з'єднань – 12, діаметр – 4 хопи, середня відстань – 2 хопи). Цій задачі відповідає також квазіоптимальна топологія з 8 вузлами (кількість з'єднань – 11, діаметр – 2 хопи, середня відстань – 1.6 хопи).

Отримані результати моделювання залежностей між транспортною затримкою та навантаженням на мережу зазначених топологій наведено на рис. 3 б. Вони корелюють із результатами, отриманими автором у [9] – квазіоптимальна топологія показала на 20% кращу

пропускну здатність, ніж прямокутна *mesh* 2x4. На 37% краща пропускну здатність квадратної *mesh* 3x3 пояснюється більшою кількістю з'єднувальних ліній та застосуванням більш ефективного алгоритму маршрутизації, однак цього досягнуто за рахунок надмірних ресурсовитрат на додатковий роутер. За результатами синтезу даних топологій (табл. 2) ресурсовитрати на квазіоптимальну топологію виявились приблизно на 9% та 13% меншими, ніж на прямокутну *mesh* 2x4 та квадратну *mesh* 3x3 відповідно.

### Висновки

Таким чином регулярні топології для побудови МНК є не завжди оптимальними з точки зору вимог до пропускну здатності і витрат ресурсів у випадках, коли є потреба в побудові МНК із кількістю роутерів, що не відповідає вимогам цих топологій або коли необхідна пропускну здатність значним чином відрізняється від тієї, яку забезпечує певна регулярна топологія. Запропоновані нами квазіоптимальні топології дають змогу заповнити вищевказану прогалину і забезпечують економію ресурсів, оскільки дають можливість будувати МНК із заданою кількістю вузлів і заданим числом з'єднувальних ліній. Це дає змогу гнучко регулювати витрати ресурсів відносно необхідної для МНК пропускну спроможності.

## Результати синтезу регулярних і квазіоптимальних топологій МНК з 8 IP

Topol. Param.\	11 lines 8ip pseudo	10 lines 8ip mesh 4x2	12 lines 8ip (9ip)	Total
Logic utilization	2918	3096	3345	64000
Total registers	2135	2257	2375	64000
Local interconnects	1692	1695	1881	85200
Block interconnects	4560	4997	5198	354748
Direct links	681	669	835	354748
C4 interconnects	2792	2945	2952	237000
C12 interconnects	594	644	692	13114
R4 interconnects	4123	4740	4587	400724
R20 interconnects	646	606	614	14058
R20/C12 interconnect drivers	934	945	999	22436
Global clocks	2	2	2	16
Spine clocks	8	12	10	416

**Список літератури:**

1. Axel J. Networks on Chip / J. Axel, T. Hannu // Kluwer Academic Publishers. – Dordrecht, 2003. – 303 p.
2. Dally W. Principles and practices of interconnection networks / W. Dally, B. Towles. – Elsevier, 2004. – 550 p.
3. Dally W. Deadlock-free adaptive routing in Multicomputer Networks using virtual channels / W. Dally, H. Aoki // IEEE Trans. on Parallel Distrib. Syst. – 1993. – Vol. 4. – No. 4. – P. 466-475.
4. Романов А.Ю. Оптимизация топологий сетей на кристалле / А.Ю. Романов // Вісник НТУ "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХП", 2011. – № 36. – С. 149-155.
5. Романов А.Ю. Адаптивный алгоритм маршрутизации в псевдооптимальных сетях на кристалле / А.Ю. Романов // ІМА 2012: Інформатика, Математика, Автоматика. Матеріали науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ, 2012. – С. 214.
6. Xiaowen Ch. Speedup Analysis of Data-parallel Applications on Multi-core NoCs/ Ch. Xiaowen, L. Zhonghai, J. Axel, Ch. Shuming // 8th IEEE Conference on ASIC (ASICON). – Changsha, China, 2009. – P. 105-108.
7. Mingsong Lv. RTNoC: A Simulation Tool

for Real-Time Communication Scheduling on Networks-on-Chips. / Lv. Mingsong, G. Ying, G. Nan, D. Qingxu // International Conference on Computer Science and Software Engineering. – 2008. – Vol. 4. – P. 102-105.

8. Романов А.Ю. Разработка программного симулятора сетей на кристалле / А.Ю. Романов, Д.А. Феськов // Электроника и связь: Электроника и нанотехнологии. – Киев: НТУУ «КПИ», 2011. – Т. 4(63). – С. 48-52.

9. Romanov O. The Comparative Analysis of the Efficiency of Regular and Pseudo-optimal Topologies of Networks-on-Chip Based on Netmaker / O. Romanov, O. Lysenko // Advances and Challenges in Embedded Computing. Proceedings. – Montenegro, Bar: 2012. – P. 13-16.

10. Fully-synthesizable parameterized NoC implementations library: Netmaker, <http://www-dyn.cl.cam.ac.uk/~rdm34/wiki>.

11. Moraes F. HERMES: an Infrastructure for Low Area Overhead Packet-switching Networks on Chip / F. Moraes, N. Calazans, A. Mello // Integration, the VLSI Journal. – 2004. – Vol. 38. – No. 1. – P. 69-93.

12. Лисенко О.М. Ресурсоефективный роутер для багатопроекторної мережі на чипі / О.М. Лисенко, О.Ю. Романов // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 17. – С. 86-92.