

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Шпіцер Андрій Стефанович

УДК 004.724:004.27

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИНАМІЧНИХ ТОПОЛОГІЙ
В МЕРЕЖАХ НА КРИСТАЛІ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дунець Роман Богданович
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри «Спеціалізовані комп'ютерні системи».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Николайчук Ярослав Миколайович
Тернопільський національний університет,
завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
м. Тернопіль;

кандидат технічних наук, доцент
Кльоц Юрій Павлович
Хмельницький національний університет,
доцент кафедри системного програмування,
м. Хмельницький.

Захист відбудеться «25» жовтня 2013 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 при Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Ст. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «24» вересня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., проф.

Луцик Я.Т.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Тривалий час підвищення ефективності роботи комп'ютерних систем та компонент проводилося в основному шляхом удосконалення технологій виробництва елементної бази, зокрема транзисторів. Із кожним роком мінімізація дозволяла підвищувати тактову частоту елементів, нарощувати кількість транзисторів на кристалі, а отже збільшувати продуктивність відповідно до закону Мура. Проте з наближенням технології виробництва до молекулярного рівня збільшення продуктивності цим шляхом практично зупинилося. Тому протягом останніх десятиліть почали стрімко розвиватися методи побудови комп'ютерних систем, що базуються на розпаралелюванні обчислень. У склад комп'ютерних систем для підвищення продуктивності почали включати спеціалізовані пристрої (перемножувачі, кодери, відеоадаптери). Більшість процесорів стали багатоядерними. Однак збільшення кількості таких пристроїв, у тому числі ядер процесорів, на практиці не перевищує 8-10, оскільки затрати часу на обмін інформацією між ними через системні шини суттєво зупиняють подальший ріст продуктивності.

В останні роки з метою підвищення ефективності комп'ютерних систем з'явилась тенденція до об'єднання їх компонентів, що апаратно реалізуються в одному кристалі, в мережі, які отримали назву мережі на кристалі (МНК). Особливістю таких МНК є організація обміну інформацією між елементами мережі за допомогою пакетів даних, аналогічно обміну пакетами у глобальних та локальних комп'ютерних мережах. Власне передачу пакетів даних забезпечують маршрутизатори комунікаційного середовища МНК, звільняючи при цьому від цієї роботи самі пристрої. Крім того, кількість елементів мережі в МНК обмежується лише технологічними можливостями їх реалізації в межах одного кристалу.

Дослідженнями МНК займаються провідні компанії та університети світу. Так, у 2007 році Intel розробила експериментальний процесор із 80-ма ядрами і продуктивністю 1 терафлопс при енергоспоживанні всього 62 Вт. У 2010 був представлений 48-ядерний «Хмарний комп'ютер на кристалі» (Single chip cloud computer). У квітні цього року була опублікована робота групи вчених МІТ, які створили прототип 16-ядерного процесора, в якому були застосовані специфічні для МНК-систем оптимізації - віртуальний обхід (virtual bypassing) і сигнали з малою амплітудою (low-swing signaling). Ці технології дозволили наблизитися до теоретичних меж пропускну здатності і затримок та помітно знизити енергоспоживання.

Чималий вклад у розвиток теорії побудови систем та мереж на кристалі зробили відомі українські та зарубіжні вчені В.С. Глухов, Р.Б. Дунець, А.О. Мельник, Я.М. Николайчук, В.П. Тарасенко, В.С. Харченко, Wael Badawy, Graham Jullien, Pieter Hooijmans, Bill Krenik.

Основну увагу в їх працях приділено створенню методів та засобів побудови власне високоефективних спеціалізованих пристроїв, проте значно менше уваги було надано методам маршрутизації пакетів у мережах на кристалі. Для обміну

пакетами даних застосовувались відомі алгоритми маршрутизації, які враховували стани завантаженості лише сусідніх елементів і фактично переносили логіку роботи маршрутизаторів глобальних чи локальних мереж на МНК. У випадку, коли кількість елементів МНК перевищує півтора десятка, система комутації пакетів починає зменшувати загальну продуктивність МНК за рахунок втрат часу на переміщення пакетів у мережі. З огляду на це актуальною є наукова задача створення ефективних методів маршрутизації пакетів у мережах на кристалі з матричною топологією.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем. У дисертаційній роботі розробка методів підвищення ефективності динамічних топологій у мережах на кристалі виконувалася в межах науково-дослідницької роботи «Вдосконалення теорії проектування NoC з матричною топологією» (номер державної реєстрації 0112U006717).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботи мережі на кристалі з матричною топологією шляхом вдосконалення маршрутизації пакетів із врахуванням поточного стану елементів мережі та сегментів. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі основні задачі:

- вдосконалити алгоритм DuXY, забезпечивши йому можливість проводити аналіз стану завантаженості не тільки безпосередніх елементів, а й цілих сегментів мережі;
- розробити метод сегментації мереж на кристалі для виявлення критичних зон та прийняття рішень для їх усунення;
- розробити методи уникнення точок скупчення, як у межах одного елемента, так і цілих сегментів.

Об'єктом дослідження є засоби маршрутизації в мережах на кристалі з матричною топологією.

Предметом дослідження є методи та алгоритми маршрутизації в мережах на кристалі та точки скупчення.

Методи дослідження ґрунтуються на математичних моделях Дейкстри, Белмана-Форда, Флойда-Уоршелла, теорії комп'ютерних систем та мереж, теорії моделювання, теорії алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів. Завдяки проведеним дослідженням розв'язана наукова задача підвищення ефективності маршрутизації в мережах на кристалі з матричною топологією на основі обробки даних про роботу мережі в цілому та її складових елементів. При цьому отримано такі результати:

- вперше запропоновано метод уникнення точок скупчення та забезпечення рівномірного завантаження мережі за принципом «Головний-Підлеглий» шляхом аналізу завантаженості безпосередніх сусідів елемента, що дозволило розвантажити локальні ділянки мережі на кристалі, залучивши до обчислювальних процесів низько завантажених сусідів;
- вперше запропоновано метод уникнення точок скупчення шляхом організації опосередкованих зв'язків у однорідних топологіях мереж на кристалі з високим

трафіком, що дозволило знаходити альтернативні легко прохідні шляхи та зменшити час руху пакета опосередкованими зв'язками.

- вдосконалено метод сегментації, що базується на алгоритмі Краскала, шляхом введення критерію завантаженості елементів мережі, що дало змогу виявляти сегменти елементів мережі на кристалі з однаковим рівнем їх завантаженості;

- вдосконалено метод маршрутизації ДуХУ шляхом аналізу стану завантаженості сусідніх елементів та секторів, що дало можливість уникати ділянок мережі на кристалі з високим ризиком виникнення тупиків і затримок та отримати у загальному випадку підвищення ефективності близько 5%, а в окремих випадках – до 30%;

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

Розроблено та впроваджено систему пошуку оптимальних маршрутів у транспортній логістиці на основі створеного методу сегментації мережі, що дало змогу локалізувати сегменти, які можуть спричиняти простої транспортних засобів.

Методи покращення ефективності маршрутизації в мережах використані в програмних засобах для вирішення задач керування трафіком на серверах системи SalesWorks для розв'язку тестових задач у компанії «СофтСерв».

Запропоновано спосіб рівномірного завантаження залізничних вузлів ДТГО «Львівська залізниця», що ґрунтується на системі «Головний-Підлеглий», який моніторить стан залізничного сполучення та на основі отриманих даних розвантажує критичні вузли шляхом пошуку обхідних маршрутів та залучення до роботи вузлів із нижчою завантаженістю.

Методи, представлені в дисертаційній роботі, також можуть бути застосовані в підприємствах: «Конекс», «Львівському відділенні НКАУ», «Прості програмні системи», можуть бути адаптовані до будь-яких логістичних програмних чи апаратних засобів систем із маршрутизацією.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи були отримані автором особисто. У роботах, написаних у співавторстві, дисертантові належать: [1] - розроблено теоретичне підґрунтя застосування принципу «Головний-Підлеглий» для розв'язання проблеми точок скупчення; [2] - розроблено теоретичне підґрунтя вдосконалення алгоритму маршрутизації ДуХУ для забезпечення йому можливості аналізу завантаженості не тільки сусідніх елементів а й цілих сегментів; [5] - розглянуто особливості матричних топологій та обґрунтовано доцільність їх використання в дослідженні, як базових для інших найпоширеніших топологій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати роботи прозвучали в доповідях і були обговорені на таких науково-технічних конференціях: First International Workshop Critical Infrastructure Safety and Security CrISS-DESSERT 2011 (Kharkiv, 2011); 6th International Conference DESSERT'12 «Characteristics of complexity of multiplication devices» (Sevastopol, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві», (Луцьк, 2011); 5-th International Conference Advanced Computer System and Networks: Design and Application, (Lviv, 2011); XVI міжнародном молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (г. Харьков, 2012); Науковому семінарі

Секції інформатики при Західному науковому центрі НАН України та МОН України (Львів, 2013) та наукових семінарах кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем.

Публікації. За темою дисертаційної роботи надруковано 8 наукових праць, із них 6 у фахових виданнях (з них одноосібних – 5) та 2 публікації у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 79 назв та додатків. Роботу викладено на 125 сторінках основного друкованого тексту. У тексті використано 59 рисунків та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, суть та перспективи технології мереж на кристалі, їхні переваги та недоліки. Сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку мереж на кристалі. Розглянуто динамічні та статичні топології мереж. Виокремлено матричну топологію як базову для більшості топологій. Наведено приклади найбільш вдалих комунікаційних середовищ.

Розглянуто методи маршрутизації в МНК, їх переваги та проблеми (взаємоблокування, активний тупик, зависання процесора), також шляхи їх вдосконалення. Проаналізовано умови вдосконалення маршрутизації з метою підвищення ефективності роботи мереж на кристалі. Показано, що подальше підвищення ефективності роботи МНК можливе шляхом оцінки завантаженості не лише окремих елементів мережі, але й їх сукупності – сегментів.

Детальну увагу приділено алгоритмам маршрутизації, зокрема сімейству XY алгоритмів. Також розглядаються алгоритми: AntNET, Odd-Even, TT, f-cube3, алгоритм адаптивної стохастичної маршрутизації, Source Routing for Deviation-Points, i-rout, Forse-Directed Wormhole Routing, Region-Based FDWR, домінуюча маршрутизація та ін. Проведений аналіз показав, що для маршрутизації пакетів у МНК з матричною топологією підходить метод DuXY, проте він потребує вдосконалення, оскільки не забезпечує аналіз станів завантаження елементів мережі, що утворюють сегменти.

Окрему увагу приділено аналізу алгоритмів сегментації та трасування для розв'язку задачі поділу мережі на сегменти за критерієм завантаженості елементів. Показано, що для виявлення сегментів найбільш придатний алгоритм Краскала, проте він не враховує критерію завантаженості елементів МНК, а тому потребує вдосконалення.

Другий розділ присвячений створенню методів пошуку та обходу сегментів на основі аналізу завантаженості елементів мережі на кристалі. Сегменти мережі формуються за критерієм завантаженості елементів методом на основі вдосконаленого алгоритму Краскала. Загальна структура кожного елемента МНК містить керуючий та функціональний блоки.

Ступінь завантаженості елемента МНК у даний момент часу – це відношення:

$$m = \frac{M_3}{M} * 100\%, \quad (1)$$

де M_3 - кількість зайнятих комірок буферної пам'яті комутатора, M - загальна кількість комірок цієї пам'яті.

Метод на основі вдосконаленого алгоритму Краскала потребує визначення величина кроку зміни ступеня завантаженості визначається як $1/M$. Якщо припустити, що всі елементи мережі на кристалі мають однакову за обсягом буферну пам'ять, то кількість ступенів завантаженості становитиме $M+1$.

На рисунку 1 наведено приклад МНК з матричною топологією, що містить 10×10 елементів, у якій є такі рівні завантаженості: $p = 1$ (0% - 20% - білі елементи на рисунку), $p = 2$ (21% - 80% - сірі елементи на рисунку), $p = 3$ (81% - 100% - чорні елементи на рисунку). Кожен елемент матриці має номер i, j де $i, j = 0, 1, \dots, n$.

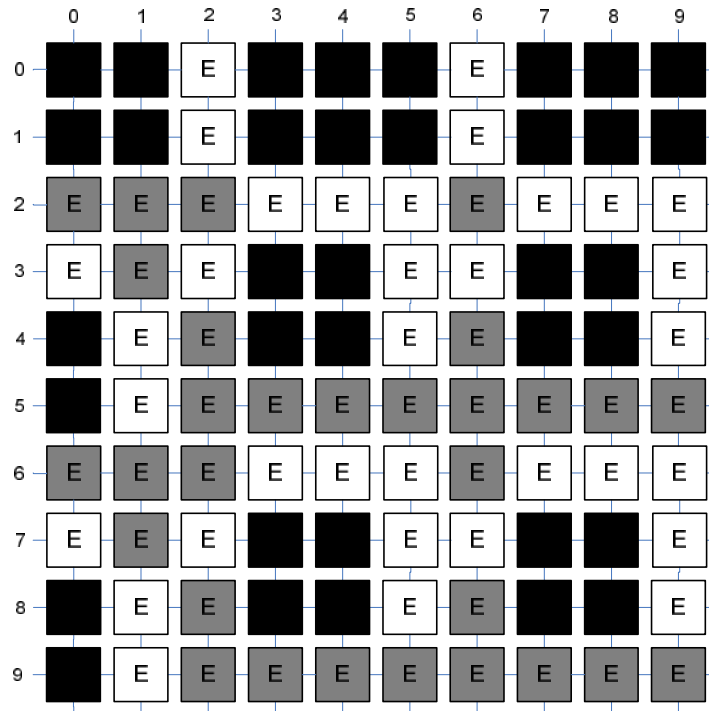


Рисунок 1. Мережа з елементами різної завантаженості

Сегмент мережі на кристалі – це підмножина її взаємозв'язаних елементів із однаковим ступенем завантаженості.

На основі цих критеріїв вдосконалено метод сегментації, що базується на алгоритмі Краскала. Граф-схема алгоритму роботи методу наведена на рисунку 2. В даній граф-схемі показано вдосконалення класичного алгоритму Краскала шляхом введення критерію завантаженості елементів перед початком формування масивів.

Спочатку задається k - кількість рівнів завантаженості елементів мережі. Далі одним із відомих методів впорядковуються елементи мережі за зростанням їх рівня завантаженості й записуються в масив M . Після цього цей масив M поділяється на окремі масиви M_p , що містять елементи із заданим рівнем завантаженості ($p = 1 \dots k$). Хоч елементи в кожному з масивів M_p є однаковими за рівнем завантаженості, проте не всі вони можуть бути зв'язаними між собою, а відтак можуть створювати певну кількість незалежних груп елементів із однаковим ступенем завантаження. Для виявлення таких груп (сегментів) у масивах M_p утворюються підмасиви S_p^f ($f =$

1,2,...), що містять лише зв'язані між собою елементи, тобто $\forall f \mid (S_p^f \cap S_p^{f+1} = \emptyset)$.

Після проведення вказаних дій для всіх масивів M_p утворюються множини сегментів з однаковим ступенем завантаження.

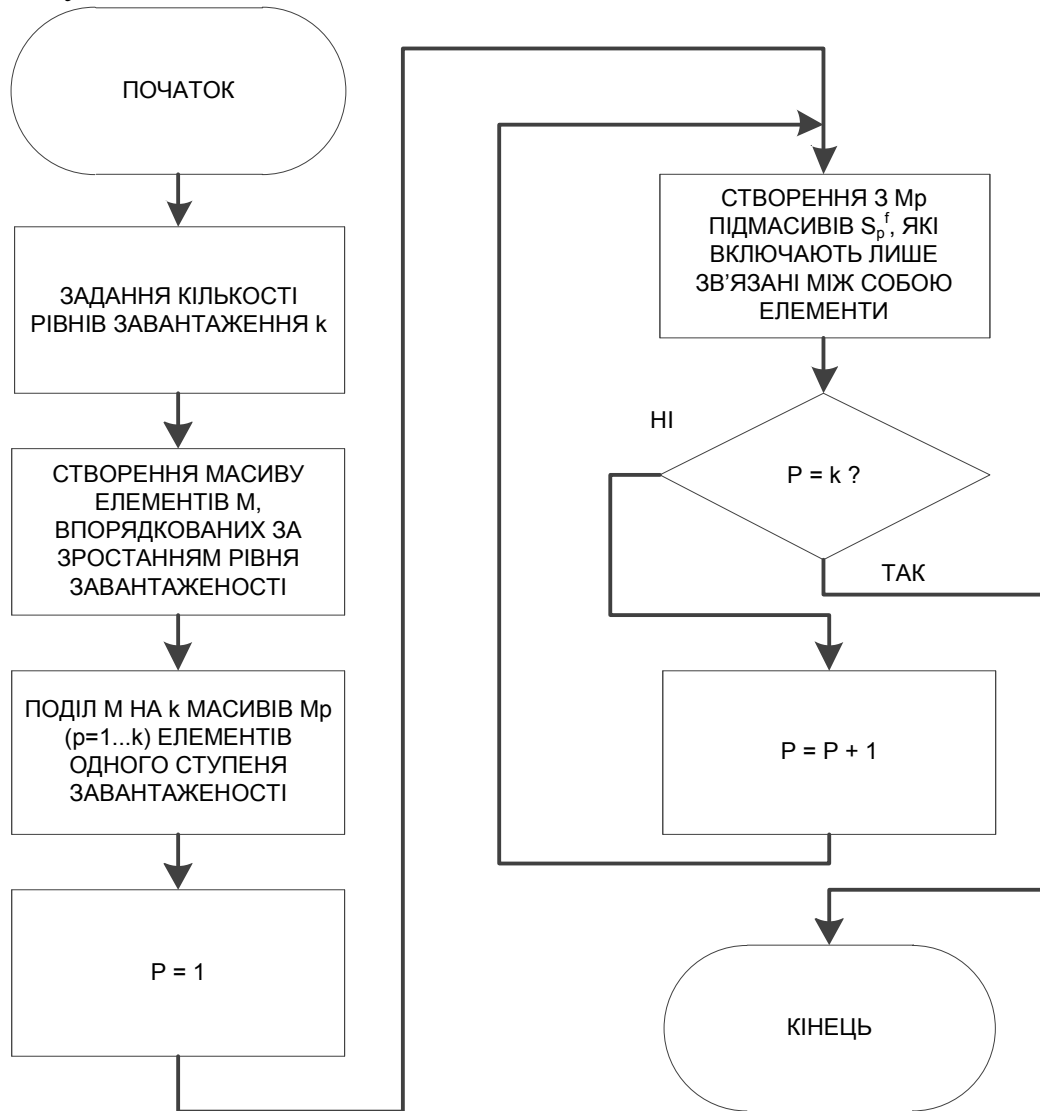


Рисунок 2. Граф-схема алгоритму вдосконаленого методу сегментації.

Для прикладу МНК, що на рисунку 1, в результаті застосування створеного методу сегментації формуються три масиви елементів із відповідними сегментами формули 1, 2 і 3.

$$M_1 = \{S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4, S_1^5, S_1^6, S_1^7, S_1^8, S_1^9, S_1^{10}, S_1^{11}, S_1^{12}\}, \quad (2)$$

$$M_2 = \{S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4\}, \quad (3)$$

$$M_3 = \{S_3^1, S_3^2, S_3^3, S_3^4, S_3^5, S_3^6, S_3^7, S_3^8, S_3^9\}. \quad (4)$$

На рисунку 3 наведено розташування секторів для масиву M_2 , які відповідають формулі 2.

З наведеного прикладу можна легко зауважити, що в загальному випадку отримані сектори можуть мати різні геометричні конфігурації, що суттєво відрізняються від прямокутних (рисунок 4).

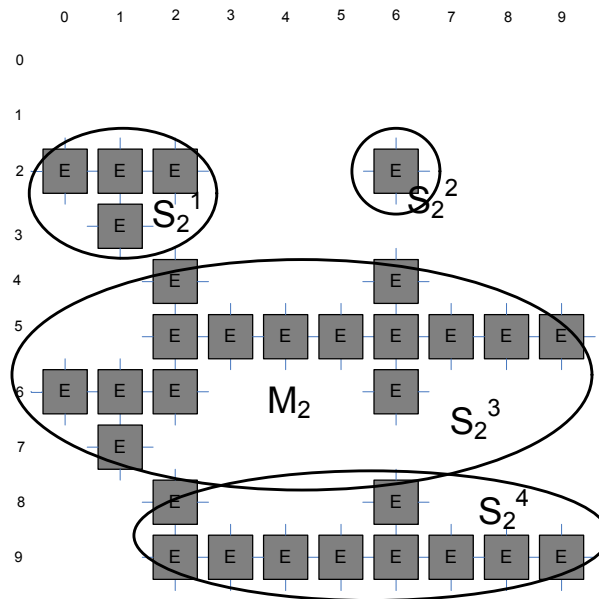


Рисунок 3. Формування сегментів на прикладі масиву M_2

Враховуючи той факт, що всі алгоритми сімейства XY забезпечують переміщення пакетів ламаними лініями лише в один бік, то може виникнути ситуація, коли пакет досягає не прямокутного сегмента і не може продовжувати рух далі, як це показано, наприклад, на рисунку 4. Ця тупикова ситуація триватиме до тих пір, поки сусідні елементи по ходу маршруту не звільняться.

У роботі запропоновано усунути такі ситуації шляхом включення до даного сегменту елементів із нижчим рівнем завантаженості, які розміщені по периметру прямокутника. На рисунку 5 наведено приклад формування прямокутного сегменту.

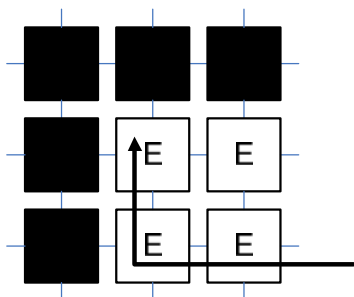


Рисунок 4. Попадання пакету в тупикову ситуацію

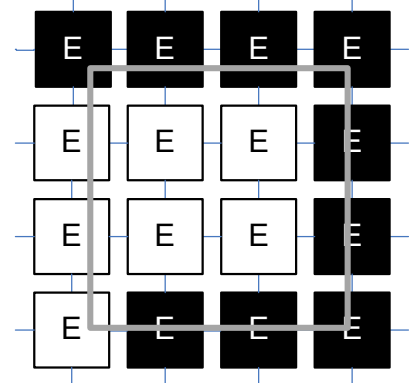


Рисунок 5. Формування прямокутного сегменту

В роботі визначено пропускну здатність поточного елемента маршруту в мережі та середню пропускну здатність сегментів, що дало змогу проводити оцінку пропускну здатності альтернативних маршрутів.

У роботі вдосконалено метод маршрутизації $DuXY$ шляхом врахування рівня завантаженості секторів, що отримав позначення $SDuXY$ (рисунок 6). На відміну від базового, перед прийняттям рішення про маршрутизацію даний алгоритм опитує

елементи про сегменти, до яких вони належать. Якщо рішення не прийнято на даному кроці, в роботу вступає базовий алгоритм.

Метод обходу важко прохідних сегментів мережі SDyXY працює за таким алгоритмом. Вибирається напрям передачі пакету: нехай поточний елемент мережі з номером (i,j) є відправником пакета у даний момент часу. Для цього він повинен спочатку з'ясувати, які два із чотирьох сусідніх елементів можуть бути включені в маршрут. Якщо маршрут пролягає по горизонталі (по осі i), то він може забезпечувати передачу пакету лише вправо або вліво, тобто сусідній елемент може мати номер більший або менший на одиницю від поточного. Це також стосується руху пакету по вертикалі (вісь j).

Далі вибирається значення ступенів завантаження $k_{i\pm 1}$ та $k_{j\pm 1}$ сегментів, до яких належать сусідні елементи. Якщо значення $k_{i\pm 1}$ та $k_{j\pm 1}$ є однаковими, то вибір подальшого маршруту проводиться за відомим алгоритмом DyXY. У випадку їх нерівності пакет відправляється тому сусідньому елементу, у якого сегмент має нижчий рівень зайнятості.

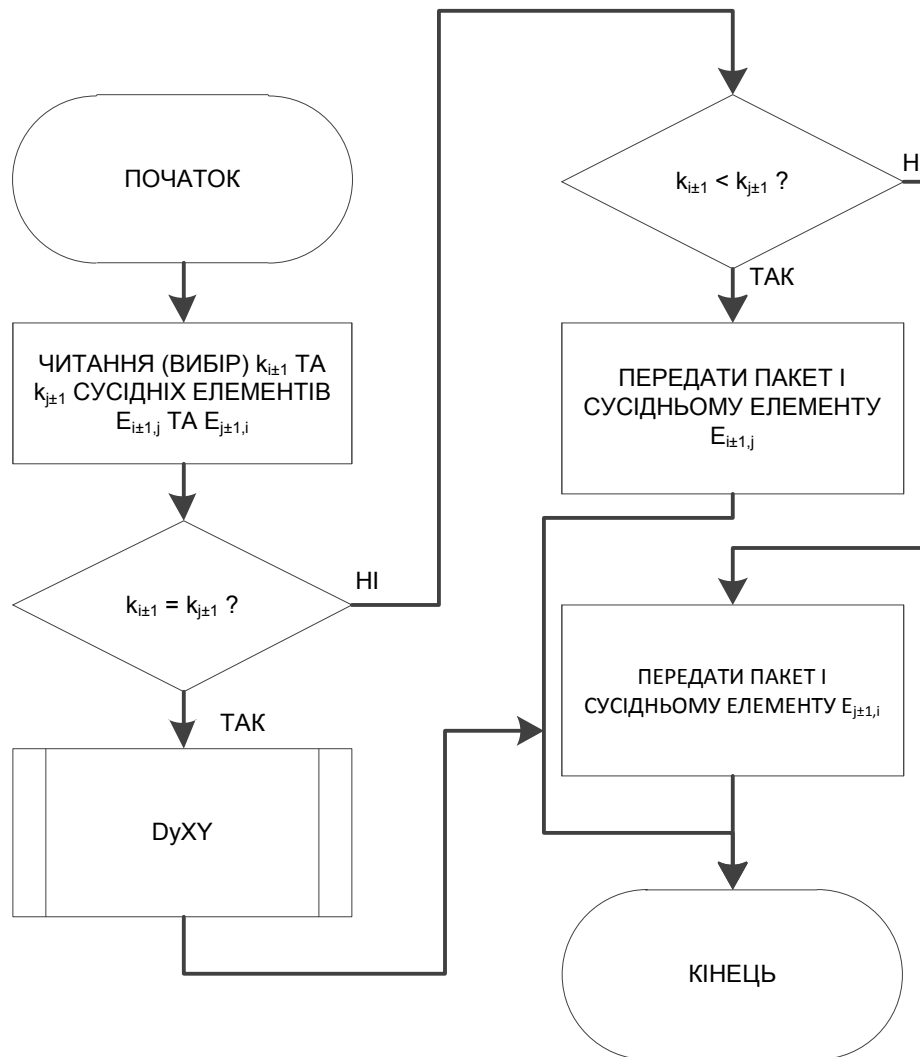


Рисунок 6. Граф-схема алгоритму роботи методу SDyXY

На рисунку 7 наведено фрагмент мережі розміром 5×4 для порівняння роботи базового DyXY та розробленого SDyXY алгоритмів, де є елементи з різним рівнем їх завантаження.

Можна легко зауважити, що обидва маршрути містять однакову кількість елементів, проте маршрут, прокладений розробленим методом SDyXY, є більш ефективним, оскільки в ньому є два середньозавантажені елементи, в той час як маршрут, прокладений відомим методом DyXY містить два сильнозавантажені елементи МНК.

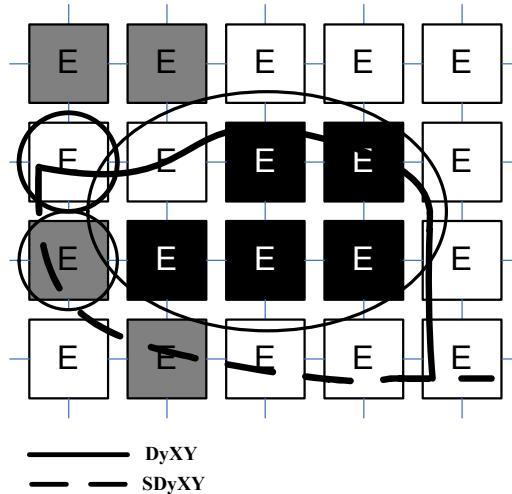


Рисунок 7. Фрагмент мережі для порівняння маршрутів, прокладених базовим та розробленим алгоритмом.

В роботі проведено аналіз ефективності методу SDyXY для ситуації, коли є один сегмент, що створює тупик, причому завантаженість цього сегмента пропорційно збільшується при збільшенні розміру мережі. В табл. 1 наведені результати моделювання роботи такої мережі, з якої видно, що розроблений метод є на 31% ефективнішим порівняно з DyXY.

Таблиця 1

Результати моделювання у сприятливих умовах із пропорційним завантаженням сегмента мережі

розмір мережі	DyXY	SDyXY	ефективність розробленого методу, %
10x10	29	20	31,03448
12x12	35	24	31,42857
15x15	44	30	31,81818

Якщо описаний сегмент не змінює своєї завантаженості зі збільшенням розміру мережі, то очевидно, що ймовірність виникнення тупика зменшується, а, відтак, і ефективність розробленого методу SDyXY теж.

У табл. 2 наведено результати моделювання такої ситуації.

Таблиця 2

Результати моделювання у сприятливих умовах зі сталим завантаженням сегмента мережі

розмір мережі	DyXY	SDyXY	ефективність розробленого методу, %
10x10	24	20	16,66667
12x12	26	24	7,692308
15x15	30	29	3,333333

Проведено також аналіз ефективності розробленого методу SDyXY для мереж на кристалі, що працюють у багатозадачному режимі, та перевірено залежність методу від кількості експериментів та розміру мережі.

На рисунку 8 представлено результати моделювання для розміру мережі 100x100 та завантаженості 0-100%.

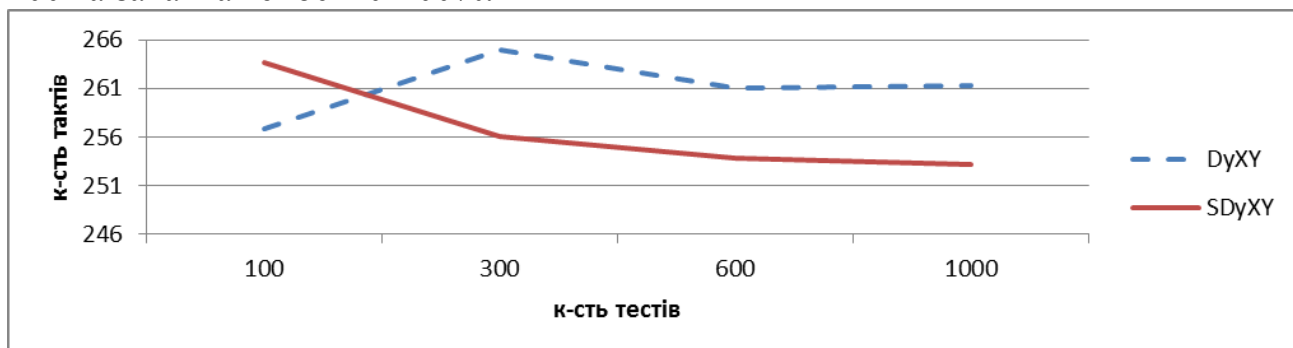


Рисунок 8. Середньозважені результати моделювання залежності ефективності методу SDyXY від кількості тестів

У результаті тестування отримано такі середньозважені відсоткові співвідношення між двома методами: для 100 тестів отриманий відсоток - -2,7%; 300 тестів показали різницю на 3,3%; 600 – 2,7%; 1000 – 3,1%. Це доводить, що метод не залежить від кількості проведених тестів та є ефективнішим за базовий.

Наступний експеримент перевіряв залежність методу від розміру мережі. Оскільки в попередньому експерименті було доведено незалежність результатів від кількості тестів, було вибрано 300 тестів. Таким чином отримано достатню кількість даних за короткий час експерименту.

На рисунку 9 представлені результати 300 тестів для розміру мережі 50x50 та завантаженості 0-100%.

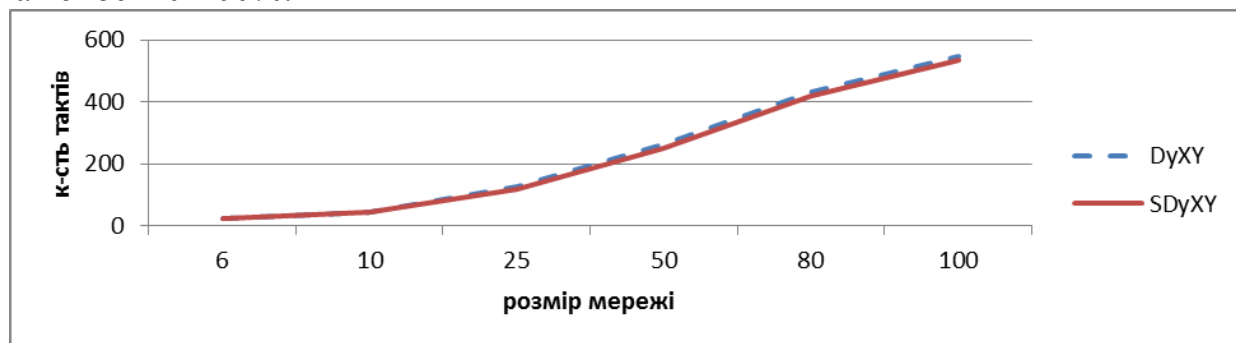


Рисунок 9. Результати моделювання залежності ефективності методу SDyXY від розміру мережі

В результаті тестування отримано такі середньозважені відсоткові співвідношення між двома методами: для розміру мережі 6x6 отриманий відсоток - 2,8%; розмір мережі 10x10 показав різницю на 1,6%; 25x25 – 5,1%; 50x50 – 4,9%; 80x80 – 2,6%; 100x100 – 2,8%. Це доводить, що метод не залежить від розміру мережі та є ефективнішим за базовий.

Для загального випадку моделювання роботи МНК з різними розмірами мережі на кристалі та значеннями завантаження елементів цих мереж показано, що розроблений метод є ефективнішим від відомого приблизно на 5%.

У третьому розділі розглянуто методи підвищення ефективності МНК з матричною топологією шляхом усунення точок скупченості даних: збільшення буферної пам'яті, створення опосередкованих зв'язків, організація взаємодії згідно з системою «Головний-Підлеглий».

Метод збільшення обсягу буферної пам'яті дає змогу прийняти більшу кількість пакетів для маршрутизації чи нескладної обробки, які потребують всього кілька тактів, якщо елемент тимчасово зайнятий довготривалою операцією. Коли елемент звільниться, то він швидко обробить пакети з буфера.

Метод організації додаткових, опосередкованих зв'язків (рисунок 10) в обхід зон скупчення забезпечує передачу транзитних пакетів мимо зайнятого елемента, що в результаті зменшує час руху пакета по маршруту.

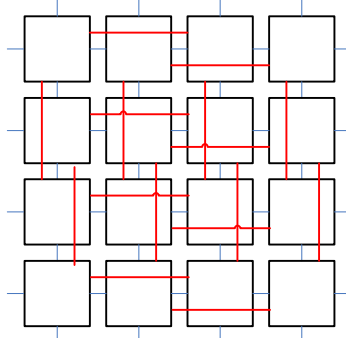


Рисунок 10. Організація опосередкованих зв'язків для уникнення проміжних завантажених елементів.

Метод «Головний-Підлеглий» потребує організації певної системи пріоритетів елементів. Для цього потрібно провести таку модифікацію роботи елементів. На відміну від альтернативного алгоритму AntNNM, розробленого на базі популярного AntNet, AntNNM дозволяє елементам моніторити безпосередніх сусідів та при виявленні ознак точок скупчення запускати F-пакет для прокладання нових маршрутів. Проте даний підхід, при виникненні точки скупчення, обновлює таблиці маршрутизації у всій мережі, що займає чималий час. Запропонований метод «Головний-Підлеглий» дозволяє вирішувати дану проблему в локальному секторі та не впливати на стан всієї мережі, що значно підвищує продуктивність маршрутизації.

Даний метод працює таким чином. При зростанні навантаження на елемент до критичного рівня (перехід елемента в категорію важкозавантажених, що описувалось вище, елементів: $p=3$), функціональний блок звертається до безпосередніх сусідів елемента з запитом про їхню завантаженість (рисунок 11). Якщо існує хоча б один сусід, завантаженість якого суттєво нижча ($p=1$, та $p=2$) завантаженості поточного елемента, то функціональний блок визначає статус поточного елемента як головного (це може бути встановлення виділеного для цього в пам'яті біту в логічну одиницю) та відправляє відповідному сусіду (сусідам) запит на встановлення статусу підлеглого (рисунок 11). Після цього головний елемент зберігає в собі інформацію про всіх підлеглих, що зв'язані з ним. Так формується система «Головний-Підлеглий» (рисунок 12).

Організація взаємодії згідно з системою «Головний-Підлеглий» враховує не лише завантаженість елемента за заповненням буферної пам'яті, а також

завантаженість функціонального блока даного елемента стосовно реалізації операції згідно з програмою роботи, в тому числі й опрацювання пакетів, що призначені цьому елементу.

Тепер, при зверненні до головного елемента про обробку пакета, він в першу чергу звертається до своїх підлеглих. Знаходить першого вільного з них та перенаправляє обробку пакету йому. Якщо вільного підлеглого не знайдено, то пакет приймається на опрацювання головним елементом або розміщується в буферну пам'ять, якщо він зайнятий.

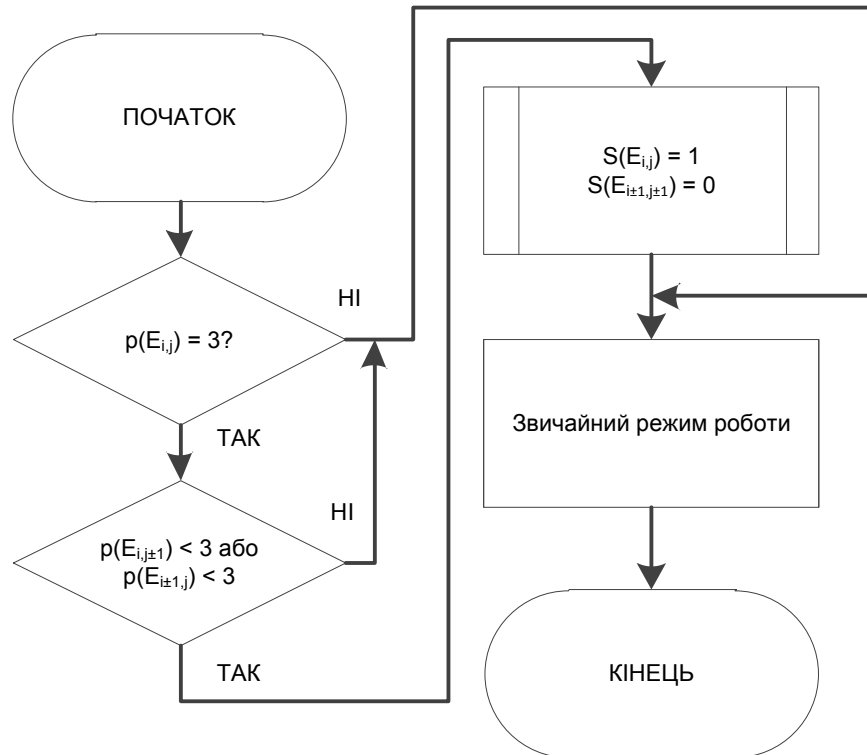


Рисунок 11. Граф-схема алгоритму встановлення пріоритетів елементів для формування системи «Головний-Підлеглий».

Також розглянуто систему «Головний-Підлеглий» в контексті сегментів (рисунок 13). У даному випадку статус головного на себе переймає не окремий елемент, а цілий сегмент. Принцип роботи в даному випадку залишається майже незмінний. Єдина різниця полягає в опитуванні сусідів цілого сегмента.

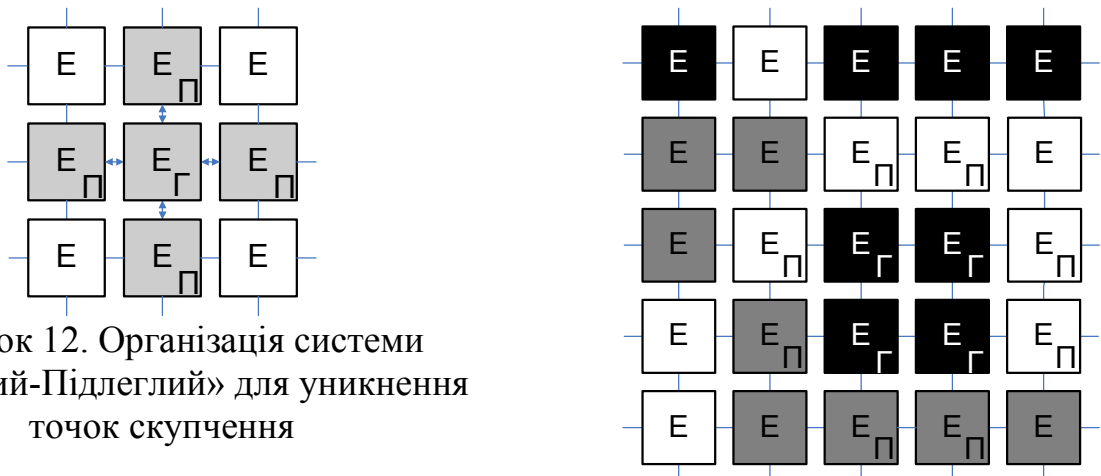


Рисунок 12. Організація системи «Головний-Підлеглий» для уникнення точок скупчення

Рисунок 13. Організація системи
«Головний-Підлеглий» із сегментом у

якості «Головного»

Алгоритм роботи даної системи наведений на рисунку 14.

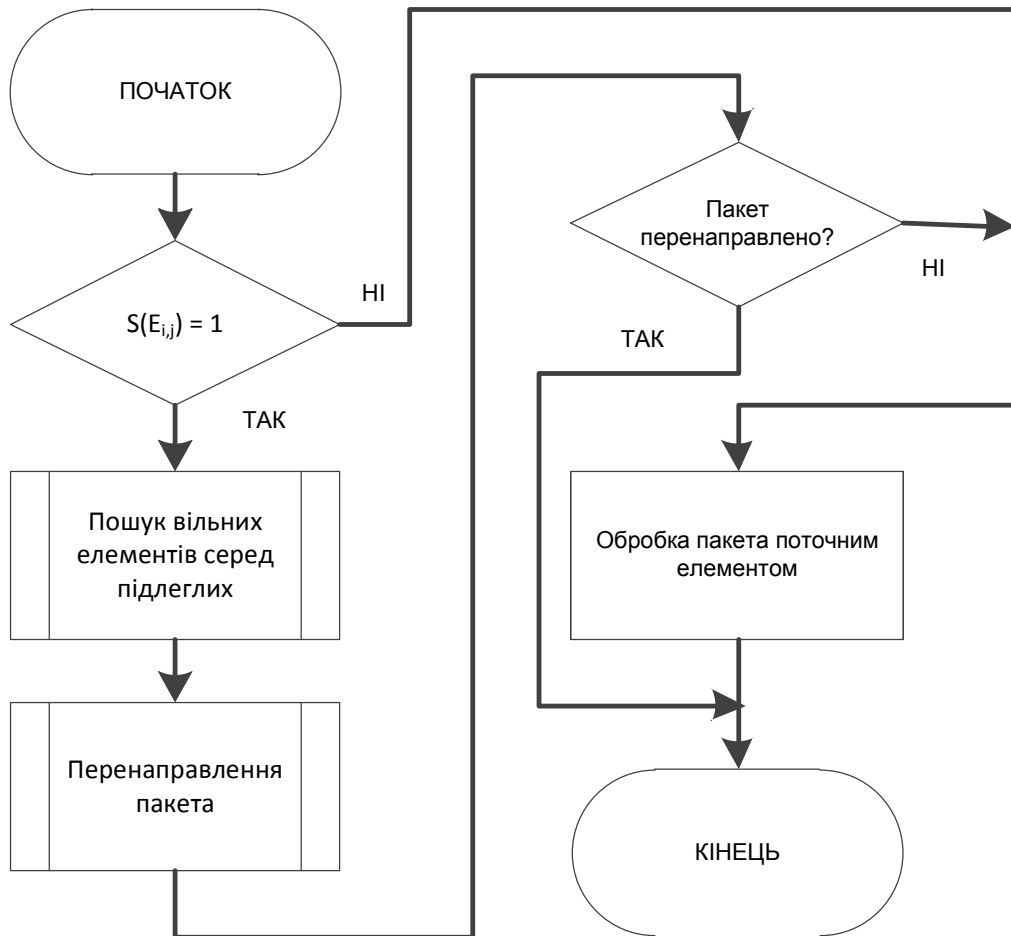


Рисунок 14. Граф-схема алгоритму перенаправлення пакета на основі системи «Головний-Підлеглий»

При зверненні до елемента з запитом на обробку пакета, функціональний блок визначає його статус. Якщо статус рівний 1 ($S(E_{i,j}) = 1$), це означає, що елемент отримав статус «Головний». Наступним кроком функціональний блок звертається до пам'яті та отримує інформацію про підлегли елементи. Цим елементам надсилається запит на зайнятість і якщо знаходиться хоча б один вільний, то йому перенаправляється пакет на обробку. У всіх інших випадках робота мережі не змінюється. Також потрібно звернути увагу на те, що всі елементи повинні бути ідентичні і мати можливість виконувати роботу один за одного.

Результати моделювання роботи даного методу проведені для двох ситуацій – вільна мережа, коли в ній присутні тільки пакети, призначені для одного елемента (рисунок 15), та зайнята, коли в мережі присутні й інші пакети, що впливають на час маршрутизації (рисунок 16).

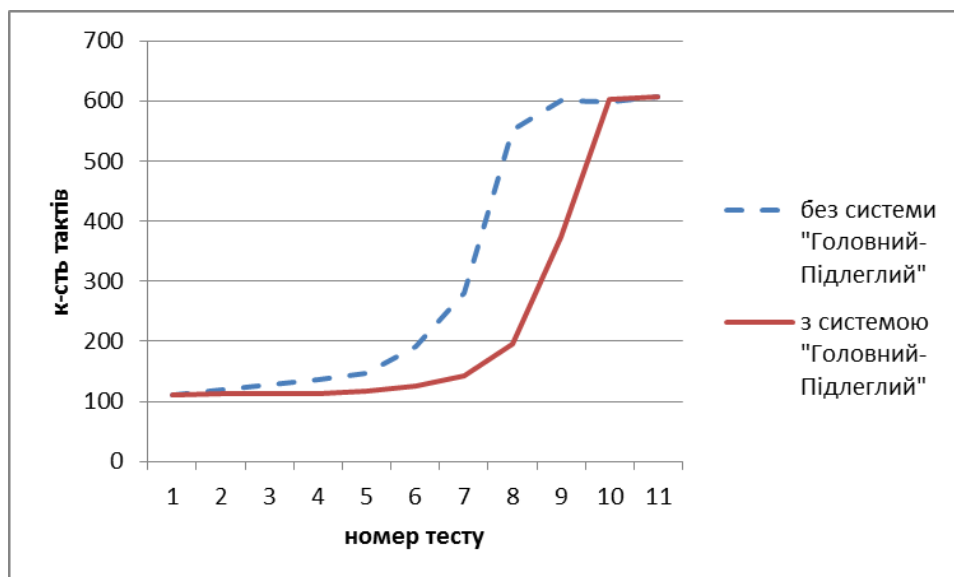


Рисунок 15. Результат роботи методу «Головний-Підлеглий» у вільній мережі

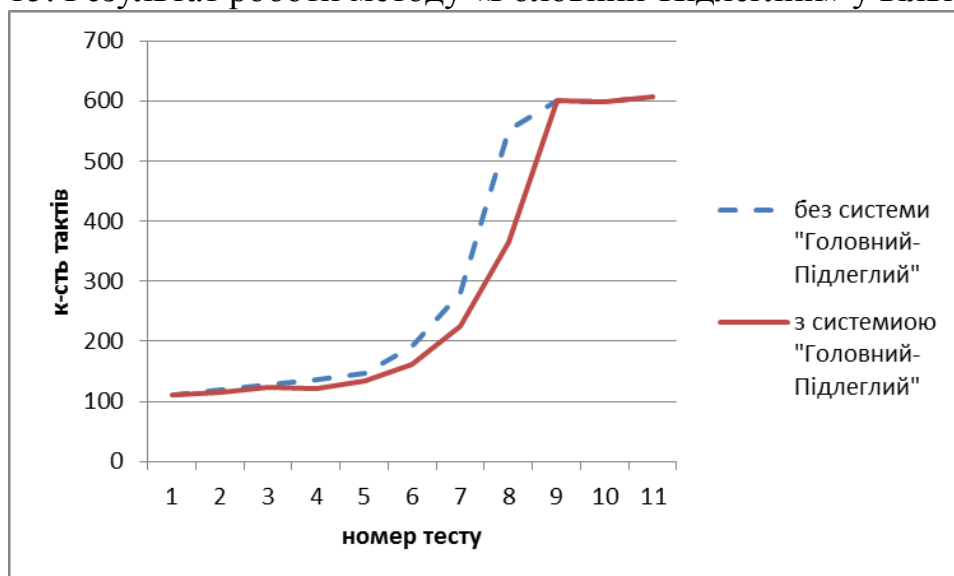


Рисунок 16. Результат роботи методу «Головний-Підлеглий» у завантаженій мережі

Проведений аналіз показує, що при малій кількості пакетів ефективність методу є доволі низькою і майже непомітною. При середній кількості пакетів ефективність методу зростає майже вдвічі. При великій кількості пакетів через лічильник time to live ефективність методу знову знижується.

Четвертий розділ присвячений спеціалізованому програмному засобу MDTNoC для моделювання роботи мережі на кристалі. На відміну від існуючих середовищ модулювання, таких як Matlab або Scilab, даний засіб є вузькоспеціалізований для розв'язання задач маршрутизації в мережах на кристалі. MDTNoC має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує управління та конфігурацію модулятора, а також суттєво прискорює усі процеси, що виконуються в ньому, в той час як відомі середовища потребують створення кожного разу оригінальної програми для моделювання об'єктів, що є доволі трудомісткою задачею, а крім того, відображення результатів моделювання не є достатньо наочним.

MDTNoC має зручний та зрозумілий інтерфейс, забезпечує розробнику можливість тестування мереж різної розмірності, відокремлений функціонал мережі та її елементів, моделює роботу елементів із пакетами, систему автоматичного тестування. Структурна схема симулятора, що наведена на рисунку 17, містить такі модулі та блоки.

Блок інтерфейсу відповідає за взаємодію користувача із симулятором. Блок мережі відповідає за загальний функціонал мережі на кристалі. Блок елементів – об'єкти симулятора, які моделюють роботу реальних елементів. Блок маршрутизації – колекція доступних користувачу алгоритмів для маршрутизації пакетів. Блок пакетів – об'єкти симулятора, що моделюють роботу реальних пакетів та здебільшого носить інформативний характер: містить службову інформацію. Модуль сегментації містить у собі безпосередньо модифікований алгоритм сегментації на основі алгоритму «Краскала», має доступ до мережі та її елементів, повністю забезпечує функціонал сегментації мережі, формує об'єкти сегментів та зв'язує їх із елементами взаємозв'язками. Блок сегментів включає об'єкти симулятора, які містять інформацію про елементи, які до них належать, тип цих елементів, їхню кількість, шлях власного обходу та ін. Кожен елемент після сегментації отримує вказівник на відповідний сегмент. Модуль системи автотестування – це симулятор роботи користувача. Містить набір тестів, необхідних для тестування запропонованих у даній роботі методів.



Рисунок 17. Структурна схема симулятора мережі на кристалі MDTNoC

Результати моделювання поділяються на поточні та повні. Поточні результати призначені для повідомлення користувача про стан симулятора та його компонентів у поточний момент. На рисунку 18 наведено вікно інтерфейсу MDTNoC з виводом поточного стану.

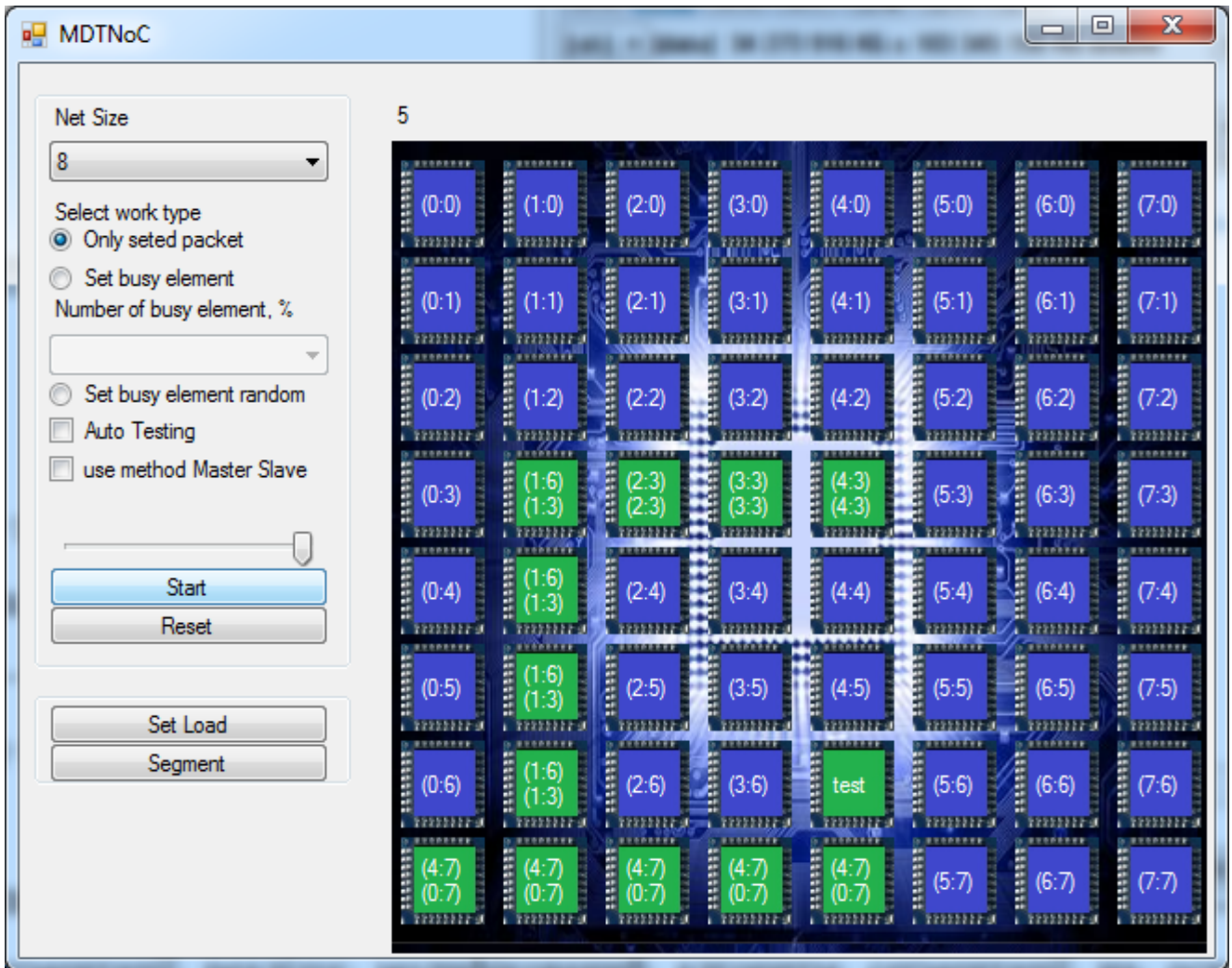


Рисунок 18. Вікно інтерфейсу MDTNoC

Повний набір даних призначений для зберігання всієї кількості результатів із метою їх подальшого аналізу. В даному симуляторі для виводу повних даних про результати використовується модуль формування документа Excel з пакету Microsoft Office.

На рисунку 19 представлена граф-схема ініціалізації та роботи симулятора MDTNoC.

На рисунку 20 зображено граф-схему ініціалізації та роботи мережі на кристалі в симуляторі MDTNoC.

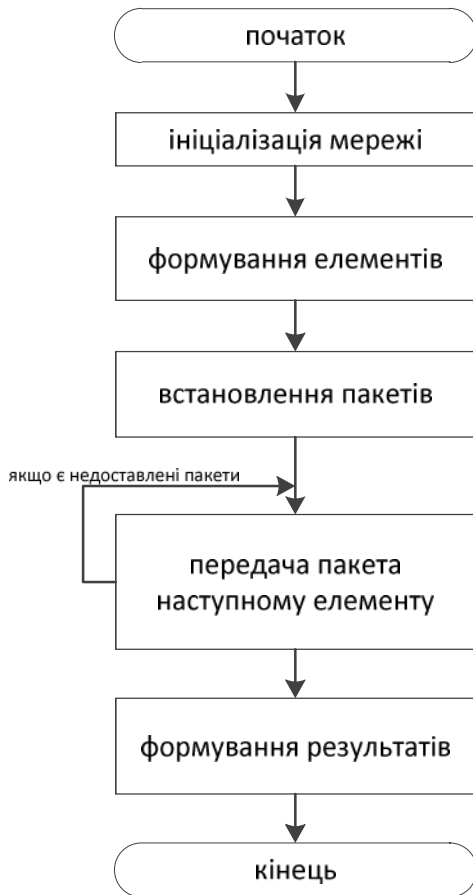


Рисунок 19. Граф-схема ініціалізації та роботи симулятора MDTNoC

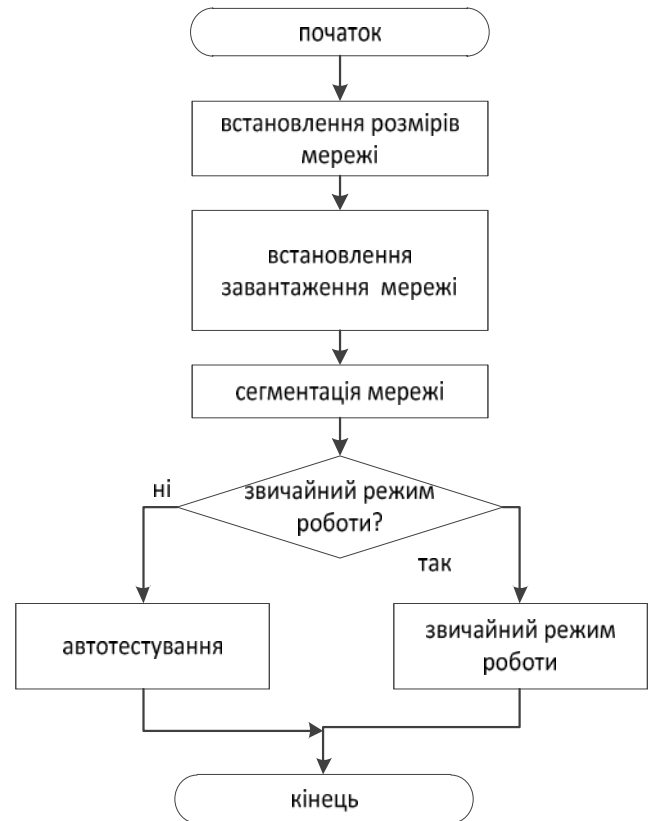


Рисунок 20. Граф-схема ініціалізації та роботи мережі на кристалі в симуляторі MDTNoC

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну наукову задачу підвищення ефективності роботи мережі на кристалі з матричною топологією шляхом вдосконалення маршрутизації з урахуванням поточного стану елементів мережі та отримано такі результати:

1. Проаналізовано основні напрямки підвищення ефективності мереж на кристалі і показано, що одним із перспективних шляхів є вдосконалення методів маршрутизації, а також проведено аналіз динамічних топологій мереж на кристалі та виділено для дослідження матричну топологію, яка є базовою для решти динамічних топологій.

2. На основі аналізу відомих алгоритмів маршрутизації зроблено висновок про те, що базовим алгоритмом для мереж на кристалі з матричною топологією є алгоритм ДуХУ. Проаналізовано особливості алгоритму ДуХУ і показано, що збільшення ефективності його роботи може бути досягнуто шляхом сегментації мережі.

3. На основі аналізу відомих алгоритмів сегментації визнано найбільш придатним для подальших досліджень алгоритм Краскала, який модифіковано шляхом введення критерію завантаженості, що дало змогу виявляти сегменти елементів мережі на кристалі з однаковим рівнем їх завантаженості.

4. Вдосконалено метод пошуку та обходу сегментів шляхом аналізу стану зайнятості не тільки сусідніх елементів, але й цілих сегментів, що дало змогу уникати ділянок маршрутів на кристалі з високим ризиком тупиків та затримок.

5. Отримано аналітичні вирази оцінки пропускної здатності елемента у сегментованій мережі та пропускної здатності сегментів, що дало змогу проводити оцінку пропускної здатності альтернативних маршрутів.

6. Показано, що метод SDyXY у загальному випадку забезпечує підвищення ефективності близько 5% порівняно з методом DyXY, а в окремих випадках – 30%.

7. Розроблено метод за принципом системи «Головний-Підлеглий» шляхом аналізу завантаженості безпосередніх сусідів елемента, що дозволило уникати точки скупчення та забезпечити рівномірне завантаження мережі.

8. Проведено моделювання даного методу та визначені умови найбільш ефективного використання даної системи, а саме: середня завантаженість мережі повинна бути низькою або слабо завантаженою (переважна більшість елементів мережі повинна мати завантаженість меншу за 80%); кількість пакетів повинна бути достатньою, щоб забезпечити роботою всіх вільних підлеглих сусідів (якщо вільних підлеглих є n , то пакетів повинно бути не менше ніж $n+1$); параметр time to live повинен бути достатнім, щоб система змогла розпаралелити роботу. В таких умовах можливо досягнути покращення ефективності приблизно вдвічі.

9. Розроблено метод уникнення точок скупчення шляхом організації опосередкованих зв'язків в однорідних топологіях мереж на кристалі з високим трафіком, що дозволило знаходити альтернативні легко прохідні шляхи та зменшити час руху пакета опосередкованими зв'язками майже вдвічі.

10. Розроблено програмне забезпечення симулятора мережі на кристалі MDTNoC та описано структурну та функціональну будову програмного продукту, яка організована за модульним принципом, що дає змогу модернізувати чи використовувати альтернативні програмні продукти та компоненти. Розроблені зручні, інтуїтивно зрозумілі користувацькі інтерфейси: панелі керування; панелі відображення поточних результатів; модуля сегментації; елемента та пакета; системи автотестування. Програмний продукт розроблений для використання в середовищі Microsoft Windows та потребує встановлення .Net фреймворку 4,0 або вище та офісного пакету Microsoft Office, зокрема компоненти Excel.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шпіцер А.С. Метод підвищення продуктивності роботи мереж на кристалі на основі рівномірного завантаження її сегментів / А.С.Шпіцер, Ю.І.Бережанський, Р.Б.Дунець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». - Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2010. - № 688. – С.224-228.

2. Шпіцер А.С. Аналіз ефективності алгоритму комутації пакетів у NOC з врахуванням інформації про стани елементів / А.С.Шпіцер, Р.Б.Дунець // Міжвузівський збірник «Комп'ютерно інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». - Луцьк: Вид-во Луцького нац. тех. ун-ту, 2011. - №5. – С.308-316.

3. Шпіцер А.С. Стислий огляд методів сегментації та адаптація одного з них для рішення задачі сегментації мережі за критерієм завантаженості елементів // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». – Харків: НАУ ХАІ, 2012. – С.95-99.
4. Шпіцер А.С. Метод розв'язання проблеми hot-spot в алгоритмах на базі XY алгоритму шляхом організації системи головний-підлеглий // Науковий вісник Чернівецького університету Комп'ютерні системи та компонентію - Чернівці. – 2013. – ТОМ IV випуск 1. – С.48-53.
5. Spitzer A. Method of switching packets in networks on chip with matrix topology / A. Spitzer, R. Dunets // Journal of Information, Control and Management Systems. – University of Zilina, Faculty of Management Science and Informatics, 2012. – VOL. 10, NO 1. – P.105-111.
6. Шпіцер А.С. Метод підвищення ефективності алгоритму ДуХУ шляхом сегментації мережі на зони завантаженості // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Комп'ютерні науки та інформаційні технології. - Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2013. - № 751. – С.128-135.
7. Шпіцер А.С. Метод підвищення продуктивності роботи мереж на кристалі на основі пошуку слабо завантажених сегментів – коридорів // Матеріали конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» (ACSN 2011). – Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2011. – С.72-74.
8. Шпіцер А.С. Інструментальний засіб сегментації мережі на кристалі // Матеріали XVI міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ веку». – Харків, 2012. – С.15-16.

АНОТАЦІЯ

Шпіцер А.С. Методи підвищення ефективності динамічних топологій в мережах на кристалі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів 2013.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню алгоритмів маршрутизації та методів роботи мереж на кристалі. Застосовано алгоритми сегментації для виявлення критичних зон у мережах на кристалі, що дало можливість проводити аналіз поточної ситуації в мережі та приймати відповідні рішення для більш ефективного використання її ресурсів. Вдосконалено метод маршрутизації ДуХУ шляхом аналізу стану опосередкованих сусідніх елементів та секторів. Таким чином пакети мають можливість уникати ділянки мережі на кристалі з високим ризиком виникнення тупиків та затримок. Запропоновано метод уникнення точок скупчення та забезпечення рівномірного завантаження мережі за принципом «Головний-Підлеглий». Проводиться аналіз завантаженості безпосередніх сусідів та встановлюються пріоритети елементів, таким чином задачі важко завантаженого елемента перенаправляються сусіднім елементам. Це дозволяє розвантажити локальні ділянки мережі на кристалі, залучивши до обчислювальних процесів низько завантажених сусідів. Запропоновано метод уникнення точок скупчення

шляхом організації опосередкованих зв'язків в однорідних топологіях мереж на кристалі з високим трафіком. Даний підхід дозволяє майже вдвічі прискорити рух пакетів, оскільки він відбувається через один елемент; уникати важко прохідних та пошкоджених елементів.

Ключові слова: NoC, топологія, маршрутизація, сегментація, алгоритм DyXY.

АННОТАЦІЯ

Шпицер А.С. Методы повышения эффективности динамических топологий в сетях на кристалле. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Компьютерные системы и компоненты. Национальный университет «Львівська політехніка» Министерство образования и науки Украины, Львов 2013.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию алгоритмов маршрутизации и методов работы сетей на кристалле.

Проанализированы основные направления повышения эффективности сетей на кристалле и показано, что одним из перспективных путей является совершенствование методов маршрутизации, а также проведен анализ динамических топологий сетей на кристалле и выделена для исследования матричная топология, которая является базовой для остальных динамических топологий.

Проанализированы особенности алгоритма DyXY и показано, что увеличение эффективности его работы может быть достигнуто путем сегментации сети. На основе анализа известных алгоритмов сегментации признан наиболее подходящим для дальнейших исследований алгоритм «Краскала», который модифицирован путем введением критерия загруженности, что позволило выявлять сегменты элементов сети на кристалле с одинаковым уровнем их загруженности.

Усовершенствован метод поиска и обхода сегментов путем анализа состояния занятости не только соседних элементов, но и целых сегментов, что позволило избегать участков маршрутов на кристалле с высоким риском тупиков и задержек. Показано, что метод SDyXY в общем случае обеспечивает повышение эффективности около 5% по сравнению с методом DyXY, а в отдельных случаях - 30%.

Разработан метод избежания точек скопления и обеспечения равномерной загрузки сети с принципом «Главный-Подчиненный» путем анализа загруженности непосредственных соседей элемента. Проведено моделирование данного метода и определены условия наиболее эффективного использования данной системы. Разработан метод избежания точек скопления путем организации опосредствованных связей в однородных топологиях сетей на кристалле с высоким трафиком, что позволило находить альтернативные легко проходимые пути и уменьшить время движения пакета опосредствованными связями почти вдвое.

Ключевые слова: NoC, топологія, маршрутизація, сегментація, алгоритм DyXY

ABSTRACT

Spitzer A.S. Methods to improve the performance of dynamic topologies in networks on chip. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.05 - Computer systems and components. Lviv Polytechnic National University of Ministry education and science of Ukraine, Lviv 2013.

The work is devoted to the improvement of algorithms and methods routing of networks on chip. Segmentation algorithms are used to identify critical areas in the network on chip, enabling an analysis of the current situation in the network and to make appropriate decisions for a more efficient use of its resources. Improved routing method DyXY by analysis of the mediate neighboring elements and sectors. Thus packets can avoid parts of the network on chip with a high risk of deadlocks and delays. Propose a method to avoid congestion points and ensure a uniform network traffic named «Master-Slave». Then the system is analysing of loading immediate neighbors and the prioritization of the elements, so the task is hard loaded elements are forwarded to neighboring elements. Propose a method to avoid congestion points by providing indirect links in the homogeneous topologies of network on a chip with high traffic. This approach allows almost double the speed of the packet, avoid impassable and damaged elements.

Keywords: NoC, topology, routing, segmentation, algorithm DyXY