

СИНТЕЗ СХЕМ ВІДНОВЛЕННЯ В РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕННЯХ ДЛЯ ВИДАВНИЧИХ СИСТЕМ

О. Я. Різник¹, Д.-В. Ю. Вороновський², Є. Є. Матвійчук³,
Є. Е. Савелов⁴, Р. А. Солтисік⁵

1. Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0000-0002-3815-043X> e-mail: oleh.y.riznyk@lpnu.ua

2. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, Львів, 79057, Україна <https://orcid.org/0000-0002-2762-1215> e-mail: 25voronovskyi.d@nltu.lviv.ua

3. Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0009-0007-2557-1810> e-mail: yevhenii.y.matviichuk@lpnu.ua

4. Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/0009-0004-1918-8610> e-mail: Yevhenii.E.Savelov@edu.lpnu.ua

5. Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна <https://orcid.org/000-0002-6040-4168> e-mail: roman.a.soltysik@lpnu.ua

Розподілені обчислення є підходом до розв’язання ресурсоемних обчислювальних задач шляхом залучення декількох комп’ютерів, які зазвичай поєднані в паралельну обчислювальну систему. Виконання послідовних обчислень у межах розподілених систем доцільне під час одночасного розв’язання великої кількості задач, зокрема у розподілених системах керування. Ключовою особливістю розподілених багатопроцесорних обчислювальних систем, на відміну від локальних суперкомп’ютерів, є можливість практично необмеженого підвищення продуктивності за рахунок масштабування обчислювальних ресурсів. У межах дослідження проведено аналіз існуючих методів побудови схем відновлення для систем розподілених обчислень довільної розмірності. Розглянуто застосування ідеальних кільцевих в’язанок для формування оптимальних схем відновлення за критерієм рівномірного розподілу навантаження у випадках пошкодження будь-якої кількості комп’ютерів як однакової, так і різної обчислювальної потужності. Уперше розроблено схеми відновлення з оптимальним балансуванням навантаження для довільної кількості відмовлених вузлів різної продуктивності, побудовані на основі ідеальних кільцевих в’язанок.

Ключові слова: балансування навантаження, ідеальна кільцева в’язанка, кластери, розподіленні системи, схема відновлення.

Постановка проблеми. Розподілені обчислення являють собою проекти, що надають можливість широкому колу користувачів залучати вільні обчислювальні ресурси власних комп’ютерів для виконання складних наукових обчислень. Існує значна кількість досліджень, розв’язання яких потребує перебору сотень тисяч або

навіть мільйонів можливих комбінацій. Традиційно для таких задач використовують високопродуктивні суперкомп'ютери. Однак кількість подібних обчислювальних систем є обмеженою, тоді як наукових проєктів, що потребують значних обчислювальних ресурсів значно більше.

Кластерні та розподілені обчислювальні системи забезпечують високу продуктивність і стійкість до відмов за рахунок колективного розподілу навантаження між вузлами. За умов штатної роботи всіх комп'ютерів обчислювальне навантаження має бути рівномірно розподілене між ними. У випадку виходу з ладу одного або кількох вузлів навантаження, яке вони обробляли, повинно бути оперативно перерозподілене між працездатними елементами кластера.

Механізм такого перерозподілу визначається схемою відновлення. Ефективна схема відновлення повинна забезпечувати максимально збалансоване навантаження навіть за умов відмови найбільш несприятливих комбінацій комп'ютерів, тобто має бути орієнтована на оптимізацію роботи системи в найгіршому можливому випадку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведені дослідження в межах цієї тематики зосереджені на задачах балансування навантаження та мають важливе значення для його ефективного розподілу в онлайн-системах з підвищеними вимогами до надійності. Крішна та Шін визначають толерантність до відмов як «здатність системи негайно реагувати на непередбачувані збої апаратного або програмного забезпечення» [1, 2]. Значна частина відмовостійких обчислювальних систем використовує механізм дублювання операцій, за якого кожна дія виконується одночасно на двох або більше паралельних системах. У такому разі, якщо одна з них виходить з ладу, інша може безперервно продовжити виконання завдання.

Окрім забезпечення відмовостійкості, ключовою перевагою кластерних систем є можливість розподілу обчислювального навантаження між окремими комп'ютерами. Керування таким розподілом може здійснюватися динамічно, коли рішення щодо перенесення навантаження залежать від поточного стану системи. Проте задачі з динамічною політикою управління є менш передбачуваними. Альтернативою є використання статичної політики, яка базується на заздалегідь відомій інформації про поведінку системи. У цьому випадку рішення щодо переносу навантаження не залежать від фактичного стану системи в конкретний момент часу, що робить такі підходи менш складними та більш прогнозованими порівняно з динамічними методами [3].

Завдання, що розглядаються в даній роботі, полягають у визначенні способів рівномірного розподілу навантаження між працездатними комп'ютерами у випадках, коли один або декілька вузлів кластера виходять з ладу, а також у побудові відповідних математичних моделей на основі ідеальних кільцевих в'язанок.

Передбачається наявність головного комп'ютера, який виконує прикладне завдання за нормальних умов, і вторинного комп'ютера, що перебирає на себе виконання у разі відмови головного. За аналогією, може існувати й третій комп'ютер, який активується у випадку одночасного виходу з ладу головного та вторинного вузлів, і так далі. За умов коректної роботи всіх комп'ютерів вживаються заходи для рівномірного розподілу навантаження. У разі відмови одного або кількох вузлів навантаження на решту комп'ютерів зростає, однак навіть за таких умов необхідно забезпечити його максимально рівномірний розподіл між доступними ресурсами.

Перерозподіл навантаження у випадку відмови комп'ютера здійснюється на основі списку відновлення процесів, що виконувалися на несправному вузлі. Сукупність усіх таких списків утворює схему відновлення. Таким чином, розподіл навантаження в системі повністю визначається схемою відновлення незалежно від кількості комп'ютерів, що вийшли з ладу.

Більшість сучасних кластерних систем підтримують подібні механізми відновлення у разі відмов, зокрема *nodelist* у *Sun Cluster*, списки пріоритетів у *MS/ServiceGuard* (HP), каскадні групи в *HACMP* (IBM), а також списки представлення у кластерах *Windows Server* (Microsoft) [4].

Схеми відновлення повинні бути розраховані на якомога більшу кількість комп'ютерів c . Це положення обґрунтовано та доведено авторами в межах *Log*-алгоритму, який формує схему відновлення з гарантованою оптимальністю, за умови що максимальна кількість одночасно вимкнених комп'ютерів не перевищує заданого обмеження $\log_2 c$ [5].

Інший підхід, відомий як ошадливий алгоритм, представлено в роботі [6]. Даний алгоритм формує схеми відновлення, які забезпечують оптимальність у ширшому колі ситуацій порівняно з алгоритмом *Log*. Зокрема, ошадливий алгоритм гарантує оптимальний розподіл навантаження навіть у випадках, коли кількість відмовлених комп'ютерів перевищує $\log_2 c$. В основі цього алгоритму лежить математична задача побудови послідовності додатних цілих чисел, для якої всі можливі суми елементів є унікальними та водночас мінімальними [6].

Обчислення ошадливого алгоритму є відносно простим навіть за великої кількості комп'ютерів c . Список відновлення для нульового процесу, що виконується на нульовому комп'ютері, складається з двох компонентів: перший формується на основі послідовності, згенерованої ошадливим алгоритмом, а другий заповнюється номерами комп'ютерів, які не були включені до першої частини. Сукупність усіх таких списків відновлення утворює повну схему відновлення системи.

Розглянуті алгоритми, зокрема *Log* та ошадливий, забезпечують оптимальність розподілу навантаження лише за умови обмеженої кількості відмовлених комп'ютерів у кластері. У роботі [7] проаналізовано найкращі можливі схеми відновлення для довільної кількості пошкоджених вузлів. Однак через високу обчислювальну складність цієї задачі пошук таких схем є надзвичайно складним. У результаті авторам вдалося гарантувати оптимальні схеми відновлення лише для кластерів, що містять не більше 21 комп'ютера.

Таким чином, наявні на сьогодні схеми відновлення здатні ефективно підтримувати лише обмежену кількість комп'ютерів у розподілених системах. Універсального підходу, який би забезпечував оптимальний розподіл навантаження для довільної кількості вузлів у розподіленій мережі, наразі не існує. Це обмеження є особливо критичним для забезпечення ефективної роботи видавничих та інших високонавантажених інформаційних систем.

Мета статті. Розподілені обчислення являють собою клас проєктів, що дозволяють користувачам залучати вільні обчислювальні ресурси власних комп'ютерів для виконання складних наукових обчислень. Існує значна кількість дослідницьких задач, розв'язання яких вимагає перебору сотень тисяч, а інколи й мільйонів

можливих комбінацій. Традиційно для виконання таких обчислень застосовуються високопродуктивні суперкомп'ютери. Однак кількість подібних обчислювальних систем є вкрай обмеженою, тоді як наукових проєктів, що потребують значних обчислювальних потужностей, існує набагато більше.

Основну мету даного дослідження спрямовано на розробку та синтез оптимальних схем відновлення за критерієм рівномірного розподілу навантаження. Запропонований підхід ґрунтується на використанні математичних моделей числових лінійок-в'язанок та ідеальних кільцевих в'язанок, що дозволяє підвищити ефективність балансування навантаження в розподілених обчислювальних системах.

Виклад основного матеріалу дослідження. У більшості кластерних і розподілених обчислювальних систем проєктувальник повинен передбачити схему відновлення, яка визначає порядок перерозподілу робочого навантаження у випадку виходу з ладу одного або кількох комп'ютерів. Основною вимогою до такої схеми є забезпечення максимально рівномірного розподілу навантаження навіть за умов відмови найбільш несприятливих комбінацій вузлів. Розглянемо кластер, що складається з l однакових вузлів, кожен з яких у штатному режимі виконує один процес. Усі процеси характеризуються однаковим обсягом обчислювальної роботи. Схеми відновлення повинні гарантувати оптимальний розподіл навантаження в найгіршому випадку, тобто тоді, коли пошкоджено k комп'ютерів. Зазначені схеми можуть також застосовуватися в кластерах, де на кожному комп'ютері паралельно виконуються кілька незалежних процесів. У даній роботі запропоновано нові схеми відновлення, в яких перша складова базується на відомій ідеальній кільцевій в'язанці (ІКВ), що забезпечує неперетинання збійних маршрутів. Друга складова схеми передбачає побудову такого шляху, за якого наступні збійні маршрути отримують унікальні значення параметра l , мінімально відмінні від відповідних значень попередніх збійних маршрутів. ІКВ називається послідовність $K_n = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ чисел, на якій всі можливі кільцеві суми вичерпують значення чисел натурального ряду від 1 до $S_n = n(n-1)+1$.

Приклад представлення ІКВ з шістьма позначками показується в табл. 1. Можливо виміряти всі 31 відстані, тобто підходить для синтезу схеми відновлення з 32 комп'ютерами (32, тому що відлік починаємо з нульового комп'ютера).

Таблиця 1

Кільцеві суми для ІКВ шостого порядку (1, 3, 2, 7, 8, 10)

p_j	q_j					
	1	2	3	4	5	6
1	1	4	6	13	21	31
2	31	3	5	12	20	30
3	28	31	2	9	17	27
4	26	29	31	7	15	25
5	19	22	24	31	8	18
6	11	14	16	23	31	10

Розглянута послідовність (1, 3, 2, 7, 8, 10) формує одну з ідеальних кільцевих в'язанок шостого порядку. Ідеальні кільцеві в'язанки можуть також інтерпретуватися у вигляді геометричних структур, у яких кожне числове значення відповідає сумі між парами сусідніх елементів. У межах ІКВ циклічні переходи не враховуються, тобто не розглядаються ситуації, за яких сумарна кількість «стрибків» для певного процесу перевищує кількість комп'ютерів у кластері. Під «стрибком» розуміється відстань між несправним вузлом і тим вузлом, на якому процес має бути відновлений. Водночас урахування циклічних переходів приводить до нового математичного формулювання задачі, що полягає у знаходженні максимально довгої послідовності додатних цілих чисел, для якої всі можливі суми елементів послідовності (включно з підпослідовностями довжини один) є унікальними до заданого значення S_n . Таке математичне формулювання задачі дозволяє побудувати більш потужні схеми відновлення на основі ідеальних кільцевих в'язанок, які здатні ефективно працювати за більшої кількості пошкоджених комп'ютерів порівняно з відомими модульними схемами [8].

Водночас використання схем числових лінійок-в'язанок забезпечує гарантовано оптимальну поведінку системи лише у випадку відмови не більш ніж 26 комп'ютерів, де $l_{26} = 492$, так як для більших значень ще не відомо чи відповідні числові лінійки-в'язанки оптимальні або ні [9]. Користуючись схемою ІКВ можна гарантувати близьку до оптимальної поведінку для будь-якої кількості S_n комп'ютерів різної потужності, так як Зінгеріві ІКВ існують для n за умови:

$$n = p^\alpha + 1, \quad (1)$$

де n – порядок ІКВ,

S_n – сума ІКВ,

p – просте число,

α – натуральне число.

Схемою відновлення розподіленої системи, яка забезпечує оптимальний рівномірний розподіл навантаження в найгіршому випадку, коли з ладу виходять k комп'ютерів однакової обчислювальної потужності x , вважається оптимальна схема відновлення за критерієм балансування навантаження для відповідного значення S_n і відповідної потужності на основі ідеальних кільцевих в'язанок. У випадку, коли всі комп'ютери розподіленої системи мають однакову обчислювальну потужність, для всієї системи використовується єдина схема відновлення. Якщо ж потужність комп'ютерів є неоднорідною, розподілену систему доцільно поділити на l груп відповідно до рівня обчислювальної продуктивності. Для кожної з утворених груп застосовується окрема схема відновлення, яка визначається кількістю комп'ютерів у відповідній групі S_l в групі l , що дозволить гарантувати оптимальне рівномірне поширення навантаження, як в кожній з груп комп'ютерів, так і в їх сукупності.

Схеми відновлення, побудовані на основі ідеальних кільцевих в'язанок, можуть бути безпосередньо впроваджені в комерційні кластерні системи. Отримані результати також можуть знайти застосування у зовнішніх системах, наприклад у

телекомунікаційних центрах, які виконують функції комутації та маршрутизації даних між різними вузлами розподіленої системи або кластера, де кожен вузол має власну мережеву адресу. У таких умовах списки відновлення фактично виконують роль альтернативних точок призначення в зовнішніх системах [10]. Це дозволяє забезпечити безперервність обробки та передачі даних у разі відмов окремих вузлів. Використовуючи алгоритм швидкого синтезу ІКВ, побудований на апараті полів Галуа, формуються перші складові схем відновлення на основі ІКВ, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Моделі схем відновлення на основі ІКВ ($n < 21$)

Сума послідовності	n	Перша частина схем відновлення на основі ІКВ
13	4	0 1 3 9 13
21	5	0 1 4 14 16 21
31	6	0 1 3 8 12 18 31
57	8	0 1 3 13 32 36 43 52 57
73	9	0 1 3 7 15 31 36 54 63 73
91	10	0 1 3 9 27 49 56 61 77 81 91
133	12	0 1 3 12 20 34 38 81 88 94 104 109 133
183	14	0 1 3 16 23 28 42 76 82 86 119 137 154 175 183/
273	17	0 1 3 7 15 31 63 90 116 127 136 181 194 204 233 238 255 273
307	18	0 1 3 21 25 31 68 77 91 170 177 185 196 212 225 257 269 274 307
381	20	0 1 3 12 17 65 75 94 117 124 132 145 163 167 200 271 297 303 337 357 381

Перші частини таких схем відновлення утворюються шляхом обчислення сум усіх суміжних елементів, починаючи з нульового значення і до сумарного значення всіх елементів в'язанки S_n . Другі складові схем відновлення, сформованих на основі ідеальних кільцевих в'язанок, конструюються у вигляді послідовності послідовно розміщених числових значень, які не збігаються з ваговими коефіцієнтами відповідних ідеальних кільцевих в'язанок. Наприклад, для ІКВ (1, 2, 6, 4) з параметрами $n = 4$ та $S_n = 13$ перша частина схеми відновлення відповідає числам (0, 1, 3, 9, 13), а друга частина схеми відновлення відповідає числам (2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12). Аналогічним чином формуються перша та друга складові схем відновлення на основі ідеальних кільцевих в'язанок і для ІКВ з більшою кількістю елементів, що відповідає збільшенню кількості комп'ютерів у розподіленій системі.

Розроблено програмне забезпечення, призначене для побудови схем відновлення в системах розподілених обчислень довільної розмірності з використанням ІКВ, зокрема для комп'ютерів з різною обчислювальною потужністю. Програмна реалізація виконана в інтегрованому середовищі Microsoft Visual Studio з використанням виключно стандартних компонентів. Розроблена програма забезпечує ко-

ректну роботу в середовищі операційних систем сімейства Windows. Після запуску програмного забезпечення, користувачеві необхідно задати наступні параметри:

– вхідні дані ІКВ розмірності n (значення ваг n елементів ІКВ);
 – кількість комп'ютерів, що використовуються в розподілених обчисленнях, до значення суми елементів ІКВ S_n ;

– номери комп'ютерів, які є пошкодженими і не працюють, при умові, що загальна кількість комп'ютерів менше суми елементів ІКВ S_n .

Інтерфейс програми схеми відновлення для кластерних обчислень на основі ІКВ, коли всі комп'ютери активні представлений на рис. 1.

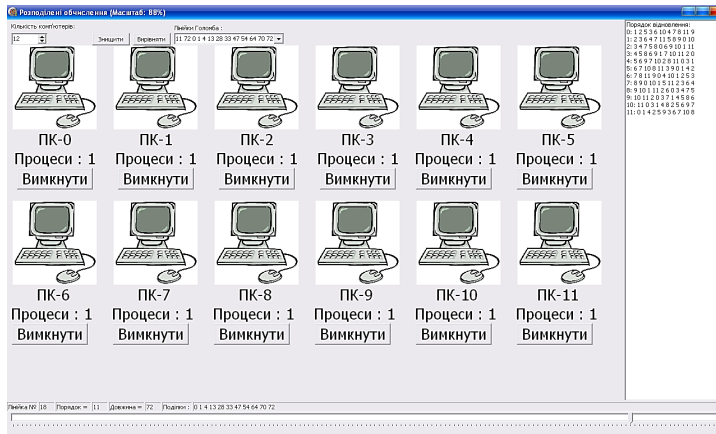


Рис. 1. Схема відновлення, коли всі комп'ютери активні

Після виконання зазначених дій стає можливим поетапний запуск процесу моделювання функціонування схеми відновлення виконання процесів у системі розподілених обчислень, побудованої на основі ідеальної кільцевої в'язанки.

Для цього користувачеві необхідно ввести номер комп'ютера, що зазнав відмови, наприклад нульовий вузол, після чого ініціювати моделювання шляхом натискання відповідної кнопки <OK>, (рис. 2).

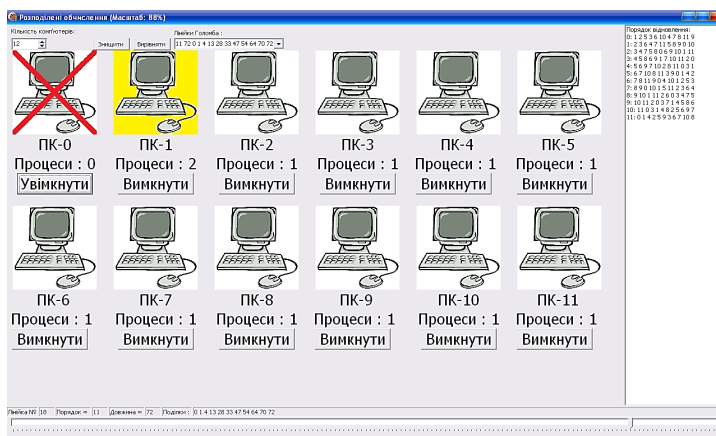


Рис. 2. Схема відновлення, коли вимкнений перший комп'ютер

Схема відновлення, коли вимкнені перший, четвертий, сьомий і одинадцятий комп'ютери (рис. 3).

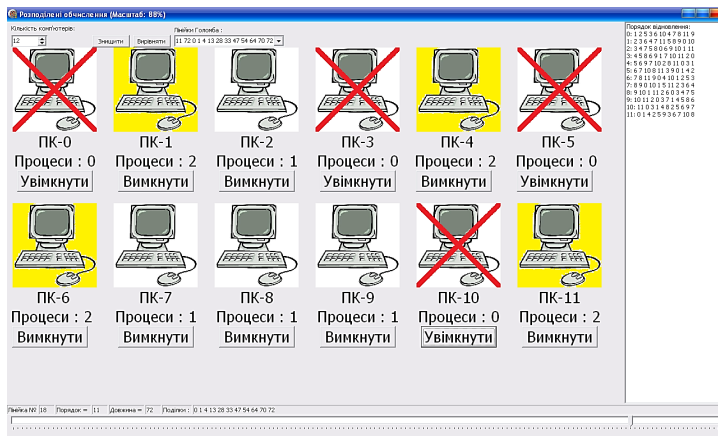


Рис. 3. Схема відновлення, коли вимкнені перший, четвертий, сьомий і одинадцятий комп'ютери

Схема відновлення, коли вимкнені всі комп'ютери, крім дванадцятого (рис. 4).

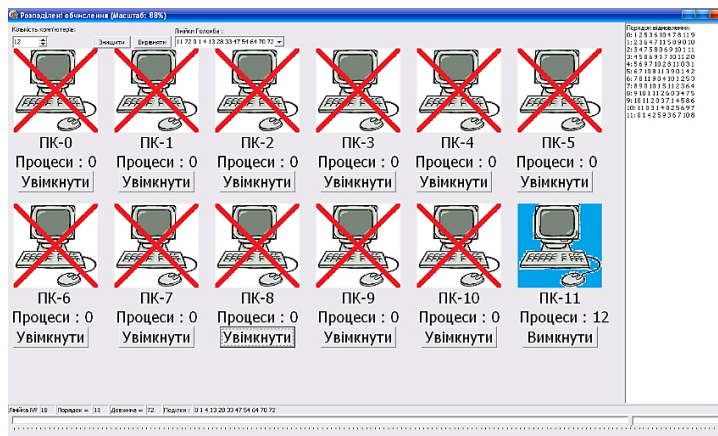


Рис. 4. Схема відновлення, коли вимкнені всі комп'ютери PC1, крім дванадцятого

Схеми відновлення передбачають розподіл обчислювального навантаження з метою балансування системи у випадку виходу з ладу окремих комп'ютерів. Розроблено та апробовано програмне забезпечення, призначене для формування схем відновлення в системах розподілених обчислень довільної розмірності з використанням ідеальних кільцевих в'язанок, зокрема для комп'ютерів з різною обчислювальною потужністю.

Висновки. Розроблено метод побудови схем відновлення для систем розподілених обчислень довільної розмірності з використанням ідеальних кільцевих в'язанок, призначений для комп'ютерів з різною обчислювальною потужністю, що

становлять основу багатьох сучасних обчислювальних систем. Запропонований метод разом із розробленим програмним забезпеченням для побудови схем відновлення в системах розподілених обчислень усуває обмеження щодо кількості комп'ютерів, що можуть бути задіяні в системі, та забезпечує масштабованість і гнучкість її функціонування. Практична цінність запропонованого методу полягає у можливості швидкого формування схем відновлення будь-якої довжини, які можуть бути ефективно застосовані в широкому спектрі обчислювальних середовищ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. Xu, G. Tong, Q. Chen and M. Wu, «A New Evaluation Method of The Fault Recovery Scheme for Medium-low Voltage DC Distribution Network,» 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, 2020, pp. 1730-1735, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136433.
2. S. Roh, M. -C. Choi and D. -K. Jeong, «A Maximum Eye Tracking Clock-and-Data Recovery Scheme with Golden Section Search(GSS) Algorithm in 28-nm CMOS,» 2021 18th International SoC Design Conference (ISOCC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2021, pp. 47-48, doi: 10.1109/ISOCC53507.2021.9613919.
3. S. Gong, Y. Yang, Q. Xiang, L. Fan and Y. Yao, «Linewidth Tolerant and Modulation-transparent Carrier Recovery Scheme Using Kurtosis-Based Dichotomy Followed by BPS,» 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Shenzhen, China, 2022, pp. 625-628, doi: 10.1109/ACP55869.2022.10088602.
4. Y. Wang, Z. Qin, Y. Ma, Y. Qi and N. Wu, «A Parallel Carrier Recovery Scheme for an 8Gbps Terahertz Communication System,» 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Chongqing, China, 2020, pp. 1308-1313, doi: 10.1109/ICCC49849.2020.9238875.
5. H. Kim, H. Y. Yeom and Y. Son, «An Efficient Database Backup and Recovery Scheme using Write-Ahead Logging,» 2020 IEEE 13th International Conference on Cloud Computing (CLOUD), Beijing, China, 2020, pp. 405-413, doi: 10.1109/CLOUD49709.2020.00062.
6. J. Hu, Y. Li, Y. Sun, C. Zhu, Q. Liu and J. Wu, «An Adaptive Fast Recovery Scheme Based on Checkpoints: Analysis and Application in Asymmetric Multiprocessor Systems,» 2025 IEEE 24th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), Guiyang, China, 2025, pp. 1275-1282, doi: 10.1109/Trustcom66490.2025.00147.
7. C.-H. Wu et al., «Robust Recovery Scheme for MFIS-FeFETs at Optimal Timing with Prolonged Endurance: Fast-Unipolar Pulsing (100 ns), Nearly Zero Memory Window Loss (0.02 %), and Self-Tracking Circuit Design,» 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEDM45741.2023.10413819.
8. O. Riznyk, Y. Kynash, O. Povshuk and V. Kovalyk, «Recovery schemes for distributed computing based on BIB-schemes,» 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 134-137, doi: 10.1109/DSMP.2016.7583524.
9. O. Riznyk, I. Yurchak and O. Povshuk, «Synthesis of optimal recovery systems in distributed computing using ideal ring bundles,» 2016 XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 220-222, doi: 10.1109/MEMSTECH.2016.7507545.
10. O. Riznyk, Y. Kynash, N. Kustra and R. Kuharchuk, «Construction of security smart systems using wireless sensor networks,» 2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSIT61576.2023.10324230.

REFERENCES

1. J. Xu, G. Tong, Q. Chen and M. Wu, «A New Evaluation Method of The Fault Recovery Scheme for Medium-low Voltage DC Distribution Network,» 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, 2020, pp. 1730-1735, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136433.
2. S. Roh, M. -C. Choi and D. -K. Jeong, «A Maximum Eye Tracking Clock-and-Data Recovery Scheme with Golden Section Search(GSS) Algorithm in 28-nm CMOS,» 2021 18th International SoC Design Conference (ISOC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2021, pp. 47-48, doi: 10.1109/ISOC53507.2021.9613919.
3. S. Gong, Y. Yang, Q. Xiang, L. Fan and Y. Yao, «Linewidth Tolerant and Modulation-transparent Carrier Recovery Scheme Using Kurtosis-Based Dichotomy Followed by BPS,» 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Shenzhen, China, 2022, pp. 625-628, doi: 10.1109/ACP55869.2022.10088602.
4. Y. Wang, Z. Qin, Y. Ma, Y. Qi and N. Wu, «A Parallel Carrier Recovery Scheme for an 8Gbps Terahertz Communication System,» 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Chongqing, China, 2020, pp. 1308-1313, doi: 10.1109/ICCC49849.2020.9238875.
5. H. Kim, H. Y. Yeom and Y. Son, «An Efficient Database Backup and Recovery Scheme using Write-Ahead Logging,» 2020 IEEE 13th International Conference on Cloud Computing (CLOUD), Beijing, China, 2020, pp. 405-413, doi: 10.1109/CLOUD49709.2020.00062.
6. J. Hu, Y. Li, Y. Sun, C. Zhu, Q. Liu and J. Wu, «An Adaptive Fast Recovery Scheme Based on Checkpoints: Analysis and Application in Asymmetric Multiprocessor Systems,» 2025 IEEE 24th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), Guiyang, China, 2025, pp. 1275-1282, doi: 10.1109/Trustcom66490.2025.00147.
7. C. -H. Wu et al., «Robust Recovery Scheme for MFIS-FeFETs at Optimal Timing with Prolonged Endurance: Fast-Unipolar Pulsing (100 ns), Nearly Zero Memory Window Loss (0.02 %), and Self-Tracking Circuit Design,» 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IEDM45741.2023.10413819.
8. O. Riznyk, Y. Kynash, O. Povshuk and V. Kovalyk, «Recovery schemes for distributed computing based on BIB-schemes,» 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 134-137, doi: 10.1109/DSMP.2016.7583524.
9. O. Riznyk, I. Yurchak and O. Povshuk, «Synthesis of optimal recovery systems in distributed computing using ideal ring bundles,» 2016 XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine, 2016, pp. 220-222, doi: 10.1109/MEMSTECH.2016.7507545.
10. O. Riznyk, Y. Kynash, N. Kustra and R. Kuharchuk, «Construction of security smart systems using wireless sensor networks,» 2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSIT61576.2023.10324230.

SYNTHESIS OF RECOVERY SCHEMES IN DISTRIBUTED COMPUTINGS FOR PUBLISHING SYSTEMS

O. Y. Riznyk¹, D.-V. Y. Voronovsky², E. E. Matviychuk³,
E. E. Savelov⁴, R. A. Soltysik⁵

1. Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine <https://orcid.org/0000-0002-3815-043X> e-mail: oleh.y.riznyk@lpnu.ua

2. National Forestry University of Ukraine, 103 General Chupryny St., Lviv, 79057, Ukraine <https://orcid.org/0000-0002-2762-1215> e-mail: 25voronovskyi.d@nltu.lviv.ua

3. Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine <https://orcid.org/0009-0007-2557-1810> e-mail: yevhenii.y.matviichuk@lpnu.ua

4. Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine <https://orcid.org/0009-0004-1918-8610> e-mail: Yevhenii.E.Savelov@edu.lpnu.ua

5. Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine <https://orcid.org/000-0002-6040-4168> e-mail: roman.a.soltysik@lpnu.ua

Distributed computing is an approach to solving resource-intensive computing problems by involving several computers, which are usually combined into a parallel computing system. Performing sequential calculations within distributed systems is advisable when solving a large number of problems simultaneously, in particular in distributed control systems. The key feature of distributed multiprocessor computing systems, in contrast to local supercomputers, is the possibility of practically unlimited performance increase due to scaling of computing resources. The study analyzed existing methods for constructing recovery schemes for distributed computing systems of arbitrary dimensions. The application of ideal ring bundles for forming optimal recovery schemes according to the criterion of uniform load distribution in cases of damage to any number of computers of both the same and different computing power is considered. For the first time, recovery schemes with optimal load balancing for an arbitrary number of failed nodes of different productivity, built on the basis of ideal ring bundles, have been developed.

Keywords: load balancing, ideal ring bundle, clusters, distributed systems, recovery scheme.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0 © О. Я. Різник, Д.-В. Ю. Вороновський, Є. Є. Матвійчук, Є. Є. Савелов, Р. А. Солтисік

Стаття надійшла до редакції 26.02.2026.

Received 26.02.2026.

Стаття прийнята 20.05.2026.

Accepted 20.05.2026.

Опубліковано 30.05.2026.

Published 30.05.2026.