



**СТРУКТУРНО - ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ
КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ
КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

Монографія

КИЇВ 2017

Рекомендовано Вченою радою Київського
національного університету технологій та дизайну
(Протокол № 3 від 29 листопада 2017 року)

Рецензенти:

Кондратенко І. П. – д-р техн. наук, проф., член-кореспондент
Інституту електродинаміки НАН України;

Денисюк С. П. – д-р техн. наук, проф., директор Інституту
енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»;

Красніцький С. М. – д-р фіз.-мат. наук, проф. кафедри інформаційних
технологій проектування Київського національного університету
технологій та дизайну.

С87 Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення: колективна монографія / кер. кол. авт. і наук. ред. д-р техн. наук, проф. В. В. Каплун; Київський національний університет технологій та дизайну. – К.: КНУТД, 2017. – 189 с.

ISBN 978-617-7506-02-6

Монографія присвячена теоретичному обґрунтуванню та розробці методів структурно-параметричного синтезу комбінованих систем електроживлення з поновлюваними джерелами із урахуванням їх надлишкової структури та заданих функціональні властивостей, характеру електроспоживання і закономірностей надійнісно-вартісних характеристик для підвищення ефективності електроживлення локальних об'єктів на основі smart-технологій. Досягнення поставленого наукового завдання базується на узгодженні детермінованого обрання структурно-параметричних організацій традиційних та поновлюваних джерел енергії, особливостей їх стохастичного функціонування з урахуванням характеру електроспоживання та закономірностей формування динамічної вартості електроенергії мікроенергетичних систем з різномірними джерелами для обґрунтування принципів оптимального управління електроспоживанням енергоефективних будівель (пасивних будинків).

УДК 621.311.2

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. КОМБІНОВАНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ У ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЛЯХ (пасивних будинках)	11
1.1 Аналіз енергоефективності будівель житлового сектору України	11
1.2 Сучасні підходи у будівництві житла та їх енергозабезпечення	14
1.3 Закономірності автономного енергозабезпечення житлових будинків	18
1.4 Обґрунтування використання комбінованих систем енергозабезпечення житлових будинків	22
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ (пасивних будинків)	27
2.1 Базові принципи енергозабезпечення енергоефективних будівель (пасивних будинків)	27
2.2 Особливості проектування пасивних будинків	34
2.3 Використання поновлюваних джерел у комплексному енергозабезпеченні пасивних будівель	37
РОЗДІЛ 3. МЕТОД НАДІЙНІСНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОГО АНАЛІЗУ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ІЗ СТРУКТУРНОЮ НАДМІРНІСТЮ	41
3.1 Аналіз надійності електрозабезпечення на основі комбінованих систем електроживлення	41
3.2 Імовірнісна модель функціонування комбінованих систем електроживлення з декількома джерелами енергії	45
3.3 Модель структурно-алгоритмічного синтезу	51

комбінованих систем електроживлення	
РОЗДІЛ 4. УМОВНИЙ ДИНАМІЧНИЙ ТАРИФ ЯК КОМПЛЕКСНИЙ КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ	59
4.1 Передумови динамічного ціноутворення у локальних електроенергетичних системах	59
4.2 До питання формування енергобалансу мікро-сітки локального об'єкта	62
4.3 Структура та енергоінформаційні зв'язки між елементами комбінованої системи електроживлення локального об'єкта	64
4.4 Вплив стохастичного надходження первинної енергії вітру і сонця на топологію структур комбінованих систем електроживлення з поновлюваними джерелами	59
4.5 Моделювання процесу генерації електроенергії поновлюваними джерелами на основі використання статистичних даних	83
4.6 Прогнозування енергобалансу комбінованих систем електроживлення з вітро-сонячними електростанціями	91
РОЗДІЛ 5. РЕСУРСНО-ПРОЦЕСНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ	99
5.1 Інтелектуальні мережі електроживлення як платформа підвищення ефективності енергозабезпечення локальних об'єктів	96
5.2 Режими функціонування мікроенергосистем з використанням технологій Smart Grid	99
5.3. Асинхронний режим функціонування мікроенергетичної системи	102
5.4 Microgrid з безперервною генерацією електричної енергії	113
5.5 Режим безперервного електрозабезпечення кінцевих споживачів	122
РОЗДІЛ 6. РЕАЛІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ	135

МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ	
6.1 Модель інтелектуального управління комбінованими системами електроживлення локальних об'єктів	134
6.2 Обґрунтування змішаних режимів виконання паралельних процесів у комбінованій системі електроживлення	137
6.3 Розробка програмного забезпечення та реалізація об'єктно-орієнтованих алгоритмів автоматизованого управління комбінованими системами електроживлення	140
РОЗДІЛ 7. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ	150
7.1 Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення	150
7.2 Підвищення енергоефективності трифазних систем електроживлення з використанням активних силових фільтрів	156
ВИСНОВКИ	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	171
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	179

РОЗДІЛ 5. РЕСУРСНО-ПРОЦЕСНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

5.1 Інтелектуальні мережі електроживлення як платформа підвищення ефективності енергозабезпечення локальних об'єктів

Енергоефективність як стратегічна мета останнім часом все частіше ототожнюється з технологією Smart Grid, як сучасною, інноваційною платформою розвитку електроенергетики. Однак розгортання реальних проєктів з впровадження енергозберігаючих технологій на основі Smart Grid пов'язані зі значними труднощами, передусім системного характеру, що потребують значних капіталовкладень і орієнтуються в першу чергу на режимні процеси виробництва, транспорту та розподілу електроенергії в існуючих енергосистемах. Як показує аналіз, процеси енергоспоживання на рівні кінцевого споживача мають надзвичайно великий потенціал щодо енергозбереження, стимулюючи його до ефективного використання енергії, впровадження нового обладнання з прогнозованим терміном окупності та формування принципово нової поведінки, спрямованої на узгодження потреб у енергії з її вартістю в режимі реального часу [99].

Ідея використання інтелектуальної мережі в якості платформи для підвищення енергоефективності локальних об'єктів, в першу чергу житлових будинків, все частіше одержує підтримку у клієнтів, що виступають інвесторами на довгостроковий період, будуючи житло для себе і на продаж. Розробка нових принципів побудови мікроенергетичних систем стала базовою основою для інтелектуалізації енергоспоживання. Технічна база мікроенергетичної системи з інтегрованою до неї інформаційною мережею та вимірювальними компонентами реалізує технологію Smart Micro Grid, основна ідея якої полягає не просто у ефективному використанні електроенергії, а,

передусім, у зміні відношення до процесу електроспоживання кінцевого споживача з урахуванням її змінної вартості протягом доби. Вартість електроенергії обумовлюється не лише диференційованими тарифами енергопостачальної компанії, а за рахунок накопичення та власної (внутрішньооб'єктної генерації) електроенергії зокрема з використанням поновлюваних джерел [99,100,101].

Заходи, які споживачі електроенергії можуть реалізовувати при управлінні електроспоживання дійсно можна класифікувати як «енергоефективні» та «енергоощадні», але за умови, зменшення витрат на електрозабезпечення вцілому, впродовж всього терміну експлуатації об'єкта та його інженерних мереж. Ця позиція є принциповою при розробці проектів електрозабезпечення локальних об'єктів та їх техніко-економічного обґрунтування особливо в умовах стрімкого зростання вартості енергоносіїв та прогнозованого об'єму генерації від власних джерел з визначеними надійнісно-вартісними показниками.

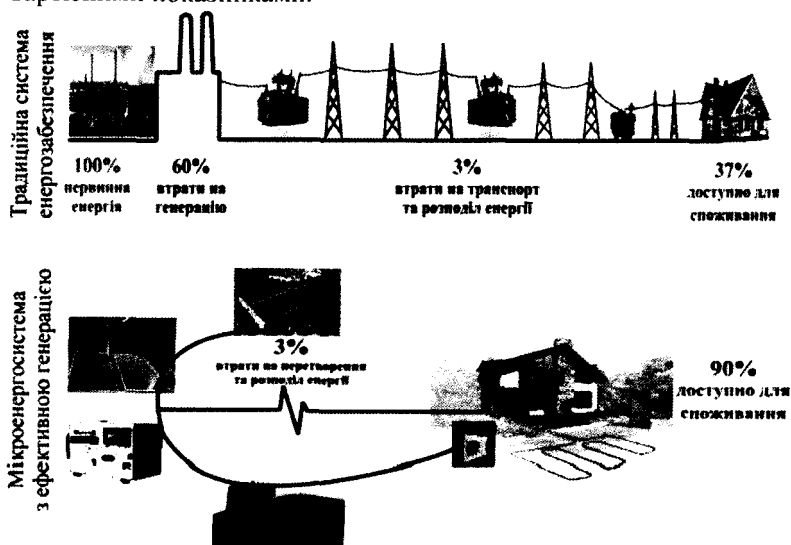


Рис. 5.1– Коцептуальні відмінності функціональності СЦЕП та локальних мікроенергосистем

Концепція Microgrid є найсучаснішим підходом для інтеграції великої кількості джерел розподіленої генерації невеликої потужності до зовнішніх електромереж. Ключовою особливістю Microgrid, є її здатність, під час порушення роботи зовнішньої мережі відокремити та ізолювати себе на певний час і забезпечити електроживлення без зниження якості електроенергії. При відновленні стандартних параметрів мережі Microgrid автоматично повертається до початкового стану і повторно підключається до зовнішньої мережі і синхронізує свою роботу з нею.

Унікальність Microgrid полягає в можливості забезпечити цю технічну функціональність без значних капітальних витрат. Крім того, такі інженерні рішення конструктивно забезпечують більш високий рівень надійності електрозабезпечення і оперативну гнучкість при використанні джерел розподіленої генерації в Microgrid.

Концепція Microgrid з використанням декількох невеликих джерел генерації, накопичення електроенергії та неперервний моніторинг стану зовнішньої мережі та власної мікроенергосистеми і облік електроспоживання вимагає розв'язання наступних задач:

- 1) здійснення автоматичних комутацій між зовнішньою електромережею та мікроенергосистемою, перехід на автономний режим електрозабезпечення;

- 2) розробка принципів побудови та алгоритмів функціонування електричних захистів в Microgrid;

- 3) розробка принципів побудови системи інтелектуального керування та алгоритмів функціонування Microgrid для забезпечення стійкості роботи мікроенергосистеми при обміні енергії з зовнішньою мережею та при роботі в автономному режимі [101,102].

Прийmemo, що математична модель інтелектуальної масштабованої розподіленої мікромережі включає в себе [103]:

- $n \geq 2$ – кількість джерел розподіленої генерації електричної енергії;
- $p \geq 2$ – кількість кінцевих споживачів електроенергії;
- $s \geq 2$ – кількість порцій (блоків) структурованих конкуруючих потоків електроенергії від джерел розподіленої генерації з врахуванням цінових діапазонів;
- $T = [t_{ij}]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$ – матрицю термінів передачі електричної енергії i -м джерелом з j -го цінового діапазону;
- $C = [c_{ij}]_{n \times s}$ – матрицю вартості одиниці електроенергії із j -го цінового діапазону при генерації i -м джерелом;
- $\varepsilon > 0$ – параметр, що характеризує системний час, який витрачається на організацію паралельної передачі електричної енергії від n джерел p кінцевим споживачам.

Передбачається, що всі джерела електричної енергії є *розподіленими*, тобто блоки структурованих потоків електроенергії передаються різним кінцевим споживачам.

5.2 Режими функціонування мікроенергосистем з використанням технологій Smart Grid

Будемо вважати, що взаємодія конкуруючих джерел розподіленої генерації електричної енергії з кінцевими споживачами підпорядковане таким умовам:

- 1) не одне із джерел порцію електроенергії не може передавати одночасно більш ніж одному споживачеві;
- 2) не один з кінцевих споживачів не може приймати одночасно понад одну порцію електричної енергії від джерел розподіленої генерації;
- 3) передача (прийом) кожної порції електроенергії здійснюється без переривань;
- 4) розподіл порцій електричної енергії від джерел розподіленої генерації кінцевим споживачам комп'ютерною системою здійснюється циклічно за правилом: блок з номером

$j = kp + i$, $j = \overline{1, s}$, $i = \overline{1, p}$, $k \geq 0$ передається споживачеві з номером i ;

5) відсутні перерви в електропостачанні кінцевих споживачів, а також відсутні простой в передачі електроенергії при наявності кінцевих споживачів.

Умови 1-5 визначають *асинхронний режим* взаємодії джерел розподіленої генерації і кінцевих споживачів (рис. 5.2).

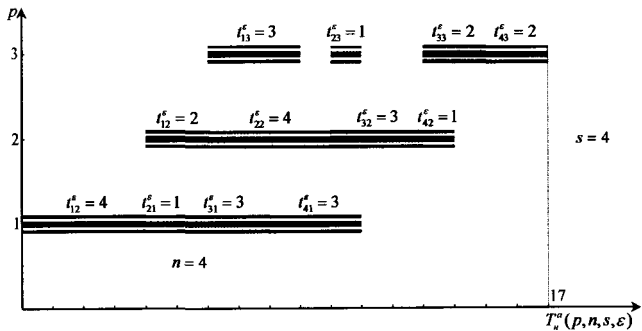


Рис. 5.2 - Асинхронний режим взаємодії 4 джерел і 3 споживачів

Асинхронний режим передбачає, при наявності на передачу електроенергії, відсутність перерв в її передачі джерелами [104], а також обов'язкову передачу електричної енергії розподіленими джерелами при наявності споживачів, де $t_{ij}^e = t_{ij} + \varepsilon$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$

Введемо наступні додаткові умови:

6) для кожного з n джерел розподіленої генерації момент завершення передачі j -ої порції електричної енергії i -ому кінцевому споживачеві збігається з моментом початку передачі наступної $(j+1)$ -ої порції $(i+1)$ -ому кінцевому споживачеві, $i = \overline{1, p-1}$, $j = \overline{1, s-1}$;

7) для кожного кінцевого споживача момент завершення отримання порції енергії від l -го джерела збігається з моментом початку отримання електричної енергії від $(l+1)$ -го джерела розподіленої генерації, $l = \overline{1, n-1}$.

Якщо до умов 1-4 додати по черзі умови 6 і 7, відповідно, то отримаємо два базових синхронних режими функціонування мікро-мережі.

Перший синхронний режим, який визначається умовами 1-4, 6, забезпечує безперервну передачу електричної енергії кінцевим споживачам всіма розподіленими джерелами (рис. 5.3).

Другий синхронний режим, який визначається умовами 1-4, 7, забезпечує безперервне отримання електричної енергії всіма кінцевими споживачами від джерел розподіленої генерації (рис. 5.4).

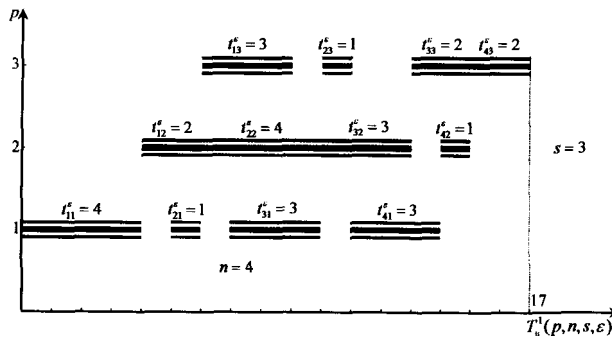


Рис. 5.3 - Перший синхронний режим взаємодії 4 джерел розподіленої генерації і 3 кінцевих споживачів

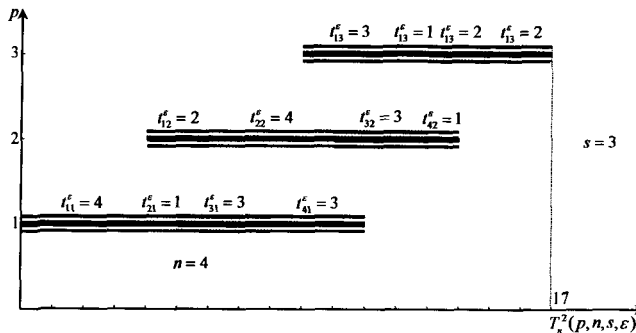


Рис. 5.4 - Другий синхронний режим взаємодії 4 розподілених джерел електричної енергії та 3 кінцевих споживачів

Розподілену мікромережу будемо називати *неоднорідною*, якщо часи передачі електричної енергії кінцевим споживачам різні для різних джерел.

Розподілену мікромережу будемо називати *однорідною*, якщо кожен кінцевий споживач отримує електроенергію від всіх джерел розподіленої генерації рівними блоками, тобо $t_{ij} = t_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$.

Розподілену мікромережу будемо називати *однаково розподіленою*, якщо часи передачі енергії кожним джерелом всім кінцевим споживачам збігаються, тобто справедлива послідовність рівностей, $t_{i1} = t_{i2} = \dots = t_{is} = t_i$, для всіх $i = \overline{1, n}$.

Отримання математичних співвідношень для обчислення точних значень загального часу виконання множини паралельних процесів, що виникають при взаємодії конкуруючих джерел розподіленої генерації електричної енергії з кінцевими споживачами, дозволить в реальному часі оптимально управляти будь-якими сегментами мікромережі, планувати підключення нових об'єктів, оперативно перерозподіляти потоки електроенергії, обробляти великі масиви інформації.

5.3 Асинхронний режим функціонування мікроенергетичної системи

Розглянемо *асинхронний* режим взаємодії джерел розподіленої генерації і кінцевих споживачів, який передбачає відсутність перерв у передачі електроенергії джерелами при її наявності, а також обов'язкову передачу електричної енергії розподіленими джерелами при наявності споживачів.

Позначимо мінімальний загальний час передачі електричної енергії n *неоднорідними* розподіленими конкуруючими джерелами p кінцевим споживачам в асинхронному режимі, з врахуванням вищеведеного параметру ε , через $T_n^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$. Для

обчислення $T_n^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ розглянемо випадки *необмеженого* ($2 \leq s \leq p$) і *обмеженого* ($s > p$) паралелізму.

У разі *необмеженого* паралелізму, тобто коли кількість блоків структурованих потоків електричної енергії не перевищує числа кінцевих споживачів, можна вважати, що кожен Q_j -й блок енергії передається j -ому споживачеві, $j = \overline{1, s}$. Тоді n джерел розподіленої генерації будуть передавати електроенергію $p = s$ споживачам, а решта $p - s$ чекатимуть своєї черги.

Нехай $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$ – $n \times s$ – матриця термінів передачі блоків електричної енергії i -м розподіленим джерелом із j -го цінового діапазону з урахуванням параметру ε . Тоді, якщо встановити взаємнооднозначну відповідність між джерелами і вимогами, ціновими блоками і приладами, то матриця термінів передачі блоків електричної енергії $[t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$ буде збігатися з матрицею термінів обслуговування n вимог s приладами в одномаршрутному завданні Беллмана-Джонсона. Тому для обчислення мінімального загального часу $T_n^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ передачі електроенергії $n \geq 2$ неоднорідними розподіленими конкуруючими джерелами, які використовують структуровані на $s \geq 2$ блоків потоки, в мікроенергетичній системі з $p \geq 2$ кінцевими споживачами з урахуванням параметру $\varepsilon > 0$, можна скористатися функціоналом цього завдання, який в нашому випадку матиме вигляд:

$$T_n^{ac}(s, n, s, \varepsilon) = \max_{1 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{s-1} \leq n} \left[\sum_{i=1}^{u_1} t_{i1}^\varepsilon + \sum_{i=u_1}^{u_2} t_{i2}^\varepsilon + \dots + \sum_{i=u_{s-1}}^n t_{is}^\varepsilon \right], \quad (5.1)$$

де $t_{ij}^\varepsilon = t_{ij} + \varepsilon$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, а u_1, u_2, \dots, u_{s-1} – цілі позитивні числа.

У разі, коли $s = p$, функціонал Беллмана-Джонсона (5.1):

$$T_n^{ac}(p, n, p, \varepsilon) = \max_{1 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{p-1} \leq n} \left[\sum_{i=1}^{u_1} t_{i1}^\varepsilon + \sum_{i=u_1}^{u_2} t_{i2}^\varepsilon + \dots + \sum_{i=u_{p-1}}^n t_{is}^\varepsilon \right].$$

При створенні взаємно-інтегрованих розподілених microgrid і комп'ютерних систем управління краще використовувати метод,

який дозволяє вирішувати задачу визначення мінімального загального часу $T_n^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ передачі неоднорідних розподілених конкуруючих потоків електроенергії в асинхронному режимі.

За заданими n, s матриці передачі електричної енергії з j -го цінового діапазону i -м джерелом $T^{\varepsilon} = [t_{ij}^{\varepsilon}]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, будусмо мережевий вершинно-зважений граф G_1^{ac} , який містить ns вершин, розташованих у вузлах прямокутної $n \times s$ -решітки (рис. 5.5).

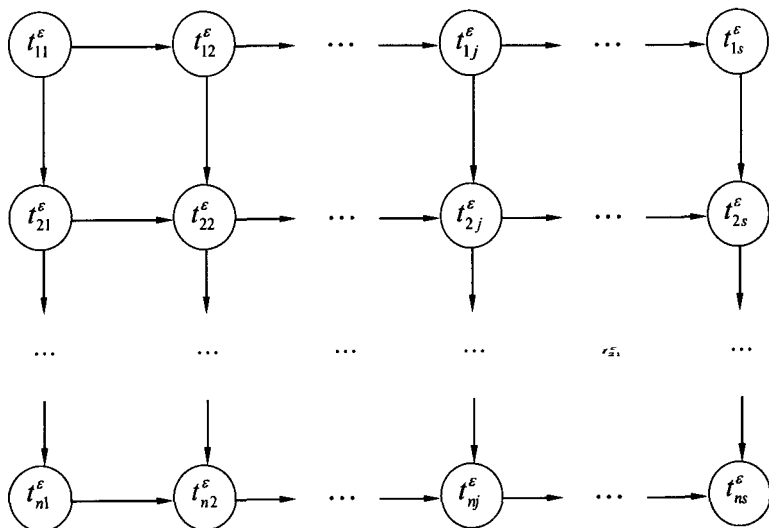


Рис. 5.5 - Мережевий вершинно-зважений граф G_1^{ac}

Кожній вершині графа G_1^{ac} відповідає значення t_{ij}^{ε} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$ причому t_{i1}^{ε} – початкова вершина, t_{ns}^{ε} – кінцева. Дуги в графі G_1^{ac} відображають лінійний порядок передачі блоків Q_j , $j = \overline{1, s}$, структурованих конкуруючих потоків електроенергії кожним джерелом розподіленої генерації [105], а також лінійний порядок

прийому одних і тих же блоків електроенергії різними кінцевими споживачами.

Теорема 1.1. Мінімальний загальний час передачі електричної енергії $n \geq 2$ неоднорідними альтернативними джерелами розподіленої генерації, що використовують структуровані на $s \geq 2$ блоків конкуруючих потоків з часом передачі, що задається матрицею $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, у мікроенергетичній системі з $p \geq 2$ кінцевими споживачами в асинхронному режимі в разі $2 \leq s \leq p$, визначається довжиною критичного шляху в мережевому вершинно-зваженому графі G_1^{ac} з початкової вершини t_{11}^ε в кінцеву t_{ns}^ε .

Теорема 1.2. Мінімальний загальний час $T_n^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ передачі електроенергії $n \geq 2$ неоднорідними розподіленими конкуруючими джерелами, які використовують при передачі лінійно структуровані на $s \geq 2$ блоки потоків з часом передачі, які задаються матрицею $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, у Smart Grid із $p \geq 2$ кінцевими споживачами і додатковими системними витратами $\varepsilon > 0$ в асинхронному режимі у випадку $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, визначається довжиною критичного шляху з початкової вершини t_{11}^ε в кінцеву вершину $t_{(k+1)n, (k+1)p}^\varepsilon$ мережевого вершинно-зваженого графа G_2^{ac} (рис. 5.6).

Доведення. Всі множини з s блоків розіб'ємо на $k+1$ групу по p блоків в кожній, за винятком $(k+1)$ -ої групи, котрі мають містити r блоків. Тоді з урахуванням параметра ε вихідну матрицю термінів передачі блоків $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, kp+r}$, розбиваємо на $(k+1)$ -у підматрицю T_l^ε , $l = \overline{1, k+1}$, розмірністю $n \times p$ кожна, за винятком останньої T_{k+1}^ε , яка буде містити при s не кратному p тільки r стовпців, а решта $p-r$ стовпців будуть нульовими.

По кожній із підматриць T_l^ε , $l = \overline{1, k+1}$, будемо $(k+1)$ - у лінійну діаграму Ганта, які відображають в часі передачу

чергових p блоків структурованих потоків електричної енергії p кінцевим споживачам усіма n джерелами розподіленої генерації (рис. 1.6, $p=3$, $n=4$, $s=8$). При цьому, якщо $r \neq 0$, то $(k+1)$ -діаграма буде відтворювати передачу останніх r блоків p споживачам.

Очевидно, що якщо передачу чергової групи з p блоків починати тільки після всіх процесів, то в цьому випадку n буде визначатися як сума довжин критичних шляхів в кожній з поспіль несуміщених діаграм Ганта, що задаються прямою сумою матриць T_l^e , $l = \overline{1, k+1}$.

Однак, цей час можна істотно скоротити, якщо скористатися прийомом суміщення послідовних діаграм Ганта по осі часу справа наліво. Причому поєднання здійснюється поблочно, починаючи з другої діаграми, на максимально можливу величину таким чином, щоб не порушувалися технологічні умови, які визначають асинхронний режим взаємодії розподілених джерел і кінцевих споживачів.

У результаті поєднання отримаємо результуючу діаграму Ганта, яка буде відображати передачу $n \geq 2$ неоднорідними розподіленими джерелами електроенергії $p \geq 2$ кінцевим споживачам, використовуючи структуровані на $s = kp + r$ блоків конкуруючі потоки (рис. 5.6).

Отримана структура результуючої суміщеної діаграми Ганта буде повністю визначатися матрицею T^* (1.2) термінів передачі блоків структурованих конкуруючих потоків розподіленої генерації від альтернативних джерел і складатися з підматриць $T_1^e, T_2^e, \dots, T_{k+1}^e$ розмірністю $n \times p$ кожна. При цьому підматриці T_l^e , $l = \overline{1, k+1}$, у результуючій матриці T^* розташовуються таким чином, щоб не порушувався характер взаємодії як блоків структурованих конкуруючих потоків, що передаються одним і тим же джерелом, так і блоків, які приймаються одним і тим же кінцевим споживачем.

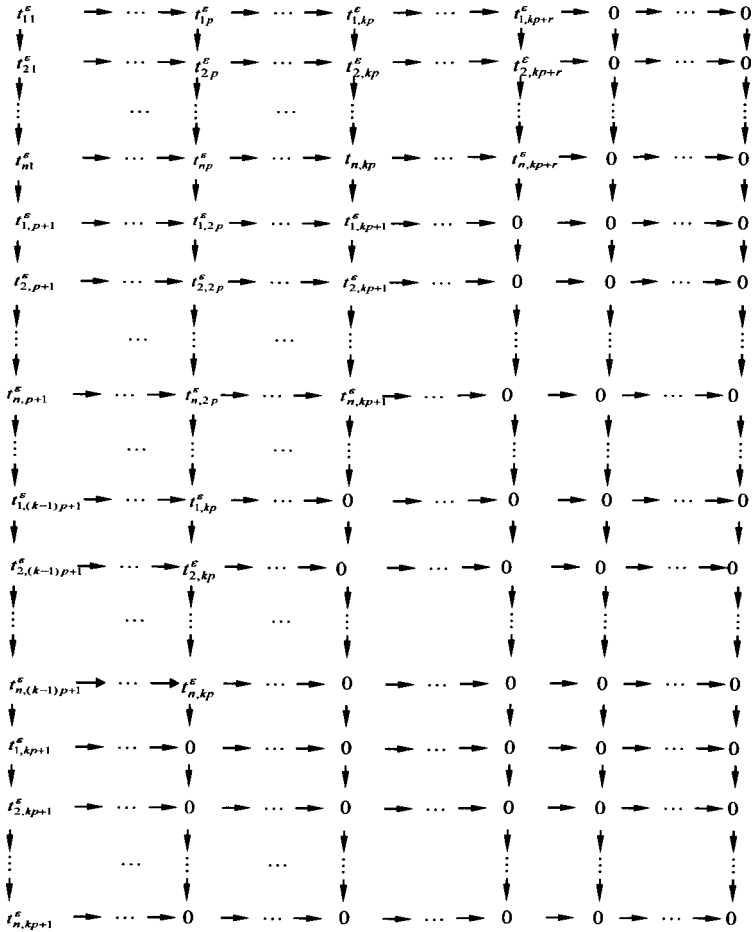


Рис. 5.6 - Мережевий вершинно-зважений граф G_2^∞

Перший рядок матриці T^* буде складатися з підматриць T_l^e , $l = \overline{1, k+1}$, що відображає характер передачі блоків конкуруючих потоків кожним із n джерел:

$$T^* = \begin{bmatrix} T_1^\varepsilon & T_2^\varepsilon & T_3^\varepsilon & \cdots & T_k^\varepsilon & T_{k+1}^\varepsilon \\ T_2^\varepsilon & T_3^\varepsilon & T_4^\varepsilon & \cdots & T_{k+1}^\varepsilon & 0 \\ T_3^\varepsilon & T_4^\varepsilon & T_5^\varepsilon & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ T_k^\varepsilon & T_{k+1}^\varepsilon & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ T_{k+1}^\varepsilon & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

де T_l^ε і T_{k+1}^ε матриці виду:

$$T_l^\varepsilon = \begin{bmatrix} t_{1,(l-1)p+1}^\varepsilon & t_{1,(l-1)p+2}^\varepsilon & \cdots & t_{1,lp}^\varepsilon \\ t_{2,(l-1)p+1}^\varepsilon & t_{2,(l-1)p+2}^\varepsilon & \cdots & t_{2,lp}^\varepsilon \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n,(l-1)p+1}^\varepsilon & t_{n,(l-1)p+2}^\varepsilon & \cdots & t_{n,lp}^\varepsilon \end{bmatrix}, \quad l = \overline{1, k},$$

$$T_{k+1}^\varepsilon = \begin{bmatrix} t_{1,kp+1}^\varepsilon & t_{1,kp+2}^\varepsilon & \cdots & t_{1,kp+r}^\varepsilon & 0 & \cdots & 0 \\ t_{2,kp+1}^\varepsilon & t_{2,kp+2}^\varepsilon & \cdots & t_{2,kp+r}^\varepsilon & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n,kp+1}^\varepsilon & t_{n,kp+2}^\varepsilon & \cdots & t_{n,kp+r}^\varepsilon & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

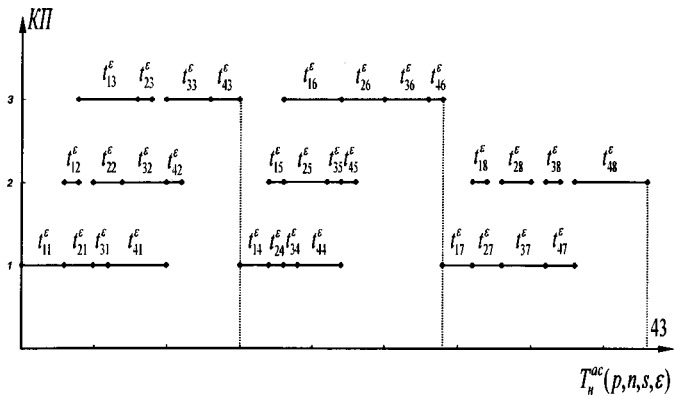


Рис. 5.7 - Несуміщена діаграма Ганта

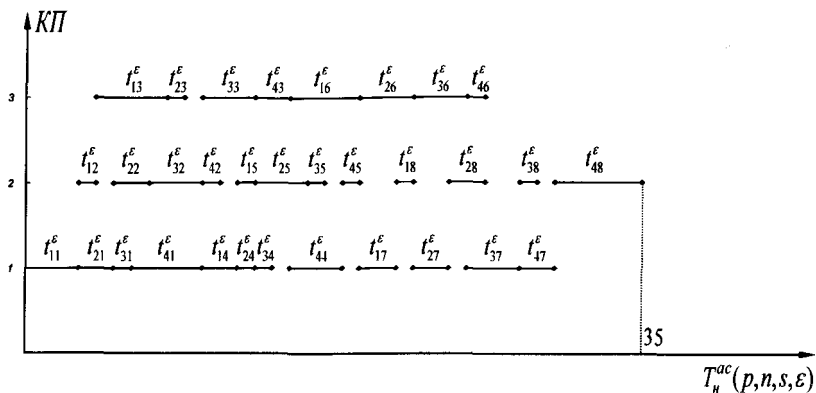


Рис. 5.8 - Суміщена діаграма Ганта

Кожен крок суміщення діаграм визначається відповідними зміщенням підматриць T_l^{ϵ} , $l = \overline{2, k+1}$, таким чином, що рядок, який складається з цих підматриць, зміщується справа наліво на максимальну величину, зберігаючи лінійний порядок передачі блоків електропотоків одним і тим же альтернативним джерелом. З урахуванням того, що всі підматриці T_l^{ϵ} , $l = \overline{1, k+1}$ мають одну і ту ж розмірність $n \times p$, величина зсуву на кожному кроці дорівнює p . Замість зміщеної на кожному кроці найправішої матриці ставляться нулі. Виконавши таким чином k кроків зсувів, отримаємо структуру результуючої матриці T^* , відповідну остаточно суміщеній діаграмі Ганта. Причому в матриці T^* будуть враховані, як всі горизонтальні зв'язки між блоками, так і всі вертикальні, а також зв'язки між блоками з різних діаграм Ганта.

Відзначимо, що результуюча матриця T^* матиме розмірність $(k+1)n \times (k+1)p$. Матриця буде блоковою, симетричною, верхньо діагональною щодо другої діагоналі, типу Ганкелевої порядку $k+1$.

Далі побудуємо мережевий вершинно-зважений граф G_2^{ac} (рис. 5.6) з вагами, що задаються матрицею T^* . Вершини цього графа будуть розташовані у вузлах прямокутної $(k+1)n \times (k+1)p$ -решітки.

Як і в випадку $s \leq p$, загальний час $T_n^{ac}(p, n, s = kp + r, \varepsilon)$ передачі неоднорідними розподіленими конкуруючими джерелами електроенергії споживачам визначається довжиною критичного шляху з початкової вершини t_{11}^e у кінцеву $t_{(k+1)n, (k+1)p}^e$.

Теорему доведено.

Однорідні асинхронні мікроелектро-системи.

У розподіленій однорідній мікромережі приймемо, що кожен кінцевий споживач отримує електроенергію від всіх джерел розподіленої генерації рівними блоками, тобто $t_{ij} = t_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$.

Нехай $(t_1^e, t_2^e, \dots, t_s^e)$ – тривалості передачі кожного із блоків Q_j , $j = \overline{1, s}$, конкуруючих потоків з урахуванням накладних витрат ε , $t_j^e = t_j + \varepsilon$, $j = \overline{1, s}$. Позначимо тривалість передачі всіх блоків електричної енергії кожним з розподілених джерел через $T_\varepsilon^s = \sum_{j=1}^s t_j^s$. Тоді має місце наступна теорема.

Теорема 1.3. Мінімальний загальний час передачі електричної енергії $p \geq 2$ кінцевим споживачем n однорідними джерелами розподіленої генерації, $n \geq 2$, які використовують структуровані на s блоків конкуруючі потоки електроенергії, $s \geq 2$, з термінами передачі блоків $(t_1^e, t_2^e, \dots, t_s^e)$, $\sum_{j=1}^s t_j^s = T_\varepsilon^s$, у разі $2 \leq s \leq p$, в асинхронному режимі становить величину $T_o^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ рівну:

$$T_o^{ac}(p, n, s, \varepsilon) = T_\varepsilon^s + (n-1) \max_{1 \leq j \leq s} t_j^e.$$

Доведення. Функціонал (1.1) у разі однорідної розподіленої microgrid прийматиме вид:

$$T_o^{ac}(p, n, s, \varepsilon) = \max_{1 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{s-1} \leq n} \left[\sum_{i=1}^{u_1} t_1^\varepsilon + \sum_{i=u_1}^{u_2} t_2^\varepsilon + \dots + \sum_{i=u_{s-1}}^n t_s^\varepsilon \right] = T_\varepsilon^s + (n-1) \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\varepsilon,$$

що і доводить теорему.

Матриця термінів передачі блоків структурованих конкуруючих потоків у цьому випадку буде мати розмірність $n \times s$ і складатися із n однакових рядків, тобто матиме вигляд:

$$T^\varepsilon = \begin{bmatrix} t_1^\varepsilon & t_2^\varepsilon & \dots & t_s^\varepsilon \\ t_1^\varepsilon & t_2^\varepsilon & \dots & t_s^\varepsilon \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ t_1^\varepsilon & t_2^\varepsilon & \dots & t_s^\varepsilon \end{bmatrix}.$$

У разі, коли $s > p$, $s = kp$, матриця термінів передачі блоків конкуруючих потоків будується аналогічно, як і матриця (5.2). Відмінність полягає в тому, що у кожній з підматриць T_l^ε , $l = \overline{1, k}$, матриці (5.2) усі рядки збігаються. Якщо $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, то остання підматриця T_{k+1}^ε відповідної матриці термінів передачі блоків міститиме $p - r$ нульових стовпців.

Тоді, за аналогією з теоремою 1.2, загальний час $T_o^{ac}(p, n, s > p, \varepsilon)$ передачі множини однорідних розподілених конкуруючих потоків визначається довжиною критичного шляху з початкової вершини в кінцеву відповідного мережевого графа.

Структурування електричного потоку на s блоки з часом передачі $(t_1^\varepsilon, t_2^\varepsilon, \dots, t_s^\varepsilon)$, $\sum_{j=1}^s t_j^\varepsilon = T_\varepsilon^s$, будемо називати *рівномірним*, якщо $t_1^\varepsilon = t_2^\varepsilon = \dots = t_s^\varepsilon = t^\varepsilon$.

Наслідки. У разі рівномірного структурування для обчислення мінімального загального часу передачі розподіленими конкуруючими альтернативними джерелами електроенергії кінцевим споживачам мають місце формули:

$$T_p^{ac}(p, n, s, \varepsilon) = \begin{cases} (n + s - 1)t^\varepsilon, & \text{если } p \geq \min\{n, s\}, \\ (kn + p - 1)t^\varepsilon, & \text{если } p < \min\{n, s\} \text{ и } s = kp, \\ [(k + 1)n + r - 1]t^\varepsilon, & \text{если } p < \min\{n, s\} \text{ и } s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases}$$

Однаково розподілені мікроенергосистеми. Позначимо через $T_\varepsilon^n = \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon$ – сумарний час передачі кожного із блоків Q_j , $j = \overline{1, s}$, усіма розподіленими джерелами $t_i^\varepsilon = t_i + \varepsilon$, $i = \overline{1, n}$. Тоді справедлива наступна теорема.

Теорема 1.4. Мінімальна загальний час передачі електричної енергії $n \geq 2$ однаково розподіленими альтернативними джерелами, які використовують структурування на $s \geq 2$ конкуруючі потоки в системі з $p \geq 2$ однаковими кінцевими споживачами і додатковими системними витратами $\varepsilon > 0$, в асинхронному режимі становить величину $T_{op}^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$:

$$T_{op}^{ac}(p, n, s, \varepsilon) = \begin{cases} T_\varepsilon^n + (s-1) \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon, & \text{якщо } s \leq p \text{ у } T_\varepsilon^n \leq p \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon, \\ k T_\varepsilon^n + (p-1) \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon, & \text{якщо } T_\varepsilon^n > p \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon \text{ у } s = kp, k > 1, \\ (k+1) T_\varepsilon^n + (r-1) \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon, & \text{якщо} \\ T_\varepsilon^n > p \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon \text{ у } s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases}$$

Доведення. Для доведення розглянемо спочатку випадок, коли число кінцевих споживачів є достатнім, тобто число блоків структурованих конкуруючих потоків $s \leq p$. Тоді елементи матриці термінів передачі блоків потоків електричної енергії $[t_{ij}^\varepsilon]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, матимуть вигляд $t_{ij}^\varepsilon = t_i^\varepsilon$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, і будуть збігатися з відповідними елементами матриці термінів обслуговування вимог приладами в одномаршрутному завданні Беллмана-Джонсона. Тому для обчислення мінімального загального часу $T_{op}^{ac}(p, n, s, \varepsilon)$ передачі конкуруючих потоків можна скористатися функціоналом цього завдання, який у наших позначеннях матиме вигляд:

$$T_{op}^{ac}(p, n, s, \varepsilon) = \max_{1 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{s-1} \leq n} \left[\sum_{i=1}^{u_1} t_i^\varepsilon + \sum_{i=u_1}^{u_2} t_i^\varepsilon + \dots + \sum_{i=u_{s-1}}^n t_i^\varepsilon \right] = T_\varepsilon^n + (s-1) \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon.$$

Розглянемо далі випадок, коли $s = kp$, $k > 1$. Прийmemo, що кінцеві споживачі універсальні. Тоді матриця термінів передачі блоків конкуруючих потоків матиме розмірність $kn \times p$ і складатися з k однакових ненульових підматриць $[t_{ij}^\varepsilon]_{n \times p}$. Обчислення загального часу $T_{op}^{ac}(p, n, s = kp, \varepsilon)$ в цьому випадку за допомогою функціоналу задачі Беллмана-Джонсона приводить до формули:

$$T_{op}^{ac}(p, n, kp, \varepsilon) = \max_{1 \leq u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{p-1} \leq kn} \left[\sum_{i=1}^{u_1} t_i^\varepsilon + \sum_{i=u_1}^{u_2} t_i^\varepsilon + \dots + \sum_{i=u_{p-1}}^{kn} t_i^\varepsilon \right] = kT_\varepsilon^n + (p-1) \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon$$

У разі, коли $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$ відповідна матриця термінів передачі блоків структурованих потоків розмірності $(k+1)n \times p$ матиме в $(k+1)$ -ій підматриці $p-r$ нульових стовпчиків. Обчислення загального часу за допомогою функціоналу задачі Беллмана-Джонсона призводить до третьої формули в теоремі 1.4.

Теорему доведено.

5.4 Microgrid з безперервною генерацією електричної енергії

Розглянемо *перший синхронний режим* взаємодії джерел розподіленої генерації електроенергії і кінцевих споживачів, який забезпечує безперервну передачу електричної енергії кінцевим споживачам кожним розподіленим джерелом [106,107]. Як і для асинхронного режиму функціонування мікроенергетичної системи, дослідження проведемо для *неоднорідних, однорідних і однаково розподілених microgrid*.

Будемо розглядати $n \geq 2$ *неоднорідних* джерел розподіленої генерації, потоки електроенергії від яких структуровані на $s \geq 2$ лінійно-впорядкованих блоків Q_1, Q_2, \dots, Q_s . Передбачається, що джерела конкурують за передачу електричної енергії $p \geq 2$

кінцевим споживачам, тобто є розподіленими. Завдання полягає в знаходженні мінімального загального часу передачі електричної енергії в режимі безперервної передачі джерелами розподіленої генерації $T_n^1(p, n, s, \varepsilon)$.

Нехай $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$ – $n \times s$ – матриця передач блоків електричної енергії i -м джерелом з j -го цінового діапазону з врахуванням накладних витрат ε , при цьому t_{ij}^ε – час передачі Q_j -го блоку i -м джерелом, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$.

Розглянемо випадок, коли число кінцевих споживачів рівне числу блоків структурованих потоків електричної енергії, тобто $p = s$. Для знаходження величини $T_n^1(p, n, s, \varepsilon)$ отримаємо формулу:

$$T_n^1(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n-1} \max_{1 \leq u \leq p} \left[\sum_{j=1}^u t_{ij}^\varepsilon - \sum_{j=1}^{u-1} t_{i+1, j}^\varepsilon \right] + \sum_{j=1}^p t_{nj}^\varepsilon, \quad (5.3)$$

де величина $\max_{1 \leq u \leq p} \left[\sum_{j=1}^u t_{ij}^\varepsilon - \sum_{j=1}^{u-1} t_{i+1, j}^\varepsilon \right]$, $i = \overline{1, n-1}$ – визначає моменти початку передачі першого блоку енергії кожним джерелом, починаючи з другого, а $\sum_{j=1}^p t_{nj}^\varepsilon$ – час передачі останнього p -го блоку електричної енергії.

Розглянемо далі загальний випадок, коли $s > p$.

Нехай $s = kp$, $k > 1$. З огляду на те, що число блоків структурованих конкуруючих потоків електроенергії більше числа кінцевих споживачів в k разів, виконаємо розбиття множини блоків на k груп по p блоків у кожному, що рівносильно розбиттю вихідної матриці термінів передачі електричної енергії T^ε на k підматриць по p стовпців в кожній. Взаємодія джерел розподіленої генерації, кінцевих споживачів і блоків з урахуванням термінів їх передачі для l -ої групи, $l = \overline{1, k}$, можна зобразити у вигляді лінійних діаграм Ганта. Кожна з цих

діаграм відображає в часі передачу чергових p блоків електричної енергії споживачам усіма n джерелами.

На рисунку 5.9 наведені несуміщені (а) і суміщені (б) послідовні діаграми Ганта при $n=4$, $p=3$, $s=9$.

Зауважимо, що при $s > p$ безперервність передачі блоків структурованого конкуруючого потоку електричної енергії може порушуватися при переході від l -ї групи блоків до $(l+1)$ -ої, причому для кожної з груп зберігається безперервна передача блоків кожним джерелом.

Надалі нам знадобляться наступні позначення:

▪ $t_{ij}^{\varepsilon, l} = t_{ij}^l + \varepsilon = t_{i, (l-1)p+j} + \varepsilon$ – час передачі j -го блоку l -ї групи блоків i -м джерелом розподіленої генерації з урахуванням параметра ε , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$;

▪ T_l^{ε} – загальний час передачі джерелами кінцевим споживачам l -ої групи блоків електроенергії, $l = \overline{1, k}$;

▪ $E_{ij}^{\varepsilon, l}$ – час завершення передачі j -го блоку i -м джерелом в l -й групі блоків, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$.

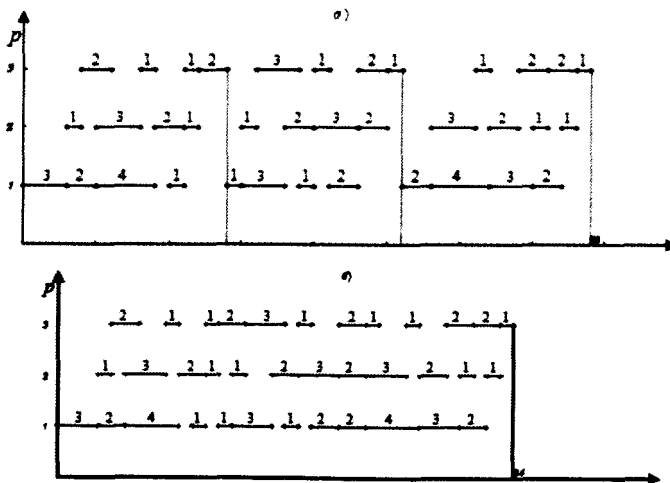


Рис. 5.9 - Несуміщені і поєднані діаграми Ганта

У наслідок (5.3) для всіх $l = \overline{1, k}$ маємо:

$$T_l^\varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} \max_{1 \leq u \leq p} \left[\sum_{j=1}^u (t'_{ij} + \varepsilon) - \sum_{j=1}^{u-1} (t'_{i+1,j} + \varepsilon) \right] + \sum_{j=1}^p (t'_{nj} + \varepsilon), \quad (5.4)$$

$$E_{ij}^{\varepsilon, l} = \sum_{q=1}^{i-1} \max_{1 \leq w \leq p} \left[\sum_{w=1}^u (t'_{qw} + \varepsilon) - \sum_{w=1}^{u-1} (t'_{q+1,w} + \varepsilon) \right] + \sum_{w=1}^j (t'_{iw} + \varepsilon).$$

Із аналізу діаграм Ганта, відповідних кожній з груп блоків, неважко помітити, що загальний час передачі енергії n джерелами розподіленої генерації в разі $s = kp$, $k > 1$, визначається як сума:

$$T_n^1(p, n, s, \varepsilon) = T_n^1(p, n, kp, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon.$$

Час $T_n^1(p, n, kp, \varepsilon)$ можна скоротити, якщо скористатись прийомами суміщенням послідовних діаграм Ганта по осі часу справа наліво. У результаті отримаємо:

$$\delta_l' = \min_{1 \leq j \leq p} \left[T_l^\varepsilon + \sum_{w=1}^{j-1} t_{1w}^{\varepsilon, l+1} - E_{nj}^{\varepsilon, l} \right] = \min_{1 \leq j \leq p} \left[\sum_{w=j+1}^p t_{nw}^{\varepsilon, l} + \sum_{w=1}^{j-1} t_{1w}^{\varepsilon, l+1} \right], \quad l = \overline{1, k-1}, \quad (5.5)$$

де $\delta_l' = \min\{\delta_l', \delta_l''\}$ позначає довжину відрізка максимально можливого суміщення двох послідовних діаграм Ганта по осі часу. Тут δ_l' – відрізок можливого суміщення по осі часу, що представляє собою різницю між моментом початку передачі j -го блоку першим джерелом для $(l+1)$ -ої групи блоків і моментом завершення передачі j -го блоку останнім джерелом для l -ої групи блоків, тобто

$$\delta_l' = \min_{1 \leq j \leq p} \left[T_l^\varepsilon + \sum_{w=1}^{j-1} t_{1w}^{\varepsilon, l+1} - E_{nj}^{\varepsilon, l} \right] = \min_{1 \leq j \leq p} \left[\sum_{w=j+1}^p t_{nw}^{\varepsilon, l} + \sum_{w=1}^{j-1} t_{1w}^{\varepsilon, l+1} \right], \quad l = \overline{1, k-1}, \quad (5.6)$$

а значення δ_i^* являє собою різницю між початком передачі першого блоку i -м розподіленим джерелом для $(l+1)$ -ої групи блоків і моментом завершення передачі p -го блоку i -м джерелом для l -ї групи блоків, тобто

$$\delta_i^n = \min_{1 \leq i \leq n} [T_i^\varepsilon + E_{i1}^{\varepsilon,l+1} - t_{i1}^{\varepsilon,l+1} - E_{ip}^{\varepsilon,l}], \quad l = \overline{1, k-1}. \quad (5.7)$$

Підставляючи в (5.6) значення T_i^ε з (5.4), δ_i^* з (5.5) і δ_i^* з (5.8), отримаємо формулу для знаходження мінімального загального часу передачі електричної енергії n джерелами розподіленої генерації при $s = kp$, $k > 1$, у неоднорідній мікромережі.

У разі $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, мінімальний перший час передачі енергії буде визначатися за формулою:

$$T_u^1(p, n, kp + r, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \delta_l - \delta_k,$$

де T_{k+1}^ε – час передачі $(k+1)$ -ої групи з r блоків усіма n альтернативними джерелами, а δ_k – величина максимально допустимого суміщення по осі часу k -ої і $(k+1)$ -ої діаграм.

Значення T_{k+1}^ε і δ_k визначаються за формулами:

$$T_{k+1}^\varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} \max_{1 \leq u \leq r} \left[\sum_{j=1}^u t_{ij}^{\varepsilon, k+1} - \sum_{j=1}^{u-1} t_{i+1, j}^{\varepsilon, k+1} \right] + \sum_{j=1}^r t_{nj}^{\varepsilon, k+1}, \quad \delta_k = \min \{ \delta_k', \delta_k'' \},$$

де

$$\delta_k' = \min_{1 \leq j \leq r} \left[\sum_{w=j+1}^p t_{nw}^{\varepsilon, k} + \sum_{w=1}^{j-1} t_{1w}^{\varepsilon, k+1} \right],$$

$$\delta_k'' = \min_{1 \leq i \leq n} \left[T_k^\varepsilon + \sum_{q=1}^{i-1} \max_{1 \leq u \leq r} \left(\sum_{j=1}^u t_{qj}^{\varepsilon, k+1} - \sum_{j=1}^{u-1} t_{q+1, j}^{\varepsilon, k+1} \right) - \right. \\ \left. - \sum_{q=1}^{i-1} \max_{1 \leq u \leq p} \left(\sum_{j=1}^u t_{qj}^{\varepsilon, k} - \sum_{j=1}^{u-1} t_{q+1, j}^{\varepsilon, k} \right) - \sum_{j=1}^p t_{ij}^{\varepsilon, k} \right].$$

Розглянемо *однорідну* розподілену microgrid, для якої терміни передачі блоків електроенергії споживачам всіма джерелами розподіленої генерації рівні, тобто $t_{ij} = t_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$.

Через $T_o^1(p, n, s, \varepsilon)$ позначимо час передачі електроенергії n альтернативними джерелами p кінцевим споживачам у першому синхронному режимі з урахуванням додаткових системних витрат $\varepsilon > 0$. Із врахуванням формули (5.3) отримаємо:

$$T_o^1(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n-1} \max_{1 \leq u \leq s} \left[\sum_{j=1}^u t_j^\varepsilon - \sum_{j=1}^{u-1} t_j^\varepsilon \right] + \sum_{j=1}^s t_j^\varepsilon = (n-1) \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\varepsilon + \sum_{j=1}^s t_j^\varepsilon \quad (5.8)$$

Далі розглянемо випадок, коли $s = kp$, $k > 1$. За аналогією з неоднорідною мікромережею введемо наступні позначення:

- $t_j^{\varepsilon, l} = t_{(l-1)p+j} + \varepsilon$ – час передачі кожного l -х p блоків вихідної послідовності t_1, t_2, \dots, t_s , $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$;
- T_l^ε – загальний час передачі l -ої групи блоків усіма альтернативними джерелами p кінцевим споживачам, $l = \overline{1, k}$;
- $E_j^{\varepsilon, l}$ – час завершення передачі $[(l-1)p + j]$ -го блоку електроенергії усіма n джерелами j -му споживачеві, $j = \overline{1, p}$, $l = \overline{1, k}$.

У силу формули (5.8) для всіх $l = \overline{1, k}$ маємо:

$$T_l^\varepsilon = \sum_{j=1}^p (t_j^l + \varepsilon) + (n-1) \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon), E_j^{\varepsilon, l} = \sum_{w=1}^j (t_w^l + \varepsilon) + (n-1) \max_{1 \leq w \leq p} (t_w^l + \varepsilon) \quad (5.9)$$

Загальний мінімальний час передачі енергії n однорідними розподіленими джерелами в разі $s = kp$, $k > 1$, визначається як сума довжин складових діаграм Ганта з урахуванням їх сумарного максимально допустимого зміщення по осі часу, тобто

$$T_o^1(p, n, s, \varepsilon) = T_o^1(p, n, kp, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \varphi_l,$$

де $\varphi_l = \min\{\varphi_l', \varphi_l''\}$, $l = \overline{1, k-1}$. Величини φ_l' і φ_l'' представляють собою тимчасові відрізки максимально допустимого поєднання процесів l -й і $(l+1)$ -ої груп блоків. Тут T_l^ε , $l = \overline{1, k}$ знаходиться із (5.9), а φ_l' і φ_l'' обчислюються за такими формулами:

$$\varphi_l' = \min_{1 \leq j \leq p} \left[\sum_{w=j+1}^p (t_w^l + \varepsilon) + \sum_{w=1}^{j-1} (t_w^{l+1} + \varepsilon) \right], \quad (5.10)$$

$$\varphi_l'' = \min_{1 \leq i \leq n} \left[(i-1) \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon) + (n-i) \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon) \right], \quad l = \overline{1, k-1}.$$

Можна помітити, що у разі, коли $\max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon) > \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon)$, мінімум виразу (5.10) досягається при $i=1$, а у разі, коли $\max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon) < \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon)$, мінімум досягається при $i=n$. Якщо ж $\max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon) = \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon)$, то при будь-яких значеннях i , $i = \overline{1, n}$, вираз (5.10) прийматиме одне і те ж значення. Із огляду на це, можна записати:

$$\begin{aligned} \varphi_l'' &= \min \left[(n-1) \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon), (n-1) \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon) \right] = \\ &= (n-1) \min \left[\max_{1 \leq j \leq p} (t_j^{l+1} + \varepsilon), \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^l + \varepsilon) \right], \quad l = \overline{1, k-1}. \end{aligned}$$

У разі $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, мінімальний загальний час передачі енергії n однорідними джерелами визначається за формулою:

$$T_o^1(p, n, s, \varepsilon) = T_o^1(p, n, kp + r, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \varphi_l - \varphi_k,$$

де T_{k+1}^ε – час передачі $(k+1)$ -х r блоків для всіх n джерелами, а φ_k – величина максимально допустимого суміщення по осі часу k -ої і $(k+1)$ -ої діаграм.

Значення T_{k+1}^ε і φ_k визначаються відповідно за формулою:

$$T_{k+1}^\varepsilon = (n-1) \max_{1 \leq j \leq r} (t_j^{k+1} + \varepsilon) + \sum_{j=1}^r (t_j^{k+1} + \varepsilon), \quad \varphi_k = \min\{\varphi_k', \varphi_k''\},$$

де

$$\varphi_k' = \min_{1 \leq j \leq r} \left[\sum_{w=1}^{j-1} (t_w^{k+1} + \varepsilon) + \sum_{w=j+1}^p (t_w^k + \varepsilon) \right],$$

$$\varphi_k'' = (n-1) \min \left[\max_{1 \leq j \leq r} (t_j^{k+1} + \varepsilon), \max_{1 \leq j \leq p} (t_j^k + \varepsilon) \right].$$

Таким чином, теорему доведено.

Теорема 1.5. Якщо взаємодія джерел розподіленої генерації електричної енергії, кінцевих споживачів і блоків структурованих конкуруючих потоків електроенергії здійснюється у першому синхронному режимі, то для будь-яких $p \geq 2, n \geq 2, s \geq 2$, мінімальний загальний час передачі електричної енергії в однорідній розподіленій мікромережі з врахуванням параметру $\varepsilon > 0$, визначається наступним чином:

$$T_{op}^1(p, n, s, \varepsilon) = \begin{cases} (n-1) \max_{1 \leq j \leq s} t_j^\varepsilon + \sum_{j=1}^s t_j^\varepsilon, & s \leq p, \\ \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\varphi_l', \varphi_l''\}, & s = kp, k > 1, \\ \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \varphi_l - \varphi_k, & s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p. \end{cases}$$

позначимо через $T_{op}^1(p, n, s, \varepsilon)$ мінімальний загальний час передачі електричної енергії в однаково розподіленій мікромережі.

Теорема 1.6. Якщо взаємодія джерел розподіленої генерації електричної енергії, кінцевих споживачів і блоків структурованих конкуруючих потоків електроенергії підпорядковано умовам першого базового синхронного режиму, то для будь-яких $p \geq 2, n \geq 2, s \geq 2, \varepsilon > 0$, мінімальний загальний час передачі електричної енергії в однаково розподіленій мікромережі визначається за формулами:

$$T_{op}^1(p, n, s, \varepsilon) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon + (s-1) \left[t_n^\varepsilon + \sum_{i=2}^n \max\{t_{i-1}^\varepsilon - t_i^\varepsilon, 0\} \right], & s \leq p, \\ kT_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) - (k-1) \min\{\omega_1, \omega_2\}, & s = kp, \quad k > 1, \\ kT_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) + T_{op}^1(p, n, r, \varepsilon) - \\ - (k-1) \min\{\omega_1, \omega_2\} - \min\{\xi_1, \xi_2\}, & s = kp+r, \quad k \geq 1, \quad 1 \leq r < p. \end{cases}$$

Доведення. При $s \leq p$, підставивши в (5.3) значення $t_{ij} = t_i$ і виконавши нескладні перетворення отримаємо:

$$\begin{aligned} T_{op}^1(p, n, s, \varepsilon) &= \sum_{i=1}^{n-1} \max_{1 \leq u \leq s} \left[\sum_{j=1}^u t_j^\varepsilon - \sum_{j=1}^{u-1} t_{i+1}^\varepsilon \right] + \sum_{j=1}^s t_n^\varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} \max [s t_i^\varepsilon - (s-1) t_{i+1}^\varepsilon] + s t_n^\varepsilon = \\ &= \sum_{i=2}^n \max [(s-1)(c_{i-1} t_{i-1}^\varepsilon - c_i t_i^\varepsilon) + c_{i-1} t_{i-1}^\varepsilon] + (s-1) c_n t_n^\varepsilon + c_n t_n^\varepsilon = \left(\sum_{i=2}^n c_{i-1} t_{i-1}^\varepsilon + c_n t_n^\varepsilon \right) + \\ &+ \left(\sum_{i=2}^n \max [(s-1)(t_{i-1}^\varepsilon - t_i^\varepsilon)] + (s-1) t_n^\varepsilon \right) = \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon + (s-1) \left[t_n^\varepsilon + \sum_{i=2}^n \max\{t_{i-1}^\varepsilon - t_i^\varepsilon, 0\} \right]. \end{aligned}$$

У разі, коли $s = kp$, $k > 1$, терміни передачі кожних p блоків усіма n альтернативними джерелами рівні між собою. Тому:

$$T_{op}^1(p, n, kp, \varepsilon) = kT_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) - (k-1) \min\{\omega_1, \omega_2\},$$

де $T_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) = \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon + (p-1) \left[t_n^\varepsilon + \sum_{i=2}^n \max\{t_{i-1}^\varepsilon - t_i^\varepsilon, 0\} \right]$, а величини ω_1 і ω_2 являють собою тимчасові відрізки максимально можливого суміщення l -ої і $(l+1)$ -ої діаграм Ганта:

$$\omega_1 = (p-1) \min\{t_1^\varepsilon, t_n^\varepsilon\}, \quad \omega_2 = T_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) - p \max_{1 \leq i \leq n} t_i^\varepsilon.$$

У разі $s = kp+r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$, $T_{op}^1(p, n, kp+r, \varepsilon)$ визначається за формулою:

$$T_{op}^1(p, n, kp+r, \varepsilon) = kT_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) + T_{op}^1(p, n, r, \varepsilon) - (k-1) \min\{\omega_1, \omega_2\} - \xi.$$

тут, $T_{op}^1(p, n, r, \varepsilon) = \sum_{i=1}^n t_i^\varepsilon + (r-1) \left[t_n^\varepsilon + \sum_{i=2}^n \max\{t_{i-1}^\varepsilon - t_i^\varepsilon, 0\} \right]$, а $\xi = \min\{\xi_1, \xi_2\}$

– величина відрізка максимально можливого суміщення по усім часу k -ої і $(k+1)$ -ої діаграм, де

$$\xi_1 = (r-1) \min\{t_1^\varepsilon, t_n^\varepsilon\} + (p-r)t_n^\varepsilon,$$

$$\xi_2 = T_{op}^1(p, n, p, \varepsilon) - \max_{1 \leq i \leq n} (T_{op}^1(p, i, p, \varepsilon) - T_{op}^1(p, i, r, \varepsilon) + rc_i t_i^\varepsilon).$$

Теорема доведена.

5.5 Режим безперервного електрозабезпечення кінцевих споживачів

Розглянемо *другий синхронний режим* взаємодії джерел розподіленої генерації електроенергії і кінцевих споживачів, який передбачає безперервне отримання електроенергії всіма кінцевими споживачами.

Будемо розглядати $n \geq 2$ *неоднорідних* розподілених джерел, які конкурують за передачу електричної енергії $p \geq 2$ кінцевим споживачам, причому передача електроенергії здійснюється блоками Q_1, Q_2, \dots, Q_s . Завдання полягає в знаходженні мінімального загального часу $T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$ передачі джерелами електричної енергії споживачам в умовах безперервного забезпечення енергією останніх. Розглянемо наступні випадки.

а) У випадку, коли число блоків структурованих потоків електричної енергії дорівнює кількості кінцевих споживачів, тобто $s = p$, Для знаходження величини $T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$ отримаємо формулу:

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n t_{ip}^\varepsilon. \quad (5.11)$$

де $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]$ – $n \times s$ – матриця термінів передач блоків електричної енергії i -м джерелом з j -го цінового діапазону з врахуванням накладних витрат ε .

Величини $\max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right]$, $j = \overline{1, p-1}$, визначають моменти початку передачі електроенергії джерелами споживачам,

починаючи з другого, а $\sum_{i=1}^n t_{ip}^{\varepsilon}$ – час забезпечення електричною енергією останнього p -го споживача всіма джерелами.

Приклад 1.1 Нехай є $n=4$ неоднорідних розподілених альтернативних джерела, які конкурують за передачу електричної енергії $p=3$ споживачам. Кожен потік структурований на $s=3$ цінових блоків. Матриця термінів передачі електроенергії джерелами кінцевим споживачам з урахуванням системного часу має вид:

$$T^{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 3 \\ 1 & 4 & 1 \\ 3 & 3 & 2 \\ 3 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

На рисунку 5.10 зображена лінійна діаграма Ганта взаємодії джерел розподіленої генерації з кінцевими споживачами в другому синхронному режимі. Відповідно до формули (5.11) мінімальна загальний час передачі дорівнюватиме:

$$T_n^2(p=3, n=4, s=3, \varepsilon) = \sum_{j=1}^2 \max_{1 \leq v \leq 4} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon} \right] + \sum_{i=1}^4 t_{i3}^{\varepsilon} = 4 + 5 + 8 = 17$$

б) Розглянемо випадок, коли число кінцевих споживачів мікроелектро системи більше числа блоків структурованих енергопотоків ($s < p$). У цьому випадку виконаємо розбиття множини споживачів $k+1$ на групи по s споживачів у кожній, тобто $p=ks+r$, якщо p не кратне s , то в останній групі буде тільки r споживачів. Результуюча матриця RM термінів передачі електроенергії джерелами кінцевим споживачам складатиметься із $k+1$ матриць T^{ε} , причому матриці міститимуть тільки r перших стовпчиків:

$$RM = [t_{ij}^{\varepsilon}]_{n \times p} = \begin{bmatrix} t_{11}^{\varepsilon} & t_{12}^{\varepsilon} & \dots & t_{1s}^{\varepsilon} & t_{11}^{\varepsilon} & t_{12}^{\varepsilon} & \dots & t_{1s}^{\varepsilon} & \dots & t_{11}^{\varepsilon} & t_{12}^{\varepsilon} & \dots & t_{1r}^{\varepsilon} \\ t_{21}^{\varepsilon} & t_{22}^{\varepsilon} & \dots & t_{2s}^{\varepsilon} & t_{21}^{\varepsilon} & t_{22}^{\varepsilon} & \dots & t_{2s}^{\varepsilon} & \dots & t_{21}^{\varepsilon} & t_{22}^{\varepsilon} & \dots & t_{2r}^{\varepsilon} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{n1}^{\varepsilon} & t_{n2}^{\varepsilon} & \dots & t_{ns}^{\varepsilon} & t_{n1}^{\varepsilon} & t_{n2}^{\varepsilon} & \dots & t_{ns}^{\varepsilon} & \dots & t_{n1}^{\varepsilon} & t_{n2}^{\varepsilon} & \dots & t_{nr}^{\varepsilon} \end{bmatrix}$$

Із урахуванням формули (5.11) мінімальний загальний час забезпечення n альтернативними джерелами електричної енергії p кінцевих споживачів за умови $s < p$ буде визначатися із виразу:

$$T_n^2(p = ks + r, n, s, \varepsilon) = kT_n^2(s, n, s, \varepsilon) + kT_n^2(1, n, 1, \varepsilon) + T_n^2(r, n, r, \varepsilon), \quad (5.12)$$

де

$$T_n^2(s, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{s-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon} \right], \quad T_n^2(1, n, 1, \varepsilon) = \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{is}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i1}^{\varepsilon} \right], \quad (5.13)$$

$$T_n^2(r, n, r, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{r-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^{\varepsilon} \right] + \sum_{i=1}^n t_{ir}^{\varepsilon}.$$

Приклад 1.2. Нехай $p=5$, $n=3$, $s=2$, $T^{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 1 & 4 \\ 3 & 3 \end{bmatrix}$ Так як:

$p = 2s + 1$, то $k=2$, $r=1$ і результуюча матриця буде мати вигляд:

$$RM = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ 1 & 4 & 1 & 4 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}.$$

Відповідно до формули (5.12) мінімальний загальний час передачі складатиме (рис. 5.10):

$$T_n^2(p=5, n=3, s=2, \varepsilon) = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 8 = 24.$$

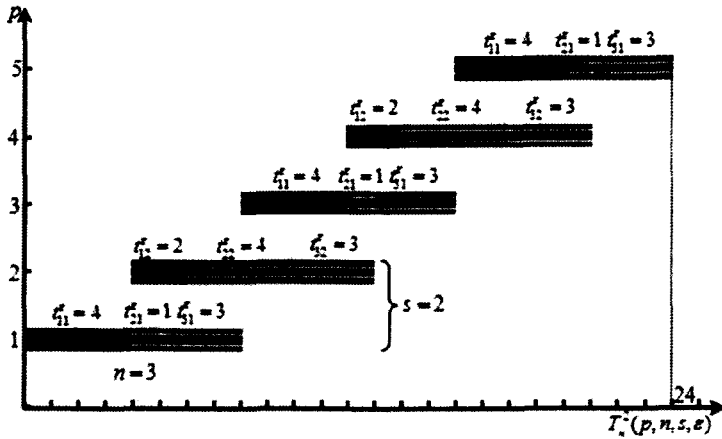


Рис. 5.10 – Функціонування microgrid при $p=5, n=3, s=2$

в) Нехай число блоків структурованих конкуруючих потоків електроенергії $s \geq 2$ більше числа кінцевих споживачів мікроенергосистеми $p \geq 2$, тобто є обмеженим ($s > p$). Тоді зробимо розбиття множини блоків на $k+1$ групу по p блоків у кожній, за винятком останньої, яка при p не кратне s буде містити r блоків: $s = kp + r, k \geq 1, 1 \leq r < p$. Це рівносильно розбиттю вихідної матриці часів передачі електричної енергії i -м джерелом з j -го цінового діапазону із врахуванням системних витрат $\varepsilon > 0$ $T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon], i = \overline{1, n}, j = \overline{1, s}$, на $k+1$ підматрицю по p стовпців у кожній, причому підматрицю в $k+1$ разів, коли s не кратне p , буде містити r стовпців.

Розглянемо окремий випадок, коли p кратне s , тобто $s = kp, k > 1$. Із огляду на, що число блоків більше числа споживачів у k разів, виконаємо розбиття множини блоків на k груп по p блоків у кожній. Отже, вихідна матриця термінів передачі електричної енергії T^ε розіб'ється на k підматриць по p стовпців у кожній. Взаємодія конкуруючих джерел розподіленої генерації електричної енергії з кінцевими споживачами із врахуванням

термінів передачі електричної енергії для l -ої групи, $l = \overline{1, k}$, можна зобразити у вигляді лінійних діаграм Ганта, кожна з яких відображає в часі передачу p блоків різних цінових діапазонів n конкуруючими альтернативними джерелами p кінцевим споживачам.

На рисунку 5.11 наведено несуміщені діаграми Ганта для випадку $p=3, n=4, s=9$ і:

$$T^\varepsilon = [t_{ij}^\varepsilon]_{4 \times 9} = \begin{bmatrix} t_{11}^\varepsilon & t_{12}^\varepsilon & \dots & t_{19}^\varepsilon \\ t_{21}^\varepsilon & t_{22}^\varepsilon & \dots & t_{29}^\varepsilon \\ t_{31}^\varepsilon & t_{32}^\varepsilon & \dots & t_{39}^\varepsilon \\ t_{41}^\varepsilon & t_{42}^\varepsilon & \dots & t_{49}^\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 3 & 2 & 1 & 4 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

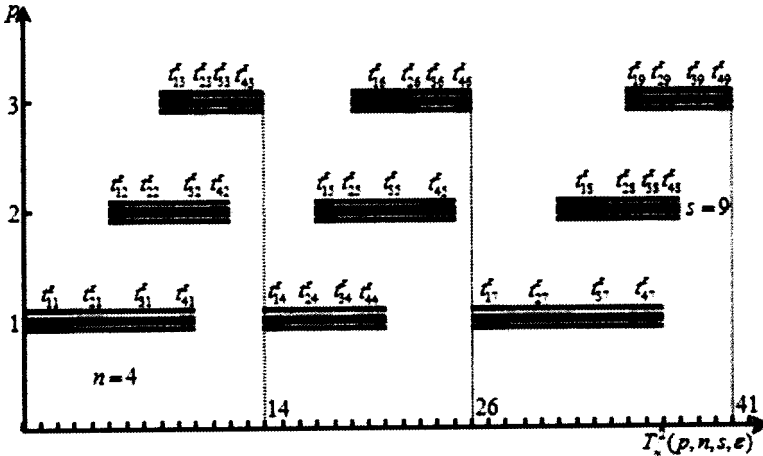


Рис. 5.11 - Несуміщена діаграма Ганта

Час $T_n^2(p=3, n=4, s=9, \varepsilon) = 41$ передачі джерелами електричної енергії споживачам можна істотно скоротити, якщо скористатися прийомом суміщення послідовних діаграм Ганта по осі часу справа наліво (рис. 5.12).

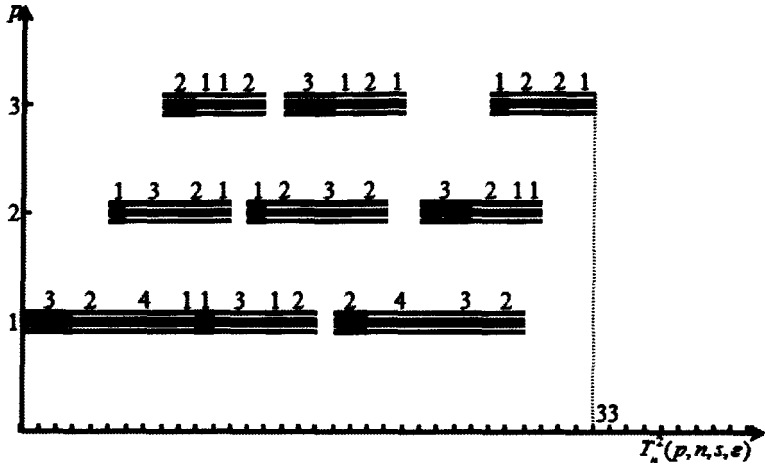


Рис. 5.12 - Суміщена діаграма Ганта

Надалі нам знадобляться наступні позначення:

- $t_{ij}^{\varepsilon, l} = t_{ij}^l + \varepsilon = t_{i, (l-1)p+j} + \varepsilon$ - час передачі порції електричної енергії з j -го цінового діапазону i -м джерелом в l -ій групі блоків з врахуванням параметру ε , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, s}$, $l = \overline{1, k}$;
- T_l^e - загальний час передачі l -ої групи блоків електричної енергії p споживачам усіма n джерелами $l = \overline{1, k}$;
- $E_{ij}^{\varepsilon, l}$ - час завершення передачі j -го блоку i -м джерелом в l -ій групі блоків, $l = \overline{1, k}$.

На основі формули (5.11) для обчислення T_l^e і $E_{ij}^{\varepsilon, l}$ отримаємо наступні співвідношення:

$$T_l^e = \sum_{j=1}^{p-1} \max_{1 \leq i \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon, l} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i, j+1}^{\varepsilon, l} \right] + \sum_{i=1}^n t_{ip}^{\varepsilon, l}, \quad (5.14)$$

$$E_{ij}^{\varepsilon, l} = \sum_{w=1}^{j-1} \max_{1 \leq i \leq n} \left[\sum_{q=1}^v t_{qw}^{\varepsilon, l} - \sum_{q=1}^{v-1} t_{q, w+1}^{\varepsilon, l} \right] + \sum_{q=1}^i t_{qj}^{\varepsilon, l}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, p}, \quad l = \overline{1, k}.$$

Крім того, через $B_{ij}^{\varepsilon, l}$ позначатимемо час початку передачі j -го блоку в l -ій групі першим джерелом:

$$B_{1j}^{\varepsilon,l} = \sum_{w=1}^{j-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{q=1}^v t_{qw}^{\varepsilon,l} - \sum_{q=1}^{v-1} t_{q,w+1}^{\varepsilon,l} \right], \quad j = \overline{1, p}. \quad (5.15)$$

Із аналізу послідовних діаграм Ганта (рис. 5.12, рис. 5.13) випливає, що:

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = T_n^2(p, n, kp, \varepsilon) = \sum_{l=1}^k T_l^{\varepsilon} - \Omega, \quad (5.16)$$

де T_l^{ε} знаходиться за формулами (5.14), а величина Ω є величиною максимально допустимого сумарного поєднання сусідніх діаграм по осі часу. Має місце наступна лема.

Лема. Величина Ω максимально допустимого сумарного суміщення сусідніх діаграм Ганта по осі часу визначається:

$$\Omega \geq \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l^i, \omega_l^s\}, \quad (5.17)$$

$$\text{де } \omega_l^i = \min_{1 \leq j \leq p} \{T_l^{\varepsilon} - E_{nj}^{\varepsilon,l} + B_{1j}^{\varepsilon,l+1}\}, \quad \omega_l^s = \min_{1 \leq s \leq n} \left\{ \sum_{q=1}^{l-1} t_{ql}^{\varepsilon,l+1} + \sum_{q=l+1}^n t_{qp}^{\varepsilon,l} \right\}, \quad l = \overline{1, k-1}, \quad (5.18)$$

тут ω_l^i і ω_l^s являють собою відрізки максимально допустимого суміщення по осі часу l -ої і $(l+1)$ -ої діаграм.

У формулі (5.17) використано символ не суворої нерівності, так як кожне значення $\min\{\omega_l^i, \omega_l^s\}$, $l = \overline{1, k-1}$, враховує тільки величину максимально і мінімально допустимого поєднання по осі часу між парами сусідніх діаграм Ганта, але не завжди враховує можливі поєднання між сусідніми групами блоків електроенергії, що передаються одному і тому ж споживачеві у двох сусідніх діаграмах. На рисунках 5.11 і 5.12 наведено приклад, коли має місце рівність, а на рисунках 5.13 і рисунках 5.14 коли має місце нерівність.

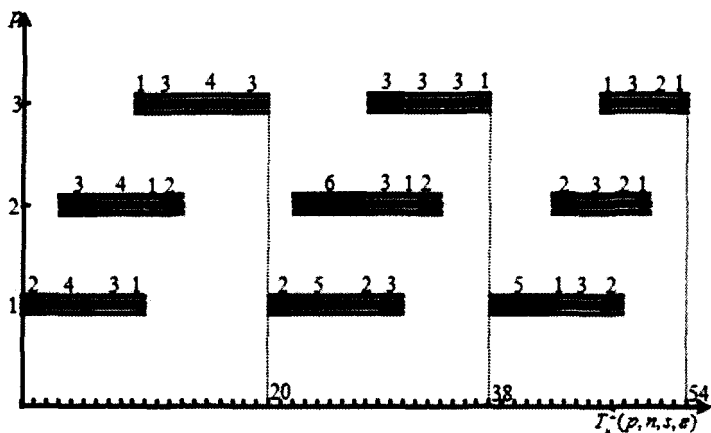


Рис. 5.13 - Несуміщена діаграма Ганта

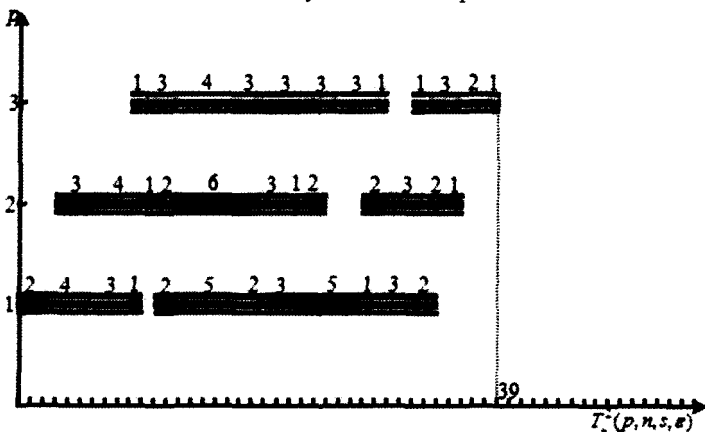


Рис. 5.14 - Суміщена діаграма Ганта

З врахуванням вихідних даних, наведених на рисунках 5.13 і 5.14, а також формул (5.17) і (5.18) леми величина Ω приймає точне значення, рівне:

$$\Omega = \sum_{l=1}^2 \min\{\omega_l', \omega_l''\} = \min\{4, 4\} + \min\{5, 4\} = 8,$$

$$\text{так як } \omega_1' = \min_{1 \leq j \leq 3} \{4, 5, 5\} = 4, \quad \omega_1'' = \min_{1 \leq j \leq 4} \{4, 4, 6, 5\} = 4,$$

$$\omega_2' = \min_{1 \leq j \leq 3} \{5, 6, 9\} = 5, \quad \omega_2'' = \min_{1 \leq j \leq 4} \{4, 5, 7, 9\} = 4.$$

Із врахуванням вихідних даних, наведених на рисунках 5.14 і 5.15, величина Ω також визначається з нерівності (5.17) і дорівнює 14 одиницям часу. Але, з огляду на можливе суміщення груп блоків другої та першої діаграм, що передаються першому споживачеві, з'являється додатковий резерв часу в 1 одиницю для наступного суміщення третьої і другої діаграм. У результаті величина Ω сумарного максимально допустимого поєднання складе 15 одиниць часу.

Підставляючи далі значення T_l^ε із (5.13) в (5.16) і в силу леми, отримуємо оцінку для обчислення $T_n^2(p, n, kp, \varepsilon)$ виду:

$$T_n^2(p, n, kp, \varepsilon) \leq \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l', \omega_l''\}. \quad (5.19)$$

Для випадку, коли s не кратне p , тобто $s = kp + r$, $k \geq 1$, $1 \leq r < p$ загальний час $T_n^2(p, n, kp + r, \varepsilon)$ передачі n джерелами електричної енергії p споживачам в умовах другого синхронного режиму визначається за формулою:

$$T_n^2(p, n, kp + r, \varepsilon) \leq \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l', \omega_l''\} - \min\{\omega_k', \omega_k''\}, \quad (5.20)$$

де T_{k+1}^ε , ω_k' , ω_k'' знаходяться за формулами:

$$T_{k+1}^\varepsilon = \sum_{j=1}^{r-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^{\varepsilon, k+1} - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i, j+1}^{\varepsilon, k+1} \right] + \sum_{i=1}^n t_{ir}^{\varepsilon, k+1}, \quad (5.21)$$

$$\omega_k' = \min_{1 \leq j \leq r} \{T_k^\varepsilon - E_{nj}^{\varepsilon, k} + B_{1j}^{\varepsilon, k+1}\}, \quad \omega_k'' = \min_{1 \leq i \leq n} \left\{ \sum_{q=1}^{i-1} t_{q1}^{\varepsilon, k+1} + \sum_{q=i+1}^n t_{qp}^{\varepsilon, k} \right\}. \quad (5.22)$$

Теорема 1.7. В умовах взаємодії джерел розподіленої генерації електроенергії з кінцевими споживачами у другому синхронному режимові, для будь-яких параметрів інтелектуальної масштабованої неоднорідної мікромережі $p \geq 2$, $n \geq 2$, $s \geq 2$, $\varepsilon > 0$ мінімальний загальний час $T_n^2(p, n, s, \varepsilon)$ передачі електричної енергії визначається за формулами:

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = \sum_{j=1}^{s-1} \max_{1 \leq v \leq n} \left[\sum_{i=1}^v t_{ij}^\varepsilon - \sum_{i=1}^{v-1} t_{i,j+1}^\varepsilon \right] + \sum_{i=1}^n t_{is}^\varepsilon \quad \text{при } s = p,$$

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) = kT_n^2(s, n, s, \varepsilon) + kT_n^2(1, n, 1, \varepsilon) + T_n^2(r, n, r, \varepsilon) \quad \text{при } s < p,$$

$$T_n^2(p, n, s, \varepsilon) \leq \begin{cases} \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l', \omega_l''\}, & \text{при } s = kp, \quad k > 1, \\ \sum_{l=1}^k T_l^\varepsilon + T_{k+1}^\varepsilon - \sum_{l=1}^{k-1} \min\{\omega_l', \omega_l''\} - \min\{\omega_k', \omega_k''\}, \\ \text{при } s = kp + r, \quad k \geq 1, \quad 1 \leq r < p, \end{cases}$$

де $T_n^2(s, n, s, \varepsilon)$, $T_n^2(1, n, 1, \varepsilon)$ і $T_n^2(r, n, r, \varepsilon)$ визначаються за формулами (5.13), T_l^ε – за формулою (5.14), ω_l' і ω_l'' – за формулами (5.18), T_{k+1}^ε – за формулою (5.21), ω_k' і ω_k'' – за формулами (5.22).

Одержані залежності та оцінки мінімального загального часу передачі електричної енергії конкуруючими джерелами розподіленої генерації кінцевим споживачам є основою для вирішення завдань порівняльного аналізу, асинхронного і двох синхронних режимів функціонування Smart Grid-оптимізації числа блоків структурованих конкуруючих потоків електроенергії, з урахуванням накладних витрат, знаходження оптимального числа розподілених джерел при заданих обсягах передачі електричної енергії та (або) директивних термінах передачі, дослідження змішаних режимів функціонування мікромереж локальних об'єктів створення програмного забезпечення.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Каплун Віктор Володимирович - доктор технічних наук, професор, проректор з наукової та інноваційної діяльності Київського національного університету технологій та дизайну;

Штена Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник науково-дослідної частини Київського національного університету технологій та дизайну;

Павлов Павло Олександрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики та інформаційних технологій Поліського державного університету;

Кравченко Ольга Петрівна - кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки та електротехніки Київського національного університету технологій та дизайну;

Артеменко Михайло Юхимович – доктор технічних наук, професор кафедри аукстики та акустоелектроніки ФЕЛ Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

Шавьолкін Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор кафедри електроніки та електротехніки Київського національного університету технологій та дизайну;

Каплун Роман В ікторович – аспірант кафедри електроніки та електротехніки Київського національного університету технологій та дизайну;

Дончик Євген Михайлович – кандидат фізико-математичних наук, математик ТОВ «Сімкорд»;

Макаревич Світлана Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова Національного університету біоресурсів і природокористування.

Наукове видання

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ
КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

Монографія

Редактор Л. Л. Овечкіна

Відповідальний за поліграфічне видання Ю. В. Коноваленко

Коректор Н. П. Біланюк

Підп. до друку 13.12.2017 р. Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. 11,15. Облік. вид. арк. 8,73. Тираж 300 пр. Зам. 178.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ-11, 01011.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 993 від 24.07.2002.