

Оптимізація мережі повітряних маршрутів є ефективним способом оптимізації ресурсів, збільшення пропускної спроможності, одним з найважливіших частин планування повітряного простору та полегшення перевантаженого повітряного руху. Тим не менш, мало що було зроблено для оптимізації мережі повітряних маршрутів у фрагментованому повітряному просторі, спричиненому забороненими, обмеженими та небезпечними районами (ЗОН). В даній роботі розглянута модель оптимізації мережі повітряних маршрутів з загальними експлуатаційними витратами як цільова функція, а обмеження повітряного простору, потужність повітряної мережі та нелінійні фактори (НФ) приймаються як головні обмеження. Оптимізація мережі повітряних маршрутів дозволяє значно скоротити експлуатаційні витрати при забезпеченні безпеки експлуатації.

Airline network optimization is an effective way to optimize resources, increase bandwidth, one of the most important parts of airspace planning and facilitate overloaded air traffic. However, little has been done to optimize the network of air routes in the fragmented airspace caused by prohibited, restricted and dangerous areas (PRDs). In this paper, the model of optimization of the air route network with general operating costs is considered as a target function, while airspace restrictions, airway power and nonlinear factors (NF) are taken as the main constraints. Optimizing the network of air routes can significantly reduce operating costs while maintaining the safety of operation.

## **Зміст**

<b>Вступ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Опрацювання літератури та пошук джерел у мережі за темою потенційної моделі мережі повітряних маршрутів (МПМ).....</b>	<b>5</b>
1.1. Місткість сегмента маршруту.....	5
1.2. Модель оптимізації вузла мережі повітряних маршрутів (ВМПМ).....	5
1.2.1. Перетин маршруту.....	6
1.2.2. Кілька маршрутів перетину.....	7
<b>2. Ознайомлення з оптимізаційною моделлю мережі повітряних маршрутів (МПМ).....</b>	<b>9</b>
<b>3. Знаходження алгоритму розв'язання оптимізаційної моделі мережі повітряних маршрутів (МПМ). Огляд літератури за темою клітинних автоматів (КА).....</b>	<b>12</b>
3.1 Клітинні автомати (КА).....	12
3.1.1. Еволюція клітинних автоматів (КА).....	12
3.1.2. Оптимізація шляху КА.....	13
3.2. Оптимізація вузлів мережі повітряних маршрутів (ВМПМ).....	14
3.2.1. Об'єднання вузлів перетину.....	14
3.2.2. Переміщення вузлів перетину.....	15
<b>4. Тематичне дослідження за темою бакалаврської роботи.....</b>	<b>19</b>
<b>5. Опис програмного забезпечення.....</b>	<b>27</b>
<b>Висновок.....</b>	<b>33</b>
<b>Список використаної літератури.....</b>	<b>34</b>

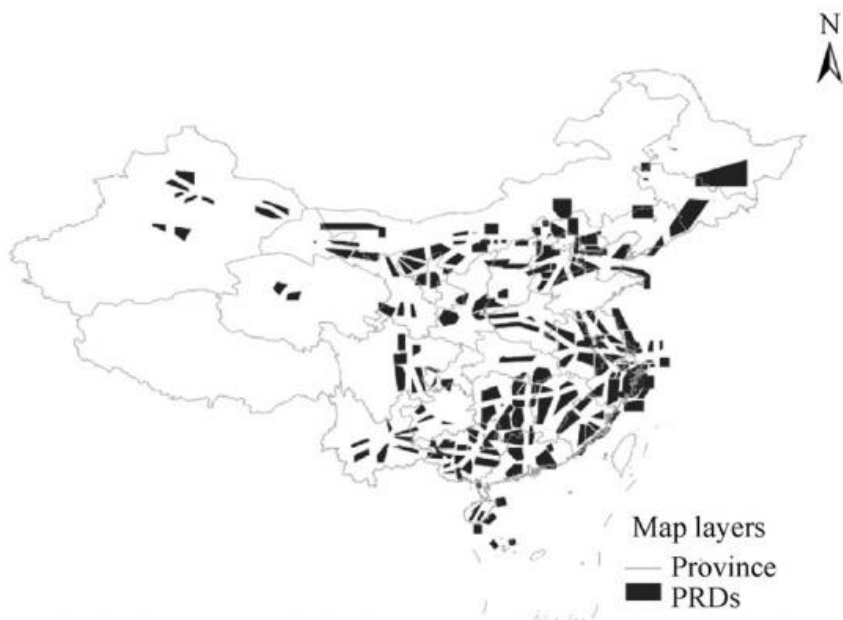
## **Вступ**

Швидке зростання попиту на повітряне сполучення призводить до серйозних проблем у системі повітряного транспорту, таких як перевантаження повітряного простору, затримка рейсів тощо. Ефективне використання ресурсів мережі повітряних маршрутів (МПМ) має основоположне значення для вирішення цих проблем.

МПМ будується з фіксованих вузлів (у тому числі аеропортами та прикордонними вузлами), вузлами мереж повітряних маршрутів (ВМПМ) і повітряними маршрутами. Просторовий розподіл і кількість ВМПМ визначають положення, напрямок, довжину сегментів маршруту, а також елементи безпеки МПМ. МПМ відіграє важливу роль у перевезенні пасажирів і вантажів.

Дослідження в мережі повітряного руху в основному зосереджено на двох аспектах: комплексний аналіз топології мережі аеропортів і оптимізації топології структури МПМ. Du et al. проаналізували мережу маршрутів китайських авіакомпаній (КМА) як багатошарову мережу та дослідили її надійність. Сао et al. вивчали топологічну структуру китайського МПМ і КМА на основі складних мережевих метрик, такі як середній ступінь, середня довжина найкоротшого шляху, і коефіцієнт кластеризації. Метод еволюції топології мереж спрямованого повітряного шляху був запропонований Zhao et al. для проектування повітряного простору з метою перевірки оптимізації структури МПМ. За рахунок злиття і переміщення вузлів, затратність МПМ мінімізується шляхом обмежень, які накладаються засобами контролю за трафіком. На основі сітчастої тканини Rivie застосував алгоритм найкоротшого шляху для оптимізації МПМ. Cai et al. розроблено дворівневу об'єктивну модель і меметичний алгоритм з двотактним оператором для поліпшення показників оцінки. Розроблені алгоритми оптимізації для поліпшення можливостей мережі, такі як оптимізація рою часток. Jin et al. побудувала багатооб'єктну оптимізаційну модель МПМ на основі потужності МПМ, ефективності польотів і безпеки повітряного простору, а також запропоновано алгоритм багатоцільової оптимізації, заснований на всебічному вивченні оптимізації рою часток і алгоритму Флойда-Уолша для розв'язання моделі. Chen розробив модель руху транспортних потоків МПМ, запропонувавши однооб'єктний алгоритм рою, який базується в керівництві на взаємозв'язок, і впровадив алгоритм оптимізації рою багатоцільових частинок для потужності МПМ.

У повітряному просторі є багато заборонених, обмежених і небезпечних районів (ЗОН), що робить навколишнє середовище МПМ фрагментованим.



*Рис. 1 Ілюстрація ЗОН в Китаї (ЗОН позначені чорним)*

На рис. 1 показані ЗОН у повітряному просторі материкового Китаю. Чорні зони являють собою ЗОН, які є основними обмеженнями для оптимізації МПМ. Територія довкола чорних зон може використовуватись, звідки випливає, що наявний простір оптимізації мережі повітряних маршрутів є розривним. Таким чином, ЗОН повинні бути враховані при оптимізації МПМ. Проте всі роботи, згадані вище, не розглядали повітряний простір фрагментами. Zhao et al. запропонував модель, засновану на методі MAKLINK Graph, використовуючи багатооб'єктний генетичний алгоритм, заснований на швидкому непомітованому сортуванні, щоб знайти рішення, як уникнути ЗОН. У зв'язку з обмеженнями методу, MAKLINK Graph застосовується лише для «опуклих» ЗОН. Xu and Zhu використовував генетичний алгоритм для розв'язання оптимізаційної моделі МПМ з урахуванням ЗОН. Але алгоритм є часозатратним. Wang і Gong розробили модель оптимізації МПМ, яка уникає ЗОН і вводить новий алгоритм на основі клітинних автоматів (КА). Модель комплексно розглядала обмеження безпеки польотів і обмеження витрат для оптимізації довжини маршруту.

## ***1. Опрацювання літератури та пошук джерел у мережі за темою потенційної моделі мережі повітряних маршрутів (МПМ)***

Потужність мережі повітряних маршрутів (МПМ) визначається як здатність МПМ пристосувати потоки повітряного руху. Потужність МПМ можна розділити на ємність вузла, пропускну здатність сегменту за певних умов структури системи повітряного простору та обмежень безпеки та правил експлуатації. На етапі проектування МПМ зроблені наступні припущення для дослідження спроможності МПМ:

1. Літак летить з постійною швидкістю, і всі літаки мають однакову швидкість.
2. Літак може розглядатися як частинка, що летить по центральній лінії свого маршруту.
3. Розглядаються тільки літаки, що літають в одному напрямку в тому ж самому рівні польоту; між польотами необхідно підтримувати горизонтальне розділення.
4. Безперервний потік повітряних суден чекає введення маршруту

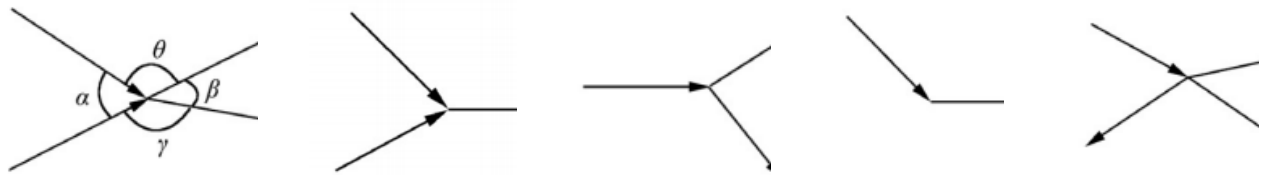
### ***1.1. Місткість сегмента маршруту***

Пропускна здатність сегмента маршруту  $C_s$  може бути виражена як :  $C_s = 1/T_c$ , де  $T_c$ - часовий інтервал між двома послідовними літаками. Нехай у середньо-швидкісної моделі  $v$  - середня швидкість для всіх літаків,  $L_d$  - відстань між двома послідовними літаками, а  $L_{min}$ - мінімальне розділення безпеки. Тоді ми маємо  $T_c = L_d/v$ . Для забезпечення безпеки, відстань між повітряними суднами, має бути більшою, ніж мінімальна відстань. Для того, щоб отримати найбільший потенціал сегмента маршруту, ми маємо

$$T_{min} = L_{min}/v , \quad C_{smax} = 1/T_{min}$$

### ***1.2. Модель оптимізації вузла мережі повітряних маршрутів (ВМПМ)***

ВМПМ можуть бути класифіковані залежно від напрямків польотів як такі, що сходяться, розходяться, повертають, і перетинаються (рис. 2). На рисунку  $\alpha$ - кут збіжності,  $\beta$  - кут розбіжності, а  $\theta$  і  $\gamma$  - кут повороту. Враховуючи різні кути  $\alpha$  і  $\beta$  , можна мати різний стан трафіку.



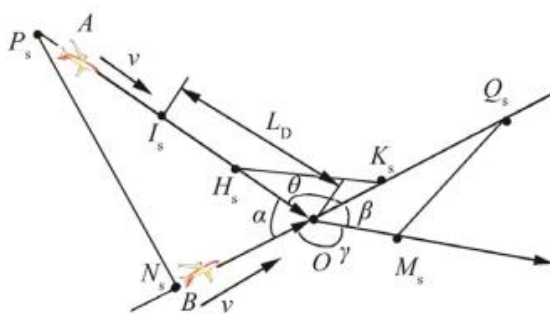
(a) Модель перетину (b) Модель збіжності ( $\alpha=0, \beta \neq 0$ ) (c) Модель розходження ( $\alpha \neq 0, \beta=0$ ) (d) Модель повороту ( $\alpha=0, \beta=0$ ) (e) Модель перетину ( $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ )

Рис.2 Діаграми збіжності розходження повороту та перетину польотів

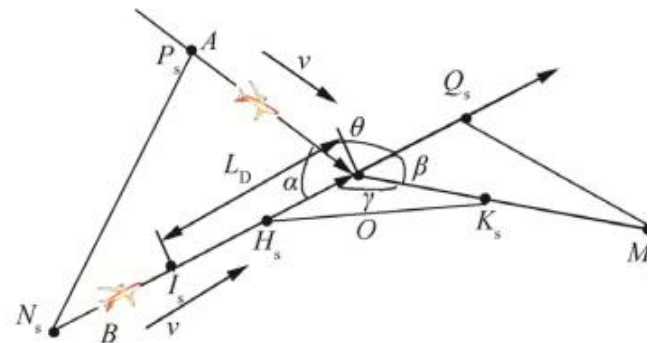
- Якщо ( $\alpha = 0, \beta \neq 0$ ), то перехресна модель польоту трансформується в збіжну модель (рис. 2, b).
- Якщо ( $\alpha \neq 0, \beta = 0$ ), тоді це модель розходження (рис. 2, c).
- Якщо ( $\alpha = 0, \beta = 0$ ), тоді це модель повороту (рис. 2, d).
- Якщо ( $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ ), тоді це модель перетину (рис. 2, e).

Збіжність, розходження і поворот польоту між маршрутами є окремими випадками перетину польотів. Існує певна кількість дослідницьких робіт на цих літаючих моделях. В них аналізуються наступні два випадки.

### 1.2.1. Перетин маршруту



(f) A пройшов вузол перетину O після B



(b) A пройшов вузол перетину O перед B

Рис. 3 Схема перетину шляхів

Як показано на рис. 3,  $OP_s$  та  $ON_s$  є збіжними сегментами маршрутів, а  $OQ_s$  та  $OM_s$  – розбіжні. Припустимо, що є два літаки A і B, літак A перетне вузол перетину O після B (рис. 3). Нехай  $x$  позначає горизонтальну відстань між двома літаками,  $L_D$  позначає довжину сегмента  $OI_s$ , а  $t$  - час польоту. Коли  $t = 0$ , B знаходиться в O, а A – в  $I_s$ . Коли  $t > 0$ , якщо A не проходить через O, наприклад A і B знаходяться в  $H_s$  і  $K_s$  відповідно, тоді  $x$  може бути обчислений як

$$x = \sqrt{(L_D - vt)^2 + (vt)^2 - 2(L_D - vt) \times vt \times \cos\theta}$$

Якщо  $A$  вже перетнув  $O$ , наприклад, якщо  $A$  і  $B$  знаходяться в  $M_S$  і  $Q_S$ , тоді  $x$  можна отримати наступним чином

$$x = \sqrt{(vt - L_D)^2 + (vt)^2 - 2(vt - L_D) \times vt \times \cos\beta}$$

Коли  $t < 0$ ,  $A$  і  $B$  є в  $P_S$  і  $N_S$ ,  $x$  можна отримати так

$$x = \sqrt{(L_D - vt)^2 + (-vt)^2 - 2(L_D - vt) \times (-vt) \times \cos\alpha}$$

Для кожного випадку можна мати мінімальний інтервал часу випуску літака  $T_{min}$ . В результаті, ми отримаємо вузол  $C_n = 1/T_{min}$ . Якщо  $A$  перетнув  $O$  перед  $B$ , той же метод може бути використаним для рис. 3 (б). Отже, ємність вузла  $O$  отримана з

$$C_n = \max \left( \max \left( \frac{v}{L_{min} \sqrt{\frac{2}{1 - \cos\theta}}}, \frac{v}{L_{min} \sqrt{\frac{2}{1 - \cos\beta}}} \right), \max \left( \frac{v}{L_{min} \sqrt{\frac{2}{1 - \cos\gamma}}}, \frac{v}{L_{min} \sqrt{\frac{2}{1 - \cos\beta}}} \right) \right)$$

### 1.2.2. Кілька маршрутів перетину

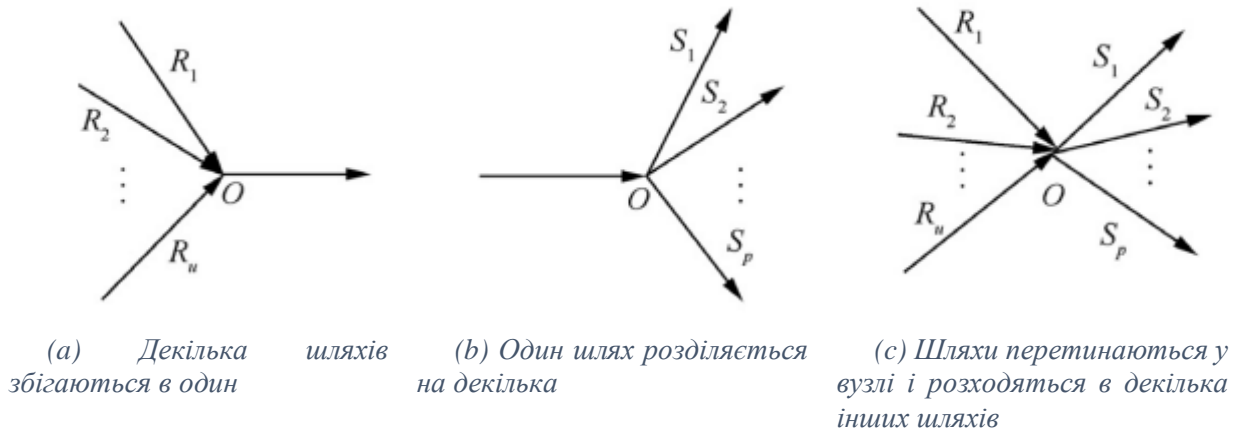


Рис. 4 Схеми перетину вузлів декількома маршрутами.

Як показано на рис. 4 (а), існують повітряні маршрути  $u$ , а саме  $R_1, R_2, \dots, R_u$ , що сходяться до одного маршруту. Місткість об'єднуючого вузла є

$$\max(C_{ncon1}, C_{ncon2}, \dots, C_{ncon\omega}), (\omega = C_u^2).$$

Також існують  $p$  маршрути  $S_1, S_2, \dots, S_p$ , що розходяться на вузлі (рис. 4 (б)). Ємність вузла є

$$\max(C_{ndir1}, C_{ndir2}, \dots, C_{ndir\tau}), (\tau = C_u^2).$$

Як зображено на рис. 4(с), маршрути  $u$  сходяться на вузлі, а потім розходяться в  $p$  маршрутах. У цьому випадку ємність вузла перетину

$$\max(C_{ncro1}, C_{ncro2}, \dots, C_{ncroq}), (q = \omega\tau).$$



## 2. Ознайомлення з оптимізаційною моделлю мережі повітряних маршрутів (МППМ)

Для побудови моделі оптимізації МППМ пропонуються наступні припущення:

1. МППМ - це двовимірна мережа. Підйом та спуск повітряних суден, не враховується;
2. Кордон ЗОН, згаданих вище, розширюється за їх межі.

Нехай  $N$  являє собою ЗОН для оптимізації  
$$N = (V, D, F, U, C_N, I_N, T_c)$$

Визначення елементів в МППМ дано наступним чином.

1.  $V$  - множина ВМППМ. Є два види ВМППМ: точки перетину і пункти аеропортів. Відповідно  $n$  та  $m$  - загальна кількість точок перетину та аеропортів. Тоді ми маємо

$$V(N) = \{V_1, V_2, \dots, V_n, V_{n+1}, \dots, V_{n+m}\},$$

де  $V_i$  є точкою перетину, якщо  $i \leq n$ , в іншому випадку це аеропорт.

2.  $D$  - матриця довжин сегментів маршруту між парами вузлів в МППМ

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1,m+n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m+n,1} & \cdots & d_{m+n,m+n} \end{pmatrix},$$

де  $d_{ij}$  фактична відстань між  $i$  та  $j$ .

3.  $F$  - матриця транспортного потоку

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1,m+n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m+n,1} & \cdots & f_{m+n,m+n} \end{pmatrix},$$

де  $f_{ij}$  вказує потік трафіку від вузла  $i$  до  $j$ .  $f_{ij}$  залежить від транспортних потоків між парами аеропортів і маршрутами польотів.

4.  $U$  - множина ЗОН. Лінія  $(i, j)$  є прямим відрізком маршруту між вузлом  $i$  та  $j$ . Лінія  $(i, j)$  не може перетинатися з ЗОН. Таким чином лінія

$$(V_i, V_j) \cap U = \emptyset, \quad (i \neq j, i > 0, j \leq m + n)$$

5.  $C_N$  - це набір потужностей ВМППМ. Як описано в розділі 1.2, обчислювальні методи різних конфігурацій потужності ВМППМ є різноманітні. Для того, щоб забезпечити впорядковане функціонування МППМ,

транспортний потік повинен бути меншим, ніж потужність. Таким чином, ми маємо

$$f_i < C_{Ni} \quad (i \leq n).$$

Беручи до уваги той факт, що приплив вузла дорівнює відтоку вузла, потік ВМППМ становить половині потоку всіх сегментів маршруту, підключених до даного ВМППМ. Співвідношення між  $f_i$  і  $f_{ij}$  є

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^{m+n} f_{ij}}{2} \quad (i \leq n).$$

6.  $I_N$  – множина нелінійних факторів (НФ), яка визначається як відношення фактичної відстані до Евклідової відстані між ВМППМ. НФ мережі може використовуватися для вимірювання зручності загальної МППМ. Чим більшим є НФ, тим вищі експлуатаційні витрати і тим менше використання повітряного простору.  $I_N$  можна обчислити як

$$I_N = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_{ij}} \leq I_{max} \quad (i \neq j),$$

де  $G_{ij}$  – евклідова відстань між двома вузлами  $i, j$ ;  $I_{max}$  є максимальним НФ. Типовим значенням НФ є 1,4 в дорожній мережі та 1,3 в МППМ.

7.  $T_C$  є сурогатом операційних витрат, що вимірює економічні показники МППМ. Чим нижче значення  $T_C$ , тим краща продуктивність мережі.  $T_C$  визначається як

$$T_C = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=i+1}^{n+m} f_{ij} d_{ij}.$$

Модель оптимізації МППМ може бути розроблена таким чином. Відповідно до правил, які оптимізують позиції вузлів перетину в зазначеній зоні при дотриманні обмежень безпеки, загальна вартість роботи МППМ повинна бути мінімальною. Тут ми представляємо модель оптимізації МППМ як

$$\min T_C = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=i+1}^{n+m} f_{ij} d_{ij} . \quad (1)$$

$$\text{Лінія} \quad (i, j) \cap U = \emptyset, \quad (2)$$

$$f_i < C_{Ni}, \quad (3)$$

$$I_N < I_{max}, \quad (4)$$

$$x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max}, y_{i,min} \leq y_i \leq y_{i,max}. \quad (5)$$

Формула (1) – цільова функція моделі, яка мінімізує загальні операційні витрати; обмеження ЗОН, обмеження пропускної спроможності та НФ наведені у формулі (2), (3) і (4) відповідно; формула (5) задає межу МППМ з

$x_i$  та  $y_i$ , які є координатами  $V_i$ .  $x_{i,min}$  та  $x_{i,max}$  - бокові межі  $V_i$ , тоді як  $y_{i,min}$  та  $y_{i,max}$  - поздовжні межі  $V_i$ .

### 3. Знаходження алгоритму розв'язання оптимізаційної моделі мережі повітряних маршрутів (МПМ). Огляд літератури за темою клітинних автоматів (КА)

#### 3.1 Клітинні автомати (КА)

Клітинний автомат – дискретна динамічна система, яка представляє собою множину однакових клітинок, з'єднаних однаковим чином між собою. Всі клітини створюють решітку клітинного автомату. Решітки можуть бути різних типів, відрізняючись як і по розмірах, так і по формі клітинок.

2	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	3

(a) Початковий стан

2	11	1	10	10	10	10	10
11	10	10	9	9	9	9	9
10	10	9	8	8	8	1	8
10	9	9	1	7	7	7	7
10	9	8	1	6	6	6	6
10	1	8	7	6	5	5	5
10	9	8	7	6	5	4	4
10	9	8	7	6	5	4	3

(b) Кінцевий стан

Рис. 5 Стани клітинок

Клітинні автомати (КА) складаються з певної кількості клітинок, кліткового простору, сусідів і правил, які можуть бути представлені у вигляді чотирьох наборів, як показано в наступному:

$$C_A = (S, L_{2D}, N_s, g).$$

Нехай  $C_A$ - система КА, а  $S$  - множина клітинних скінченних дискретних станів. У початковий момент часу  $t = 0$  кожна клітинка МПМ має два стани: 0 і 1. Якщо клітинка є ЗОН клітиною, її стан дорівнює 1, інакше стан є 0. Стан вихідної клітинки має значення 2, а стан цільової клітинки становить 3 (рис. 5 (a)).  $L_{2D}$  визначає двовимірний клітковий простір МПМ. Відповідно до моделі МПМ, весь повітряний простір повинен бути растрованим.  $N_s$  являє собою всі стани сусідніх клітинок в межах повітряного простору.  $g$  - локальна функція переходу стану, яка використовує поточний стан клітинки і стан всіх її сусідів для визначення еволюції зміни стану.

##### 3.1.1. Еволюція клітинних автоматів (КА)

Процес еволюції клітинних автоматів МПМ відбувається наступним чином. Еволюція починається з клітинки, яка знаходиться поблизу місця призначення. Якщо стан поточної клітинки дорівнює 0 або перевищує 3, то наступним станом комірки буде 1 плюс мінімальне значення її сусідніх

клітинок, стан яких більший або дорівнює 3. Якщо стан поточної клітинки є 1, тоді стан залишається незмінним, поки не зміняться всі стани його сусідніх клітинок.  $(i_c, t)$  використовується для представлення стану центральної клітинки  $N_c$  у момент часу  $t$ , а  $(i_n, t)$  - стан сусідньої до  $N_c$  клітинки -  $N_n$ .  $(i_c, t)$  можна визначити як Алгоритм 1 (правила еволюції)

```

1 if  {(ic, t) = 0 or (ic, t) > 3} and (in, t) ≥ 3}
2   (ic, t + 1) = min[(in, t) ≥ 3] + 1
3 else
4   (ic, t + 1) = (ic, t)
5 End

```

Виходячи з цих правил, стани кожної клітинки після еволюції показані на рис. 5 (b).

### 3.1.2. Оптимізація шляху КА

Літак стартує з клітинки поблизу вихідної точки. Якщо стан клітинки більше 1 і її значення є мінімальним серед усіх сусідніх клітинок, ця клітинка стає центральною. Потім літак переходить до сусідньої клітинки, стан якої менше 1 до стану центральної клітинки. Якщо є декілька клітинок, які мають однаковий стан, НФ буде обирати клітинку, яка є підключеною. Центр сітки з'єднаний з вихідною клітинкою  $N_o$  та клітинкою призначення  $N_D$  прямими лініями. Наприклад, евклідова відстань між центром сітки і вихідною клітинкою є  $d_1$ , а відстань до кінцевої клітинки -  $d_2$ .  $G_{OD}$  - відстань між  $N_o$  і  $N_D$ . НФ обчислюється як

$$(d_1 + d_2) / G_{OD}.$$

Клітинку з мінімальним НФ вибирають як наступну клітинку. Нехай  $(i_n, L_n)$  представляють НФ сусідньої до клітинки  $N_n$ , клітинки  $N_c$  в момент часу  $t$ , а  $(i_n, L_n)$  - розташування клітинки  $N_n$ . Тоді використовуємо наступний алгоритм оптимізації шляху

Алгоритм 2 (Оптимізація шляху)

```

1 While (t > 0)
2 if {(in, t) = (ic, t) - 1 and min (in, In)}
3   (ic, t - 1) = (in, t)
4   route = [route; (in, Ln)]
5   t = t - 1
6 End
7 End

```

Аналогічно, пошук шляхів триває з обмеженнями НФ, щоб сформувати оптимальний шлях, поки не буде досягнуто призначення. Оптимальний шлях

позначений червоною лінією на рис. 5 (b). Сірі клітинки із значенням 1 є клітинами ЗОН; не-ЗОН клітинки мають значення 0; клітинки із значеннями 2 і 3, є початковими та кінцевими клітинки відповідно. Червона лінія являє собою оптимальний шлях.

### 3.2. Оптимізація вузлів мережі повітряних маршрутів (ВМПМ)

Враховуючи обмеженість можливостей ВМПМ у фрагментованому повітряному просторі, загальні витрати на всю мережу повітряних маршрутів можна звести до мінімуму шляхом об'єднання та переміщення вузлів перетину.

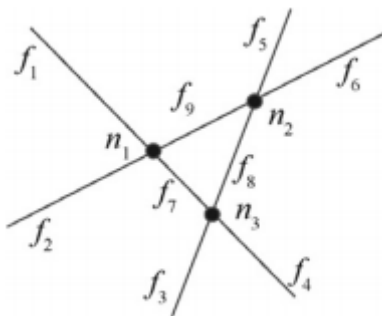
#### 3.2.1. Об'єднання вузлів перетину

Об'єднання вузлів може скоротити кількість вузлів, яке, в свою чергу, зменшує навантаження для диспетчерів, підвищує безпеку повітряного простору, і знижує загальну вартість всієї мережі маршрутів. На підставі обмеження потужності у формулі (3) і зваженого якісного методу, вузли перетину (наз. "якірними вузлами") з відстанями менше 100 км можуть бути об'єднані в один вузол (так званий "невідомий вузол"). Всі вузли перетину повинні відповідати обмеженням потужності після об'єднання. Алгоритм задається так

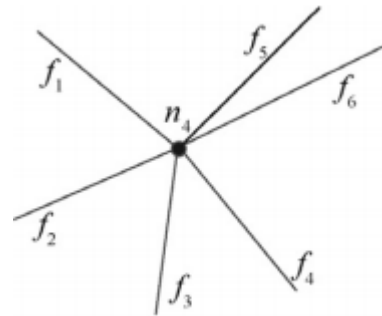
$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} (w_i B_i(x, y))}{\sum_{i=1}^{N_a} (w_i)} \quad (6), \quad w_i = (f_i)^{n_a} \quad (7)$$

де  $P(x, y)$  координати невідомого вузла,  $B_i(x, y)$  координати якірного вузла,  $w_i$  відношення ваги якірного вузла до невідомих вузлів,  $n_a$  ваговий коефіцієнт зі значеннями від 1 до 3, і  $N_a$  кількість якірних вузлів. Чим більший потік в якірних вузлах, тим більший ефект розташування невідомого вузла.

Процес злиття якірного вузла показаний на рис. 6, де  $n_1, n_2$  і  $n_3$  є трьома якірними вузлами, а  $f_i$ - пов'язаний трафік сегмента.



(a) Початкова структура шляхів



(b) Об'єднана структура шляхів

6 Злиття вузлів перетину

Транспортні потоки вузлів  $n_1, n_2$  та  $n_3$  є

$$(f_1 + f_2 + f_7 + f_9) / 2,$$

$$(f_5 + f_6 + f_8 + f_9) / 2 \text{ та}$$

$$(f_3 + f_4 + f_7 + f_9) / 2 \text{ відповідно.}$$

Три анкерні вузли об'єднуються в вузол  $n_4$  з потоком трафіку

$$(f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6) / 2.$$

У процесі об'єднання вузлів перетину, які задовольняють обмеження, з'єднування сегмента маршруту буде змінюватися, що призводить до генерації нових вузлів перетину. Описаний вище спосіб повторюється, поки не згенеруються всі вузли. Потім процес об'єднання завершується.

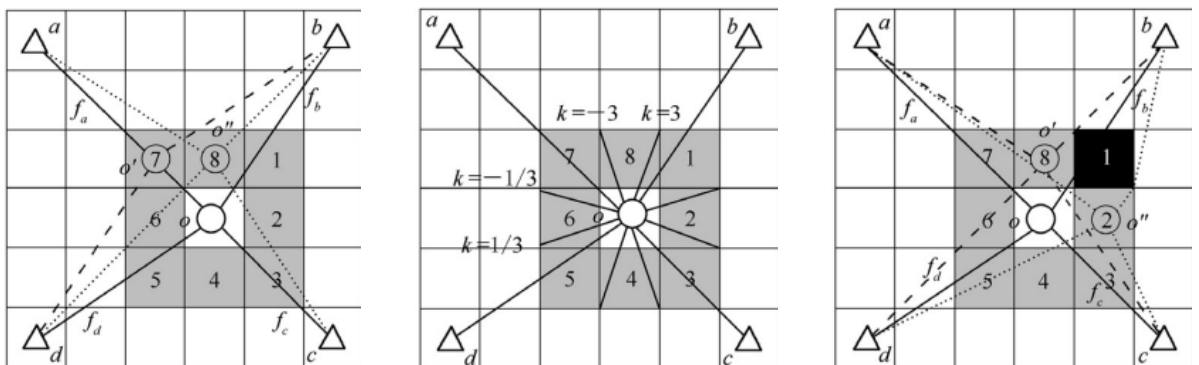
### 3.2.2. Переміщення вузлів перетину

Враховуючи обмеження потужності ВМПП у формулі (3), сполучений трафік сегмента використовується в якості ваги, а вузли перетину переміщуються до сусідньої клітинки (за винятком ЗОН) з найбільшою вагою. Переміщення приймається, якщо воно задовольняє наступні два обмеження:

1. загальна вартість маршрутної мережі зменшується після переміщення;
2. і вузол, і його сусідні вузли задовольняють обмеженням потужності.

В іншому випадку вузли перетину залишаються у вихідному положенні. Переміщення повторюється до тих пір, поки не буде досягнуто найкращої ефективності МПП. Але через розмір сітки та правил обмеження результат є локально оптимальним.

Для оптимізації МПП у фрагментованому повітряному просторі запропоновані наступні правила для переміщення ВМПП, які показані на рис. 7:  $o$  - вузол перетину, який необхідно оптимізувати.  $a, b, c, d$  - суміжні вузли і вісім сусідніх клітинок (1, 2, ..., 8) навколо вузла  $o$ .  $f_i$  ( $i = a, b, c, d$ ) являє собою транспортний потік між вузлом  $o$  і сусіднім вузлом  $i$ .



(a) Загальні рухи вузла (b) Зв'язок  $k$  з (c) Рухи вузлів уникаючи  
альтернативними сусідніми три зони  
клітинками

Рис. 7 Правила руху вузлів

## 1) Загальні правила для переміщення вузлів.

Крок 1. Визначте сусідні клітинки-кандидати, до яких буде переміщено вузол перетину. Позначте вузол  $i$  з максимальним значенням  $\max(f_i)$  як  $Q$ . Довільно виділіть один вузол як  $Q$ , якщо є більше одного вузла з максимальним потоком. Відповідно до нахилу  $k$  прямої, утвореної вузлом  $Q$  і  $o$ , можна визначити сусідню клітинку-кандидата. (рис. 7 (b))

Крок 2. Визначення цільової сусідньої комірки  $Q_c$ . Як показано на рис. 7 (a), відповідно до відносного положення  $o$  і  $Q$ , одна з сусідніх клітинок-кандидатів повинна бути обрана в якості цільової сусідньої клітини, в яку буде переміщено вузол  $o$ . Наприклад, припустимо, що  $f_a = \max(f_i)$ , а потім  $Q = a$ . Відповідно до діапазону нахилу  $k$  ( $-3 < k < -\frac{1}{3}$ ) лінії між вузлом  $Q$  і  $o$ , сусідні клітинки-кандидати є клітинки 3 і 7. На основі відносної позиції  $o$  і  $a$ , клітинка 7 вибрана як цільова сусідня клітинка  $Q_c$ . Таким чином, вузол  $o$  буде переміщений до клітинки 7 і позначений  $o'$  без зміни його стану з'єднання.

## 2) Обмеження ЗОН.

У процесі переміщення вузлів, вузол  $o$  і його сусідні клітини, ймовірно, знаходяться в ЗОН. Якщо вузол  $o$  знаходиться в ЗОН, його слід перемістити до найближчої межі ЗОН. Потім вузол  $o$  переміщується згідно з правилами, описаними в (1). Якщо цільова сусідня клітинка  $Q_c$  вузла  $o$  розташована в ЗОН, дві найближчі сусідні клітинки до  $Q_c$  вибираються клітинками-кандидатами. Розглядаються три випадки для цих двох сусідніх клітинок-кандидатів:

Випадок 1. Якщо дві сусідні клітинки-кандидати знаходяться в ЗОН, зберігайте вузол  $o$  без змін.

Випадок 2. Якщо одна з двох сусідніх клітинок-кандидатів знаходиться в ЗОН, то цільовою обирається інша сусідня клітинка.

Випадок 3. Якщо жодна з двох сусідніх клітинок-кандидатів не знаходиться в ЗОН, то цільовою сусідньою коміркою обирається та, яка знаходиться поряд з більшою  $f_i$ .

На рис. 7 (c) зображений приклад переміщення вузла з ЗОН обмежень. Як видно, клітинка 1, показана в ЗОН, є однією з сусідніх клітинок вузла  $o$ . Якщо  $f_b = \max(f_i)$ , то клітинка 1 є цільовою сусідньою осередком вузла  $o$ . Оскільки клітинка 1 знаходиться в ЗОН, клітинки 2 і 8 будуть новими сусідніми клітинками кандидатами. Якщо  $f_a \leq f_c$ , то клітинка 8 буде цільовою



сусідньою клітиною. В іншому випадку, вузол  $o$  буде переміщеним до клітинки 2. Ця клітинка позначена  $o'$ .

### 3) Обмеження потужності.

Обмеження на потужність перевіряються, щоб визначити, чи слід приймати вузли перетину. Припустимо, що суміжний вузол вузла  $o \in p$ , тобто  $f_p = \max(f_i)$ . Визначено наступні правила.

Якщо вузол  $o'$  і всі його суміжні вузли перетину задовольняють обмеженням потужності, тоді цей рух приймається; В іншому випадку цей рух відхиляється. Дві сусідні клітинки вузла  $Q_c$  обираються новими клітинками-кандидатами. Потім визначається нова цільова сусідня клітинка на основі правил, згаданих у (2). Якщо жодна з двох нових сусідніх клітинок-кандидатів не задовольняє обмежень потужності, нові сусідні клітинки-кандидати визначаються згідно з правилами в (1) і (2) на основі потоку трафіку  $f_i$ . Якщо жодна сусідня клітинка не може задовольнити обмеження потужності, положення вузла перетину зберігається незмінним.

Наприклад, нехай  $f_b \geq f_a \geq f_c \geq f_d$ , у (с), клітинка 1 обрана цільовою клітинкою вузла  $o$ . Тим не менш, клітинка 1 знаходиться в ЗОН, і клітинка 8 потім обрана новою цільовою клітинкою вузла  $o$ , оскільки  $f_a \geq f_c$ . Вузол  $o$  буде переміщено до клітинки 8 і позначено як  $o'$ :

Випадок 1. Якщо обмеження потужності задовольняються, цей рух може бути прийнятий.

Випадок 2. У іншому випадку, клітинка 2 переобирається як цільова для сусідньої клітинки. Вузол  $o$  переміщується в клітинку 2 і він позначається як  $o''$ . Якщо обмеження потужності задовольняються, то цей рух може бути прийнятий; В іншому випадку, порівнюючи  $f_a, f_c$  і  $f_d$ , ми визначимо нову цільову сусідню клітинку, яка задовольняє обмеженням потужності відповідно до правил, згаданих в пунктах 1) - 3).

Випадок 3. Якщо немає сусідської клітинки, яка може задовольняти обмеженням потужності, позиція вузла  $o$  залишається незмінною.

### 4) Перевірка мети.

Згідно з обмеженнями потужності і ЗОН, цільові розташування всіх вузлів перетину в МПМ визначаються в наступному кроці часу на основі правил, описаних вище. Алгоритм оптимізації шляху КА потім застосовується для пошуку найкоротшого шляху між вузлами перетину. Відповідно до даного потоку, обчислюються сукупні витрати поточних МПМ і наступних МПМ, позначених як  $T_{cmin}$  і  $T_{co}$  відповідно. Якщо  $T_{cmin} \leq T_{co}$ , вузли переміщуються в цільові місця розташування. Цей етап повторюють поки  $T_{cmin} > T_{co}$ . Потім алгоритм припиняється, і отримується оптимальний МПМ.

Таблиця 1. Співвідношення нахилу  $k$  та сусідніх кліток-кандидатів

Діапазон нахилу	Сусідні клітки-кандидати
$1/3 < k < 3$	1, 5
$-1/3 < k < 1/3$	2, 6
$-3 < k < -1/3$	3, 7
$k < -3$ or $k > 3$	4, 8

#### **4. Тематичне дослідження за темою бакалаврської роботи**

Щоб протестувати побудовану модель, транспортний потік аеропортів з найбільшим потоком в кожній з 9 РПІ використовується в якості попиту на вихідний пункт (ВП). Обчислювальні результати показують переваги моделі та переваги алгоритму.

Отже, було проведено дослідження по даній тематиці у Китаї, де є 9 районів польотної інформації (РПІ або FIR від англійського Flight Information Region), а саме таких: ZYSH (Шеньян), ZBPE (Пекін), ZSHA (Шанхай), ZHWH (Ухань), ZGZU (Гуанчжоу), ZJSY (Санья), ZPKM (Куньмін), ZLHW (Ланьчжоу) і ZWUQ (Урумчі), а також 251 ЗОН. Flight Information Region - повітряний простір певних розмірів, в межах якого забезпечуються польотно-інформаційне обслуговування та аварійне сповіщення. Це найбільший поділ повітряного простору, що існує в сучасному світі.

Відібрано аеропорти з найбільшим транспортним потоком у кожній FIR, якими стали ZYTX (Шеньянський міжнародний аеропорт Таосянь), ZBAA (Міжнародний аеропорт Шоуду, Пекін), ZSSS (Шанхайський міжнародний аеропорт Хунцяо), ZHNN (Уханський міжнародний аеропорт Тяньхе), ZGGG (Міжнародний аеропорт Байюнь, Гуанчжоу), ZJSY (Міжнародний аеропорт Фенікс, Санья), ZPPP (Міжнародний аеропорт Чаншуй, Куньмін), ZLXY (Міжнародний аеропорт Сіаньянг, Сіань) і ZWWW (Міжнародний аеропорт Дівопу, Урумчі) (Таблиця А1). Ці аеропорти приймаються як фіксовані вузли. Відповідно до попиту на вихідні пункти (ВП) між аеропортами, тут демонструється національна оптимізація МПМ. На рис. 8 зображені процедури оптимізації, які поділені на три модулі: збір даних, розробка моделі оптимізації та модельне рішення.

Збір даних полягає у отриманні інформації про повітряний простір та попиту на ВП. По-перше, згідно з маршрутами польотів і правилами рівня польоту, отримується 35 маршрутів і пов'язана з ними інформація про місцезнаходження для кожного сегмента між двома аеропортами. Також витягується інформація про ЗОН. Поточна мережа маршруту проілюстрована на рис. 9 і рис. 10 з суцільними лініями, що проходять через 144 ЗОН. Кількість повітряних маршрутів, що проходять через ЗОН між різними аеропортами, наведена в таблиці А2. Загальна довжина діючих ділянок МПМ становить 45507,0 км, а НФ - 1,0821 км.

Середній піковий обсяг трафіку між аеропортами розраховується на основі плану польотів у 2014 році, який використовується як попит на МПМ (таблиця А2). Загальна вартість поточної МПМ становить 48304,44 км/год.

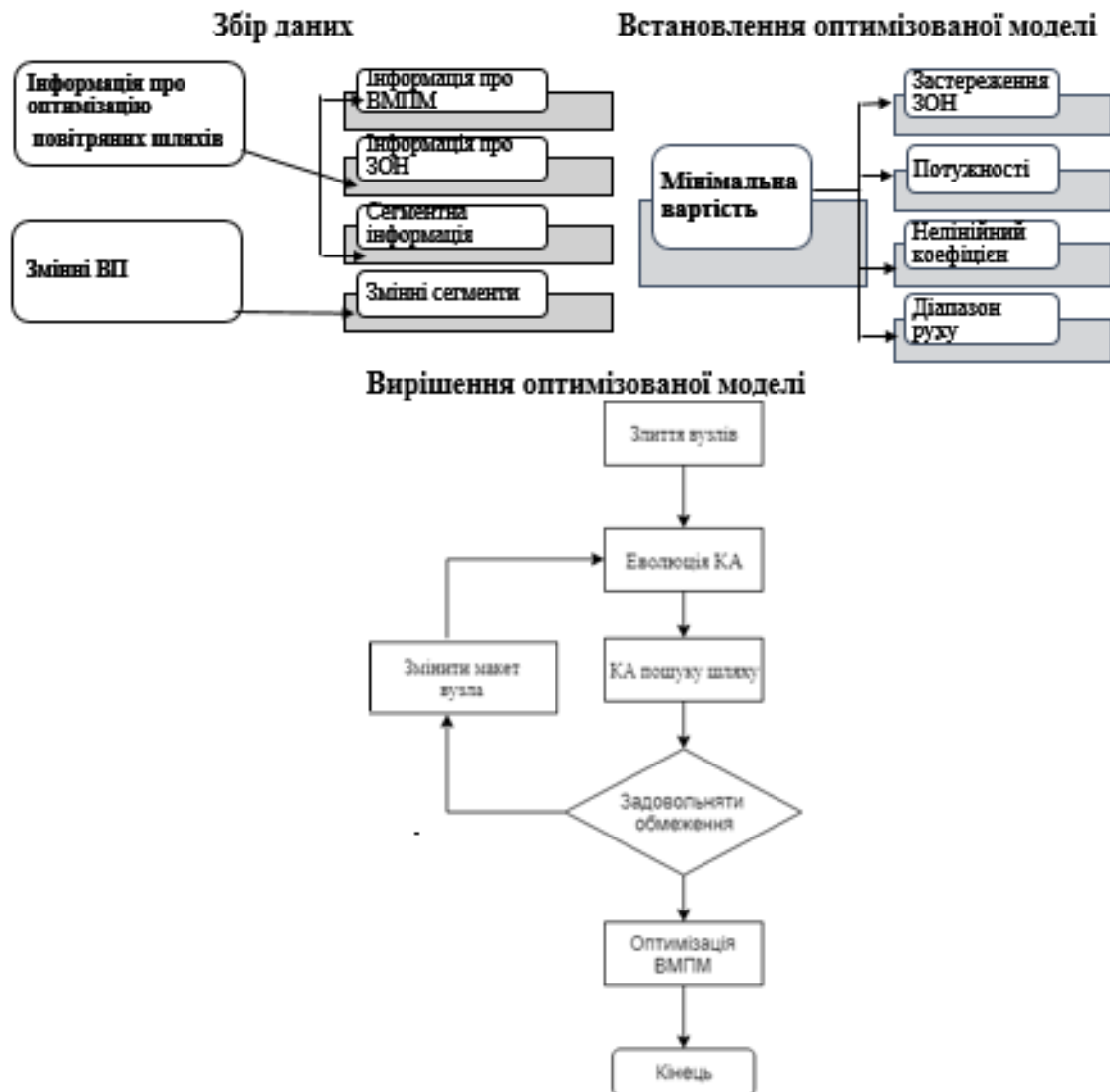


Рис. 8 Блок-схема оптимізації МПМ

У модулі розрахунку мінімальна вартість МПМ, виражена у формулі (1), приймається як цільова функція. Чотири обмеження на уникнення ЗОН, потужність ВМПМ, НФ і рух вузла встановлюються на основі рівнянь (2) - (5).

Для розв'язання моделі, 81 вузол перетину об'єднуються за допомогою алгоритму, описаного в розділі 3.2.1, поки не буде згенерований новий вузол перетину. Крім того, вузли перетину в ЗОН переміщуються до меж ЗОН. З'єднання всіх сегментів маршруту змінюються, оскільки вузли об'єднуються, даючи початкову оптимізовану МПМ. Координати вузла перетину, трафіку і потужності наведені в таблиці А2. Потім весь повітряний простір rasterизується з, принаймні, двома сітками між ЗОН. Найкоротший шлях між кожним з двох аеропортів здійснюється за допомогою алгоритмів КА, представлених у розділі 3.1.



Рис.9 Схеми оптимізації маршруту повітряного простору від ZLXY до ZBAA

На рис. 9 показані схеми оптимізації маршруту повітряного простору від ZLXY до ZBAA. ①, ②, ③ - зони високої щільності вузлів перетину, через які повинен пройти повітряний маршрут між ZLXY і ZBAA. Навколо області ① існує п'ять вузлів: CDY, ET, EF, ETH і EFO. Після налаштування, вузли зменшуються на 3, а розташування нових вузлів' (32') і 32 відповідно. У межах ② і ③ кількість вузлів зменшується від 2 до 1 і від 14 до 2 відповідно. Після оптимізації тракту, вузол 20 був видалений, а положення вузла 21 було скориговано. Вузол 35 - новий вузол перетину, що генерується. Детальні зміни вузлів наведені в таблиці 2. Видно з рис. 9, що оригінальні маршрути (позначені суцільними лініями) між парами аеропортів крутяться в роздробленому повітряному просторі, а 13 сегментів маршрутів пройшли через 6 ЗОН, а саме:  $A_a$ ,  $A_b$ ,  $A_c$ ,  $A_d$ ,  $A_e$  і  $A_f$ . Після оптимізації, як показано пунктирною лінією, усуваються всі ЗОН. Маршрутна мережа оптимізована в цьому фрагментованому повітряному просторі. Кількість вузлів значно зменшується.

МППМ в межах 9 РПП до і після оптимізації показана на рис. 10. Детальна інформація наведена в табл. 3 і рис. 11. Індикаторами безпеки є кількість вузлів перетину і кількість вузлів, які проходять через ЗОН. Економічні показники включають повні довжини сегментів маршруту, довжину МППМ, загальну

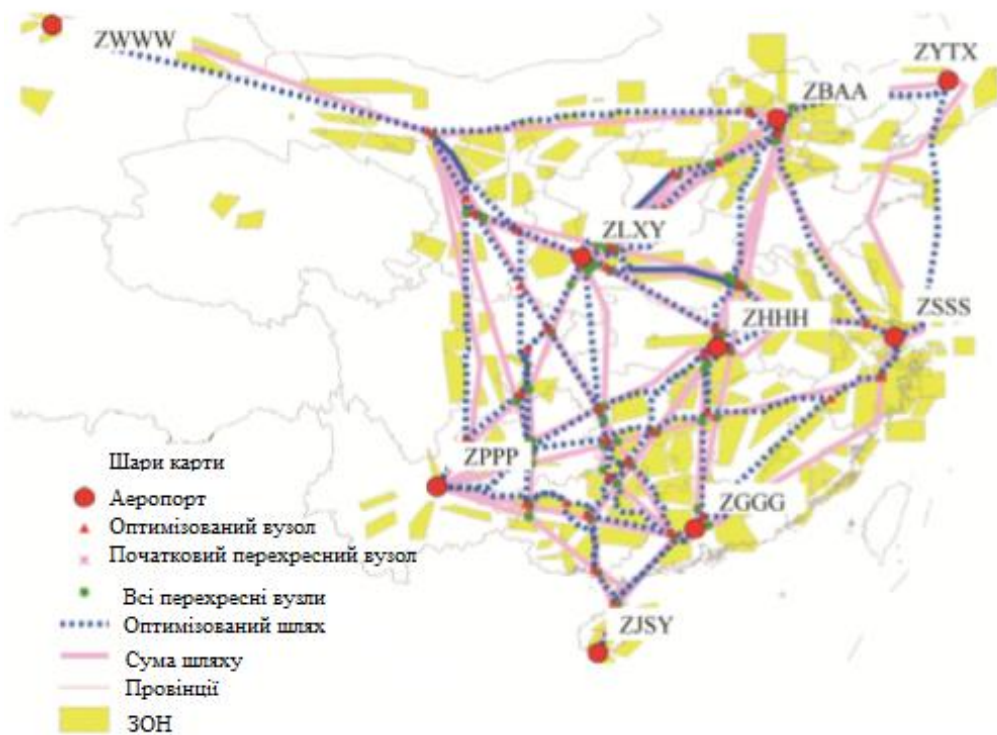


Рис.10 Діаграма оптимізації МПМ

експлуатаційну вартість МПМ, і НФ. Поточні маршрути проходять через загалом 144 ЗОН. Наприклад, маршрути між ZPPP і ZSSS повинні пройти через 13 ЗОН. Після оптимізації, всі ЗОН запобігають і експлуатаційна безпека поліпшується.

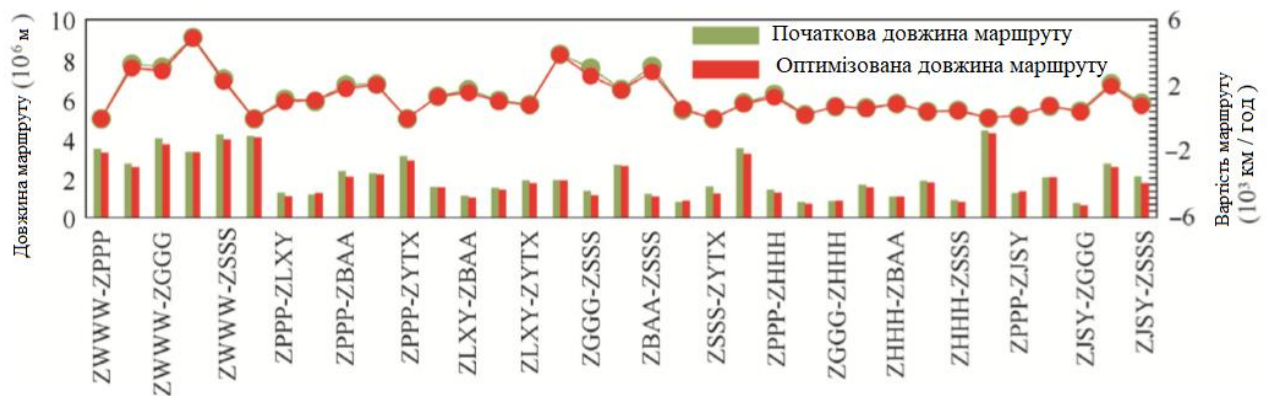


Рис.11 Порівняльні результати по МПМ до і після оптимізації маршруту

Число перехресних ВМПМ є 81. Після оптимізації, кількість вузлів сильно скоротилося приблизно на 50% ,до 40 (таблиця А3). Координаційне навантаження між військовими та цивільними особами було значно скорочене, а також навантаження на управління повітряним рухом (УПР). Загальна довжина всіх відрізків маршрутів зменшилася з 45507,0 км до 30929,3 км, що на 32,03% менше. Загальна довжина маршрутів була зменшена з 72683,5 км до 68453,88 км, що на 5,82% менше. Протяжність маршруту ZJSY



– ZSSS зменшилася на 16,69%, при цьому довжина маршруту ZPPP – ZGGG збільшилася на 4,64% внаслідок уникнення ЗОН. Загальна вартість сегментів зменшилася з 48304,44 км/год до 45308,27 км/год. Вартість маршрутів ZGGG – ZSSS знизилася на 16,06%. НФ, який змінюється з довжиною маршруту, зменшився на 5,82%. Порівняльні результати щодо безпеки та економічних показників між поточними МПМ та оптимізованими МПМ представлені на рис. 11. Довжини ZPPP – ZJSY, ZPPP – ZGGG, ZGGG – ZHHH, ZLXY – ZJSY та ZBAA – ZYTX збільшені на 8,09%, 4,64%, 2,86%, 1,04% і 8,25%, щоб уникнути ЗОН. Однак довжина та вартість інших 30 маршрутів менші, ніж у поточних маршрутах.

Таблиця А1. Аеропорти Китаю

Назва аеропорту	Таосянь/Шеньянь	Шоуду/Пекін	Хунцяо/Шанхай	Тіанхе/Ухань	Чаншуй/Куньмін	Сіаньянг/Сіань	Дівопу/Урумчі
Код аеропорту	ZYTX	ZBAA	ZSSS	ZHHH	ZGGG	ZLXY	ZWWW

Пара аеропортів	Трафік (км/год)	Кількість ЗОН	Пара аеропортів	Трафік (км/год)	Кількість ЗОН
ZWWW-ZPPP	0	6	ZWWW-ZLXY	7,292	3
ZWWW-ZGGG	4,706	6	ZWWW-ZBAA	8,865	10
ZWWW-ZSSS	3,455	5	ZWWW-ZYTX	0	10
ZPPP-ZLXY	5,712	0	ZPPP-ZGGG	5,467	6
ZPPP-ZBAA	5,239	3	ZPPP-ZSSS	5,618	13
ZPPP-ZYTX	0,009	7	ZLXY-ZGGG	5,323	2
ZLXY-ZBAA	9,349	1	ZLXY-ZSSS	4,417	1
ZLXY-ZYTX	2,812	5	ZGGG-ZBAA	12,4	6
ZGGG-ZSSS	13,638	6	ZGGG-ZYTX	3,971	6
ZBAA-ZSSS	16,013	2	ZBAA-ZYTX	4,126	0
ZSSS-ZYTX	0,008	3	ZWWW-ZHHH	1,641	4
ZPPP-ZHHH	6,275	2	ZLXY-ZHHH	1,929	0
ZGGG-ZHHH	5,223	0	ZJSY-ZHHH	2,394	2
ZHHH-ZBAA	5,11	3	ZHHH-ZYTX	1,427	3
ZHHH-ZSSS	3,455	0	ZWWW-ZJSY	0,097	9
ZPPP-ZJSY	0,849	4	ZLXY-ZJSY	2,285	4
ZJSY-ZGGG	3,916	1	ZJSY-ZBAA	4,664	5
ZJSY-ZSSS	2,714	6	ZJSY-ZYTX	0	0

Таблиця А2. Трафік між аеропортами

№	Довготи	Широти	Трафік (км/год)	Потужності (км/год)	Довготи після оптимізації	Широти після оптимізації
1	E 102°46'39"	N 39°25'12"	4.342	23.405	E 102°35'48"	N 39°35'21"
2	E 104°35'53"	N 36°06'23"	2.849	26.415	E 104°25'02"	N 36°16'43"
3	E 104°16'48"	N 26°51'42"	1.827	34.449	E 104°05'46"	N 27°02'27"
4	E 106°24'25"	N 28°48'48"	1.843	32.235	E 106°17'29"	N 28°56'11"
5	E 162°45'15"	N 26°28'40"	2.379	34.417	E 106°35'09"	N 26°38'25"
6	E 106°39'46"	N 24°11'18"	1.449	34.896	E 106°31'56"	N 24°25'27"
7	E 109°09'14"	N 23°46'33"	2.088	34.965	E 108°58'07"	N 23°56'37"
8	E 109°25'58"	N 21°35'06"	1.715	35	E 110°00'46"	N 20°18'46"
9	E 110°10'44"	N 20°08'34"	2.819	34.095	E 112°18'55"	N 23°13'58"
10	E 112°29'05"	N 23°04'07"	2.583	17.933	E 109°51'08"	N 25°32'44"
11	E 110°01'32"	N 25°22'56"	2.064	32.341	E 110°34'30"	N 26°09'35"
12	E 110°45'41"	N 25°58'27"	1.961	33.815	E 109°44'42"	N 27°02'27"
13	E 109°54'24"	N 26°51'19"	2.608	34.718	E 109°25'26"	N 28°19'20"
14	E 109°35'21"	N 28°08'09"	2.717	34.999	E 111°33'56"	N 27°24'52"
15	E 111°44'36"	N 27°19'02"	2.113	35	E 107°23'21"	N 31°33'10"
16	E 107°33'33"	N 31°22'00"	2.992	34.999	E 108°51'42"	N 34°27'47"
17	E 109°02'56"	N 34°17'49"	7.028	35	E 109°44'42"	N 34°03'45"
18	E 109°55'44"	N 33°52'41"	1.331	34.909	E 109°57'33"	N 34°51'49"
19	E 110°07'08"	N 34°47'25"	0.577	30.007	E 112°26'57"	N 37°56'02"
20	E 112°37'08"	N 37°44'57"	2.431	32.209	E 113°48'52"	N 28°09'44"
21	E 111°02'56"	N 36°08'03"	1.341	35	E 113°39'14"	N 30°22'18"
22	E 114°00'03"	N 27°53'06"	4.535	35	E 114°08'09"	N 31°33'10"
23	E 113°49'58"	N 30°22'05"	3.093	34.687	E 114°35'27"	N 30°46'43"
24	E 114°18'53"	N 31°23'18"	2.462	34.963	E 115°07'35"	N 33°18'54"
25	E 114°45'51"	N 30°36'03"	3.304	34.999	E 117°00'01"	N 31°58'48"
26	E 115°07'22"	N 33°19'30"	5.907	33.025	E 120°12'47"	N 31°44'23"
27	E 116°58'36"	N 31°59'17"	1.888	24.894	E 129°49'44"	N 29°34'48"
28	E 120°11'25"	N 31°44'30"	4.557	27.767	E 115°30'04"	N 40°21'48"
29	E 120°48'53"	N 29°35'56"	3.662	34.201	E 114°17'47"	N 38°20'04"
30	E 115°29'52"	N 40°23'21"	1.477	34.473	E 116°39'08"	N 39°28'57"
31	E 114°17'46"	N 38°21'33"	2.901	35	E 113°37'37"	N 23°53'25"
32	E 116°37'49"	N 39°30'01"	12.331	35	E 112°04'34"	N 36°32'02"
33	E 113°36'27"	N 23°54'23"	6.324	26.198	E 106°08'42"	N 35°35'39"
34	E 114°50'58"	N 24°16'59"	2.725	35	E 108°08'31"	N 24°27'36"
35			1.962	32.152	E 106°35'42"	N 30°49'47"
36			4.321	34.561	E 106°20'59"	N 33°13'00"
37			1.856	34.234	E 104°06'00"	N 36°51'32"
38			2.342	21.231	E 118°45'36"	N 28°44'44"
39			1.215	31.203	E 111°49'48"	N 28°58'00"
40			2.512	34.233	E 104°04'37"	N 37°41'49"
41			3.662	34.201	E 102°46'39"	N 24°16'59"
42			3.093	34.687	E 102°46'39"	N 24°16'59"
43			2.865	34.577	E 102°46'39"	N 24°16'59"



Примітка: 35-43 - нові вузли

Таблиця А3. Інформація про вузли після оптимізації

№	Початковий вузол	Координати	Кількість після оптимізації	Координати
①	CDY	E 117°13'21" N 40°34'36"	32	E 116°37'49" N 39°30'01"
	ET	E 116°34'25" N 39°11'42"		
	EF	E 116°34'01" N 39°09'58"		
	EFO	E 116°34'08" N 39°10'31"		
	ETH	E 116°34'25" N 39°11'24"		
②	ZF	E 113°59'04" N 38°14'45"	31	E 114°17'46" N 38°21'33"
	SIS	E 114°40'03" N 38°29'39"		
③	SHX	E 109°55'44" N 33°52'41"	18	E 109°55'44" N 33°52'41"
	THF	E 108°57'47" N 33°59'17"		
	ZS	E 108°51'19" N 34°13'19"		
	THTH	E 108°47'54" N 34°20'44"		
	THSE	E 109°09'48" N 34°11'40"		
	FOTH	E 109°21'39" N 34°58'42"		
	FOFO	E 109°25'17" N 34°57'48"		
	FOF	E 109°48'56" N 34°51'56"		
③	NSH	E 108°18'50" N 33°19'13"	17	E 109°02'56" N 34°17'49"
	THS	E 109°00'33" N 33°53'12"		
	THE	E 109°06'39" N 34°08'26"		
	THN	E 109°15'42" N 34°05'31"		
	FOZ	E 109°18'43" N 34°07'59"		
	OD	E 108°54'59" N 34°36'01"		
④	FOE	E 111°02'56" N 36°08'03"	21	E 110°52'10" N 36°18'19"
			35 (новий вузол)	E 112°04'34" N 36°32'02"

Таблиця 2. Оптимізовані ВМІМ між ZBAA і ZLXY

Тип	Індикатор	Поточна МПМ	Оптимізована МПМ	Зміна (%)
Безпечний	Кількість вузлів	84	49	-41,67
	Загальна кількість повітряних маршрутів, що проходять ЗОН	144	0	-100
	Кількість повітряних маршрутів, що проходять ЗОН між ZPPP і ZSSS	13	0	-100
Економний	Загальна довжина сегментів (км)	45507	30929,3	-32,03
	Загальна довжина маршруту (км)	72683,5	68453,88	-5,82
	Довжина маршруту ZJSY-ZSSS (км)	2093,65	1744,22	-16,69
	Загальна вартість МПМ (км/год)	48304,44	45308,27	-6,22
	Вартість МПМ ZGGG-ZSSS (км/год)	3068,68	2575,69	-16,06
	МПМ НФ	1,0821	1,0189	-5,82

*Таблиця 3. Порівняльні результати роботи МПМ до і після оптимізації маршруту*

## 5. Опис програмного забезпечення

Щоб протестувати наведену вище модель та зроблену програмну реалізацію було обрано Україну, та 4 з найбільших аеропортів, а саме Міжнародний аеропорт «Львів» імені Данила Галицького (Львів), Міжнародний аеропорт «Бориспіль» (Київ), Міжнародний аеропорт «Одеса» (Одеса) та Міжнародний аеропорт «Харків» (Харків). Розглянуто такі маршрути Київ-Львів, Київ-Харків, Київ-Одеса, Одеса-Харків та Львів-Одеса. (Рис. 12)

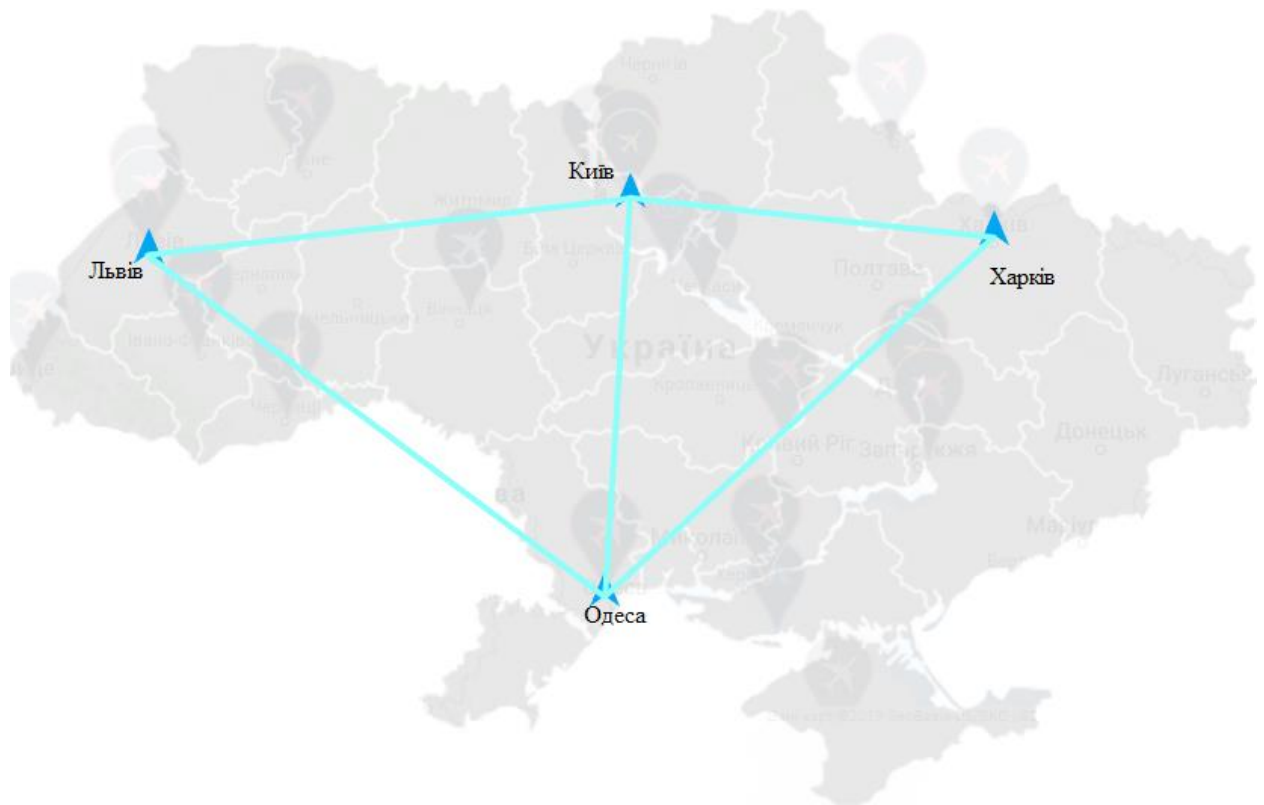


Рис.12 Карта України з обраними аеропортами та маршрутами

Для того аби проводити оптимізацію, на карту з рис.12 було додано 28 ЗОН, і отримано нову карту (рис.13), на якій обрані маршрути проходять через заборонені, обмежені і небезпечні райони. Було отримано фрагментований повітряний простір, тому необхідно провести оптимізацію шляхів з уникненням ЗОН, використовуючи алгоритм клітинних автоматів.

Для виконання програмної реалізації було обрано середовище Microsoft Visual Studio та мову програмування C#. Дану модель було побудовано за допомогою Windows Forms. Для оптимізації маршруту було обрано перший шлях - Київ-Львів. (Рис.14).

Після запуску програми було обрано висоту та широту ділянки ( в клітинках) – 15/20. Далі проводиться генерація блоків і отримується ділянка, на яку правою кнопкою комп'ютерної миші по клітинах нанесено 28 ЗОН, а

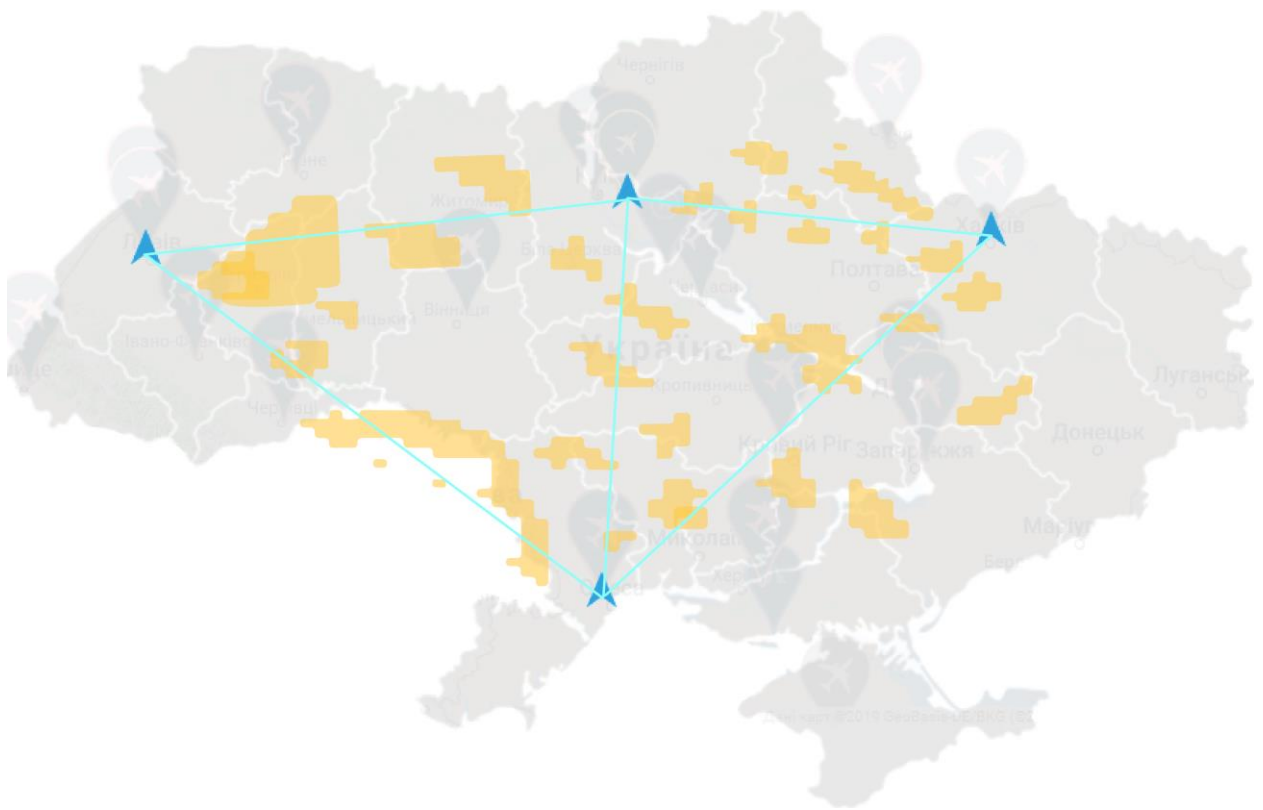


Рис.13 Карта України з нанесеними ЗОН та обраними аеропортами, маршрутами

лівою – початкова і кінцева точки, які розглянуто як аеропорти (рис. 15) . ЗОН приймаються як сірі клітинки, а вихідні точки зелені.

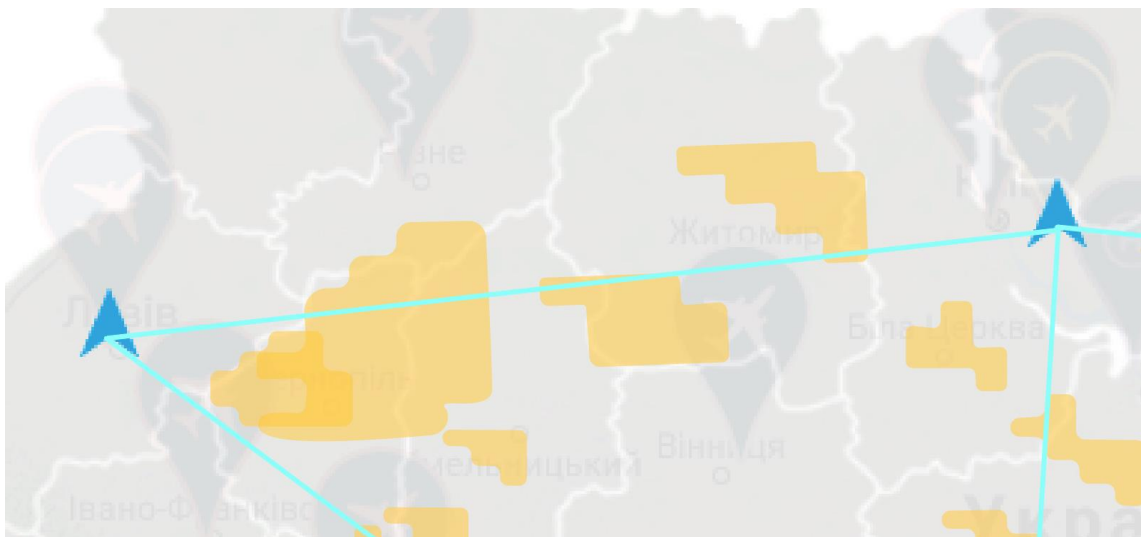


Рис.14 Перший обраний шлях - Київ-Львів

Для того аби було знайдено оптимальний шлях, виконано команду «Знайти шлях», після чого програма видає кінцеві стани клітинок (алгоритм описано в розділі 3) та оптимальний маршрут, який виведено лінією (рис. 16). Якщо виникають труднощі з вказаним шляхом, світло-зелені клітинки показують, що існують і інші маршрути проходження небезпечних районів.

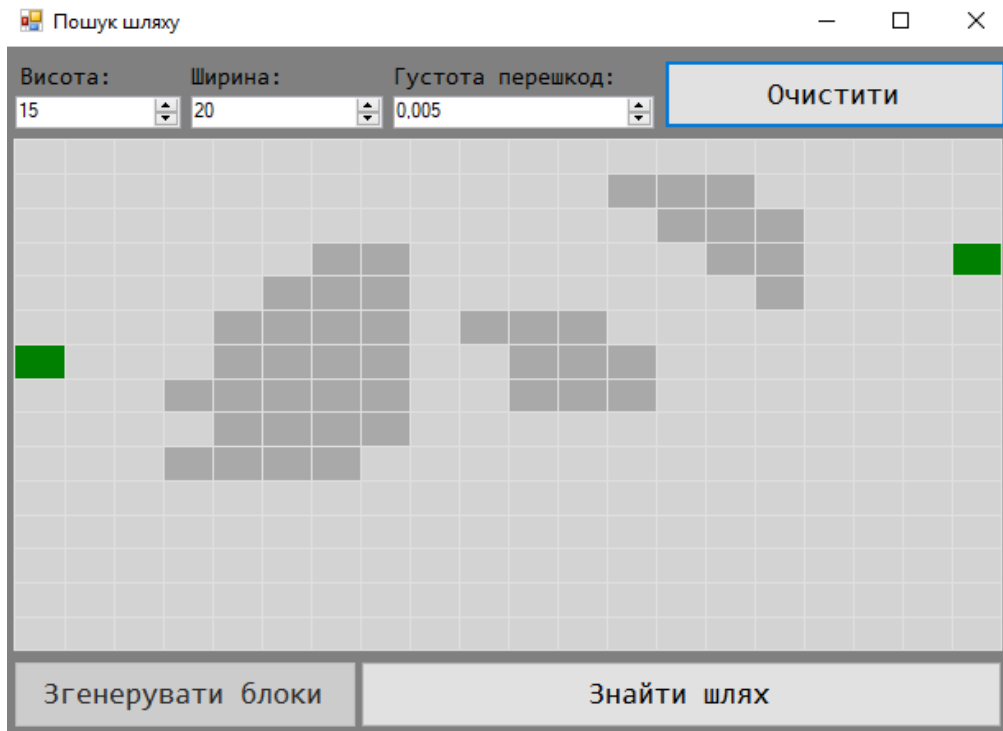


Рис.15 Програмна реалізація з нанесеними вихідними точками та ЗОН

Отриманий оптимізований маршрут було накладено на карту і отримано оптимальний шлях, який уникає всіх небезпечних районів. (рис. 17)

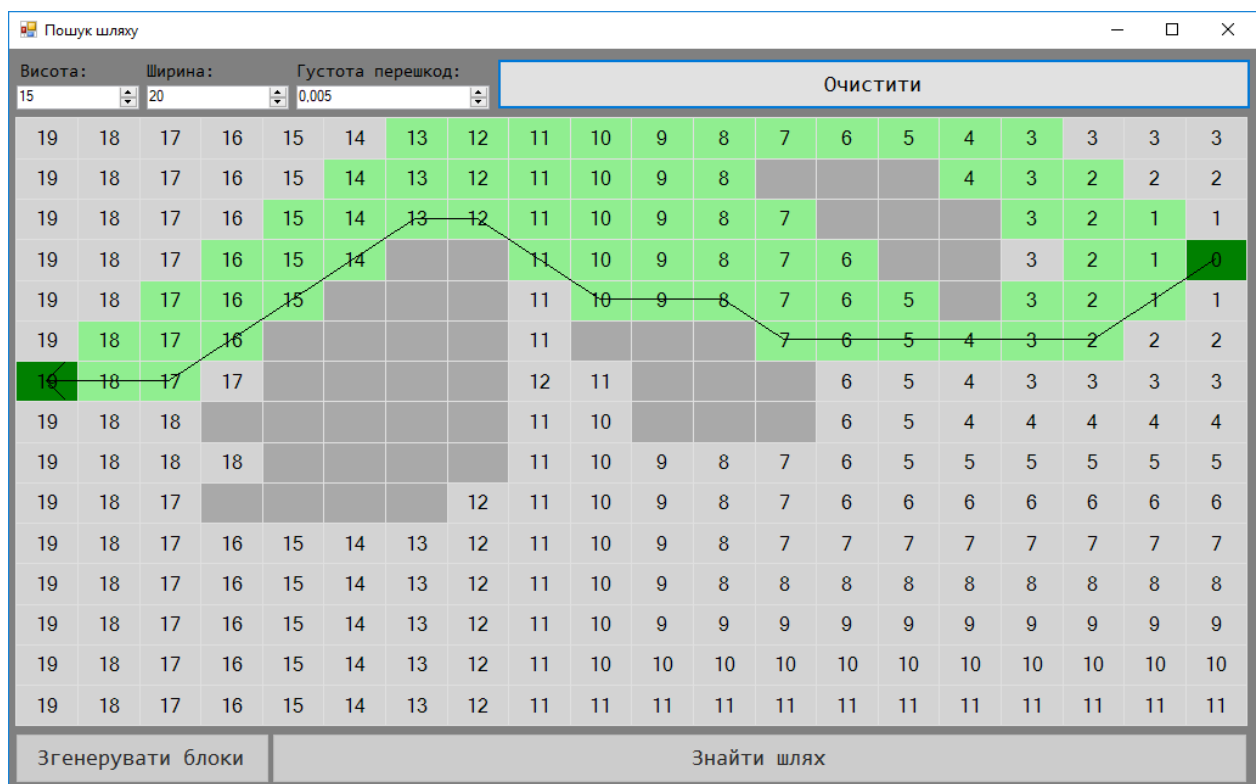


Рис.16 Результат виконання програми

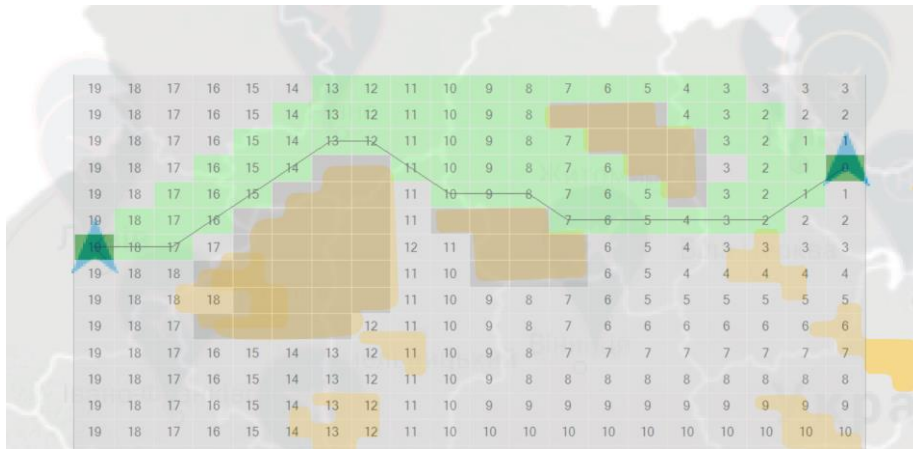


Рис.17 Накладений, отриманий з програми, оптимальний шлях на карту

Було застосовано дану програмну реалізацію до інших чотирьох маршрутів, в ході чого отримано ще чотири оптимізованих шляхи. (Рис. 18-21)

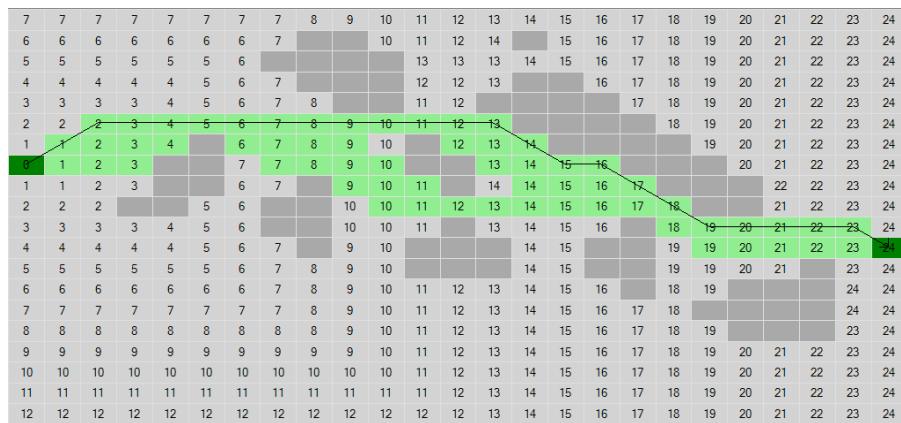


Рис.18 Результат виконання програми. Оптимальний маршрут Київ-Харків

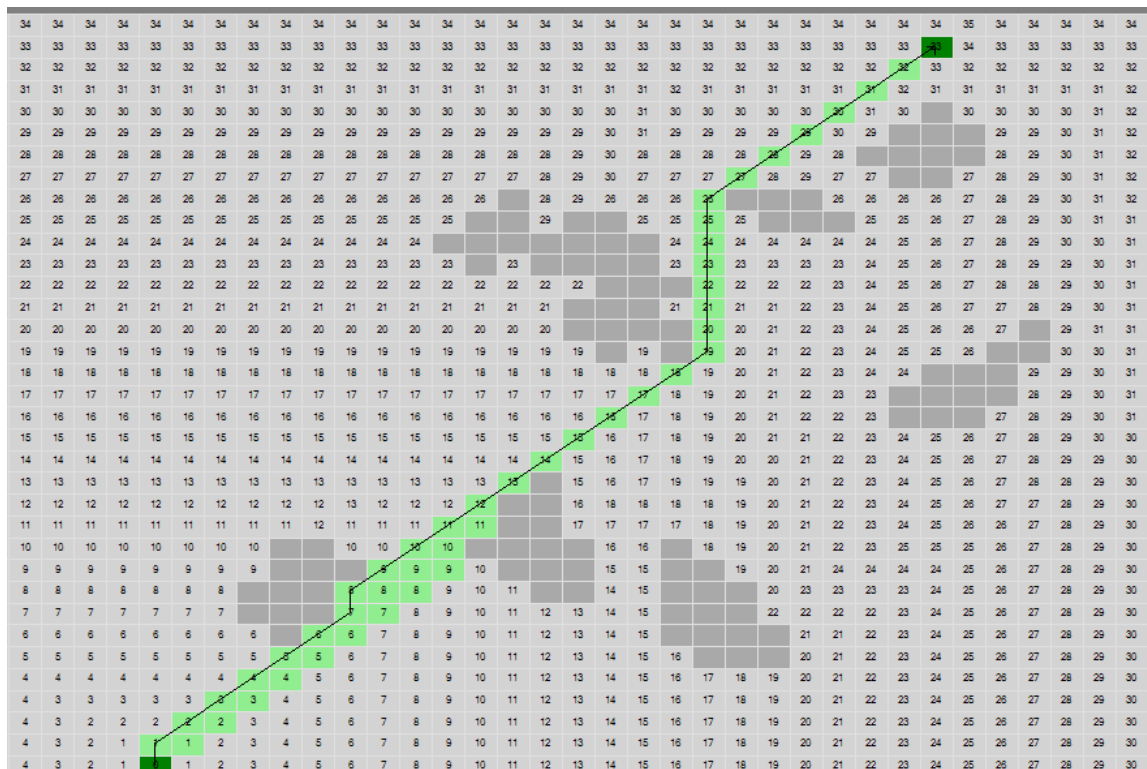


Рис.19 Результат виконання програми. Оптимальний маршрут Одеса-Харків

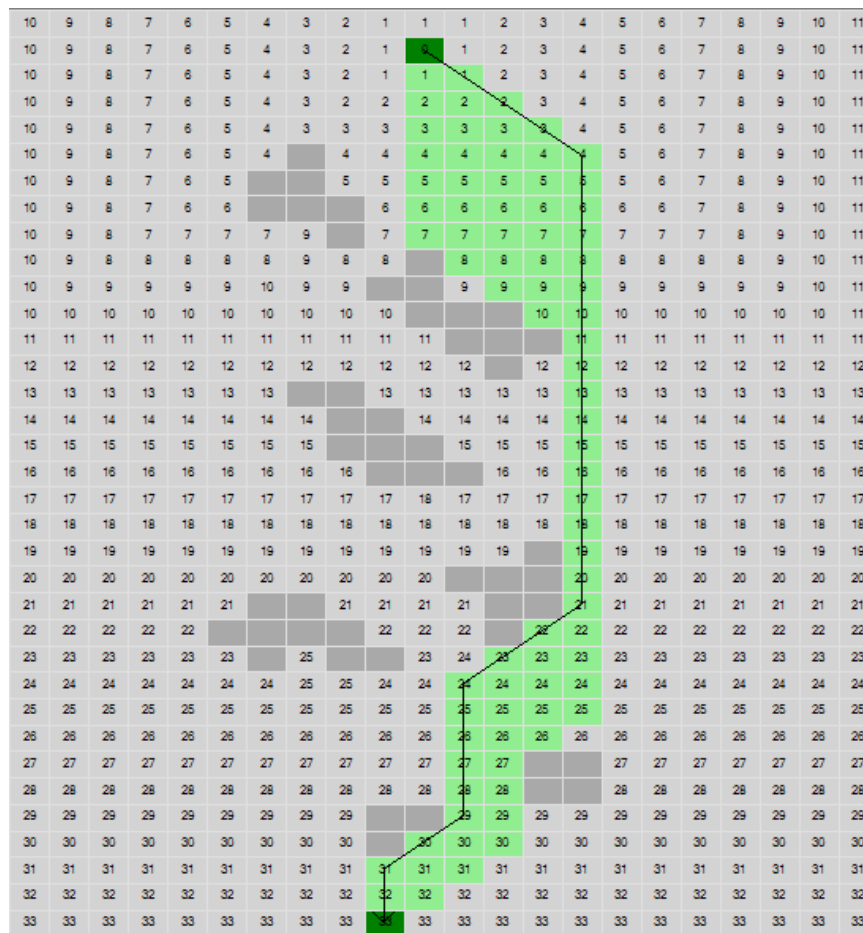


Рис.20 Результат виконання програми. Оптимальний маршрут Київ-Одеса

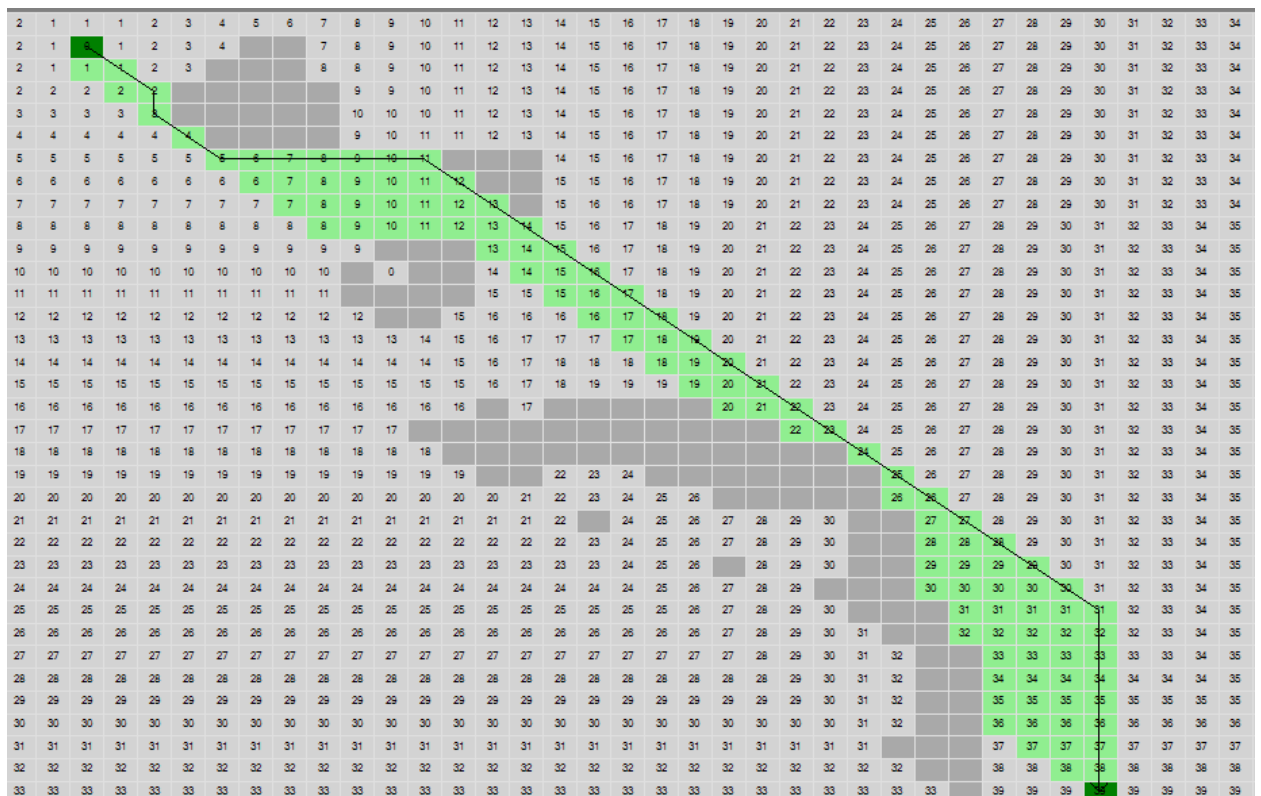


Рис.21 Результат виконання програми. Оптимальний маршрут Львів-Одеса



The map shows the flight route of the 'Ukraine' cargo plane. The route is marked with a green line and blue arrows, starting from Kyiv, flying to Lviv, then to Krakow, and finally to Warsaw. The map includes labels for major Ukrainian cities and regions.



## ***Висновок***

В даній роботі було розглянуто модель оптимізації мережі повітряних маршрутів на основі можливостей вузлів МПМ, уникаючи ЗОН у фрагментованому повітряному просторі. Розглянуто алгоритм КА і подано процедуру розв'язання оптимізаційної моделі мережі повітряних маршрутів. Можна зробити висновок з обчислювальних результатів 35 маршрутів в материковому Китаї, що загальна експлуатаційна вартість МПМ, кількість маршрутів, що проходять через ЗОН, і кількість вузлів різко скорочуються після оптимізації. Продемонстровано, що запропонований метод може бути використаний для планування та розробки фрагментованих МПМ для поліпшення економіки та безпеки МПМ.

## ***Список використаної літератури***

1. И. И. Захарчук, «О сложности одномерных универсальных клеточных автоматов» — Дискретный анализ и исследование операций, октябрь—декабрь 2002. серия 1. том 9, № 4, 50—56.
2. Клеточные автоматы. Реализация и эксперименты. Лев Наумов, Анатолий Шалыто. «Мир ПК» 2003 №8, с. 64-71.
3. Chen CL. Research on optimization method based on complex network for crossing waypoints location [dissertation]. Hefei: University of Science and Technology of China; 2011 [China].
4. Du WB, Gao Y, Liu C, Zheng Z, Wang Z. Adequate is better: Particle swarm optimization with limited-information. Appl Math Comput 2015; 268(1): 832-8.
5. Du WB, Zhou XL, Lordan O, Wang Z, Zhao C, Zhu YB. Analysis of the Chinese airline network as multi-layer networks. Transport Res Part E: Logist Transport Rev 2016; 89: 108-16.
6. Jia B, Gao ZY, Li KP. Models and simulation of traffic system on the theory of cellular automaton. Beijing: Science Education Press; 2007. p. 11-7 [Chinese]
7. Jin C, Zhu YB, Fang J, Li YT. An improved methodology for ARN crossing waypoints location problem. Proceedings of the 31<sup>st</sup> digital avionics systems conference (DASC); 2012 Oct 14-18; Williamsburg (VA), USA. Piscataway (NJ): IEEE Press; 2012.
8. Wang SJ, Gong YH. Research on air route network nodes optimization with avoiding the three areas. Safety Sci 2014; 66: 9-18.
9. Xu YC, Zhu YB. Methodology of key network nodes optimization and restricted airspace avoiding. J Civil Aviation Univ China 2013; 31 (1): 41-5 [Chinese].
10. Zhang J, Cao XB, Du WB, Cai KQ. Evolution of Chinese airport network. Phys A: Stat Mech Appl 2010; 398(18): 3922-31.
11. Zhao S, Zhang XJ, ZHU YB, Cai KQ. A methodology for designing transition route network between en-route airspace and terminal areas. Proceedings of the IEEE/AIAA 27<sup>th</sup> digital avionics systems conference; 2008 Oct 26-30; St. Paul (MN), USA. Piscataway (NJ): IEEE Press; 2008.