

**Волкогон В.О.**, к.т.н.,  
orcid.org/ 0000-0002-6813-5724

**Чепіженко В.І.**, д.т.н.,

**Шутко В.М.**, д.т.н.,  
orcid.org/ 0000-0002-9761-5583,

**Корнієнко С.П.**,  
orcid.org/ 0000-0003-1007-8701

## МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИСТЕМИ ДВОХ ЛІНІЙНО ЗВ'ЯЗАНИХ ОБ'ЄКТІВ У СТОХАСТИЧНІ ПОСТАНОВЦІ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Національний авіаційний університет

sonechkovikaa@gmail.com  
chepizhenko.valeriy@gmail.com  
vnshutko@ukr.net  
spkorn@ukr.net

### **Вступ**

Актуальність підтримки безпеки руху в аеронавігаційному середовищі стабільно висока. Вона обумовлена рядом процесів, що супроводжують розвиток авіаційних технологій.

Інтенсивність повітряного руху зростає в геометричній прогресії (5-6 відсотків на рік). Зростання трафіку призводить до підвищення частоти затримок. Безпека повітряного руху базується на методах і алгоритмах виявлення та попередження конфліктних ситуацій. З цією метою виникає необхідність удосконалення існуючих систем керування повітряним рухом на маршруті та покращення алгоритмів їх функціонування.

Сучасні концепції спрямовані на підвищення безпеки виконання польотів, надання повітряним суднам змоги виконувати польоти в межах чітко виділеного повітряного простору за довільними маршрутами. Однак, вони не вповні задовольняють сучасним вимогам безпеки повітряного руху, оскільки не забезпечують повну автономність руху повітряних суден та не виконується надійне розв'язання конфліктних ситуацій в повітряному просторі.

Очевидно, виникає гостра проблема вдосконалення алгоритмічного забезпе-

чення життєдіяльності майбутньої аеронавігаційної системи на безпечній і ефективній основі.

### **Мета**

Метою є удосконалити математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи управління рухом повітряних суден в частині запобігання конфліктів в умовах автономного польоту.

### **Постановка задачі**

Проведений аналіз доступних джерел інформації показує, що існуючі концепції, пов'язані з автономністю польоту, такі як: Free Flight, A3, TCAS, S&A, ADS-B та ASAS є недосконалими. Це обумовлено тим, що системи такого рівня – це багатоаспектні комплексні системи з ієрархічною схемою організації, які містять технічні, організаційні, інформаційні, керуючі, соціотехнічні й ергатичні компоненти. Дані концепції здатні вирішувати тільки часткові проблеми безпеки повітряного руху. Результати останніх досліджень виявили певні існуючі недоліки та обмеження даних концепцій при реалізації автономного польоту.

Євроконтролем сформульовано стратегію розвитку організації повітряного руху на найближчі десятиліття. Важливу роль приділяють розробленню нових

принципів керування повітряним рухом та організації повітряного простору.

Технологія самоорганізаційних систем, розглядається нині як єдина технологія, яка в змозі запропонувати адекватні методи, архітектуру й інструментальну підтримку програмній реалізації найбільш складних сучасних систем. Ця технологія має великі перспективи, передусім, по відношенню до систем, для яких характерні відкритість, велика розмірність, автономність складових її підсистем і їх мережева організація, а також мобільність.

Можна сказати, що процес самоорганізації системи підтверджує, що ефективність раціональних і цілеспрямованих дій слабшає, організація сама "створює" себе, іноді протидіючи свідомому керівництву. Дослідження процесів самоорганізації дають можливість не лише виявляти механізм автономної циклічної самопідтримки, але і дозволяють знайти можливість запустити цей механізм.

Розглянемо окремих випадок, коли два літаки у повітряному просторі мають пройти один повз одного на безпечній відстані. Для цього випадку можна провести аналогію зі зв'язаними маятниками, що мають змогу вільно рухатися на одній висоті. Ми накладаємо умову або «зв'язуємо» два тіла не жорстко, але так, щоб вони не могли торкатися одне одного. При цьому також не потрібно щоб тіла не розходилися на велику відстань (тобто літак залишається на своєму маршруті).

### Основна частина

Ставиться задача знайти математично дві гармоніки для випадку, коли довжини маятників однакові. Як приклад лінійних осциляторів з нелінійним зв'язком розглянемо рівняння

$$\ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = \alpha x_1 x_2, \quad (1)$$

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = \beta x_1 x_2, \quad (2)$$

де квадратичні члени в правих частинах описують зв'язок.

Нехай відхилення одного маятника буде  $x$ , а іншого –  $y$ , як це показано на рис.1. За відсутності пружини сила тяжіння, що діє на перший маятник, пропорційна його відхиленню. Якби тут не було

пружини, то для одного маятника з'явилася б деяка власна частота  $\omega_0$ , а рівняння руху в цьому випадку набуло б вигляду

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega_0^2 x.$$

Другий маятник за відсутності пружини гойдався б точно так, як і перший. Проте за наявності пружини на додаток до поновлюючої сили, що виникає в результаті гравітації, з'являється ще додаткова сила від пружини, яка прагне "стягнути" маятники. Ця сила залежить від перевищення відхилення  $x$  над відхиленням  $y$  і пропорційна їх різниці, тобто вона рівна деякій постійній, залежній тільки від геометрії, помноженої на  $(x-y)$ . Та ж сила, але у зворотному напрямі діє на другий маятник. Тому рівняння руху, які ми повинні вирішити, будуть наступними:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega_0^2 x - k(x - y), \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -m\omega_0^2 y - k(x - y). \quad (4)$$

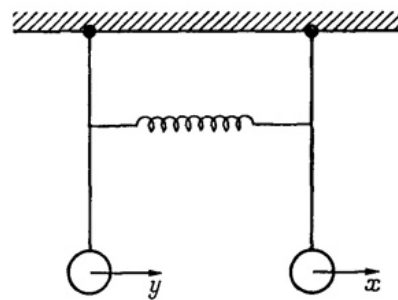


Рис. 1. Модель зв'язаних маятників

Щоб знайти рух, при якому обидва маятники коливаються з однаковою частотою, ми повинні визначити, наскільки відхиляється кожен з них. Іншими словами, маятник А і маятник В коливатимуться з однаковою частотою і з якимись амплітудами А і В, відношення яких фіксоване. Давайте перевіримо, наскільки підходить таке рішення:

$$x = A e^{i\omega t}, \quad y = B e^{i\omega t}.$$

Якщо підставити його в рівняння (1) і привести подібні члени, то отримаємо:

$$\begin{aligned} \left(\omega^2 - \omega_0^2 - \frac{k}{m}\right) A &= -\frac{k}{m} B, \\ \left(\omega^2 - \omega_0^2 - \frac{k}{m}\right) B &= -\frac{k}{m} A. \end{aligned} \quad (5)$$

При виведенні цих рівнянь ми скоротили загальний множник  $e^{i\omega t}$  і розділили

все на  $m$ . Тепер ми бачимо, що вийшли два рівняння для, здавалося б, двох невідомих. Проте насправді тут не два невідомих, бо загальні масштаби руху не можна знайти з цих рівнянь. Вони можуть дати нам тільки відношення  $A$  до  $B$ , причому обидва рівняння повинні дати однакову величину. Вимога узгодженості рівнянь один з одним накладає вимогу на частоту: вона має бути якоюсь дуже спеціальною.

Але знайти частоту в цьому окремому випадку досить легко. Якщо перемножити обидва рівняння, то ми отримаємо:

$$\left(\omega^2 - \omega_0^2 - \frac{k}{m}\right)^2 AB = \left(\frac{k}{m}\right)^2 AB.$$

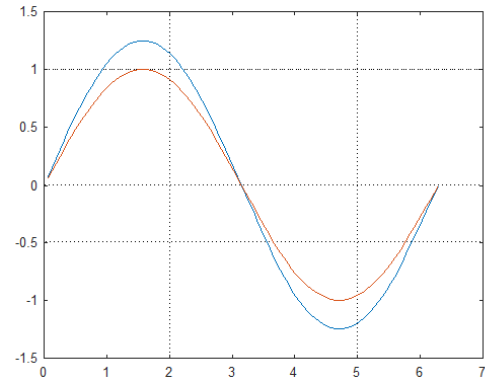
В обох сторонах можна скоротити добуток  $AB$ , за винятком тих випадків, коли або  $A$ , або  $B$  дорівнює нулю, що означає відсутність руху взагалі. Але якщо рух є, то мають бути рівні між собою й інші співмножники, що призводить до квадратного рівняння. В результаті виходять дві можливі частоти:

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 \text{ і } \omega_2^2 = \omega_0^2 + \frac{2k}{m}.$$

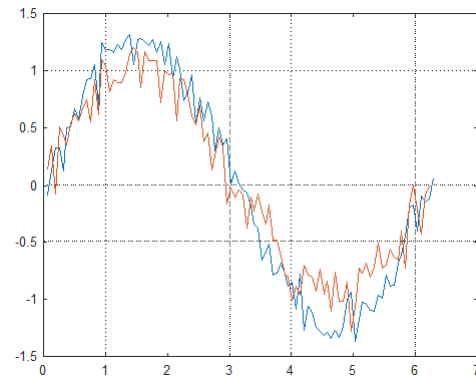
Більше того, якщо підставити ці значення частот знову в рівняння (5), то для першої частоти ми отримаємо  $A=B$ , тобто пружина взагалі не розтягуватиметься і обидва маятники коливаються з частотою  $\omega_0$ , начебто пружини взагалі не було. У іншому рішенні, коли  $A=-B$ , пружина збільшує поновлюючу силу і частота зростає.

Дану задачу вирішували в стохастичі посилаючись на Г. Хакена (він являється основоположником синергетичного підходу у детермінованій постановці задачі) [2], ми ж вирішили врахувати стохастичність процесу.

У результаті моделювання руху маятників в ідеальному випадку за відсутності шумів, завад та інших спотворень маємо такі криві (рис.2а). Але в реальному житті система зв'язаних рухомих об'єктів піддається дії різного роду збурювачів. До того ж завжди виникають похибки вимірювань параметрів руху цих об'єктів. Це відображається на кривих (рис.2б).



а)



б)

Рис. 2. Приклад стохастичних коливань маятників із різними СКВ шумів: а) детерміновані основи; б) реальний сигнал, до якого входять детермінована основа та шуми.

Проведемо вейвлет-фільтрацію амплітуд стохастичних маятників з урахуванням аналітичних зв'язків між їхніми детермінованими основами з метою підвищення точності оцінки даних.

Для фільтрації параметрів математичних маятників класичним та запропонованим (з урахуванням аналітичних зв'язків між їхніми детермінованими основами) методами використовуємо багатомасштабний аналіз із біортогональним сплайновим вейвлетом восьмого порядку в якості базисної функції.

На основі В-сплайнів побудовані декілька біортогональних базисів із сплесків. Наприклад, масштабуюча функція і сплеск Малла-Зонга визначаються через свої перетворення Фур'є таким чином:

$$\hat{\varphi}(\omega) = \left(\frac{\sin\omega/2}{\omega/2}\right)^{2n+1};$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \left(\frac{\sin\omega/4}{\omega/4}\right)^{2n+2}.$$

Функція згладжування  $\varphi(t)$  і вейвлет-функція  $\psi(t)$  показані на рис.3.

Відмітимо, що у разі біортогональних сплесків для прямого і зворотного перетворення треба використати різні фільтри.

Функціонал для розрахунку коефіцієнтів вейвлет-фільтрів для стохастичних маятників з урахуванням лінійного зв'язку між ними має вид:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_{k=1}^N \left[ a_{1, -\frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, -\frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}} - y_{1,k} \right]^2 + \\ & + \sum_{k=1}^N \left[ a_{2, -\frac{R}{2}} \times y_{2, k-\frac{R}{2}} + a_{2, -\frac{R}{2}+1} \times y_{2, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{2,0} \times y_{2,k} + a_{2,1} \times y_{2,k+1} + \dots + a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k+\frac{R}{2}} - y_{2,k} \right]^2 + \\ & + \lambda \sum_{k=1}^N \left[ (a_{1, -\frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, -\frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}})^H + \right. \\ & + \omega_1^2 (a_{1, -\frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, -\frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}}) - \\ & \left. - \alpha (a_{2, -\frac{R}{2}} \times y_{2, k-\frac{R}{2}} + a_{2, -\frac{R}{2}+1} \times y_{2, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{2,0} \times y_{2,k} + a_{2,1} \times y_{2,k+1} + \dots + a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k+\frac{R}{2}}) \right]^2 = \min \end{aligned}$$

де  $a_{1i}, a_{2i}$ , – коефіцієнт низькочастотного вейвлет-фільтра (Low);  $\lambda$  – ваговий коефіцієнт, що характеризує жорсткість аналітичного зв'язку;  $y$  – вхідні відліки сигналу;  $\omega_1^2$  – частота коливань першого маятника;  $\alpha$  – ваговий коефіцієнт рівняння руху першого маятника (4).

Проведемо статистичне моделювання та побудуємо порівняльну таблицю фільтрації класичним та запропонованим методом (таб. 1). Можемо простежити, що перевага у точності нового методу в рази вища від класичного методу. Показники точності вимірювання польотних даних не погіршують, а навпаки покращуються.

Для знаходження оптимальних коефіцієнтів  $a_{1i}, a_{2i}$ ,  $(i = -\frac{R}{2}, -\frac{R}{2} + 1, \dots, \frac{R}{2})$  складемо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial a_{1, -\frac{R}{2}}} &= 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_{1, -\frac{R}{2}+1}} &= 0; \\ &\vdots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_{1, \frac{R}{2}}} &= 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_{2, -\frac{R}{2}}} &= 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_{2, -\frac{R}{2}+1}} &= 0; \\ &\vdots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_{2, \frac{R}{2}}} &= 0. \end{aligned} \right.$$

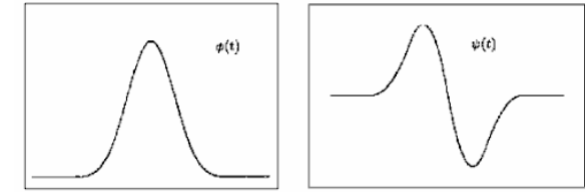


Рис. 3. Масштабуюча функція  $\varphi(t)$  – кубічний сплайн, вейвлет функція  $\psi(t)$  – квадратичний сплайн

Після чисельного розв'язання системи будуємо вейвлет-фільтрацію з урахуванням аналітичних зв'язків між детермінованими основами стохастичних маятників. Порівнюємо нашу фільтрацію з класичною вейвлет-фільтрацію.

Розглянемо більш детально вигляд фільтрації аналітично зв'язаних маятників на рис.4.

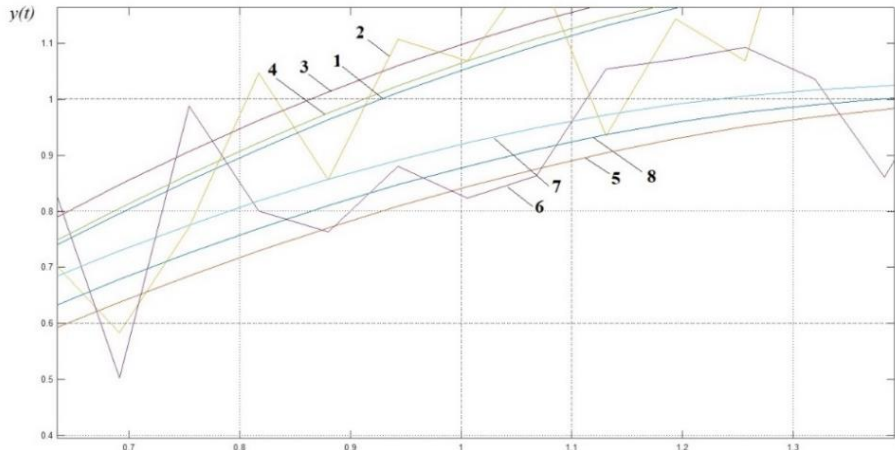


Рис. 4. Фрагмент графіку фільтрації аналітично зв'язаних маятників:

1 – детермінована основа коливання першого маятника; 2 – суміш корисного сигналу перешкоди, яка спостерігається на вході автоматизованої системи обробки даних; 3 – результат фільтрації класичним методом; 4 – результат фільтрації запропонованим методом. 5 – детермінована основа коливання другого маятника; 6 – суміш корисного сигналу перешкоди, яка спостерігається на вході автоматизованої системи обробки даних; 7 – результат фільтрації класичним методом; 8 – результат фільтрації запропонованим методом.

Проведемо статистичне моделювання та побудуємо порівняльну таблицю фільтрації класичним та запропонованим методом (таб.1). Можемо простежити, що

перевага у точності нового методу в рази вища від класичного методу. Показники точності вимірювання польотних даних не погіршують, а навпаки покращуються.

Таблиця 1.

Середньоквадратичне відхилення суміші корисного сигналу від детермінованої основи коливання першого маятника	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання першого маятника (класичний метод)	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання першого маятника (запропонований метод)	Перевага в точності фільтрації першого маятника	Середньоквадратичне відхилення суміші корисного сигналу від детермінованої основи коливання другого маятника	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання другого маятника (класичний метод)	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання другого маятника (запропонований метод)	Перевага в точності фільтрації другого маятника
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,024	0,019	+26%	0,1	0,024	0,016	+50%
0,15	0,036	0,028	+28%	0,15	0,036	0,023	+56%
0,2	0,047	0,037	+27%	0,2	0,047	0,030	+56%
0,25	0,059	0,046	+28%	0,25	0,059	0,037	+59%

Як свідчать дані, наведені в табл. 1, перевага в точності фільтрації першого маятника створеним методом складає 26-28 відсотків у порівнянні з класичним методом фільтрації. При цьому, точність

фільтрації другого маятника розробленим методом на 50-59 відсотків вище від точності класичного методу фільтрації.

Графічно відобразимо результати моделювання залежності

середньоквадратичного відхилення (СКВ) відфільтрованого сигналу відносно його детермінованої основи від середньоквадратичного відхилення вхідного шуму (в діапазоні від 0,1 до 0,25) для обох маятників (рис.5).

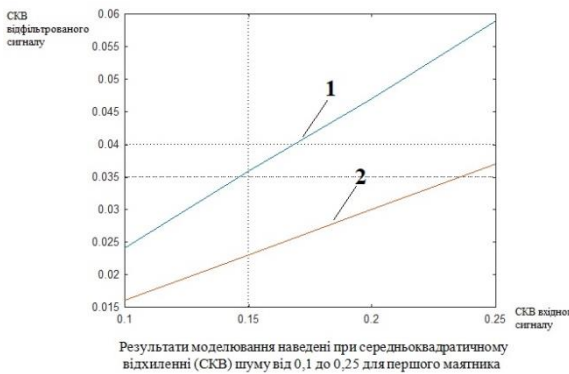
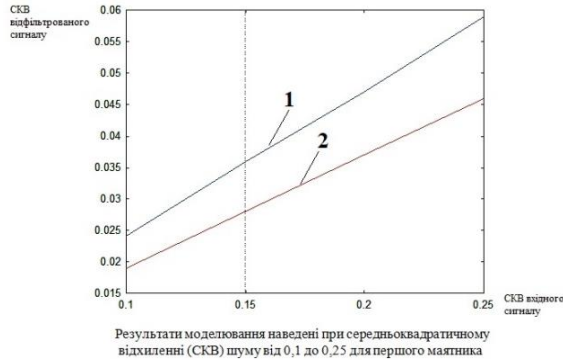


Рис. 5. Результати моделювання в графічному виді, де: 1 – СКВ відфільтрованого сигналу від детермінованої основи коливання маятника, отримана класичним методом фільтрації; 2 – СКВ відфільтрованого сигналу від детермінованої основи коливання маятника, отримана запропонованим методом фільтрації.

Аналіз графіків функцій на рис.5 показує, що запропоноване математичне та програмне забезпечення дозволяє суттєво виграти у зменшенні СКВ сигналу, що фільтрується. На першому графічному вікні відображено результати оцінки точності фільтрації даних першого маятника, на другому графічному вікні – другого маятника.

**Практичне застосування**  
**Захищені зони**

Однією з варіацій дизайну алгоритмів виявлення конфліктів є форма та

розмір "захищеної зони". Захищена зона фактично визначається пороговими значеннями, які використовуються в логіці виявлення конфліктів. Тобто математичні моделі тривимірних об'ємів, як правило, не підтримуються в реалізаціях режиму реального часу. Швидше, об'єми повітряного простору служать концептуально корисними концепціями для розуміння логіки виявлення конфліктів.

«Сплюснений сфероїд» є математично зручною формою для захищеної зони. Цей об'єм зазвичай отримують, розглядаючи деякий вертикальний поділ як еквівалентний якомусь горизонтальному поділу [1].

Наприклад, під час круїзного польоту вертикальне відхилення на 1000 футів може вважатися еквівалентом п'яти миль горизонтального поділу. Вертикальні одиниці просто масштабуються відповідно до еквівалентного горизонтального поділу.

Це математично зручно, оскільки для характеристики поділу між двома літаками можна розрахувати одне значення. Рисунок 6 ілюструє "сплюснений сфероїд".

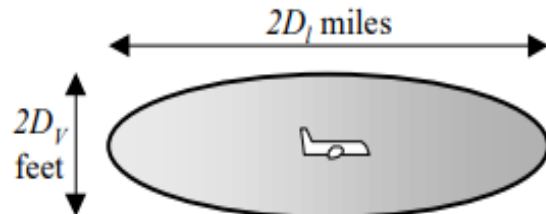


Рис. 6. Захищена сфероїдна зона

“Циліндрична” захищена зона – це інша поширена форма, яка використовується в алгоритмах виявлення конфліктів. Для цієї захищеної зони критерії поділу в обох осях перевіряються окремо. Рисунок 7 ілюструє концептуальний обсяг, який є результатом цієї схеми. П'ять миль горизонтального поділу та 1000 футів вертикального розділення все ще є відповідними прикладами параметрів розділення. Хоча сплетений сфероїд математично простіший, циліндрична захищена зона має ту перевагу, що узгоджується з існуючими

критеріями розділення, що використовуються сьогодні. Крім того, це, швидше за все, поділ повітряного простору, який більше відповідає сприйняттю пілотами.

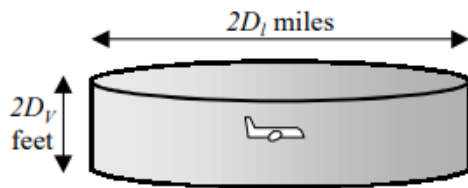


Рис. 7. Циліндрична захищена зона

Робоча група RTCA CD&R має за мету одночасне використання двох захищених зон для кожного літака – захищеної зони повітряного простору (Protected Airspace Zone (PAZ)) та зони ближнього повітряного зіткнення (Near Mid-air Collision (NMAC)). PAZ визначає бажані стандарти поділу повітряного простору. Наприклад, критерій п'яти миль на 1000 футів визначає бажану PAZ. Зона NMAC призначена для більш щільного закриття літака. Меншу захищену зону можна використовувати для формування сповіщень високого рівня.

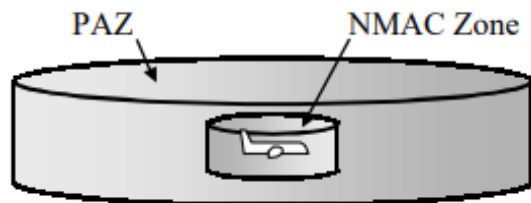


Рис. 8. Захищена зона (PAZ) та зона ближнього повітряного зіткнення (NMAC)

Завдяки розробленому математичному та програмному забезпеченню з'явилася можливість зменшити захисну просторову зону (рис.8) і цим самим скоротити мінімально допустимий інтервал між ПС та підвищити безпеку польоту.

Очікуване збільшення щільності повітряного руху, зміна динаміки відносного руху літаків і зменшення норм ешелонування збільшує ймовірність небезпечного зближення літаків. У цих умовах значно зростає роль систем виявлення і запобігання потенційно конфліктних ситуацій.

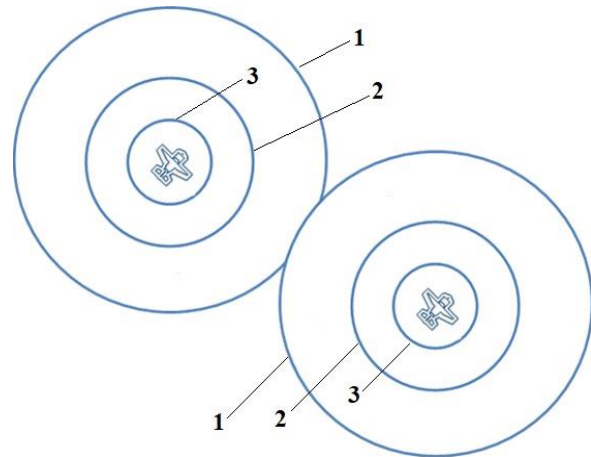


Рис. 9. Захисна просторова зона (PAZ – Protected Airspace Zone):

- 1 – для стохастичної постановки задачі;
- 2 – після класичної фільтрації;
- 3 – після запропонованої фільтрації.

#### Управління конфліктами

Важливу роль приділяють розробленню нових принципів керування повітряним рухом та організації повітряного простору, що покликані забезпечити високу пропускну здатність мережі маршрутів та можливість виконувати польоти за найбільш ефективними траєкторіями за гарантованого рівня безпеки.

Літак контролює поточну траєкторію польоту повітряного судна з точки зору можливих конфліктів. (На практиці автоматична функція ASAS буде контролювати весь відповідний рух і попереджати льотний екіпаж про будь-які конфлікти. Суть полягає в тому, що льотний екіпаж відповідає за відокремлення від усіх літальних апаратів, тому літак, а не наземні системи або контролер, повинен виявити конфлікти.) Суб'єкт літака коригує свою траєкторію руху за необхідності для вирішення будь-якого конфлікту, уникаючи втрат при розділенні з будь-яким іншим літаком в результаті зміни траєкторії.

#### Маневр без конфлікту

Суб'єкт літака коригує свою траєкторію за необхідності або за бажанням, визначивши, що нова траєкторія безконфліктна протягом якогось прийняттого часового горизонту.

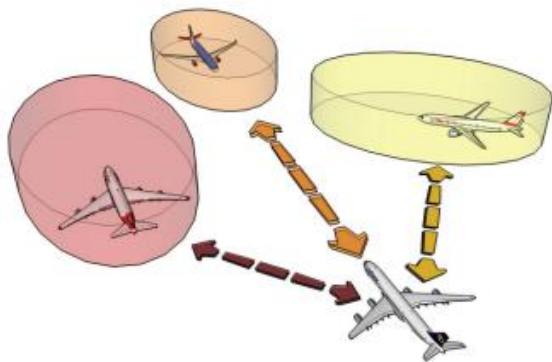


Рис. 10. Управління конфліктами

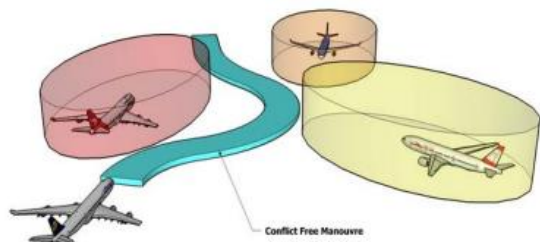


Рис. 11. Маневр без конфлікту

### Висновки

Зростання інтенсивності польотів неминуче веде до збільшення конфліктів між повітряними кораблями. Під конфліктом повітряних кораблів розуміється таке їх зближення у просторі та часі, при якому має місце порушення заданих мінімумів дистанції розділення (ешелонування). Мінімальна дистанція розділення ПС визначається їхньою захисною просторовою зоною з регламентованою геометрією.

Можливість застосування вже існуючих методів обробки результатів, а також характерні риси поводження вейвлет-перетворення в частотно-часовій області дозволяють істотно розширити й доповнити можливості подібних систем. Можна зробити висновок, що вейвлет-перетворення з урахуванням аналітичних зв'язків надає більш точну та інформативну картину результатів моделювання та експерименту. Дозволяє більш якісно очистити вхідні

дані руху літака від шумів і випадкових спотворень.

Завдяки запропонованому математичному та програмному забезпеченню з'явилася можливість зменшити захисну просторову зону і цим самим скоротити мінімально допустимий інтервал між ПС та підвищити безпеку польоту, а також оптимізувати структуру повітряного простору з метою покращення пропускної здатності і цим самим підвищує безпеку польотів.

### Література

1. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным явлениям. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
2. M. Eby, W. Kelly. Free Flight Separation Assurance Using Distributed Algorithms. – IEEE Aerospace Conference, Snowmass, CO, March 1999. – Vol. 2. – P. 429-441.
3. FAA Announces Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Architecture" (Press release). // FAA Office of Public Affairs. July 1, 2002. APA 27-02.
4. Чепиженко В.И., Павлова С.В., Писарчук А.А., Захарин Ф.М., Пономаренко С.А. Навигация и синергетическое управление сложными динамическими системами – К.: Национальный авиационный университет, 2018. – 167 с.
5. Загора С.Л. Аналіз методів розв'язання конфліктних ситуацій в умовах вільного польоту // Вісн. НАУ, 2005. – №1. – С. 42-47.
6. Харченко В.П. Інтеграція засобів діагностики, прогнозування і управління рівнем безпеки польотів / В.П. Харченко, А.Е. Луппо, О.Н. Алексеев // Вісн. НАУ, 2007. – №2 (32). – С. 43-49.
7. Харченко В.П. Функціональна «віртуальність» – концепція майбутніх CNS/ATM систем / В.П. Харченко, В.В. Павлов, С.В. Павлова // Вісник КМУЦА, 2004. – №2. – С. 19-23.



**Волкогон В.О., Чепіженко В.І., Шутко В.М., Корнієнко С.П.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИСТЕМИ ДВОХ ЛІНІЙНО ЗВ'ЯЗАНИХ ОБ'ЄКТІВ У СТОХАСТИЧНІ ПОСТАНОВЦІ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ АВТО-МАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ**

*Розроблено математичне та програмне забезпечення для підвищення ефективності автоматизованої системи управління повітряним рухом та розв'язання задачі забезпечення безпеки польотів. Це дозволяє з єдиних системних позицій синтезувати безконфліктне траєкторне управління повітряними суднами засобами автоматизованої системи обробки інформації.*

*Сформульовано задачу оцінки параметрів руху повітряних суден у стохастичній постановці.*

*Для розв'язання задачі у новій постановці вперше використано вейвлет-фільтрацію даних з урахуванням аналітичних зв'язків між детермінованими основами руху об'єктів, що дозволяє підвищити точність оцінки характеристик руху об'єктів в повітряному просторі. Це дає можливість скоротити мінімальний допустимий інтервал між повітряними суднами і оптимізувати структуру повітряного простору з метою покращення пропускну здатності та забезпечення безпеки польотів.*

*Збільшується точність і надійність систем.*

**Ключові слова:** програмне забезпечення, автоматизована система обробки польотних даних, вейвлет-фільтрація, математичний маятник, аналітичний зв'язок.

**Volkogon V.O., Chepizhenko V.I., Shutko V.M., Kornienko S.P.**

## **MODELING OF MOVEMENT OF A SYSTEM OF TWO LINEARLY CONNECTED OBJECTS IN STOCHASTIC STATIONS IN THE SOFTWARE OF AN AUTOMATED AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM**

*Mathematical and software have been developed to increase the efficiency of the automated air traffic control system and to solve the problem of flight safety. This allows from a single system position to synthesize conflict-free trajectory control of aircraft by means of an automated information processing system.*

*The problem of estimating the parameters of aircraft movement in stochastic formulation is formulated.*

*To solve the problem in the new production, wavelet filtering of data is used for the first time, taking into account the analytical relationships between the determined bases of object motion, which allows to increase the accuracy of estimating the motion characteristics of objects in airspace. This makes it possible to reduce the minimum allowable interval between aircraft and to optimize the structure of the airspace in order to improve capacity and ensure flight safety.*

*The accuracy and reliability of systems increases.*

**Keywords:** software, automated flight data processing system, wavelet filtering, mathematical pendulum, analytical communication.