

# ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ЗАСОБІВ ППО НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОКРИТТЯ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

У роботі представлено програмну систему оптимізації розміщення та призначення засобів протиповітряної оборони (ППО) для захисту критично важливих об'єктів від повітряних загроз. Оптимізаційна задача формалізована у вигляді бінарної цілочислової задачі, де цільова функція максимізує сумарну ефективність покриття об'єктів з урахуванням їх пріоритетів, дальності ураження, ймовірності знищення цілі та бюджетних обмежень.

Ефективність кожного засобу ППО визначається як функція відстані до об'єкта та базової ймовірності ураження. Для практичної реалізації розроблено програмний комплекс на мові Python, який використовує конфігураційні JSON-файли, алгоритми оптимізації та інтерактивну HTML-візуалізацію результатів. Додатково реалізовано модуль аналізу некоректних сценаріїв, що дозволяє виявляти причини відсутності допустимого рішення (Infeasible) та формувати рекомендації щодо корекції вхідних даних.

Результати експериментального тестування підтверджують ефективність запропонованого підходу для підтримки прийняття рішень щодо бойового застосування систем ППО.

Ключові слова: оптимізація, ППО, цілочислове програмування, ефективність покриття, моделювання загроз, Python.

## Abstract

The paper presents a software system for optimizing the placement and assignment of air defense systems (ADS) to protect critical objects from aerial threats. The optimization problem is formulated as a binary integer programming model, where the objective function maximizes the total coverage effectiveness considering object priorities, engagement range, kill probability, and budget constraints.

The effectiveness of each air defense system is calculated as a function of the distance to the protected object and the base interception probability. A practical software implementation is developed in Python using JSON-based configuration files, optimization algorithms, and interactive HTML visualization of results. An additional diagnostic module is implemented to analyze infeasible scenarios and provide recommendations for correcting input parameters.

Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for decision support in air defense resource allocation.

Keywords: optimization, air defense, integer programming, coverage effectiveness, threat modeling, Python.

## Вступ

В умовах сучасних воєнних конфліктів ефективне використання засобів протиповітряної оборони є критично важливим для захисту стратегічних та інфраструктурних об'єктів. Обмежена кількість систем ППО, різні тактико-технічні характеристики та наявні ресурсні обмеження формують складну задачу прийняття рішень щодо їх розміщення та призначення.

Кожен засіб ППО характеризується максимальною дальністю ураження, імовірністю знищення цілі та вартістю експлуатації, тоді як об'єкти захисту мають різний пріоритет і значущість. Це зумовлює необхідність використання методів математичної оптимізації для максимізації загальної ефективності системи ППО.

У даній роботі розглядається задача оптимального призначення засобів ППО до об'єктів захисту, яка формулюється як задача бінарної цілочислової оптимізації з урахуванням географічних, економічних та тактичних обмежень.

## Результати дослідження

Оптимізаційна модель розподілу засобів ППО формалізується у вигляді бінарної цілочислової задачі. Нехай  $x_{ij} \in \{0,1\}$  — бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо засіб ППО  $i$  призначено для захисту об'єкта  $j$ .

Цільова функція

Метою оптимізації є максимізація сумарної ефективності покриття об'єктів:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot \text{Effectiveness}_{ij} \cdot \text{Priority}_j$$

де  $\text{Effectiveness}_{ij}$  — ефективність застосування засобу ППО  $i$  для захисту об'єкта  $j$ , а  $\text{Priority}_j$  — пріоритет об'єкта.

Розрахунок ефективності

Ефективність визначається як функція відстані між засобом ППО та об'єктом:

$$\text{Effectiveness}_{ij} = \begin{cases} \left(1 - 0.3 \cdot \frac{\text{Distance}_{ij}}{\text{Range}_i}\right) \cdot \text{Kill\_Prob}_i, & \text{Distance}_{ij} \leq \text{Range}_i \\ 0, & \text{Distance}_{ij} > \text{Range}_i \end{cases}$$

Обмеження моделі

- Один засіб ППО — один об'єкт:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1$$

- Бюджетне обмеження:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot Cost_i \leq Max\_Budget$$

- Мінімальне покриття об'єктів:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot Effectiveness_{ij} \geq Min\_Coverage$$

Програмна реалізація

Для реалізації моделі розроблено програмний комплекс на Python. Конфігурація сценаріїв здійснюється через JSON-файли, що містять опис об'єктів, засобів ППО та параметрів оптимізації.

Окремий модуль аналізу сценаріїв дозволяє визначати причини статусу **Infeasible**, зокрема:

- надмірні вимоги до покриття,
- недостатній бюджет,
- недосяжність об'єктів для наявних засобів ППО.

Результати оптимізації відображаються у вигляді інтерактивної карти в HTML-форматі.

## Висновки

Розроблена програмна система дозволяє ефективно вирішувати задачу оптимального призначення засобів протиповітряної оборони з урахуванням просторових, економічних та тактичних факторів. Запропонований підхід забезпечує формалізовану підтримку прийняття рішень та дозволяє оперативно аналізувати різні сценарії застосування ППО.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на врахування динамічного руху цілей, можливості багаторазових пусків та інтеграцію з реальними системами розвідки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wolsey L.A. Integer Programming. 2nd ed. Wiley, 2020. 608 p. (ISBN: 978-1119755770)
2. Mitchell S. An Introduction to PuLP: A Python LP/MIP Modeler. 2023. URL: <https://coin-or.github.io/pulp/>
3. Kress M., Szechtman R., Atkinson M.P. Optimal Defense of a Distributed Asset. Military Operations Research. 2018. Vol. 23(3). P. 5-18.
4. Karasakal O. Air Defense Missile-Target Allocation Models for Naval Air Defense. Naval Research Logistics. 2008. Vol. 55(8). P. 761-769.
5. Python Software Foundation. Python 3.11 Documentation. 2023. URL: <https://docs.python.org/3/>

**Франков Максим Сергійович** – студент групи ІСТ-236, факультет автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [maksimfrankov36@gmail.com](mailto:maksimfrankov36@gmail.com)

Науковий керівник: **Горячев Георгій Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця,

**Frankov Maksym S.** – student of the Faculty for Intelligent information technologies and automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [maksimfrankov36@gmail.com](mailto:maksimfrankov36@gmail.com)

Supervisor: **Goriachev Georhii V.** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia