

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ІТ-ТЕХНОЛОГІЯХ, ГАЛУЗЯХ ЕЛЕКТРОНІКИ, ІНЖЕНЕРІЇ, НАНОТЕХНОЛОГІЯХ ТА ТРАНСПОРТНІЙ СФЕРІ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ | ВИДАННЯ 2

2021-2022



EUROPEAN
SCIENTIFIC
PLATFORM

EUROPEAN
SCIENTIFIC
PLATFORM

КОЛЕКТИВНА НАУКОВА МОНОГРАФІЯ

Сучасний стан проведення наукових досліджень у ІТ-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері

Видання 2

2021-2022 | Вінниця

ГО «Європейська наукова платформа»



Головний редактор: Голденблат М.А.

Науковий редактор: Валеренко Г.І.

Технічна редактура та верстка: Казьміна Н.П. & Бондаренко І.В.

Автори колективної монографії:

Адаменко А.А. – канд. техн. наук ⁵

Герасименко В.В. – канд. військових наук ³

Гурін О. – канд. військ. наук ⁵

Ільге І.Г. – канд. техн. наук ⁴

Кунда Н.Т. – канд. техн. наук ²

Лукьянчук В. – д-р. техн. наук ⁵

Николаев И. – канд. техн. наук ⁵

Олексенко О.О. ⁵

Осієвський С.В. – канд. техн. наук ⁵

Старцев В. ⁵

Третяк В.Ф. – канд. техн. наук ⁵

Філь Н.Ю. – канд. техн. наук ⁴

Хвалін Д.І. – канд. техн. наук ¹

Наукові та навчальні заклади:

¹ Інститут проблем безпеки атомних електростанцій

² Національний транспортний університет

³ Національний університет оборони України імені Івана Черняховського

⁴ Харківський національний автомобільно-дорожній університет

⁵ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

С 89

Сучасний стан проведення наукових досліджень у ІТ-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері: колективна монографія (2-е вид.). / під ред. Валеренко Г.І. – Вінниця: Європейська наукова платформа, 2022. 134 с.

ISBN 978-617-7991-47-1

DOI 10.36074/csriteenat.ed-2



УДК 62+004

ЗМІСТ

Розділ I.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВАРІАНТІВ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ МАКС-МІННОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ 4

© *Олексенко О.О., Герасименко В.В.*

Розділ II.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ НЕЧІТКИХ КОГНІТИВНИХ МОДЕЛЕЙ 13

© *Адаменко А.А.*

Розділ III.

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ЗНАННЯ-ОРІЄТОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ 23

© *Осієвський С.В., Третяк В.Ф.*

Розділ IV.

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПЕРЕВІЗНИКА 44

© *Кунда Н.*

Розділ V.

АНАЛІЗ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАГОНУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ РАДЯНСЬКИХ ВІЙСЬК ТА МИРОТВОРЧОГО КОНТИНГЕНТУ БАГАТОНАЦІОНАЛЬНИХ СИЛ ЗА ДОСВІДОМ БОЙОВИХ ДІЙ У АФГАНІСТАНІ 57

© *Гурін О.М., Старцев В.В.*

Розділ VI.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ОБЛИКА ЗЕНИТНОЙ РАКЕТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА 72

© *Лукьянчук В.В., Николаев И.М.*

Розділ VII.

МЕТОД ВИБОРУ СТАЦІОНАРНОГО RFID-ЗЧИТУВАЧІВ БАГАТЬМА КРИТЕРІЯМИ 93

© *Філь Н.Ю., Льге І.Г.*

Розділ VIII.

МУЛЬТИФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ПОТУЖНОГО ГЕНЕРАТОРА 102

© *Хвалін Д.І.*

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВАРІАНТІВ ПОЛЬОТУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ МАКС-МІННОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

ОЛЕКСЕНКО Олександр Олександрович 

ад'юнкт науково-організаційного відділу
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

ГЕРАСИМЕНКО Володимир Вікторович 

кандидат військових наук, докторант кафедри авіації
Національний університет оборони України імені Івана Черняховського

УКРАЇНА

Анотація: Запропоновано використання мурашиного алгоритму для визначення маршрутів польоту безпілотного літального апарата (БПЛА) до об'єктів удару (ОУ). Проведено дослідження щодо застосування Макс-мінного мурашиного алгоритму для одночасного визначення маршрутів польоту декількох груп БПЛА з різних аеродромів до різних об'єктів удару та смуги прориву системи протиповітряної оборони (ППО) з врахуванням впливу наряду БПЛА, необхідних для знищення об'єкту удару з заданою ймовірністю. Також досліджено працездатність алгоритму в умовах нестационарного середовища. Результати досліджень позитивні і вказують на можливість вирішення поставлених завдань з використанням мурашиного алгоритму. Подальші дослідження також можуть бути направлені на реалізацію тримірної пошуку маршрутів польоту БПЛА в географічних координатах з урахуванням розмірів поворотних точок маршруту, у яких вони здійснюють маневр, та реальних розмірів і конфігурації заборонених зон, а також рельєфу місцевості.

ВСТУП.

Практика сучасних бойових дій у Сирії, Лівії, на сході України, між Азербайджаном та Вірменією тощо свідчить про широке використання стелс технологій [1–3]. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стало однією з основних складових бойових дій між Вірменією та Азербайджаном [1]. Так, деякі західні коментатори назвали цю діяльність “Південно-Кавказькою війною безпілотних літальних апаратів” [4]. Головною відмінністю при нинішньому загостренні конфлікту в Карабасі стало використання ударних безпілотних авіаційних комплексів з

ракетно-бомбовим озброєнням. Карабахська війна демонструє, що сучасна бронетехніка є цілком беззахисною перед атаками БПЛА з верхньої напівсфери, і її застосування без забезпечення відповідного захисту ризиковане. Адже вартість дрона-камікадзе (до \$100 тис.) набагато менша, порівняно з танком, реактивною системою залпового вогню або зенітним ракетним комплексом.

Незважаючи на значний інтерес до розвитку теорії та практики створення та використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), питання планування їх використання з використанням сучасних інформаційних технологій залишається до кінця не дослідженим..

ОСНОВНА ЧАСТИНА.

Позитивні результати, отримані в попередніх дослідженнях [5], спонукали на проведення подальших досліджень щодо застосування мурашиного алгоритму (AS) для розробки ряду методів визначення варіантів польоту БПЛА.

Ймовірність переходу k -го агента в i -у ПТМ з врахуванням доступності i -ї ділянки маршруту L_i та концентрації феромонів на цій ділянці F_i в момент часу t в базовому AS наступним чином:

$$P_i^k(t) = \frac{F_i(t)^\alpha \cdot L_i^\beta}{\sum_{j=1}^J F_j(t)^\alpha \cdot L_j^\beta}, \quad (1)$$

де $\alpha \geq 0$ і $\beta \geq 0$ – два регульовані параметри, що задають вагу феромона і доступності ділянки, відповідно.

Значення L_i може бути розраховане в залежності від наявності зон небезпеки (виявлення та ураження засобами ППО та інших небезпек на ділянці польоту).

$$L_i = \begin{cases} 1/D_i, & \text{"якщо } i\text{-й маршрут пролягає} \\ & \text{за межами "зон небезпеки"} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}. \quad (2)$$

Базовий AS вирішує задачі оптимізації з великою розмірністю з точністю на рівні інших евристичних методів, таких, як генетичний алгоритм, чи імітація відпаду. Недостатня ефективність базового мурашиного алгоритму пов'язана з:

– можливістю втрати найкращого знайденого рішення із-за

ймовірнісного правила вибору маршруту;

– низьке сходження поблизу оптимуму, через приблизно рівний вклад як кращих, так і гірших рішень в оновленні феромонів;

– зберігання в пам'яті колонії заздалегідь неперспективних варіантів, що для задач великої розмірності сильно розширює область пошуку.

Тому для покращення результатів роботи використовуються покращені мурашині алгоритми (ASE – базовий мурашиний алгоритм з елітними мурашками, ASR – ранговий мурашиний алгоритм, ACS – алгоритм мурашиної колонії, MMAS – макс-мінний мурашиний алгоритм). В даній роботі пропонується застосовувати Макс-мінний мурашиний алгоритм (MAX-MIN Ant System), який у порівнянні з іншими різновидами AS знаходить кращі рішення за найкоротший час та має найкращу показник по критерію середньої відносної точності [6, 7, 8, 9]. Його характерними особливостями є те, що:

– на кожній ітерації феромони добавляються тільки на ребра (поворотної точки маршруту (ПТМ)) найкращого маршруту по правилу (3);

– кількість феромонів на маршруті між поворотними точками обмежено в діапазоні $[F_{min}, F_{max}]$;

– на початку роботи алгоритму кількість феромону на кожному ребрі графа приймається рівним F_{max} .

Отже, тільки найкращі агенти підвищують рівень феромону на своїх маршрутах і рівень феромону на маршрутах обмежений. Оновлення рівня феромону на маршрутах здійснюється за правилом:

$$F_i(t+1) = [(1 - \rho)F_i(t) + \Delta F_i^{best}] \begin{matrix} F_{max} \\ F_{min} \end{matrix}, \quad (3)$$

де F_{max} та F_{min} – верхня та нижня межі рівня феромону;

а ΔF_i^{best} визначається як:

$$\Delta F_i^{best} = \begin{cases} 1/L_{best}, & \text{якщо } i - \text{кращий маршрут в ітерації} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

L_{best} – довжина маршруту кращого агента. Це може бути або найкращий маршрут, знайдений в поточній ітерації, L_{ib} , або найкраще рішення, знайдене з початку роботи алгоритму, L_{bs} .

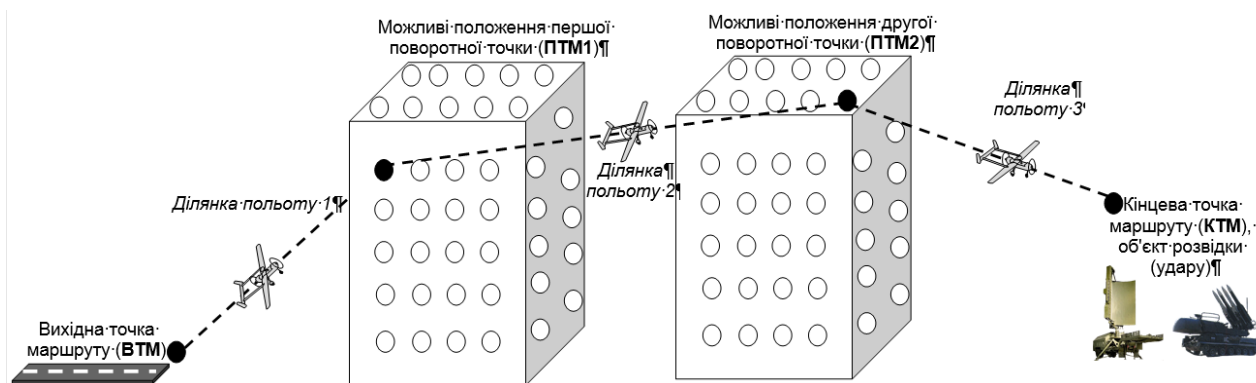


Рис 1. Приклад представлення маршруту польоту БПЛА

При проведенні дослідження будемо вважати:

система ППО долається всіма БПЛА одночасно (один БПЛА працює по одному об'єкту) на ділянці польоту 2 (відстань від ПТМ1 до ПТМ2). Це означає, що поворотні точки маршруту ПТМ1 та ПТМ2 для всієї групи БПЛА однакові;

одним БПЛА чи група БПЛА закріплюється за одним ОУ;

може існувати обмеження на кількість БПЛА, що базуються на одному аеродромі; при відсутності такого обмеження, очевидно, оптимальним буде зліт всіх БПЛА з найближчого до входу в смугу прориву системи ППО аеродрому базування;

критерієм оптимальності є досягнення мінімуму сумарної дальності від аеродромів базування БПЛА до відповідних ОУ при умові огинання “заборонених зон”, що зустрічаються на маршрутах. При цьому доступність ділянок маршруту розраховувалась за (2).

Для розрахунку використовувались вихідні дані контрольного прикладу, наведеного в [5]. При цьому кількість ПТМ1 та ПТМ2 збільшена до 60, кількість кінцевих точок маршруту (КТМ) дорівнює 5, кількість вихідних точок маршруту (ВТМ) (аеродромів базування БПЛА) складає 3. “Заборонені зони” позначені на рис.2 колами. Обмежень на кількість БПЛА, що базуються на одному аеродромі, немає. Розташування ВТМ, КТМ, ПТМ1, ПТМ2, “заборонених зон” показане на рис.2.

На рис.2 наведені результати розрахунку маршрутів польоту БПЛА до ОУ та смуги прориву системи ППО для трьох реалізацій алгоритму MMAS (для наочності отримані в трьох реалізаціях маршрути накладені на одному рисунку). Видно, що у всіх трьох реалізаціях кінцеві ділянки маршруту (ділянки виходу до ОУ) співпадають. Перша і друга ділянки

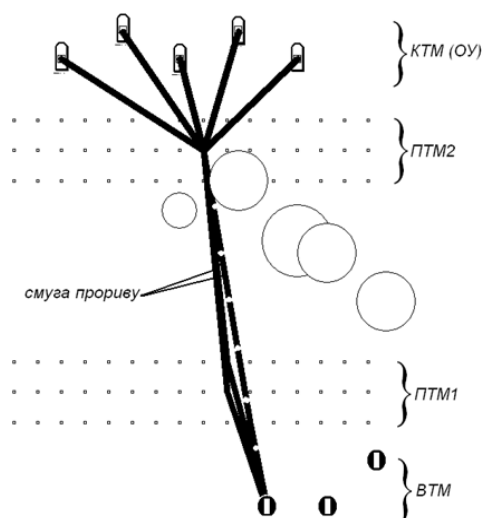


Рис. 2. Результати застосування ММАС для визначення смуги прориву системи ППО

маршруту в двох реалізаціях несуттєво відрізняються від третьої, в ході якої знайдено оптимальну за обраним критерієм сукупність маршрутів (показані пунктиром). Зауважимо також, що у всіх реалізаціях для всіх маршрутів алгоритм, природно, обрав як ВТМ найближчий аеродром базування БПЛА, оскільки обмеження на кількість БПЛА, що базуються на кожному аеродромі, відсутні.

На рис.3 показана робота алгоритму ММАС при збільшеній до 15 кількості “заборонених зон”. Алгоритм знову швидко знайшов оптимальне рішення.

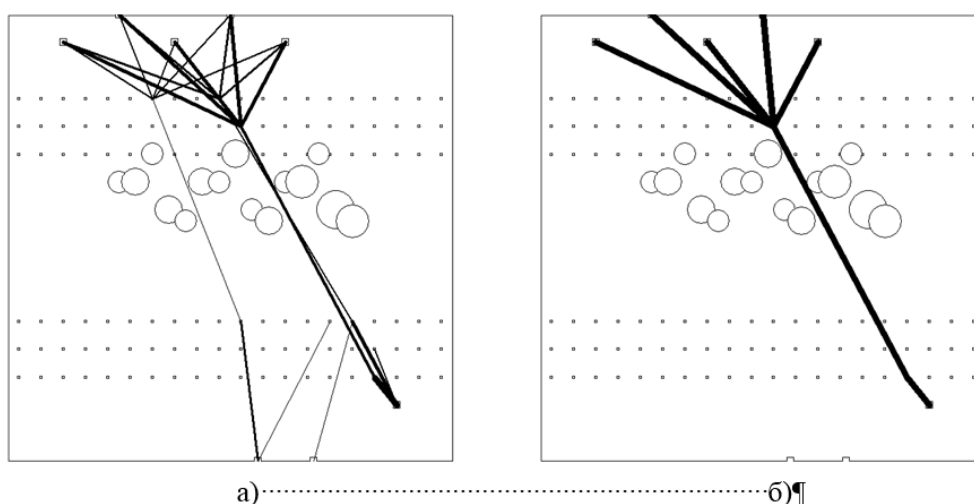


Рис. 3. Результати застосування ММАС для визначення смуги прориву системи протиповітряної оборони, при наявності п'ятнадцяти “заборонених зон”
(а – після 30; б – після 200 ітерацій)

В наступному експерименті досліджується робота алгоритму ММАС при змінах в місцеположенні “заборонених зон” (рис.4). Працездатність при нестационарному середовищі є однією з переваг мурашиних алгоритмів [6 – 9], що сприяє використанню цих алгоритмів при дослідженні процесів, що протікають у ході ведення бойових дій.

На рис. 4 продемонстрований процес пошуку рішення, в якому після 60-ї ітерації алгоритму змінені дві з “заборонених зон” (на рисунку відповідні кола зафарбовані). Алгоритм почав будувати нове рішення: після 80 ітерацій це рішення ще не оптимальне, оскільки на результат впливає високий рівень феромонів на третій ділянках маршрутів (ділянках виходу на об’єкт удару), отриманий на перших 60 ітераціях. Проте вже після 140 ітерацій з’являється оптимальне рішення, яке починає домінувати після 300 ітерацій алгоритму. На інших, неоптимальних маршрутах рівень феромону поступово зменшується за рахунок випаровування.

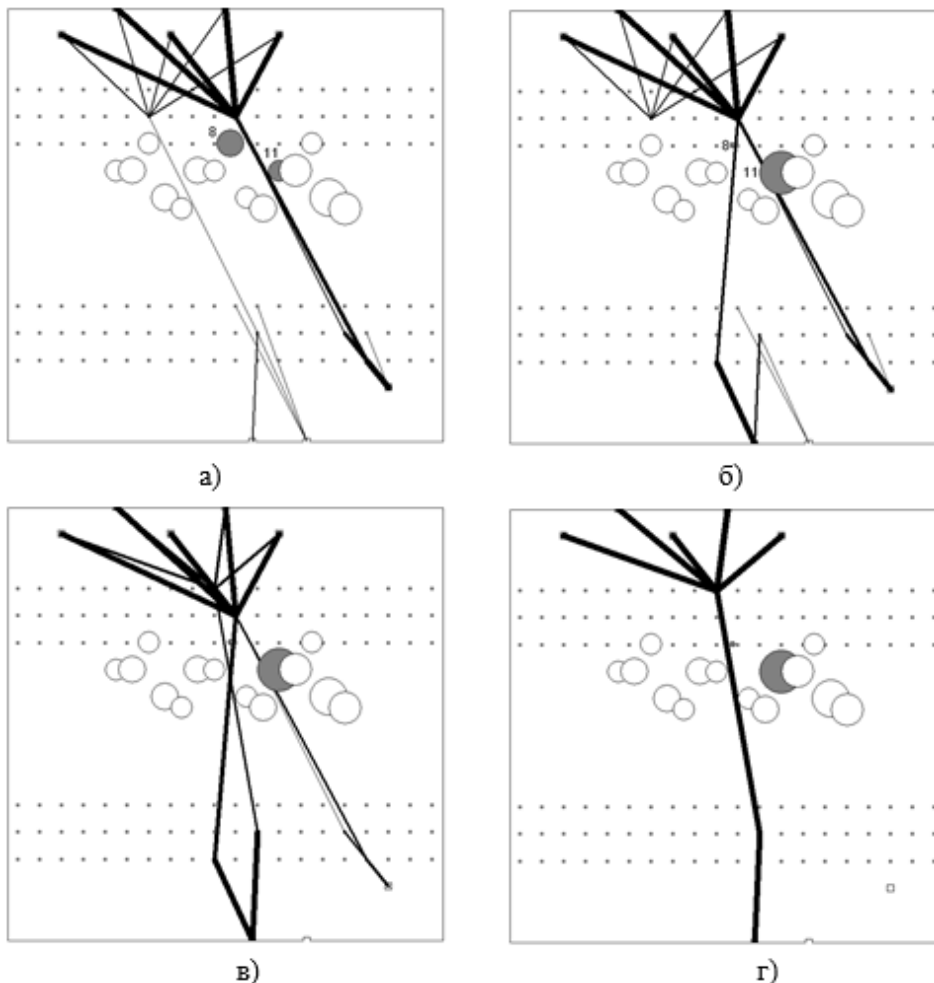


Рис. 4. Результати застосування ММАС в нестационарному середовищі
(а – після 40; б – після 80; в – після 140; г – після 300 ітерацій)

В результатах визначення смуги прориву системи ППО та маршрутів польоту БПЛА до ОУ з використанням ММАС не врахований вплив важливості об'єктів удару та кількості БПЛА (наряду), необхідних для знищення об'єкта удару з заданою ймовірністю або ступенем ураження БПЛА.

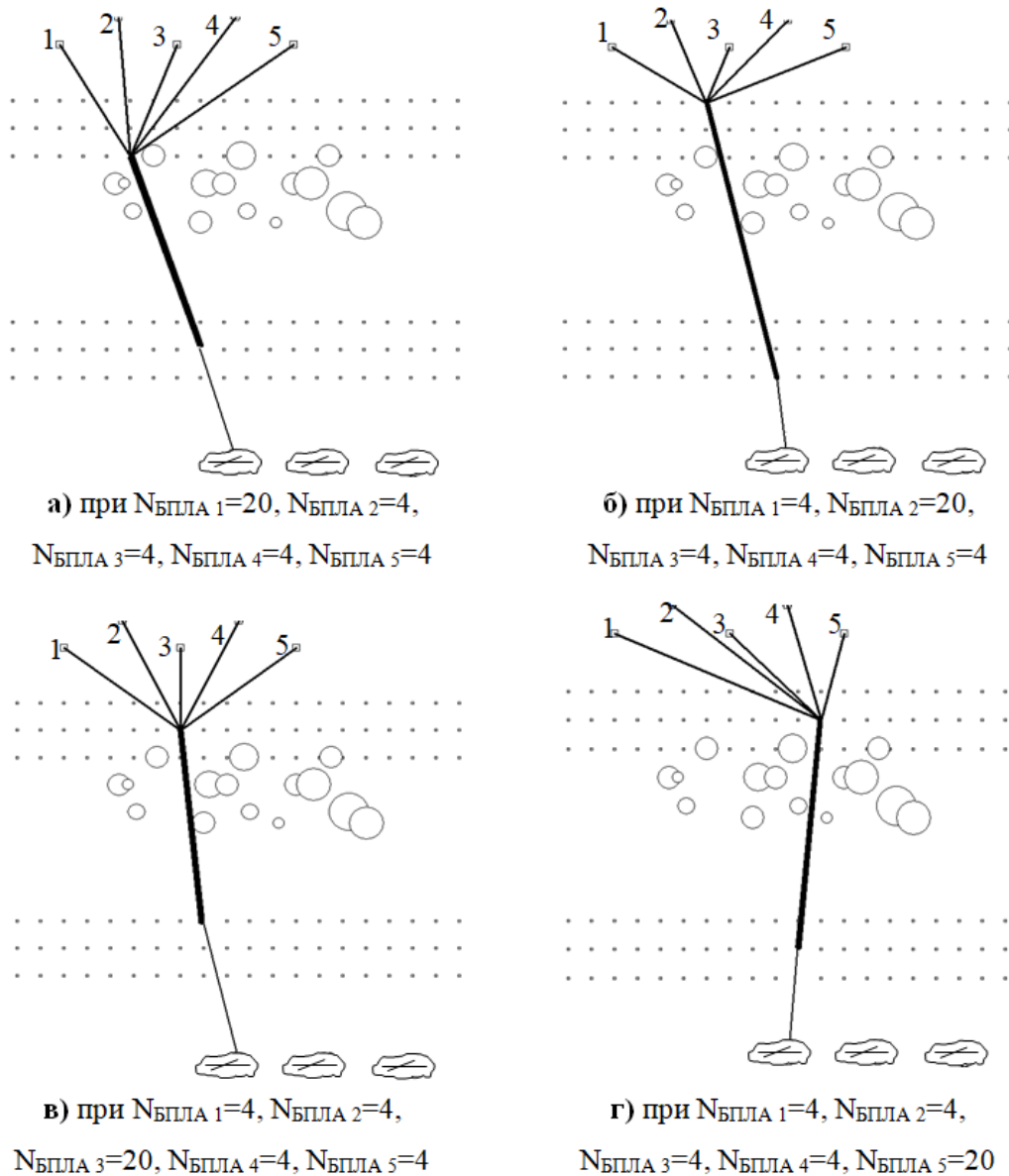


Рис. 5. Результати роботи ММАС з урахуванням впливу наряду БПЛА

Змінимо порядок обчислення доступності ділянки маршруту L_i . На відміну від (2) у наступній формулі для розрахунку затрат на подолання ділянки маршруту польоту до k -го ОУ (КТМ) враховується не тільки довжина ділянки D_i , але і наряд БПЛА (необхідна кількість БПЛА для знищення (придушення) ОУ), призначений на k -й ОУ $N_{\text{БПЛА } k}$.

$$L_i = \frac{1}{D_i \cdot N_{\text{БПЛА},k}}. \quad (5)$$

Прирощення рівня феромону ΔF_i^{best} будемо визначати як:

$$\Delta F_i^{\text{best}} = \begin{cases} 1/(D_{\text{best}} \cdot N_{\text{ЗПН},k}), & \text{якщо } i - \text{й найкоротший маршрут в ітерації} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad (6)$$

На рис.5 наведені результати розрахунків для контрольного прикладу, наведеного в [5], але при цьому доступності ділянок маршруту та природження рівня феромону обчислювались за (5) та (6).

В усіх випадках алгоритм визначив маршрути польоту БПЛА таким чином, щоб забезпечувались найменша довжина маршруту від ВТМ до тих ОУ, для яких призначені найбільші наряди БПЛА.

Достовірність отриманих результатів перевірялась їх порівнянням з результатами, отриманими методом повного перебору.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

В роботі наведені результати досліджень щодо застосування ММАС для одночасного визначення маршрутів польоту декількох груп БПЛА від різних аеродромів до різних ОУ та смуги прориву системи ППО з врахуванням впливу наряду БПЛА, необхідного для знищення ОУ з заданою ймовірністю. В межах області простору, в якій розташовані “заборонені зони”, маршрути різних БПЛА співпадали. Також проведені дослідження щодо працездатності алгоритму в умовах нестационарного середовища. Для цього після декількох кроків ітераційного процесу, коли агенти поступово підвищували рівень феромону на декількох субоптимальних маршрутах, змінювались розміри і місцеположення “заборонених зон”. Алгоритм ММАС швидко адаптувався до змін та будував нове рішення, оптимальне в нових умовах.

Подальші дослідження також можуть бути направлені на реалізацію тримірного пошуку маршрутів польоту БПЛА в географічних координатах з урахуванням розмірів поворотних точок маршруту, у яких БПЛА здійснюють маневр, та реальних розмірів і конфігурації “заборонених зон”, а також рельєфу місцевості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Armenia Azerbaijan: Reports of fresh shelling dent ceasefire hopes. (2020). Вилучено з <https://www.bbc.com/news/world-europe-54488386>.
- [2] Civil War in Syria. (2020). Вилучено з <https://www.cfr.org/global-conflict-tracker/conflict/civil-war-syria>.
- [3] Banasik, M. (2020) Armed Forces As The Russian Federation’s Strategic Tool. *Journal on Baltic Security*, (5 (2)), 29–40.
- [4] Eckel, M. (2020). Drone Wars: In Nagorno-Karabakh, The Future Of Warfare Is Now. Вилучено з <https://www.rferl.org/a/drone-wars-in-nagorno-karabakh-the-future-of-warfare-is-now/30885007.html>.
- [5] Олексенко О. О., Ярошенко Я. В. (2021). Розробка методу оптимального маршруту польоту безпілотного літального апарату на основі мурашиного алгоритму. *Сучасний стан проведення наукових досліджень у IT-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері*, (1), 147–158. Вилучено з <https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-1.10>.
- [6] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (Part B, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, 1996.
- [7] Stutzle, T. and Hoos, H. (2000). MAX–MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*, (vol. 16, no. 8). 889-914
- [8] Штовба, С. Д. (2003). Муравьиные алгоритмы. *Exponenta Pro. Математика в приложениях*, (4). 70-75.
- [9] Caro, G. D., Dorigo, M. (1997). Anet: a Mobile Agents Approach to Adaptive Routing. *Technical Report IRIDA 97-12. IRIDA*. Brussels, Belgium: niversite Libre de Brusseles.

УДК 004.942

Опубліковано 16 червня 2021 року

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ НЕЧІТКИХ КОГНІТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

АДАМЕНКО Анатолій Анатолійович 

кандидат технічних наук, с.н.с., провідний науковий співробітник
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

УКРАЇНА

Анотація: *Запропоновано підхід щодо удосконалення методів параметризації нечітких когнітивних моделей з метою підвищення їх адекватності. Підхід базується на перетворенні причинно-наслідної когнітивної карти в мережу логічних (з використання булевої алгебри) зв'язків між концептами, формалізації станів концептів та логічних зв'язків між ними методами логіки антонімів, введені єдиних шкал для оцінки станів концептів і формалізації характеру зв'язків між ними, що в комплексі забезпечують підвищення адекватності моделі.*

ВСТУП.

Одним із підходів дослідження слабко структурованих систем та ситуацій (далі – систем) є їх статичний та динамічний аналіз за допомогою їх когнітивних моделей [1].

В основу когнітивної моделі покладено поняття когнітивної карти, що формально являє собою орієнтований зважений граф, в якому вершини відповідають базисним факторам (далі - концептам), а дуги – взаємовідношенням між ними. Когнітивна модель конкретної динамічної системи чи ситуації отримується в результаті параметризації когнітивної карти, коли вершинам та дугам графу ставляться у відповідність змінні, за допомогою яких формалізують стани концептів, характер зв'язків між ними, а також задаються механізми перетворення впливів концептів один на одного.

Аналіз результатів розробки та використання когнітивних моделей в різних предметних областях свідчить про існування проблеми їх адекватності, що залежить, зокрема, від способу параметризації когнітивних карт [1].

Найбільшу практичну цінність при моделюванні слабко структурованих систем та ситуацій здобули запропоновані Б. Коско

нечіткі когнітивні моделі (НКМ) [2] та їх різновиди (наприклад, [1], [3], [4]), де параметричні характеристики вершин та дуг формалізуються з використанням методів теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

Віддаючи належне методам параметризації НКМ, слід зауважити, що мають місце парадоксальні результати їх використання як наслідок наявності слабких місць в самій теорії нечітких множин та нечіткої логіки, а саме [5], [6]:

- вид та параметри функцій приналежності нечітких множин, що описують вхідні та вихідні змінні системи, обираються суб'єктивно, тому можуть викривлювати реальну дійсність;
- відсутність єдиного підходу щодо правил проведення та фізичного тлумачення операцій НЛ;
- чутливість операторів НЛ до "сильного" аргументу;
- "небулевість" операторів НЛ, тобто існування таких законів класичної двозначної логіки, яким вони не відповідають;
- припущення щодо взаємної незалежності аргументів в рамках однієї формули (правила);
- складність формалізації негативних та різнознакових зв'язків;
- складність апіорного формування повного набору сумісних (неконфліктних) нечітких правил та їх апостеріорного корегування.

Уточнення функцій приналежності нечітких множин в окремих випадках пропонується здійснювати з використанням процедур "навчання", що застосовуються в теорії нейронних мереж. Такі підходи реалізовані в когнітивних гібридних системах підтримки прийняття рішення та прогнозування [7].

Різними авторами були запропоновані й інші методичні підходи щодо зниження негативного впливу окремих слабких місць теорії нечітких множин та нечіткої логіки й підвищення адекватності НКМ, але проблема забезпечення адекватності НКМ залишається актуальною [6].

Метою статті є підвищення адекватності окремих типів нечітких когнітивних моделей за рахунок удосконалення методів їх параметризації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА.

Розглядається слабо структурована система як взаємодія її елементів (підсистем), де якість того чи іншого елементу може визначатися якістю як "співдіючих" (позитивний зв'язок) так і

"протидіючих" (негативний зв'язок) елементів (підсистем). Як само сукупність різних за характером впливів визначить майбутній стан певного елемента чітко формалізувати неможливо. Тобто має місце нестохастична невизначеність щодо поточного стану кожного з елементів системи та результатів їх взаємодії. Окрему ступінь невизначеності надає нейтральність взаємовідносин між елементами систем, а також той факт, що характер взаємозв'язків (співдія, протидія, нейтралітет) під впливом різних факторів та умов може змінюватись з часом.

Запропонований нижче методичний підхід щодо параметризації нечітких когнітивних моделей базується на теоретичних положеннях та математичному апараті алгебри логіки та логіки антонімів (ЛА) [8], що вмістила в собі усі позитивні властивості неперервнозначних логік, позбавлена наведених слабких місць нечіткої логіки [9] й, тим самим, забезпечує потенційну можливість отримання більш адекватних моделей. Найголовніша властивість ЛА, на відміну від нечіткої логіки, – це її відповідність усім законам класичної булевої логіки, що обґрунтовує можливість їх сумісного використання.

В якості базової моделі будемо використовувати когнітивну карту у виді причинно-наслідної мережі $G=(X,D)$, де $X=\{X_i\}$ - множина концептів - елементів системи, що досліджується; $D\subseteq X\times X$ - множина причинно-наслідних зв'язків між ними [3].

Головною концепцією методу є представлення когнітивної карти у виді мережі логічних зв'язків між її концептами з наступним введенням змінних, що описують їх стани (параметризація вершин), напрямок та силу логічних зв'язків (параметризація дуг), а також функцій, що пов'язують ці змінні згідно побудованих раніше логічних формул.

Дійсно, в когнітивних моделях зв'язки типу " X_i є причиною X_j " формалізуються через логічну зв'язку "Імплікація" (умовно позначається як $X_i \Rightarrow X_j$), що згідно законів класичної логіки має властивість:

$$X_i \Rightarrow X_j = \bar{X}_i \vee X_j, \quad (1)$$

де

\bar{X}_i - умовне позначення оператора заперечення "Ні", що застосовується до X_i .

Відповідно до цього позитивні причинно-наслідні зв'язки представляються як:

$$X_i \xrightarrow{(+)} X_j : \begin{cases} X_i \Rightarrow X_j = \bar{X}_i \vee X_j, \\ \bar{X}_i \Rightarrow \bar{X}_j = X_i \vee \bar{X}_j, \end{cases} \quad (2)$$

а негативні причинно-наслідні зв'язки представляються як:

$$X_i \xrightarrow{(-)} X_j : \begin{cases} X_i \Rightarrow \bar{X}_j = \bar{X}_i \vee \bar{X}_j, \\ \bar{X}_i \Rightarrow X_j = X_i \vee X_j. \end{cases} \quad (3)$$

Вирази (2) та (3) відображають простий випадок взаємозв'язку між концептами, тобто, коли проста подія X_j є наслідком іншої простої події X_i .

Але на практиці частіше виникає необхідність формалізації багатовимірних взаємозв'язків між концептами, коли подія X_j є наслідком взаємодії сукупності подій $\{X_i\}$, $i = \overline{1, n}$, тобто $\{X_i\} \Rightarrow X_j$. В цьому проявляється одне з основних проблемних питань при параметризації когнітивних моделей, що негативно впливає на їх адекватність, – проблема формалізації одночасного та різного за характером (знаком, силою тощо) впливу на окремих концепт з боку множини інших концептів.

Послаблення негативного впливу цього проблемного питання пропонується здійснити за рахунок формалізації багатовимірних зв'язків за допомогою класичної алгебри логіки з урахуванням знаку дії кожного з концептів-причин.

Наприклад, можна обмежитись логічними зв'язками двох типів:

Тип 1 - "кон'юнктивний": "Сукупність $S_{1j} = \bigcap_i X_i$, $i = \overline{1, n_j}$, є причиною X_j ";

Тип 2 - "диз'юнктивний": "Сукупність $S_{2j} = \bigcup_i X_i$, $i = \overline{1, n_j}$, є причиною X_j ",

або у формалізованому виді:

$$\text{Тип 1. } \{X_i\} \xrightarrow{(\wedge)} X_j : \left(S_{1j} = \bigcap_i X_i \right) \Rightarrow X_j, \quad (4)$$

$$\text{Тип 2. } \{X_i\} \xrightarrow{(\vee)} X_j : \left(S_{2j} = \bigcup_i X_i \right) \Rightarrow X_j, \quad (5)$$

де:

X_j - концепт-наслідок (або концепт-вхід);

$\{X_i\}$ - множина концептів-причин (або концептів-виходів);

$\bigcap_i X_i$ - кон'юнкт (з урахуванням знаку впливу кожного з X_i);

$\bigcup_i X_i$ - диз'юнкт (з урахуванням знаку впливу кожного з X_i).

У разі негативного впливу будь-якого з концептів-причин X , то у відповідній формулі (4) або (5) використовується його протилежне значення, що отримується шляхом застосування до нього оператора заперечення "Ні", тобто значення \bar{X} .

Якщо поєднати вирази (2), (3) з формулами (4), (5), то можна отримати повний набір формул, за якими будуть описуватись багатовимірні причинно-наслідні взаємозв'язки в базовій когнітивній моделі, а саме:

$$\{X_i\} \xrightarrow[\wedge]{+} X_j : \begin{cases} \left(S_{1j} = \bigcap_i X_i \right) \Rightarrow X_j = \bar{S}_{1j} \vee X_j = \overline{\left(\bigcap_i X_i \right)} \vee X_j = \left(\bigcup_i \bar{X}_i \right) \vee X_j \\ \left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i \right) \Rightarrow \bar{X}_j = \bar{S}_{1j} \vee \bar{X}_j = \overline{\left(\bigcap_i \bar{X}_i \right)} \vee \bar{X}_j = \left(\bigcup_i X_i \right) \vee \bar{X}_j \end{cases}, \quad (6)$$

$$\{X_i\} \xrightarrow[\wedge]{-} X_j : \begin{cases} \left(S_{1j} = \bigcap_i X_i \right) \Rightarrow \bar{X}_j = \bar{S}_{1j} \vee \bar{X}_j = \overline{\left(\bigcap_i X_i \right)} \vee \bar{X}_j = \left(\bigcup_i \bar{X}_i \right) \vee \bar{X}_j \\ \left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i \right) \Rightarrow X_j = \bar{S}_{1j} \vee X_j = \overline{\left(\bigcap_i \bar{X}_i \right)} \vee X_j = \left(\bigcup_i X_i \right) \vee X_j \end{cases}, \quad (7)$$

$$\{X_i\} \xrightarrow[\vee]{+} X_j : \begin{cases} \left(S_{2j} = \bigcup_i X_i \right) \Rightarrow X_j = \bar{S}_{2j} \vee X_j = \overline{\left(\bigcup_i X_i \right)} \vee X_j = \left(\bigcap_i \bar{X}_i \right) \vee X_j \\ \left(S_{2j} = \bigcup_i \bar{X}_i \right) \Rightarrow \bar{X}_j = \bar{S}_{2j} \vee \bar{X}_j = \overline{\left(\bigcup_i \bar{X}_i \right)} \vee \bar{X}_j = \left(\bigcap_i X_i \right) \vee \bar{X}_j \end{cases}, \quad (8)$$

$$\{X_i\} \xrightarrow[\vee]{-} X_j : \begin{cases} \left(S_{2j} = \bigcup_i X_i \right) \Rightarrow \bar{X}_j = \bar{S}_{2j} \vee \bar{X}_j = \overline{\left(\bigcup_i X_i \right)} \vee \bar{X}_j = \left(\bigcap_i \bar{X}_i \right) \vee \bar{X}_j \\ \left(S_{2j} = \bigcup_i \bar{X}_i \right) \Rightarrow X_j = \bar{S}_{2j} \vee X_j = \overline{\left(\bigcup_i \bar{X}_i \right)} \vee X_j = \left(\bigcap_i X_i \right) \vee X_j \end{cases}. \quad (9)$$

Дійсно, формули (6) – (9) можуть застосовуватись при формалізації як одновимірних, так і багатовимірних причинно-наслідних зв'язків між концептами, що надає змогу базову когнітивну карту представити у виді мережі логічних зв'язків між концептами.

Далі з використанням математичного апарату ЛА вводяться змінні, що описують стани концептів (параметризація вершин), напрямок та силу логічних зв'язків (параметризація дуг), а також функцій, що пов'язують ці змінні згідно побудованих раніше логічних формул типу (6) – (9).

В інтересах параметризації вершин когнітивної карти обирається єдина шкала (що також повинно позитивно вплинути на адекватність когнітивної моделі, що будується).

Для цього будемо розглядати антонімічну пару A та αA , що задають граничні значення можливих станів відповідних концептів $X = \{X_i\}$, $i = \overline{1, n}$. Наприклад, якщо кожний концепт розглядати як деяку подію, то в умовах невизначеності їх стан можна оцінити як чисельну міру ступеня можливості (ймовірності, частоти тощо) наступу цієї події та прийняти, що $A = \text{"Достовірно"}$ та $\alpha A = \text{"Неможливо"}$. Тоді показник якості вершини X_i (далі – змінна $H[X_i]$) задається одною з антонімічних оцінок $H[A]$ або $H[\alpha A]$ (тобто, $H[X_i] = H[A]$ або $H[X_i] = H[\alpha A]$), що визначають на скільки поточний стан елементу X_i наближений до стану $A = \text{"Достовірно"}$ або до стану $\alpha A = \text{"Неможливо"}$ відповідно.

Згідно положень ЛА антонімічні оцінки зв'язані між собою виразами виду:

$$H[A] = -\log_2(1 - 2^{-H[\alpha A]}), \quad (10)$$

$$H[\alpha A] = -\log_2(1 - 2^{-H[A]}). \quad (11)$$

Графік функції, що заданий виразом (10) чи (11), наведено на (рис. 1).

На рис. 1 на координатних осях, що позначені $H[A]$ та $H[\alpha A]$, відкладаються кількісні оцінки ступеню прояви у елемента X_i властивості, що досліджується. При цьому, пара оцінок $H[A]$ та $H[\alpha A]$ є координатами точки, що поділяє криву на дві частини: частину, що відповідає елементу антонімічної пари A (далі – дуга A), та частину, що відповідає елементу антонімічної пари αA (далі – дуга αA). Значення $H[A]$ та $H[\alpha A]$ відображають величини проєкцій дуг A та αA на відповідні осі координат, а самі дуги A та αA доповнюють одна одну до всієї кривої.

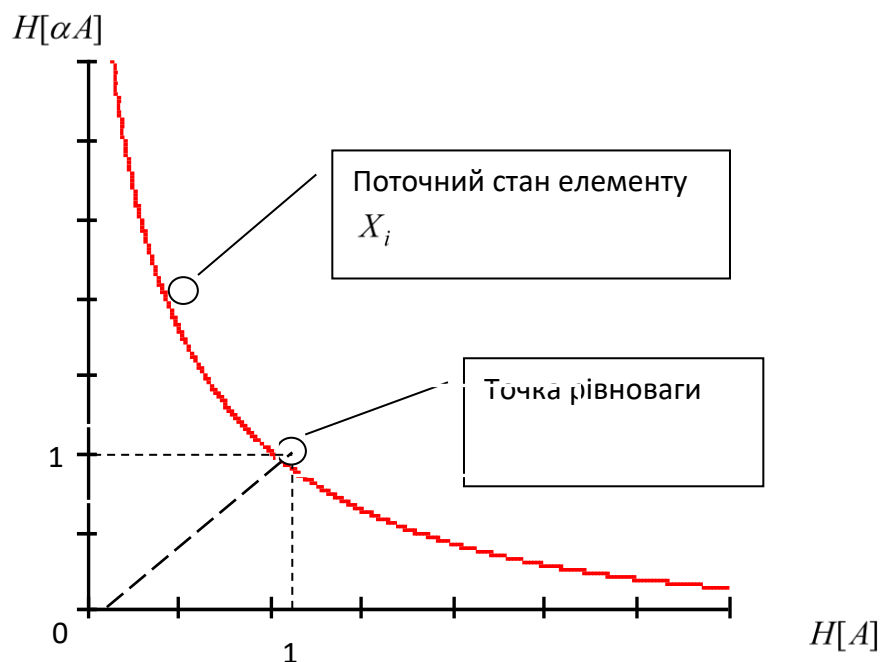


Рис. 1. Графік можливих станів елементу X_i

Слід зазначити, що оператору α можна поставити у відповідність оператор "Ні", що, на відміну від його розуміння в нечіткій логіці, передбачає не "Усе інше", а перехід до конкретного протилежного значення – синоніма.

Зрозуміло, якщо міра наявності у елементу X_i властивості - одного з елементів антонімічної пари оцінюється як мінімальна, то міра наявності у нього протилежної властивості у цьому випадку буде максимальною. Тобто, якщо $H[A] \rightarrow 0$, то $H[\alpha A] \rightarrow \infty$; якщо $H[A] \rightarrow \infty$, то $H[\alpha A] \rightarrow 0$.

З цього можна вважати, що $H[A]$ та $H[\alpha A]$ є координатами стану елементу X_i , що оцінюється за певною його властивістю, а крива на рис. 1 – кривою можливих станів цього елементу. Слід звернути увагу на точку з координатами $(1, 1)$, що є точкою рівноваги і відображає такий стан елементу X_i , при якому ступінь прояви у нього властивості, що досліджується, оцінюється як така, що однаково наближена до обох антонімічних оцінок, і є чисельною мірою максимальної невизначеності щодо стану елементу X_i .

Саме стан максимальної невизначеності щодо стану кожного концепту приймається в якості його початкового стану, тобто:

$$H[X_i]_{t=0} = H_i[A] = H_i[\alpha A] = 1.$$

Слід зауважити, що прийняття апріорної максимальної невизначеності щодо початкового стану кожного елементу слабо структурованої системи позбавляє від внесення похибки в початкових даних й тим самим позитивно впливає на адекватність когнітивної моделі.

Для формалізації характеру зв'язку типу (4) або (5) між концептами будемо вважати, що характер взаємозв'язків між деякою сукупністю концептів-причин S_j та концептом-наслідком X_j (далі - $H[S_j \Rightarrow X_j]$) оцінюється мірою прояви впливу за допомогою антонімічних оцінок $H[B]$ та $H[\alpha B]$ (тобто, $H[S_j \Rightarrow X_j] = H[B]$ або $H[S_j \Rightarrow X_j] = H[\alpha B]$), що задаються на шкалі з використанням антонімічної пари: $B =$ "Абсолютна співдія" та $\alpha B =$ "Абсолютна протидія". Оцінки $H[B]$ та $H[\alpha B]$ зв'язані собою функціонально згідно (10) та (11).

У цьому випадку точка з координатами (1, 1) характеризує нейтральний характер взаємодії між визначеними елементами (точка нейтралітету) та поділяє криву на дві дуги: B - позитивних зв'язків та αB - негативних зв'язків.

Позитивні зв'язки будуть характеризуватись значеннями елементів антонімічної пари, що задовольняють умовам: $H[B] > 1$ та $0 > H[\alpha B] < 1$.

Негативні зв'язки будуть характеризуватись значеннями елементів антонімічної пари, що задовольняють умовам: $H[\alpha B] > 1$ та $0 > H[B] < 1$.

Початкові значення $H[S_j \Rightarrow X_j]_{t=0} = H_j[B]$ для кожного концепту-наслідка X_j (концепту-входу) встановлюється експертним шляхом.

Для формалізації логічних зв'язків виду (6) - (9) будемо використовувати базові оператори ЛА [8], що задають два види зв'язків: γ -зв'язок (сильний зв'язок), що відповідає операції кон'юнкції, та β -зв'язок (слабкий зв'язок), що відповідає операції диз'юнкції, наступного виду:

$$H \left[\gamma X_i \right] = -\log_2 \left[1 - 2^{-\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot H_i[\alpha A]} \right]; \quad (11)$$

$$H \left[\beta X_i \right] = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot H_i[A], \quad (12)$$

де:

μ_i - ваговий коефіцієнт елемента X_i , в якості якого можна використовувати міру впевненості, що буде задаватись на шкалі за допомогою антонімічних оцінок $C =$ "Завжди" та $\alpha C =$ "Ніколи". Тобто $\mu_i = H_i[C]$ або $\mu_i = H_i[\alpha C]$.

Використовуючи термінологію та математичний апарат ЛА з використанням формул (6) – (9) для кожного концепту-наслідка (концепту-входу) можна скласти математичний вираз, що пов'язує силу зв'язку між суміжними концептами та їх чисельними мірами якості (можливості, ймовірності тощо), виду:

$$H[S_j \Rightarrow X_j] = H[\alpha S_j \beta X_j] = H[\alpha S_j] + H[X_j]. \quad (13)$$

Так, наприклад, для формули зв'язку (6) з урахуванням (13) отримаємо:

$$\{X_i\} \xrightarrow[\wedge]{+} X_j : \begin{cases} H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i X_i\right) \Rightarrow X_j\right] = H\left[\beta \left(\alpha X_i\right)\right] + H[X_j] = \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[\alpha A] + H_j[A] \\ H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i\right) \Rightarrow \bar{X}_j\right] = H\left[\beta X_i\right] + H[\alpha X_j] = \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[A] + H_j[\alpha A] \end{cases}.$$

З цього, можна сформулювати функціонал для концепту-наслідка X_j виду:

$$\{X_i\} \xrightarrow[\wedge]{+} X_j : \begin{cases} H_j[A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i X_i\right) \Rightarrow X_j\right] - \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[\alpha A] \\ H_j[\alpha A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i\right) \Rightarrow \bar{X}_j\right] - \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[A] \end{cases}. \quad (14)$$

Аналогічно отримаємо функціонали для формул (7) – (9):

$$\{X_i\} \xrightarrow[\wedge]{-} X_j : \begin{cases} H_j[\alpha A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i X_i\right) \Rightarrow \bar{X}_j\right] - \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[\alpha A] \\ H_j[A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i\right) \Rightarrow X_j\right] - \sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[A] \end{cases}, \quad (15)$$

$$\{X_i\} \xrightarrow[\vee]{+} X_j : \begin{cases} H_j[A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcup_i X_i\right) \Rightarrow X_j\right] + \log_2 \left[1 - 2^{-\sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[A]}\right] \\ H_j[\alpha A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i\right) \Rightarrow \bar{X}_j\right] + \log_2 \left[1 - 2^{-\sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[\alpha A]}\right] \end{cases}, \quad (16)$$

$$\{X_i\} \xrightarrow[\vee]{-} X_j : \begin{cases} H_j[\alpha A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcup_i X_i\right) \Rightarrow \bar{X}_j\right] + \log_2 \left[1 - 2^{-\sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[A]}\right] \\ H_j[A] = H\left[\left(S_{1j} = \bigcap_i \bar{X}_i\right) \Rightarrow X_j\right] + \log_2 \left[1 - 2^{-\sum_{i=1}^{n_j} \mu_i \cdot H_i[\alpha A]}\right] \end{cases}. \quad (17)$$

Таким чином, отримано повний набір функціоналів виду (14) – (17), що забезпечують отримання математичного виразу для оцінки якісного стану кожного концепту-наслідка і подальше дослідження слабо структурованої системи в різних ситуаціях за допомогою її когнітивної моделі.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Запропоновано концептуальний підхід щодо удосконалення методів параметризації нечітких когнітивних моделей з метою підвищення їх адекватності. Підвищення адекватності когнітивних моделей забезпечується: перетворенням когнітивної карти в мережу логічних зв'язків між концептами; формалізацією якісного стану концептів та взаємозв'язків між ними методами логіки антонімів, що позбавлена слабких місць, наявних у нечіткій логіці; застосуванням єдиних шкал для вимірювання якісного стану концептів та взаємозв'язків між ними; введенням посилок щодо максимального значення міри невідповідності початкового стану концептів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Кулинич, А.А. (2007). Систематизация когнитивных карт и методов их анализа. *Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2007): труды VII Международной конференции* (с. 50 – 57). Москва, Россия: Институт проблем управления РАН.
- [2] Kosko, B. (1986). Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, (24). 65 – 75.
- [3] Силов, В.Б. (1995). *Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке*. Москва: ИНПРО-РЕС.
- [4] Горелова, Г.В. (2012). О когнитивном моделировании сложных систем, инструментарий исследований. *Известия ЮФУ. Технические науки*. (6), 236 – 240.
- [5] Аршинский, Л.В. (2007). Парадоксы нечеткого оценивания. *Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2007): труды VII Международной конференции* (с. 20 – 23). Москва, Россия: Институт проблем управления РАН.
- [6] Канеман, Д., Словик, П., Тверски, А. (2005). *Принятие решений в неопределенности: правила и предубеждения*. Харьков: Изд-во Институт прикладной психологии «Гуманитарный Центр».
- [7] Аверкин, А.Н., Ярушев, С.А., Павлов, В.Ю. (2017). Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования. *Программные продукты и системы*. 4 (30). 632 – 642.
- [8] Голота, Я.Я. (1992). О формализации логики неполных знаний (логики антонимов). *Логика и развитие научного знания*, 92 – 112.
- [9] Фальков, Д.С. (1999). О разработке лингвистического подхода на базе логики антонимов. Сравнение с лингвистическим подходом, лежащим в основе нечеткой логики Заде. Вилучено із <http://inftech.webservis.ru/it/conference/scm/1999/session4/falkov.html>.

УДК 681.3

Опубліковано 20 серпня 2022 року

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ОСІЄВСЬКИЙ Сергій Валерійович 

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба

ТРЕТЯК Вячеслав Федорович 

кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник,
науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил
Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба

УКРАЇНА

Анотація: *Розвиток онтологічного інжинірингу, а також знання-орієнтованих інформаційних систем (ЗОІС), пов'язане з вдосконаленням методів комп'ютерної обробки предметно-орієнтованих знань. Зрозуміло, що добре опрацьовані методи і засоби обробки інформації для вирішення прикладних завдань в вузькоспеціалізованих предметних областях (ПрО) недостатні для вирішення комплексних завдань, пов'язаних з пошуком релевантної інформації, її лінгвістичним аналізом, формально-логічним поданням в рамках відповідної теорії, вибіркою предметних знань та їх подальшим використанням для вирішення прикладних завдань в довільних ПрО. Звідси випливає актуальність і важливість розробки нових наукових методів і підходів до побудови ЗОІС, відповідних технологій і, нарешті, інструментальних засобів автоматизованої побудови баз знань ПрО.*

ВСТУП.

Розробка ЗОІС – важлива проблема, яка ускладнюється унікальністю об'єктів управління та відсутністю систематизованої інформації про методи і аспекти підтримки прийняття рішень (ППР) в уніфікованому вигляді. Крім цього сам процес розробки ЗОІС також потребує науково обґрунтованої всебічної підтримки, а розробка методів і засобів такої підтримки є актуальним завданням. На основі аналізу існуючих рішень та публікацій [1–6] в яких висвітлені питання підтримки процесів проектування програмних систем визначено ряд недоліків, що

впливають на розуміння розробниками підходів щодо розробки ЗОІС та, власне, безпеку самої ЗОІС:

– існуючі моделі не розділяють поняття архітектурний підхід та методологія розробки програмного забезпечення ставлячи їх на один рівень, що впливає на розуміння сутності застосування підходу щодо розробки ЗОІС;

– в існуючих моделях, збереження контенту передбачається у межах інтерфейсу користувача, що не забезпечує надійного захисту інформації;

– існуючі архітектурні рішення типових ЗОІС пропонують розгортання інтерфейсу розробника та користувача безпосередньо в програмній системі, що робить саму систему вразливою до атак.

Ціль (мета) дослідження. Зважаючи на результати аналізу та наявні рішення в галузі проектування ЗОІС визначимо, що метою даної публікації є розробка моделі підтримки процесів розробки ЗОІС, що дозволить усунути зазначені проблеми.

Проведений аналітичний огляд показав, що існуючі рішення щодо розробки ЗОІС використовують різні принципи і підходи щодо реалізації процесів розробки та як правило не відповідають принципу універсальності. Наведемо опис моделі підтримки процесів розробки (ППр) ЗОІС на основі онтології «ПІДТРИМКА ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ЗОІС» [1].

ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС МОДЕЛІ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ЗОІС.

Для опису моделі ППр розглянемо формальну систему:

$$MP = \langle C, R, A \rangle,$$

де C - множина атомарних концептів ППр,

R - множина атомарних ролей, що описують властивості концептів і відношень між ними,

A - множина аксіом, що встановлюють зв'язок між концептами і ролями.

Аксіоми містять описи концептів (складених із атомарних концептів з атомарних концептів) і обмежень ролей з використанням конструкторів деякої логіки. В роботі система $MP = \langle C, R, A \rangle$ задається в рамках

дескрипційної логіки ALC (Attributive Language with Complement) [8]. Для опису елементів MP були введені додаткові символи $(,), =, \{, \}, [,]$, що дозволить виконати опис елемент моделі ППр в компактному вигляді.

Множини C та R включають наступні основні концепти і ролі:

$$C = \{ \text{Розробник_ЗОІС, Підтримка_Розробника_ЗОІС, Архітектор_ЗОІС,} \\ \text{Підтримка_Архітектора_ЗОІС, Замовник_ЗОІС,} \\ \text{Підтримка_Замовника_ЗОІС, Метод_ППр, Засіб_ППр,} \\ \text{Методика_розробки_ППр, Принцип_розробки_ППр,} \\ \text{Підхід_до_розробки_ППр, Технологія_розробки_ППр,} \\ \text{Методика_розробки_репозиторія_методів_ППр,} \\ \text{Архітектура_ЗОІС, Алгоритм_розробки_ЗОІС, Дія,} \\ \text{Процес_рохробки_ЗОІС, Етап_розробки_ЗОІС} \};$$

$$R = \{ \text{влаштовує, реалізує, запозичує, використовує, базуєтьсяНа,} \\ \text{пропонує, включає} \}.$$

Множина A включає аксіоми, що задають відношення “загальне-часткове” між концептами, що визначають області дії аргументів бінарних відношень, відповідних ролей, які описують властивості концептів та ролей.

Аксіоми містять складові концепти і обмеження ролей, які визначаються відповідно K конструкторами логіки ALC.

Розглянемо аксіому, яка описує властивості концепту “Засіб_ППр”:

$$\text{Засіб_ППр} \sqsubseteq \exists \text{ базуєтьсяНа. [Принцип_розробки_ЗОІС} \\ \sqcup \text{Підхід_до_розробки_ЗОІС}] \sqcap \exists \text{ використовує. Технологія_розробки_ЗОІС.}$$

Інтерпретація Int формальної системи, що задає її семантику, представляється парою $Int = \langle \Delta, f \rangle$ де Δ - домен, множина всіх екземплярів (індивідів) моделі ППр, f - функція інтерпретації $f : C \cup R \rightarrow (2^\Delta) \cup (2^\Delta \times 2^\Delta)$ для якої введемо правила використання.

1. Правило співставлення множин:

$f(C_i) \subseteq \Delta, C_i \in C$ - кожному концепту співставляється множина його екземплярів (індивідів).

2. Правило співставлення відношень:

$f(R_i) \subseteq \Delta \times \Delta, R_i \in R$ - кожній ролі співставляється бінарне відношення, тобто множина пар пов'язаних з екземплярів.

Функція f розширюється для інтерпретації складових концептів відповідно до індуктивних правил логіки ALC.

Тоді інтерпретація формальної системи буде задавати модель ППр як множина конкретних об'єктів, що належать певним класам, пов'язаних певними відношеннями, які задовільняють аксіомам А. Тобто, термін «модель» можна розглядати як спрощене інформаційне представлення сукупності об'єктів і процесів реального світу, що описують процес ППр.

При описі концептів, ролей, аксіом та їх інтерпретацій використані угоди по іменуванню, що введені, запроваджені та обґрунтовані в [9].

ПРОЦЕС РОЗРОБКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗОІС ТА ЙОГО ПІДТРИМКА.

Модель ППр розглядає підтримку процесу розробки інтелектуальних ЗОІС як процес паралельно протікаючий з процесами власне розробки ЗОІС. В значній мірі реалізація елементів пропонуємої моделі направлені на виявлення помилок (явно виражених та скритих) та корегування дій групи розробників в залежності від ступеню зрілості програмного забезпечення, що реалізує функціонал ЗОІС.

У розробці ЗОІС беруть участь фахівці різного профілю – експерти тієї предметної області (ПрО), для якої створюється ЗОІС, інженери знань, які є фахівцями в області подання знань і підтримки прийняття рішень, програмісти та архітектори програмного забезпечення. Крім цього пропонується окремо включити в модель замовника ЗОІС, як потенційного власника програмного забезпечення та власне того функціонал ЗОІС має задовільнити. Враховуючи вищезазначене та проаналізувавши взаємний вплив вищезазначених осіб відобразимо в моделі три елементи: архітектор_ІСПР, що включає архітектора програмного забезпечення та експерта ПрО; розробник_ЗОІС – інженер зі знань та програміст; замовник. Тобто:

$$f(\text{Розробник_ЗОІС}) = \{\text{ІНЖЕНЕР_ЗНАНЬ, ПРОГРАМІСТ}\};$$

$$f(\text{Архітектор_ЗОІС}) = \{\text{АРХІТЕКТОР_ПЗ, ЕКСПЕРТ}\};$$

$$f(\text{Власник_ЗОІС}) = \{\text{ЗАМОВНИК}\}.$$

Кожен із концептів вищезазначених функцій володіє

індивідуальними формалізмами щодо предметної області ЗОІС, що пов'язано перш за все зі специфікою термінологічного представлення інформації про ПрО. Для їх успішної спільної роботи, особливо на початкових етапах розробки, необхідна єдина система понять та узгоджений концептуальний базис.

Крім цього концептам функції Розробник_ЗОІС крім загального розуміння про ПрО необхідна інформація про необхідна інформація про конкретні методи підтримки прийняття рішень (ППР), класи завдань, що вирішуються цими методами (можливості та обмеження кожного з них), про основні етапи прийняття рішень і використовуваних на кожному з них методах, а також про інструментальні засоби, що реалізують ці методи. Зазначена інформація по суті має бути сформована в результаті реалізації функції $f(\text{Архітектор_ЗОІС})$, яка безпосередньо залежить від $f(\text{Власник_ЗОІС})=\{\text{ЗАМОВНИК}\}$.

Слід зазначити, що навіть за умови успішного подання вищезазначеної інформації визначеним концептам нагальним питанням, що досить часто упускають з розгляду, являється компонентна підтримка $f(\text{Розробник_ЗОІС})$, оскільки розуміння власних можливостей щодо вибору та застосування готових програмних рішень, що реалізують необхідні методи підтримки прийняття рішень або організують інтерфейс користувача, який суттєво вплине на часові терміни та вартісні показники процесу створення ЗОІС.

Особливістю запропонованої моделі є розширення типових елементів підтримки процесу розробки ЗОІС за рахунок введення аналітичної підтримки, основним призначенням якої є виявлення типових та маскованих помилок, автоматична оцінка відповідності термінів розробки та фінансових витрат як за короткочасними беклогами так і за жорсткими вимогами (що надасть можливість усунути суб'єктивність думки розробника в оцінці зазначених характеристик).

І як узагальнення всього вищезазначеного слід розглядати питання методичної підтримки, що включає опис підходів і принципів розробки ЗОІС, засоби розробки та методіку їх застосування (особливо в умовах застосування гнучких методологій де команди розробників можуть динамічно нарощуватися або зменшуватися).

Таким чином, узагальнена функція підтримки процесу розробки ЗОІС матиме вигляд:

$$f(\text{Підтримка})=\{\text{КОНЦЕПТУАЛЬНА, ІНФОРМАЦІЙНА, КОМПОНЕНТНА, АНАЛІТИЧНА, МЕТОДИЧНА}\}$$

Обґрунємо елементи забезпечення вищезазначених концептів функції підтримки на основі онтології «Підтримка прийняття рішень».

Концептуальний базис ППр забезпечується шляхом систематизації інформації про область знань «Підтримка прийняття рішень», результатом якої є онтологія цієї ПрО. Інформаційна підтримка здійснюється шляхом забезпечення змістовного доступу (ЗЗД) до структурованих знань, інформаційних ресурсів, принципів та методів, що належать до області знань «Підтримка прийняття рішень». Засобом такої підтримки є спеціалізований інформаційно-аналітичний ресурс (СІАР) по ППр.

Компонентна підтримка процесу розробки ЗОІС здійснюється шляхом забезпечення безпосереднього змістовного доступу до реалізацій методів ППр і забезпечується репозиторієм методів ППр через відповідні мікросервіси.

Методична підтримка забезпечується наданням інформації про підходи, принципи, технології та алгоритми розробки ЗОІС.

Таким чином, основу методу ППр становлять способи роботи з інформацією про методи ППр та аспекти їх програмної реалізації, систематизація та забезпечення змістовного доступу до них, а також ЗЗД до існуючих реалізацій методів ППр та методика розробки ЗОІС.

$$f(\text{Метод_ППр})=\{\text{СИСТЕМАТИЗАЦІЯ_ІНФОРМАЦІЇ, АНАЛІТИЧНІ_РОЗРАХУНКИ, ЗЗД_ДО_МЕТОДІВ_ППр_ТА_АСПЕКТІВ, ЗЗД_ДО_РЕАЛІЗАЦІЙ_МЕТОДІВ_ППр, ЗЗД_ДО_ПРИНЦИПІВ_ТА_ТЕХНОЛОГІЙ}\}.$$

Засобами ППр є онтологія відповідної області знань (ОЗ) ППр, спеціалізований інформаційно-аналітичний ресурс (СІАР) по ППр, аналітичний ресурс ППр, репозиторій методів ППр та методика розробки ЗОІС.

$$f(\text{Засіб_ППр})=\{\text{ОНТОЛОГІЯ_ОЗ_ППр, СІАР_ППр, АР_ППр,}$$

РЕПОЗИТАРІЙ_МЕТОДІВ_ППР, МЕТОДИКА_РОЗРОБКИ_ЗОІС }.

Методи ППр забезпечують підтримку розробників ЗОІС та архітекторів ПЗ.

$$f(\text{забезпечує}) = \{ (\text{СИСТЕМАТИЗАЦІЯ_ІНФОРМАЦІЇ, КОНЦЕПТУАЛЬНА}), \\ (\text{АНАЛІТИЧНІ_РОЗРАХУНКИ, АНАЛІТИЧНА}), \\ (\text{ЗЗД_ДО_МЕТОДІВ_ППР_ТА_АСПЕКТІВ, ІНФОРМАЦІЙНА}), \\ (\text{РЕПОЗИТАРІЙ_МЕТОДІВ_ППР, ЗЗД_ДО_РЕАЛІЗАЦІЙ_МЕТОДІВ_ППР}), \\ (\text{ЗЗД_ДО_ПРИНЦИПІВ_ТА_ТЕХНОЛОГІЙ, МЕТОДИЧНА}) \}.$$

Засоби ППр реалізують методи ППр КПр.

$$f(\text{реалізує}) = \{ (\text{ОНТОЛОГІЯ_ОЗ_ППР, СИСТЕМАТИЗАЦІЯ_ІНФОРМАЦІЇ}), \\ (\text{АР_ПП, АНАЛІТИЧНІ_РОЗРАХУНКИ}), (\text{СІАР_ППР, \\ ЗЗД_ДО_МЕТОДІВ_ППР_ТА_АСПЕКТІВ}), \\ (\text{ЗЗД_ДО_РЕАЛІЗАЦІЙ_МЕТОДІВ_ППР, КОМПОНЕНТНА}), \\ (\text{ЗЗД_ДО_ПРИНЦИПІВ_ТА_ТЕХНОЛОГІЙ, \\ ЗЗД_ДО_ПРИНЦИПІВ_ТА_ТЕХНОЛОГІЙ}) \}.$$

Засоби підтримки процесів розробки ЗОІС (Рисунок 1), що є складовими моделі ППр, являються об'єктами для яких необхідна розробка підтримуючих підмоделей. В подальшому інформаційно-аналітичний ресурс пропонується розділити на дві складові (спеціалізований аналітичний ресурс (САР) та спеціалізований інформаційний ресурс (СІР)).



Рис. 1. Засоби підтримки процесів розробки ЗОІС

ПІДХОДИ, ПРИНЦИПИ, ТЕХНОЛОГІЇ, ПРОПОНУЄМІ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЗОІС.

Зрозуміло, що при формуванні стратегії підтримки процесу розробки ЗОІС необхідно обирати принципи, що найбільш адекватно описують функціонал Про.

В даний час в наукових і практичних цілях розроблено велику кількість методів прийняття рішень та програмних додатків, що їх реалізують – бібліотек, пакетів, додатків. Тож в більшій мірі актуальним є питання не розробки нових методів, а забезпечення ефективної реалізації існуючих та розробка підходів щодо їх комбінації. Тому при забезпеченні підтримки процесу розробки ЗОІС важливим є питання надання доступу до існуючих реалізацій цих методів з максимальним використанням готових рішень. Але дане рішення маючи ряд переваг потребує наявності структури, що забезпечить визначення власне оцінки якості отриманого рішення отриманого на основі існуючого програмного модулю. В зазначеній моделі дана функція покладається на структуру аналітичного забезпечення. Дотримання такого підходу дозволить легко підключати нові методи ППР та інтерфейсні компоненти, модифікувати наявні, вирішуючи проблему старіння розроблюваних систем.

З метою врахування кваліфікаційних вимог до розробників і користувачів ЗОІС засоби повинні бути простими у використанні і, по можливості, незалежні від предметної області.

$f(\text{Принцип_розробки_ЗОІС}) = \{\text{ГОТОВІ_РІШЕННЯ,}$
 $\text{МАСШТАБОВАНІСТЬ, ДОСТУПНІСТЬ, ПРОСТОТА_ВИКОРИСТАННЯ,}$
 $\text{ПЛАТФОРМОНЕЗАЛЕЖНІСТЬ}\}.$

Центральним елементом ЗОІС є бази знань (БЗн), роль яких в даний час грають онтології. При розробці методів і засобів ППР пропонується використовувати онтологічний підхід. Крім нього розробниками можуть розглядатися і інші підходи такі як фрактально-стратифікований, швидкого прототипування, гнучкої розробки та каркасний.

Фрактально-стратифікований підхід (ФС-підхід), базується на фрактальному підході, запропонованому в [9]. Даний підхід дозволяє врахувати подібність системи знань в цілому та її фрагментів, за рахунок чого можна досягти максимальної уніфікації застосовуваних методів при розробці ЗОІС. В свою чергу, як перспективний напрямок розширення проектних можливостей варто вести мову про модифікацію ФС та перехід

до ярусно-фрактально-стратифікованого підходу на основі рангів ЯФС(р) де кожен ярус являється формалізованим відображенням стратифікованого простору знань, а ранг його формалізованим описом в термінах теорії алгоритмів.

Використання ФС-підходу регулює і спрощує систематизацію знань, дозволяє багаторазово використовувати раніше розроблені фрагменти знань.

При розробці прикладних програмних систем добре зарекомендував себе мікросервісний підхід [10, 11]. Всі функціональні можливості ЗОІС, методи, які будуть використовуватися для вирішення поставлених завдань, а також інтерфейс користувача пропонується реалізовувати у вигляді мікросервісівсервісів. Використання даного підходу створює передумови для забезпечення реалізації основних принципів ППр, згаданих вище.

Підходи швидкого прототипування [12] та каркасний підхід, зазначені підходи є універсальними при розробці широкого класу програмних систем і добре узгоджуються з принципами та іншими підходами, що запропоновані до використання в моделі ППр. Крім цього окремо слід розглядати методологію гнучкої розробки [13-18] (рис. 2).

Таким чином, функція опису підходів для розробки ЗОІС матиме наступний вигляд:

$$f(\text{Підхід_до_розробки_ЗОІС}) = \{\text{ОНТОЛОГІЧНИЙ, ФРАКТАЛЬНО_СТРАТИФІКОВАНИЙ, РАНГОВО_СТРАТИФІКОВАНИЙ, МІКРОСЕРВІСНИЙ, ШВИДКОГО_ПРОТОТИПУВАННЯ, КАРКАСНИЙ}\}.$$

$$f(\text{Методологія_гнучкої_розробки_ЗОІС}) = \{\text{AGILE}\}.$$

Використовувані підходи забезпечують дотримання згаданих вище принципів.

$$\text{Підхід_до_розробки_ЗОІС} \sqsubseteq \exists \text{забезпечує.Принцип_розробки_ЗОІС.}$$

$$\text{Методологія_гнучкої_розробки_ЗОІС} \sqsubseteq \exists \text{забезпечує.Принцип_розробки_ЗОІС.}$$

Модель ППр передбачає використання WEB, СІР, САР технологій: (рис. 2), а саме:

$$f(\text{Технологія_розробки_ЗОІС}) = \{\text{WEB, СІР, САР}\}.$$

Зазначені технології містять набір засобів, достатній для того, щоб процес розробки відповідав зазначеним принципам та був простим і інформативним. На рис. 3 представлені їх основні компоненти.

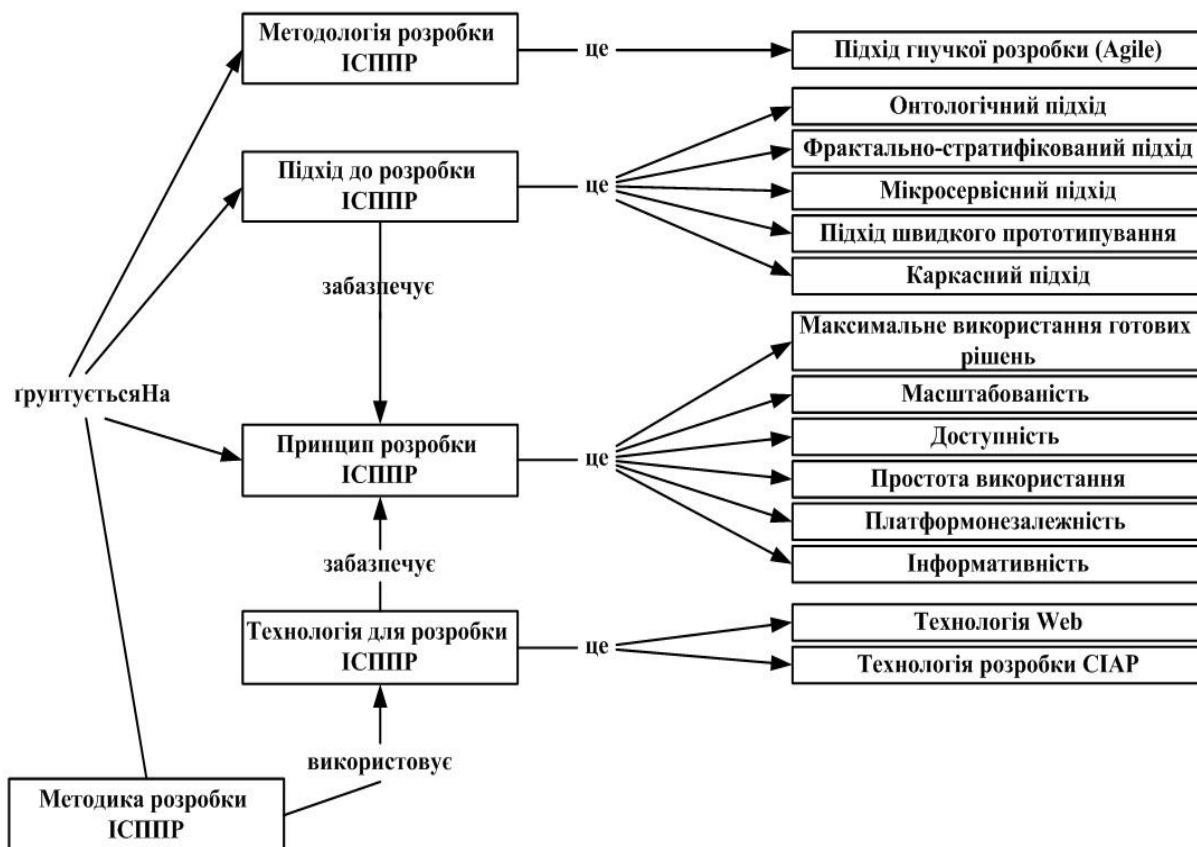


Рис. 2. Принципи та підходи розробки інтелектуальних ЗОІС

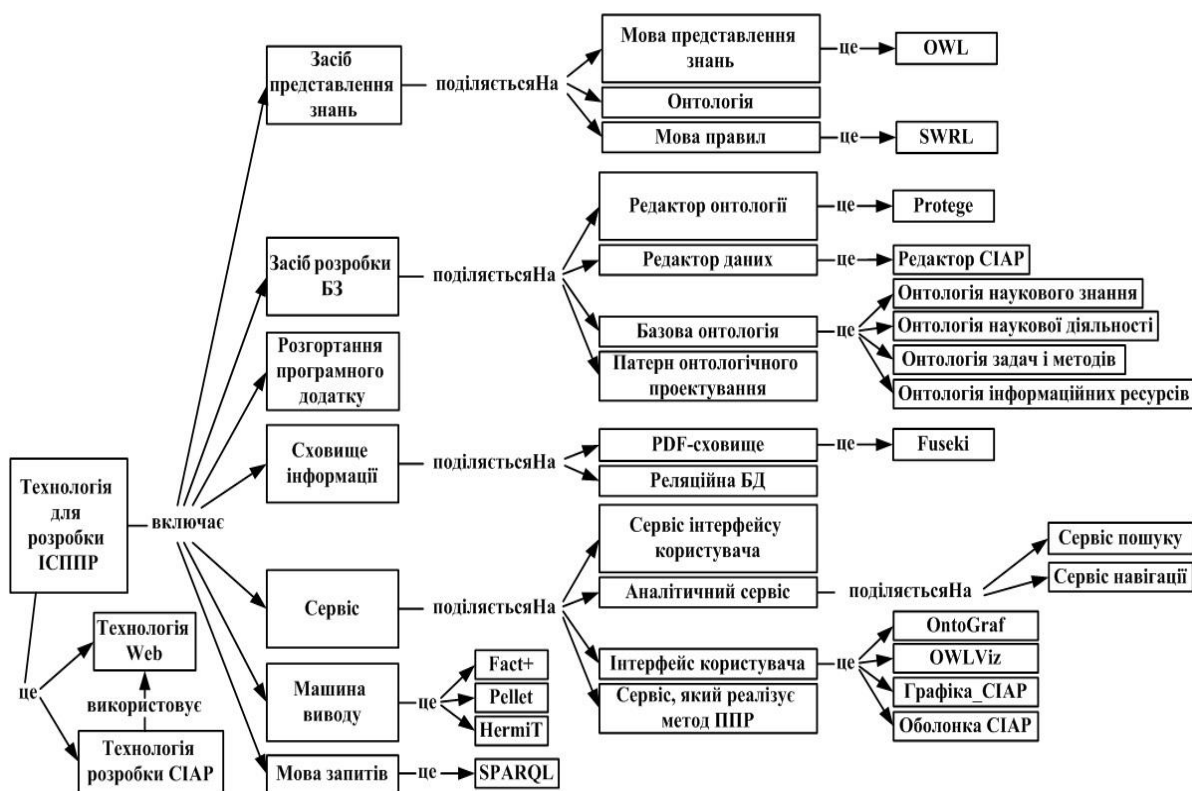


Рис. 3. Технології розробки ЗОІС та їх компоненти

Технологія_розробки_ЗОІС \supseteq \exists включає.[Засіб_подання_даних \sqcup Засіб_розробки_БЗн \sqcup Розгортання_програмного_додатку \sqcup Сховище_інформації \sqcup Сервіс \sqcup Машина_виводу \sqcup Мова_запитів].

У сучасних інтелектуальних системах знання, як правило, представлені на основі онтологій та правил виведення, що дозволяють отримувати нові знання такі, що не містяться в явному вигляді, в БЗн. Враховуючи можливості сучасних середовищ розробки програмних додатків, логічно (з метою залучення експертів Про на будь-якому етапі розробки ЗОІС) передбачити використання редакторів онтологій та редакторів даних. Спрощення розробки також може бути досягнуто за рахунок використання базових онтологій. Для збереження інформації можуть використовуватися різні типи сховищ. Функціональні можливості тієї чи іншої технології визначаються набором надаваних нею мікросервісів. Це можуть бути мікросервіси інтерфейсу користувача (введення даних/виведення результатів роботи ЗОІС); інформаційні мікросервіси, такі, що дозволяють здійснювати пошук необхідної інформації, навігацію по інформаційному наповненню ЗОІС, аналітичні мікросервіси, такі, що дозволяють отримати оцінку зрілості програмного забезпечення, отримати оцінку гарантоздатності програмних модулів; графічні мікросервіси; мікросервіси реалізації методів ППР. Для організації логічного виведення в онтології на основі аксіом та правил, а також перевірки онтології на несуперечливість, пропонується використовувати машини виведення.

Наступні аксіоми задають ієрархію понять моделі ППр, що описують зазначені технології:

Засіб_подання_даних \supseteq Мова_подання_даних \sqcup Онтологія \sqcup Мова_правил;
 Засіб_розробки_БЗн \supseteq Редактор_онтології \sqcup Редактор_даних \sqcup
 \sqcup Базова_онтологія \sqcup Патерн_онтологічного_проекування;
 Сховище_інформації \supseteq RDF_сховище \sqcup реляційна_БД;
 Сервіс \supseteq Сервіс_інтерфейсу_користувача \sqcup Аналітичний_сервіс \sqcup
 Інтерфейс_користувача \sqcup Сервіс_реалізації_методу_ППР \sqcup Інформаційний_сервіс;
 Інформаційний_сервіс \supseteq Сервіс_пошуку \sqcup Сервіс_навігації;
 Аналітичний_сервіс \supseteq Сервіс_оцінки_зрілості_ПЗ \sqcup
 \sqcup Сервіс_виявлення_маскованих_помилоч.

Змістова функція технології Web може бути представлена наступним

чином:

$$f(\text{включає}) = \{ \text{WEB}, (\text{OWL}, \text{PROTEGE}, \text{ONTOGRAF}, \text{OWLVIZ}, \text{FACT}, \text{PELLET}, \text{HERMIT}, \text{SPARQL}) \}.$$

Такий скорочений запис слід трактувати наступним чином: множина усіх пар відношень “включає”, першим елементом технологію Web, а другим - одну з компонент цієї технології, перерахованих в круглих дужках.

Змістові функції технологій СІР та САР можуть бути представлені наступним чином:

$$f(\text{включає}) = \{ \text{СІР}, (\text{РЕДАКТОР_СІР}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗНАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ДІЯЛЬНОСТІ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗАВДАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ІР}, \text{FUSEKI}, \text{ІНТЕРФЕЙС_СІР}) \}.$$

$$f(\text{включає}) = \{ \text{САР}, (\text{РЕДАКТОР_САР}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ППКП}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ПЗВЗ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗАВДАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_АР}) \},$$

де ППКП – помилка “Перетин критичних подій” та усі її модифікації,
ПЗВЗ – помилка “Забування відкладеного запису” та усі її модифікації.

При цьому технологія розробки СІР використовує компоненти і засоби Web.

$$f(\text{використовує}) = \{ (\text{СІР}, \text{WEB}) \}.$$

Технологія розробки САР використовує компоненти і засоби технології інформаційних систем.

$$f(\text{використовує}) = \{ (\text{САР}, \text{ТЕХНОЛОГІЇ_ІНФОРМАЦІЙНИХ_СИСТЕМ}) \}.$$

Змістовно конкретні компоненти даних технологій будуть застосовані при описі тих засобів ППр, для розробки яких вони використовуються.

ОНТОЛОГІЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.

Як було зазначено вище, засобом концептуальної підтримки розробки ЗОІС є онтологія ППр. На рисунку 4. показані основні компоненти онтології ППр та наведена їх деталізація, а також підходи, технології та конкретні компоненти технологій, що використовувалися для її розробки.

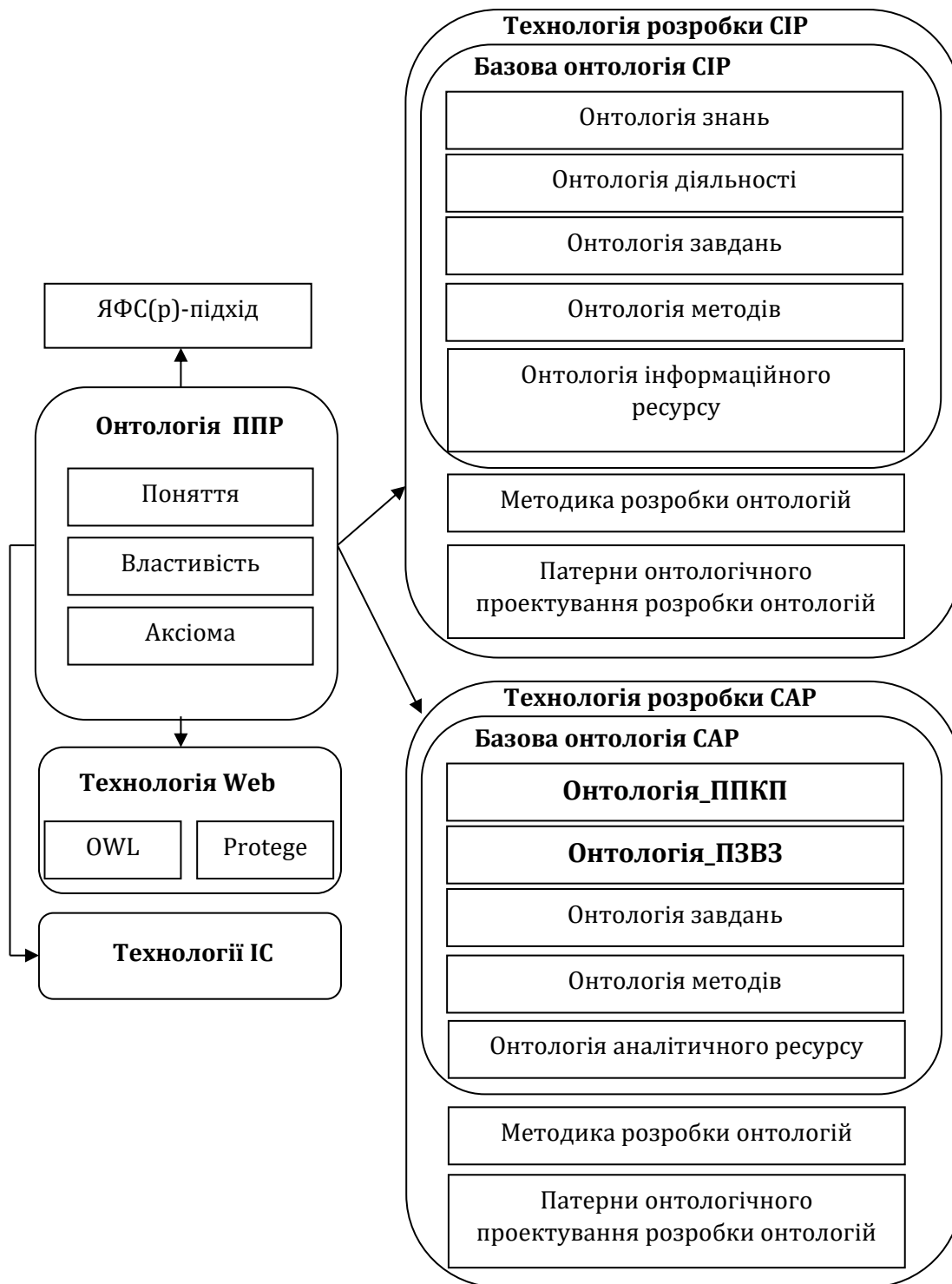


Рис. 4. Модель онтології ППР

Онтологія_ППР \sqsubseteq \exists включає. Елемент_онтології_п
 \sqsupset будується на основі. Базова_онтологія_СІР \sqsubset Базова_онтологія_САР;
 Елемент_онтології \sqsupset Поняття \sqsubset Символ \sqsubset Аксиома.
 ОНТОЛОГІЯ_ППКП, ОНТОЛОГІЯ_ПЗВЗ, ОНТОЛОГІЯ_ЗАДАЧ, ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ, ОНТОЛОГІЯ_АР)), ОНТОЛОГІЯ_ПРО_ППР}}.

Функція опису методів, підходів та принципів, які використовуються матиме наступний вигляд:

$$f(\text{використовуєтьсяДляРозробки}) = \{((\text{ЯСФ}(P), \text{МЕТОДИКА_РОЗРОБКИ_ОНТОЛОГІЙ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗНАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ДІЯЛЬНОСТІ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗАДАЧ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_IP}), (\text{ЯСФ}(P), \text{МЕТОДИКА_РОЗРОБКИ_ОНТОЛОГІЙ},$$

Такий скорочений запис формалізовано описує множину всіх пар відношення “використовуєтьсяДляРозробки”, першим елементом якого є підхід, або компонент технологій, що використовується при розробці онтології, а другим - онтологія Про ППР.

В свою чергу, базові онтології СІР та САР матимуть формалізований вигляд:

$$f(\text{Базова_онтологія_СІР}) = \{ \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗНАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ДІЯЛЬНОСТІ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗАВДАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ІНФОРМАЦІЙНОГО_РЕСУРСУ} \};$$

$$f(\text{Базова_онтологія_САР}) = \{ \text{ОНТОЛОГІЯ_ППКП}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ПЗВЗ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_ЗАВДАНЬ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_МЕТОДІВ}, \text{ОНТОЛОГІЯ_АНАЛІТИЧНОГО_РЕСУРСУ} \}.$$

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ РЕСУРС ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.

Засобом інформаційної підтримки процесів розробки ЗОІС є спеціалізований інформаційний ресурс по ППР.

Інформаційна підтримка полягає в наданні користувачам змістовного доступу до онтології ППР і до систематизованої відповідно до онтології інформації про розглядаємо Про для забезпечення доступу до методів обробки інформації і вирішення завдань (з відкритим кодом).

На рисунку 5 представлена модель СІР. Ресурс будується на основі оболонки інформаційного ресурсу (ІР), що надається технологією розробки ІР.

$$f(\text{будуєтьсяНаоснові}) = \{ \text{СІЗ_ППР}, \text{ОБОЛОНКА_ІР} \}$$

Компоненти СІР діляться на три основних типи:

$\{ \text{СІР_ППР} \} \sqsubseteq \exists$ включає. Компонент_СІР;

Компонент_СІР \sqsupseteq База_знань \sqcup Контент \sqcup Сстемний_сервіс;

База_знань $\sqsubseteq \exists$ містить. [Онтологія \sqcup Правило_виведення].



Рис. 5. Модель спеціалізованого інформаційного ресурсу (СІР)

Інформаційне наповнення ресурсу, його контент, утворюють об'єкти двох видів - інформаційні та мережеві.

Контент $\sqsubseteq \exists$ містить. [Інформаційний_об'єкт \sqcup Мережевий_об'єкт]

Інформаційні об'єкти - це конкретні екземпляри понять онтології. Вони надають систематизовану інформацію відповідно до онтології розглядаємої ПрО. Інформаційні об'єкти можуть описувати як реальні об'єкти (наприклад, літак), так і об'єкти, що являються мережевими об'єктами (наприклад, веб-сервіс).

Інформаційний_об'єкт \sqsupseteq Опис_реального_об'єкта \sqcup
 \sqcup Опис_мережевого_об'єкта.

Мережеві об'єкти можуть бути як інтегровані в СІР, тобто міститися в його контенті, так і розташовуватися в іншому місці (за умови застосування розподіленої системи). Кожен інтегрований мережевий об'єкт обов'язково повинен описуватися відповідним інформаційним об'єктом.

Мережевий_об'єкт \sqsupseteq ІР \sqcup Прикладний_сервіс;

Мережевий_об'єкт $\sqsubseteq \exists$ описується. Опис_мережевого_об'єкта.

Під інформаційними ресурсами розуміються довільні ресурси, доступні архітектору, інженерам зі знань та програмістам через комп'ютерні засоби зв'язку (бази даних, текстові або мультимедіа

документи і т.д). Всі інформаційні об'єкти СІР можуть бути пов'язані з інформаційними ресурсами різних типів.

$$IP \sqsubseteq \exists \text{маєТип. Тип_IP}$$

$$f(\text{Тип_IP}) = \{ \text{БАЗА_ДАННИХ, ДОКУМЕНТ} \}$$

Прикладні сервіси призначені для вирішення завдань Про. Наявність таких сервісів в контенті є особливістю СІР ППР. Користувач не просто отримує інформацію про методи реалізації або посилання на власне на реалізацію методу іншою групою розробників. Програміст має можливість безпосередньо на ресурсі застосовуючи можливості аналітичного сервісу виконати аналіз його роботи з різними вхідними даними. СІР ППР надає також доступ до сервісів, які мають програмні інтерфейси з відкритим кодом. Семантичні описи цих сервісів суттєво спрощують їх використання в прикладних ЗОІС.

Системні сервіси визначають базову функціональність СІР ППР, характерну для подібних ресурсів.

$$\text{Системний_сервіс} \sqsubseteq \text{Сервіс_керування_логічним_виведенням} \sqcup$$

$$\text{Сервіс_керування_онтологією_та_контентом}$$

Сервіс керування логічним виведенням дозволяє отримувати інформацію, не представлену в явному вигляді в контенті СІР, за рахунок інтерпретації аксіом і правил виведення, що містяться в БЗн. Сервіси керування онтологією і контентом здійснюють перевірку онтології і контенту на сумісність, дозволяють вводити і редагувати інформаційні та мережеві об'єкти, надають можливість пошуку, навігації по онтології і контенту СІР. Сервіси візуалізації дозволяють відображати дані в табличному або графічному вигляді [15]. Сервіси візуалізації, відображаючи інформацію у вигляді графіків і діаграм та сприяють підвищенню її наочності і дозволяють провести більш якісний її аналіз.

Для розробки СІР ППР пропонується використовувати наступні підходи і технології:

$$f(\text{використовуєтьсяДляРозробки}) = \{ \text{ОНТОЛОГІЧНИЙ_ПІДХІД, МІКРОСЕРВІСНИЙ_ПІДХІД, WEB, SWRL, ТЕХНОЛОГІЇ_РОЗРОБКИ_СІР, ОБОЛОНКА_СІР, ІР_ППР ДОКУМЕНТ} \}.$$

МОДЕЛЬ СХОВИЩА МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.

Засобом компонентної підтримки архітектора, інженера зі знань та програміста є сховище методів ППР. Модель сховища представлена на рисунку 6 та описується наступним чином:

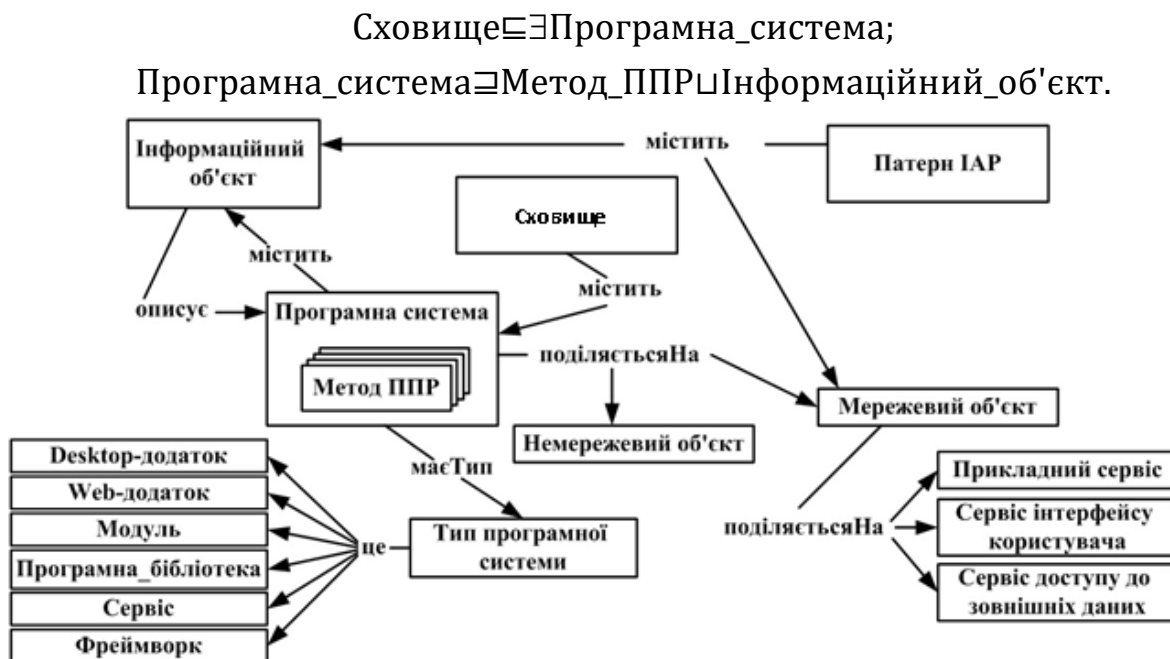


Рис. 6. Модель сховища методів ППР

Наступні аксіоми описують підкласи і ролі компонентів сховища, а також їх зв'язок з контентом СІР:

Програмна_система $\sqsubseteq \exists$ поділяєтьсяНа. [Мережевий_об'єкт \sqcup Немережевий_об'єкт]

Програмна_система $\sqsubseteq \exists$ маєТип. Тип_програмної_системи $\sqcup \exists$ реалізує. Метод_ППР $\sqcup \exists$ містить. Інформаційний_об'єкт;

Інформаційний_об'єкт $\sqsubseteq \exists$ описує. Метод_ППР;

$f(\text{Тип_програмної_системи}) = \{\text{ДЕСКТОП_ДОДАТОК, WEB_ДОДАТОК, МОДУЛЬ, ПРОГРАМНА_БІБЛІОТЕКА, СЕРВІС, ФРЕЙМВОРК}\}$

Початкове наповнення сховища методів ППР та вихідного коду, що їх реалізує може бути представлено наступним чином:

$f(\text{Метод_ППР}) = \{\text{АНКЕТУВАННЯ, ЙМОВІРНІСНЕ_МОДЕЛЮВАННЯ, КОГНІТІВНЕ_МОДЕЛЮВАННЯ, НЕДОВИЗНАЧЕНІ_ОБЧИСЛЕННЯ, ОНТОЛОГІЧНЕ_МОДЕЛЮВАННЯ, СУДЖЕННЯ_НА_ОСНОВІ_ПРЕЦЕДЕНТОВ,}$

СУДЖЕННЯ_НА_ОСНОВІ_ПРАВИЛ};

f (Програмна_система) = {СМАР_TOOLS, COLIBRI, GOOGLE_FORMS, SEMP_TAO, NETICA, NEMO +, PROTEGE, CLIPS, GRM_ONTO_MAP, GRM_COG_MAP, GRM_EVENT_MAP, WEB, SEMP_NEMO, UNICALC }.

Для розробки сховища пропонується використати наступні технології:

f (використовуєтьсяДляРозробки) =
{((ОНТОЛОГІЧНИЙ_ПІДХІД, МІКРОСЕРВІСНИЙ_ПІДХІД,
ТЕХНОЛОГІЯ_WEB), СХОВИЩЕ)}.

Доступ до сховища, до опису методів та вихідного коду, надається через СІР ППР:

f (забезпечуєДоступ) = {(СІР_ППР, СХОВИЩЕ)}.

Розробка сховища полягає в розробці нових методів ППР та мікросервісів, що забезпечують їх реалізацію, інтеграцію цих методів і програмних систем, а також знаходяться узгодження з готовими програмними рішеннями з ІР ППР. Інтеграція кожного реалізованого методу, в свою чергу, полягає в створенні в контенті СІР ППР інформаційного об'єкта, що описує його програмну реалізацію, його тип, зв'язки з іншими об'єктами, інструкціями щодо застосування, формат використовуваних даних, порядок доступу.

{МЕТОДИКА_РОЗРОБКИ_СХОВИЩА_МЕТОДІВ_ППР} \subseteq \exists пропонує.
{АЛГОРИТМ_РОЗРОБКИ_СХОВИЩА} \cap \exists базується На. [Принцип_розробки_ЗОІС] \cap {МІКРОСЕРВІСНИЙ_ПІДХІД} \cap \exists
використовує. Технологію_мікросервісів {АЛГОРИТМ_РОЗРОБКИ_СХОВИЩА} \subseteq \exists включає Дію. Дія;
Дія \subseteq Розробка_методу_ППР \cap Розробка_мікросервісу \cap Інтеграція_методу_з_ІР_ППР.

АРХІТЕКТУРНІ РІШЕННЯ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ЗОІС.

Відповідно до запропонованої моделі основним компонентом для будь-якої ЗОІС являються СІР та САР на які у вигляді мікросервісів будуть нарощуватися інтерфейсні та функціональні компоненти у відповідності до ПрО. База знань будується на основі онтології ПрО. Мікросервіси, що включаються в архітектуру ЗОІС, вибираються із сховища методів ППР, а

інформаційні об'єкти, що їх описують – з онтології ППР і контенту СІР ППР (для програмних додатків з відкритим кодом) та з САР ППР (для програмних додатків з закритим кодом).

На рисунку 7 показані архітектурне рішення щодо реалізації інформаційно – аналітичної підтримки процесу розробки ЗОІС та схема взаємодії елементів запропонованого рішення.

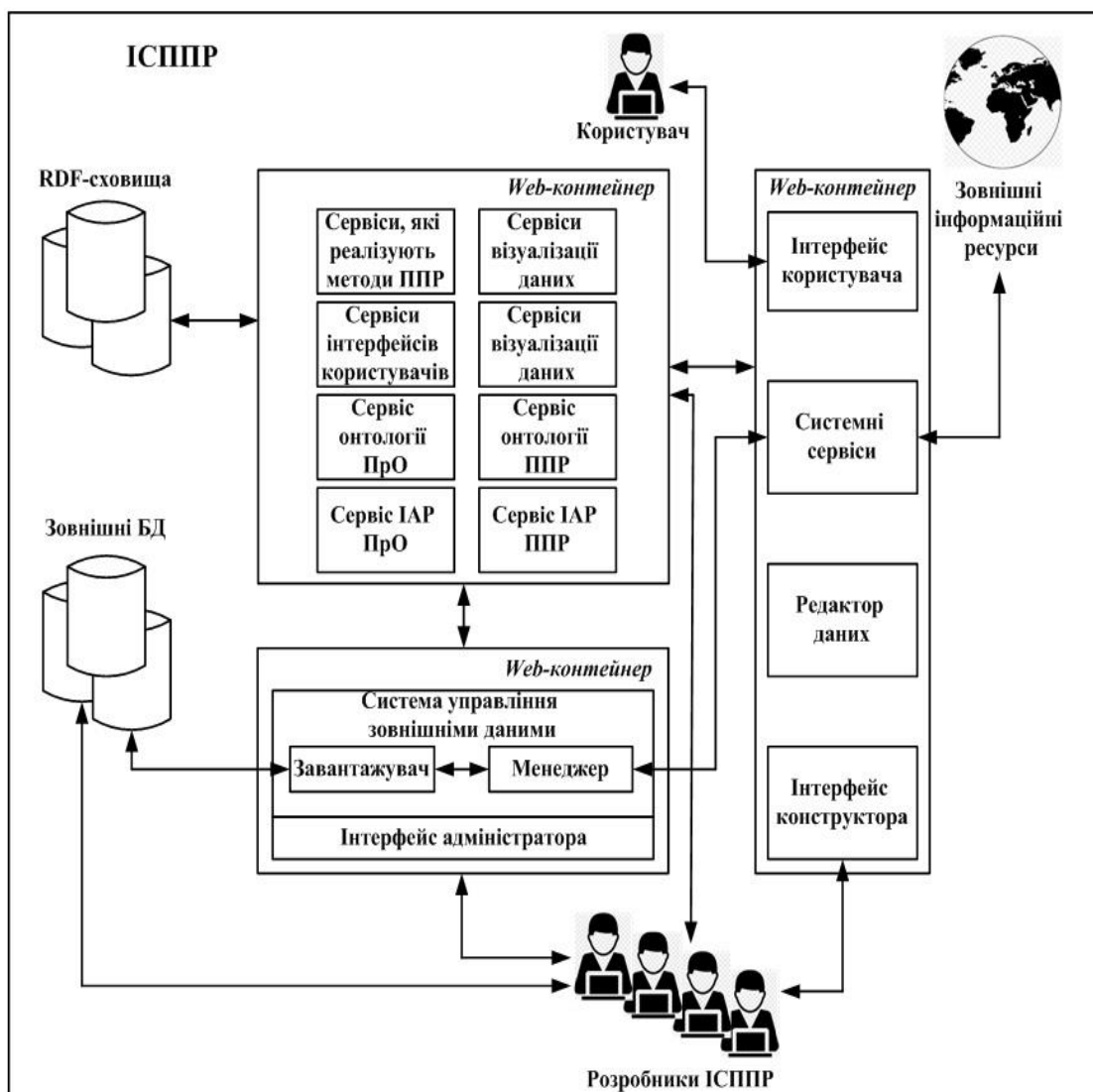


Рис. 7. Архітектурне рішення щодо реалізації інформаційно – аналітичної підтримки процесу розробки ЗОІС

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Модель інформаційно – аналітичної підтримки процесів розробки ЗОІС - це сукупність методів, засобів, принципів, підходів, технологій, та алгоритмів, призначених для забезпечення усіх стейкхолдерів

зазначеного процесу актуальними в будь який момент часу аналітичними, методичними та програмними ресурсами.

Основними методами ППр є способи роботи з інформацією про методи і аспекти ППр – їх систематизація та забезпечення змістовного доступу до них, а також до реалізацій методів ППр та методик розробки ЗОІС. Засобами, що реалізують методи концептуальної, інформаційної, компонентної і методичної підтримки є, відповідно, онтологія ППр, СІР ППр, САР ППр, сховище методів ППр та методика розробки ЗОІС.

Онтологія систематизує інформацію про ПрО «Підтримка прийняття рішень» і забезпечує розробників ЗОІС єдиним концептуальним базисом.

Спеціалізований інформаційний ресурс, який базується на онтології ППр, є засобом змістовного доступу як до інформації про ПрО, так і до сховища методів ППр.

Методика розробки сховища базується на мікросервісному підході та принципі використання готових рішень. Принципи та підходи покладені в основу методики, обумовлюють наступні її основні особливості: націленість на слабоформалізовані ПрО; незалежність від ПрО; націленість на використання готових розробок (як авторських, так і сторонніх); використання технологій Web і мікросервісного підходу, технологій розробки СІР та САР; використання оболонок СІР та САР в якості каркаса ЗОІС; масштабованість пропонованих засобів; зручність і адаптивний поріг щодо кваліфікаційних вимог при використанні пропонованих засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Павленко М.А., Осієвський С.В., Золотухіна О.А., Модель підтримки процесів розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2020. № 4 (69) 130 – 139 с. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.045051
- [2] Manuel Mora, Guisseppi A. Forgionne, Jatinder N. D. Gupta (2002), Decision-Making Support Systems: Achievements and Challenges for the New Decade. Idea Group Publishing. 437 p.
- [3] Power D. J. A Brief History of Decision Support Systems. <http://dssresources.com/history/dsshistory.html>
- [4] Pushkar O. I. (2014) Support systems for solutions of weakly formalized problems of enterprise development. Kharkiv. RVV KhDEU. 140 p.
- [5] Zahorulko H.B. (2019) "Model kompleksnoi podderzhky razrabotky yntellektualnikh SPPR. Ontolohyia proektyrovanyia". Vol. 9. №4(34). P. 462 – 479.
- [6] Larychev O. Y., Petrovskiy A. V. (1987), " Decision support systems: current status and prospects for their development". Ytohy nauky u tekhnky. Tekhnicheskaya kybernetyka. Vol.21. P. 131 – 164.
- [7] Schmidt-Schau, M.; Smolka, G. (1991). Attributive concept descriptions with complements. Artificial Intelligence 48 (1): 1–26. Baader F. The Description Logic Handbook: Theory,

- Implementation, Applications / F. Baader, D. Calvanese, D.L. McGuinness, D. Nardi, P.F. Patel-Schneider. Cambridge, 2003. 574 P. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // *Онтология проектирования*. 2016. Т. 6. № 2 (20). С. 149-161.
- [8] Carnell J. *Spring Microservices in Action* / John Carnell., 2017. – 384 с.
- [9] Fowler M. *Microservices. a definition of this new architectural term* [Електронний ресурс] / Martin Fowler. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>.
- [10] Power D J., *Decision Support Systems Hyperbook*. Cedar Falls, IA:DSSResources.COM, HTML version, 2000. URL: <http://dssresources.com/subscriber/password/dssbook>
- [11] Garaibeh N.K. *DSS Development and Agile Methods: Towards a new Framework for Software Development Methodology* // *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 2, No. 4, August 2012 URL: https://www.researchgate.net/publication/267625331_Survey_of_DSS_Development_Methodologies
- [12] Zagorulko Yu., Borovikova O., Zagorulko G. *Pattern-Based Methodology for Building the Ontologies of Scientific Subject Domains*. In: *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques*. Proceedings of the 17th International Conference SoMeT_
- [13] H. Fujita and E. Herrera-Viedma (Eds.). *Series: Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 303. Amsterdam: IOS Press, 2018. P. 529–542. DOI 10.3233/978-1-61499-900-3-529. (Scopus)
- [14] Голубничий, Д., Третяк, В., Костенко, І., Поляцко, В., Апполонов, О., Крук, Б., & Закиров, З. (2021). Експериментальне дослідження алгоритмів рішення задач дискретної оптимізації на основі рангового підходу та принципу оптимізації за напрямком. *InterConf*, (58), 324-337. <https://doi.org/10.51582/interconf.21-22.05.2021.034>
- [15] Третяк, В., Голубничий, Д., Коломійцев, О., Мегельбей, Г., Возний, О., & Філіпенков, О. (2020). Математична модель рангового підходу. *Збірник наукових праць ЛОГОС*, 116-122. <https://doi.org/10.36074/25.12.2020.v1.40>
- [16] Третяк, В., & Пашнева, А.(2017) Оптимізація структури сховища даних у вузлах інфокомунікаційної мережі хмарного середовища. *Системи управління, навігації та зв'язку*. № . 4 (44). – С. 122-128.
- [17] Третяк В.Ф., Осієвський С.В., Лук'янчук В.В., Власов А.В., Крук Б.М., Савельєв А.М. & Авдєєв В.Ф. (2020). Спосіб оптимального розподілу засобів захисту інформації на основі рангового підходу до рішення задачі цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними. *Scientific Collection «InterConf»*, (38): with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Science, Education, Innovation: Topical Issues and Modern Aspects» (December 16-18, 2020) in Tallinn, Estonia; pp. PP. 1309-1317. Available at: <https://www.interconf.top/archive.html>
- [18] Патент на корисну модель № 9 2959, Україна, МПК G06 F15/00. Спосіб динамічного кодування та захисту інформаційного ресурсу в інфокомунікаційних системах / В.Ф. Третяк, В.В. Бараннік та ін. – № u201403988; заяв. 14.04.2014; опубл. 10.09.2014; Бюл. № 17. – 5 с.

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПЕРЕВІЗНИКА

КУНДА Неоніла Тарасівна 

канд. техн. наук, доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю
Національний транспортний університет

УКРАЇНА

Анотація: *На ефективність роботи підприємства, що виконує перевезення вантажів, значний вплив справляє вибір перевізника. Проаналізовано критерії вибору, що набули найбільшого поширення – вартість послуги, час та швидкість доставки, надійність перевезення, провізна спроможність та ін. Описано процедуру вибору перевізника, етапи якої включають формування переліку критеріїв, ранжування, оцінювання претендентів, використання додаткових параметрів вибору. Надано стислу характеристику ряду методів вибору перевізника (метод рейтингових оцінок, метод матриць, метод ієрархій, метод елімінування, метод домінуючих характеристик, метод оцінки витрат, метод врахування технологічних параметрів. Наведено приклад оцінювання перевізника з використанням методу експертних оцінок.*

ВСТУП.

Своєчасна і якісна доставка вантажу є основною вимогою споживача транспортних послуг у ринкових умовах. Задовольнити таку вимогу можливо із застосуванням логістичних принципів, втілених у певних керуючих алгоритмах, заснованих на різних економіко-математичних методах, які дозволяють оптимізувати роботу окремих елементів транспортного процесу й об'єднати ці елементи в єдину систему.

Для підприємств, що здійснюють доставку вантажу, однією з першочергових задач є вибір надійного перевізника. З позицій логістики постачання очевидно, що від того, наскільки добре перевізники виконують свої обов'язки, залежить успіх і компанії-постачальника, і компанії-покупця в забезпеченні споживачів якісними товарами та послугами.

Якщо підприємство вирішило віддати перевезення на аутсорсинг сторонній фірмі, то її підбирають, використовуючи різні засоби, підходи, можливості: вивчають фахові каталоги, аналізують рекламні оголошення в різних ЗМІ, оголошують конкурс тощо. Далі складають

перелік потенційних перевізників, інформація про яких є основою для подальшої аналітичної роботи.

Задача вибору оптимального перевізника вирішується на основі певних критеріїв з використанням широкого спектру математичних методів [1].

Це досить складна і багатокритеріальна задача. У загальному випадку встановлення системи критеріїв залежить від виробничої та логістичної стратегій конкретного підприємства, причому в умовах жорсткої конкуренції та нестабільної економічної ситуації ця конструкція є мінливою та може змінюватися навіть протягом короткочасного періоду.

ОСНОВНА ЧАСТИНА.

Проаналізуємо критерії, що набули найбільшого поширення. В багатьох випадках за основний критерій при виборі перевізника беруть ціну (вартість) послуги. За вартісним критерієм вибір здійснюється за результатами порівняльного аналізу витрат при різних варіантах доставки, які напряду залежать від відстані перевезення та обсягу вантажу, прийнятого до транспортування. На думку більшості зарубіжних фахівців з постачання і логістики це недоцільно, адже ціна - це те, про що можна домовитися, і вона не повинна бути головним критерієм при виборі перевізника.

Критерій швидкості доставки є похідним від вартісного критерію.

Критерій часу доставки є вирішальним у випадках перевезення швидкопсувних вантажів або термінових замовлень. Тому часто вартість перевезення ставлять на друге місце, а з двох перевізників перевага віддається тому, який зможе доставити товар в мінімальні терміни.

Критерій якості транспортування є комплексним критерієм, що включає широкий перелік вимог, як то дотримання термінів окремих операцій та часу повного циклу доставки, збереження цілісності товарів, індивідуальний підхід до обслуговування клієнта, висока репутація перевізника на міжнародному ринку, наявність системи управління ризиками, страховий захист тощо.

Отже, вибір перевізника визначається цілою системою критеріїв, але зазвичай основними критеріями вибору є ціна, якість товару і надійність доставки. Кількість параметрів вибору може бути різна – від двох-трьох одиниць до десятків – залежно від поставленої задачі, але незалежно від

специфіки задачі найважливішими вважаються надійність і прийнятна ціна. Надійність перевезення характеризується такими параметрами, як час перевезення, збереження вантажу та споживчих властивостей товарів при перевезенні, кваліфікація персоналу, стабільність надання послуг. Наприклад, стабільність надання транспортних послуг дуже важлива для фірми з постійним рухом товарів, яка укладає постійний договір з певним перевізником, що може задовольнити потребу в перевезенні незалежно від обсягу вантажу чи сезону.

Також важливим критерієм є і провізна спроможність того чи іншого перевізника. Наприклад, при перевезенні товарів невеликими партіями раціонально вибрати автомобілі з невеликою вантажопідйомністю, ставки на які нижчі, ніж на великотоннажні вантажівки.

При детальному аналізі звертаються і до таких критеріїв як терміни виконання поточних і термінових заявок, екологічність транспортних засобів та наявність резервного автопарку, можливість переадресування вантажу в дорозі; контроль за рухом товару, відповідність вимогам стандартів управління якістю обслуговування (ISO) фінансовий стан перевізника та ін. При організації доставки різних видів вантажів критерії вибору можуть відрізнятися через різні властивості вантажів, параметри замовлення та інші фактори, що мають вплив на вартість та якість транспортування товарів, при цьому вони ранжуються залежно від їх важливості для замовника.

Представимо в табл.1 критерії, що найчастіше використовуються при виборі перевізника, проранжовані у традиційному порядку значущості, де ранг 1 – найвищий, ранг 10 – найнижчий [2].

Таблиця 1

Основні критерії вибору перевізника

Критерій	Ранг
Загальний час доставки вантажу	1
Тарифи на перевезення вантажу	2
Збереження цілісності вантажу	3
Репутація перевізника та досвід роботи на транспортному ринку	4
Фінансова стабільність перевізника	5
Можливість переадресування вантажу в дорозі	6
Контроль за рухом товару в дорозі	7
Кваліфікація персоналу фірми	8
Регулярність роботи транспорту	9
Гнучкість маршрутів	10

Зважаючи на важливість прийняття рішення, від якого залежать тривалість виконання перевезення, можливість доставки точно в строк, логістичні та транспортні витрати, репутація підприємства, розроблено відповідні алгоритми і методи. Загалом процедура вибору перевізника проводиться в декілька етапів (табл.2).

Таблиця 2

Етапи узагальненої процедури вибору перевізника

Етап	Зміст
1	Формування переліку критеріїв, за якими буде проводитися оцінка послуг перевізників і які є релевантні для даного підприємства.
2	Ранжування – визначення «ваги» кожного критерію (параметра)
3	Попередній вибір перевізника: збирання інформації про надання транспортних послуг та їх вартість, порівняння провізних можливостей, оцінка фінансової стабільності, надійності та репутації фірм-перевізників на транспортному ринку
4	Оцінювання претендентів за обраними критеріями до отримання кількісних, якісних або релейних їх значень.
5	Визначення переваг претендентів: ранжування перевізників по заданому переліку критеріїв (параметрів) та обчислення переваг за цільовою функцією (мінімальний час, максимальний прибуток, прийнятна вартість послуги, допустимі витрати тощо)
6	Аналіз результатів визначення переваг претендентів по відношенню до кожного параметра. Формування списку претендентів-перевізників, ранжованих за цільовою функцією
7	Додаткові параметри вибору: якщо системі обраних критеріїв відповідають кілька перевізників, їх ранжують повторно за додатковими параметрами

До якісних критеріїв (параметрів, факторів) відносять такі, які оцінюються вербально (добре, погано, краще, гірше тощо), до релейних – ті, що мають лише два значення: «так» чи «ні». [21].

При проведенні процедури вибору застосовують методи експертних оцінок, такі як метод зважування чи метод попарних порівнянь; методи дослідження операцій, такі як теорія ігор та статистичних рішень; методи кваліметрії та теорії важливості критеріїв, метод розмитих коефіцієнтів, математичний апарат теорії нечітких множин.

Незважаючи на різноманіття математичних підходів, вибір перевізника здійснюється за описаною вище процедурою: в першу чергу складається перелік критеріїв, відповідно до яких будуть обирати перевізника; далі виконується ранжування критеріїв, потім проводиться

оцінка перевізників у відповідності до обраних критеріїв: розраховуються рейтинги перевізників та проводиться порівняльний аналіз, за результатами якого приймається рішення про вибір перевізника.

Надамо стисло характеристику деяких з методів вибору перевізника.

Метод рейтингових оцінок - серед найбільш поширених. Відбір критеріїв (параметрів, факторів) та ранжування (визначення їх ваги) проводиться, як правило, експертним шляхом із залученням незалежних експертів або службовців логістичних відділів. Значення рейтингу визначається шляхом підсумовування добуток ваг критеріїв на їх експертні бальні оцінки (наприклад, по 10-бальній шкалі) для кожного перевізника. Приклад розрахунку рейтингу перевізника наведено в табл.3 [3].

Таблиця 3

Розрахунок рейтингу перевізника

Критерій вибору постачальника	Питома вага критерію	Оцінка значущості критерію за 10-бальною шкалою	Добуток питомої ваги критерію на оцінку
Фінансова стабільність	0,20	7	1,40
Вартість транспортних послуг	0,20	9	1,80
Гнучкість маршруту транспортних засобів	0,15	8	1,20
Можливість переадресування вантажу в дорозі	0,15	6	0,90
Наявність додаткових послуг по експедиційному обслуговуванню, комплектації і доставці вантажу	0,10	4	0,40
Контроль руху товару в дорозі з допомогою засобів зв'язку	0,10	5	0,50
Регулярність роботи транспорту	0,05	3	0,15
Екологічність транспортних засобів	0,05	2	0,10
Разом	1,00		6,45

Розрахувавши рейтинги для всіх претендентів і порівнявши результати, визначають оптимального (за заданою цільовою функцією) перевізника. Якщо кінцева рейтингова оцінка за основними критеріями збігається для двох і більше перевізників, то процедуру порівняння повторюють вже із застосуванням додаткових критеріїв оцінки (рис.1).

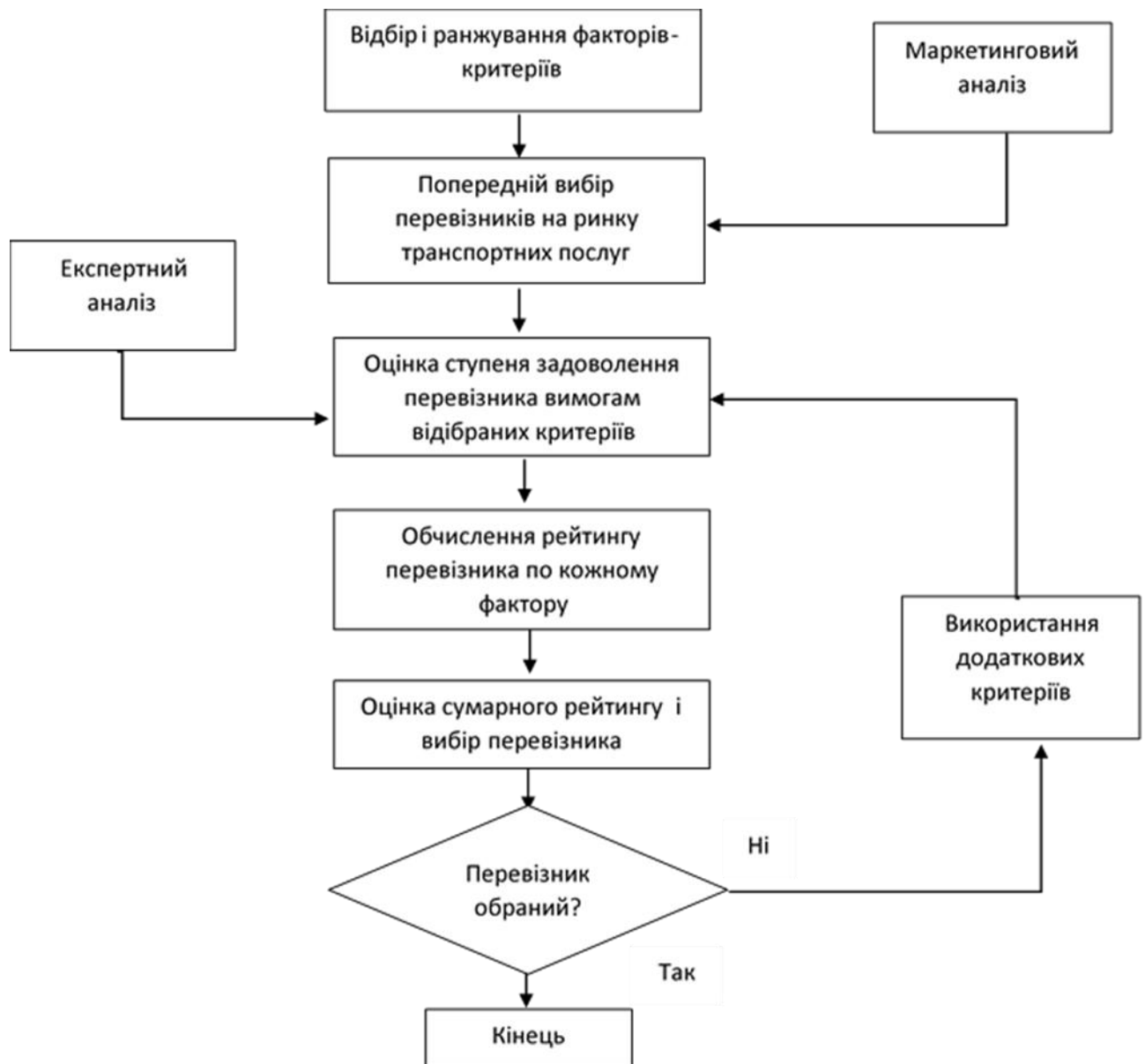


Рисунок 1. Схема алгоритму вибору перевізника за методом рейтингових оцінок

Метод матриць також застосовується для вирішення завдання вибору перевізника, якщо проводиться аналіз стану ринку транспортних послуг (вартість, доступність, потреба в послугах, конкуренти). Математичною моделлю процедури вибору є матриця, в рядках якої вказують обсяги заявок на перевезення, у стовпчиках – потенційних перевізників, на перетині рядків і стовпчиків – вартість послуг. Замовник послуги може вибрати оптимального перевізника, визначивши по стовпчиках найменші витрати. При остаточному виборі враховують також умови поставки, тарифи, якість обслуговування, які оцінюються за бальною системою, що тягне за собою ускладнення формалізації задачі і

є певним недоліком методу матриць.

Метод аналізу ієрархій (МАІ) застосовують при прийнятті рішень за умов обширної, але недостовірної інформації. Будується модель, що включає в себе ціль, критерії, альтернативи та має ієрархічну структуру. Ціль є вершиною ієрархії; критерії вибору (фактори, показники) утворюють проміжний рівень і пов'язують ціль з альтернативами (варіантами досягнення цілі), що представляють нижній рівень (рис. 2). МАІ відноситься до бально-рейтингових методів та використовується в СППР (системах підтримки прийняття рішень) для моделювання в умовах невизначеності.

Метод елімінування полягає у послідовному виключенні з процедури вибору параметрів (факторів, критеріїв). Термін «елімінування» означає вибіркове освітлення, усунення, виключення. Для оцінки претендента аналіз проводиться індивідуально по кожному параметру послідовно, методично, починаючи з найзначимішого і до менш значимих. Таким чином виключають вплив на величину результуючого показника всіх параметрів, крім одного. До переліку параметрів, що характеризують перевізника і вказані в табл. 1, можна включити зручність часу відправлення, точність часу прибуття до пункту призначення, гарантії цілісності та збереженості вантажу тощо.

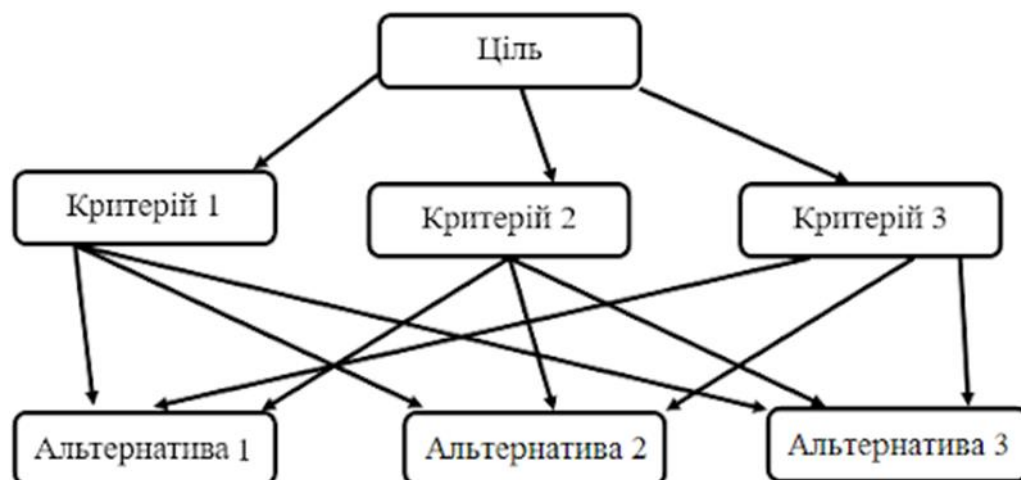


Рисунок 2. Структура зв'язків при виборі перевізника за методом ієрархій

Метод домінуючих характеристик ґрунтується на виборі тільки одного фактора (критерію) для оцінки перевізника. Це може бути прийнятна ціна послуги, висока якість обслуговування, зручний графік

перевезення, висока частота поставок та інші характеристики, які є значимими для замовника послуг. Метод простий у застосуванні, але має недолік: не враховуються інші критерії вибору.

Метод оцінки витрат (інакше затратно-коефіцієнтний або метод місій) полягає в тому, що досліджуваний процес поділяється на кілька можливих варіантів (місій) і ретельно розраховуються всі витрати і доходи для кожного з них. Дані, отримані за результатами розрахунків, використовують для порівняльного аналізу і подальшого вибору або для коригування варіантів рішень (місій). Окремо для кожного з претендентів-перевізників розраховують витрати і доходи на здійснення перевізного процесу, а потім з набору варіантів вибирають оптимальний за критерієм прибутку або іншим комерційного характеру. Метод оцінки витрат відноситься до методів ранжування критеріїв за важливістю та використовується в процедурі вибору перевізника з метою мінімізації витрат по реалізації прийнятого рішення. Застосування методу ускладнюється необхідністю у значному обсязі інформації про кожного перевізника.

Метод врахування технологічних параметрів ґрунтується на взаємозв'язках між фізичними характеристиками вантажів (як то обсяг, маса, співвідношення вартість/вага) технологічними характеристиками системи перевезень (наприклад, швидкість і частота перевезень, наявність альтернативних маршрутів). Таким чином, вибір перевізника роблять згідно з технологічними параметрами, які вибираються з практичних міркувань; найчастіше це відстань і тривалість перевезення, вид, вага і вартість вантажу, обсяг вантажу, що перевозиться, за звітний період [4, 5].

У розглянутих методах припускається, що замовник послуги аналізує кожен параметр (критерій) та всі можливі альтернативи (варіанти вибору), однак це практично нездійсненні умови, особливо в ситуаціях, коли потрібно врахувати багато параметрів. Здебільшого замовник виключає частину параметрів з розгляду, тим самим спрощуючи задачу вибору.

Розглянемо особливості **комплексного підходу до вибору перевізника** на прикладі діяльності трьох вітчизняних транспортних підприємств, що займаються перевезенням вантажів у міжнародному сполученні, серед яких треба обрати одне. Будемо враховувати теоретичні та практичні аспекти прийняття рішення.

Для процедури вибору застосуємо метод експертних оцінок, що базується на використанні досвіду, інтуїції та знань експертів - спеціалістів у певній фаховій галузі. В нашому випадку експерти – це високопрофесійні фахівці, з великим практичним досвідом у галузі транспортної логістики.

Критерієм методу є досягнення згоди серед усіх членів експертної групи. За методикою, експерти відповідають на питання заздалегідь розробленої анкети-опитувальника, пов'язаної з досліджуваною проблемою, Кожен експерт фіксує свою думку про проблему, а потім повідомляє про неї своїм колегам. У випадку розбіжності його прогнозу з думками інших експерт зобов'язаний пояснити причину такої невідповідності. Процедура повторюється до тих пір, поки думки експертів не збіжаться.

Вибирати перевізника пропонується на основі експертних оцінок за наступними критеріями, які були обрані шляхом обговорення та узгодження питання у групі експертів:

- релейні – наявність сертифікату, можливість переадресування вантажу в дорозі;
- кількісні – тариф, фінансова стабільність, термін доставки;
- якісні – якість транспортних послуг, кваліфікація персоналу, екологічність транспортних засобів, контроль за рухом товару в дорозі за допомогою засобів зв'язку.

Проведемо процедуру ранжування критеріїв, яка полягає в розташуванні експертами об'єктів в найбільш раціональному порядку і присвоєння ним певного рангу у вигляді числа натурального ряду. При цьому ранг 1 отримує найбільш важливий об'єкт, а ранг n — найменш важливий. В результаті отримана шкала порядку, в якій число рангів дорівнює числу об'єктів. Якщо два об'єкти мають однакові ранги, то їм приписують так звані стандартизовані ранги, які розраховуються як середнє суми місць об'єктів із однаковими рангами. Ранжування може бути виконане без проведення точних вимірювань та може бути застосоване до об'єктів, що характеризуються різною природою, бувають несумісними та не мають загальної міри порівняння.

При аналізі результатів анкетного опитування необхідно враховувати специфічні особливості вихідної інформації: оцінки експертів за ранговою шкалою не є кількісними і представляють собою вимірювання за ординарною шкалою порядку; при анкетуванні експерт

розв'язує багатовимірну задачу про відносне і взаємозалежне розташування всіх критеріїв вибору, які можуть змінюватися у процесі обговорення членами експертної групи; остаточна оцінка про порядок критеріїв приймається за умови хорошої узгодженості думок експертів, яка оцінюється за допомогою коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена і Кендалла, обчислення коефіцієнта детермінації, визначення узгодження з використанням непараметричних критеріїв Манна-Уїтні, Ван дер Вардена, Колмогорова-Смирнова. Визначення ступеня одноступеністості експертів включає також розрахунок коефіцієнтів варіації та осциляції, показників ексцесу та асиметрії.

Результати анкетного опитування зводимо до порівняльної таблиці 4.

При виборі перевізника в першу чергу перевіряються релейні показники. Серед перевізників, яких умовно позначимо як «перевізник 1», «перевізник 2», «перевізник 3», з подальшого розгляду виключають тих, що мають значення релейного показника „ні”. Отже, для даних, що наведені в табл. 4, на основі оцінки релейного критерію з подальшого розгляду виключається перевізник 3.

Таблиця 4

Результати анкетного опитування щодо вибору перевізника

№	Критерій	Перевізник 1	Перевізник 2	Перевізник 3	Ранг
1	Наявність сертифікату	так	так	так	-
2	Можливість переадресування вантажу в дорозі	так	так	ні	-
3	Тариф	7,75	4,8	4,85	1
4	Термін доставки	24	14	17	2
5	Якість транспортних послуг	добре	дуже добре	добре	3
6	Контроль за рухом товару в дорозі за допомогою засобів зв'язку	добре	відмінно	задовільно	4
7	Фінансова стабільність	13	15	12	5
8	Екологічність транспортних засобів	задовільно	добре	задовільно	6
9	Кваліфікація персоналу перевізника	задовільно	відмінно	добре	7

Далі розраховуються вагові коефіцієнти (ваги) для кількісних і якісних критеріїв за формулою:

$$W_i = \frac{2(N-j+1)}{N(N+1)} \quad (1)$$

де W_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію, $i \in \overline{1, N}$;

j – значення рангу i -го критерію, $i \in \overline{1, N}$;

N – загальна кількість критеріїв, що враховуються при визначенні інтегральної оцінки (два релейні показники не враховуються, тому $N = 7$).

Розрахунок кількісних оцінок проводиться з урахуванням характеру екстремуму досліджуваного критерію. Наприклад, для критерію „фінансова стабільність” при виборі перевізника екстремальним значенням є „max”: чим воно більше, тим більш привабливим є перевізник. Серед усіх перевізників обирають найкраще значення критерію за певним екстремумом.

Значення кількісного критерію Z_i розраховують за наступними формулами:

- при екстремумі „max”:

$$Z_i = \frac{K_{ni}}{K_{em}}, \quad (2)$$

- при екстремумі „min”:

$$Z_i = \frac{K_{em}}{K_{ni}}. \quad (3)$$

де K_{em} - еталонне значення для даного критерію;

K_{ni} - фактичне значення для i -го перевізника.

Значення кількісного критерію D_i з урахуванням вагового коефіцієнта розраховують за формулою:

$$D_i = Z_i * W_i \quad (4)$$

Не обтяжуючи виклад матеріалу проміжними обчисленнями, кінцеві результати розрахунків кількісних оцінок зводимо до таблиці 5.

Таблиця 5

Розрахунок кількісних оцінок

Критерій	Ваговий коефіцієнт	Екстремум	Еталонне значення	Перевізник 1		Перевізник 2	
				Значення без W_i	Значення з W_i	Значення без W_i	Значення з W_i
Тариф	0,250	min	4,8	0,620	0,155	1	0,250
Термін доставки	0,214	min	14	0,583	0,124	1	0,214
Фінансова стабільність	0,107	max	15	0,866	0,092	1	0,107

Значення якісного критерію розраховують з використанням функції бажаності Харінгтона (табл. 6), яка дозволяє звести якісні оцінки до кількісних, що знаходяться в інтервалі (0, 1).

Таблиця 6

Відповідність якісних оцінок на шкалі бажаності Харінгтона

Інтервал за шкалою	Оцінка за якісним показником	Значення за шкалою бажаності	
		діапазон	середнє значення
3 - 4	Відмінно	> 0,950	0,975
2 - 3	Дуже добре	0,875 - 0,950	0,913
1 - 2	Добре	0,690 - 0,875	0,782
0 - 1	Задовільно	0,367 - 0,690	0,530
(-1) - 0	Погано	0,066 - 0,367	0,285
(-2) - (-1)	Дуже погано	0,0007 - 0,066	0,033

Наприклад, за критерієм „якість транспортних послуг” експерти оцінили першого перевізника як „добре”. В табл. 6 цій оцінці відповідає значення 0,782. Розрахунок значень якісних критеріїв з урахуванням вагового коефіцієнту проводять аналогічно розрахунку кількісних оцінок.

Значення інтегральної оцінки встановлюють на основі значень якісних і кількісних оцінок з урахуванням вагових коефіцієнтів. Результати розрахунків якісних та інтегральних оцінок зводимо до таблиці 7.

Таблиця 7

Розрахунок якісних та інтегральних оцінок

Критерій	Ваговий коефіцієнт	Перевізник 1		Перевізник 2	
		Значення без W_i	Значення з W_i	Значення без W_i	Значення з W_i
Якість транспортних послуг	0,179	0,782	0,139	0,913	0,162
Контроль руху товару в дорозі за допомогою засобів зв'язку	0,143	0,782	0,111	0,975	0,138
Екологічність транспортних засобів	0,071	0,530	0,037	0,782	0,055
Кваліфікація персоналу перевізника	0,036	0,530	0,018	0,975	0,034

Отже, за результатами дослідження, проведеного з використанням методу експертних оцінок, перевагу доцільно віддати перевізнику з більш високими підсумковими оцінками – це перевізник 2.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Ефективне вирішення задачі вибору перевізника є основою успішного функціонування кожного підприємства, зайнятого у сфері перевезення вантажів. Представлені методи оцінювання перевізника з точки зору забезпечення доставки товарів із необхідним рівнем якості (в необхідний термін, за прийнятною ціною, у потрібній кількості) дозволяють оцінити конкурентоздатність перевізників з погляду споживання їх послуг кожним конкретним замовником у кожному конкретному перевезенні.

Вітчизняні підприємства у процесі вибору перевізника в основному покладаються на власні сили. При оцінюванні перевізника необхідно враховувати його позитивні та негативні характеристики і розраховувати ймовірні ризики втрат чи недоотримання прибутку. Для цього потрібно розширювати інформаційну базу, створювати банк даних, формувати списки надійних партнерів, проводити дослідження та розрахунки.

Оптимальний вибір перевізника є запорукою успіху підприємства в конкурентній боротьбі. Дослідження ринку транспортних послуг вказує на те, що роль вдалого вибору перевізника буде тільки зростати. Тому комплексний підхід до об'єкту дослідження, що полягає в розширенні науково-методологічної бази та пошуку механізмів удосконалення існуючих методів, є перспективою подальших наукових розробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Смирнов І.Г. & Косарева Т.В. (2019). Транспортна логістика. Навчальний посібник для студентів ВНЗ. К.: ЦУЛ, 224 с. 129-146.
- [2] Нагорний Є.В. & Шраменко Н.Ю. (2009). Комерційна робота на автомобільному транспорті. Підручник. Харків: Видавництво ХНАДУ, 91-95.
- [3] Кунда Н.Т. & Главацька Т.В. (2020). Вибір логістичних посередників в умовах конкуренції на ринку міжнародних перевезень. *Актуальные научные исследования в современном мире*, 9 (65), ч.1, 59-63.
- [4] Новікова Н.М. (2018). Вибір постачальників товарних ресурсів підприємства торгівлі. *Приазовський економічний вісник*, 4 (9), 43-48.
- [5] Журавель Н.О. Методи вибору постачальника. (2014). *Управління розвитком*, 1 (164), 118-121.

УДК 681.3

Опубліковано 11 вересня 2021 року

АНАЛІЗ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАГОНУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ РАДЯНСЬКИХ ВІЙСЬК ТА МИРОТВОРЧОГО КОНТИНГЕНТУ БАГАТОНАЦІОНАЛЬНИХ СИЛ ЗА ДОСВІДОМ БОЙОВИХ ДІЙ У АФГАНІСТАНІ

ГУРІН Олександр Миколайович 

канд. військ. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

СТАРЦЕВ Володимир Вікторович 

науковий співробітник науково-дослідної лабораторії науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

УКРАЇНА

Анотація: *В статті, на прикладі одного із окремих підрозділів бригади спеціального призначення, яка вела бойові дії у Афганістані, розкривається штатна структура, головні завдання, район розташування, особливості виконання службових обов'язків окремого загону спеціального призначення. Описуються умові, фактори та особливості проведення логістичного забезпечення бойових дій підрозділів загону. Приводяться норми утримання боєприпасів, продовольства та води на кожного військовослужбовця. Наведені в статті приклади практичного супроводження військових колон з матеріальними засобами від ураження диверсійними групами, підрозділами спеціального призначення в районах з горно-пустельною місцевістю, розкривають особливості та надають досвід логістичного забезпечення військ в умовах активної фази бойових дій [1-7]. Інформується про результативність бойових дій загонів 15 бригади спеціального призначення за три роки війни. Висвітлені проблеми з організації логістичного забезпечення під час проведення операцій міжнародних сил сприяння безпеці (ISAF) в Афганістані на початку військової компанії та проаналізовані шляхи подолання.*

ВСТУП.

В сучасних умовах бойові можливості Збройних Сил (ЗС) України значно залежать від якісного, своєчасного та повного логістичного

забезпечення (ЛЗ) їх військових частин та окремих підрозділів. Для здійснення забезпечення вважається необхідним мати компактну, мобільну, швидко реагуючу на потреби військ логістику.

Ведення бойових дій в різних умовах потребує використовувати різні форми та методи ЛЗ. Збройний конфлікт на сході України виявив ряд проблем у системі ЛЗ ЗС України.

У наукових та навчальних установах і закладах постійно вивчається світовий досвід військових конфліктів. За останні роки у ЗС України в організація постачання за видами матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) озброєння та військової техніки і матеріально-технічних засобів (МтЗ) здійснилися суттєвих реорганізації та зміни. На теперішній час продовжується реформування системи ЛЗ за стандартами країн НАТО [8-9].

Метою статті є розповсюдження матеріалу щодо логістичного забезпечення військових частин за досвідом бойових дій радянських військ та миротворчого контингенту багатонаціональних сил у Афганістані.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ.

Знайомство з Афганістаном автора почалось третього серпня 1986 року з прибуттям на пересильний пункт у м. Кабул. Після триденного перебування на аеродромі літаком АН-12 був доставлений до штабу 15 бригади спеціального призначення у м. Джалалабад для відрекомендування та ознайомлення з керівництвом з'єднання. Перебування у Джелалабаді запам'яталось труднощами акліматизації до спеки, вологості повітря та наявністю шкідливих мартишок. Через добу на вертольоті Мі-8МТ був доставлений у 668 окремий загін спеціального призначення (озсп) (за легендою 4 окремий мотострілецький батальйон «Баракинський»), де до квітня 1987р. виконував обов'язки заступника командирів окремої частини з МТЗ.

668 озсп був розгорнутий у лютому 1984 році зі складу бригади спеціального призначення Київського Воєнного Округу м. Кіровоград до штатів військового часу. У складі загону перебувало: одна рота на БМП; дві роти на БТР; рота мінування; зенітно-артилерійська група на ЗСУ-23; група зв'язку; рота забезпечення та медичний пункт. Всього зі штатом 550 чоловік, з яких 9 службовці та 8 службово - пошукових собак. Головним завданням загону являлося не допущення переміщення

військових формувань та озброєння і майна на шляхах караванів від Пакистану вглиб країни. Завдання виконувалось шляхом здійснення засідок, рейдів або мінування на імовірних напрямках у зоні відповідальності загону. На рисунку 1 наведена мапа розташування загону на місцевості.

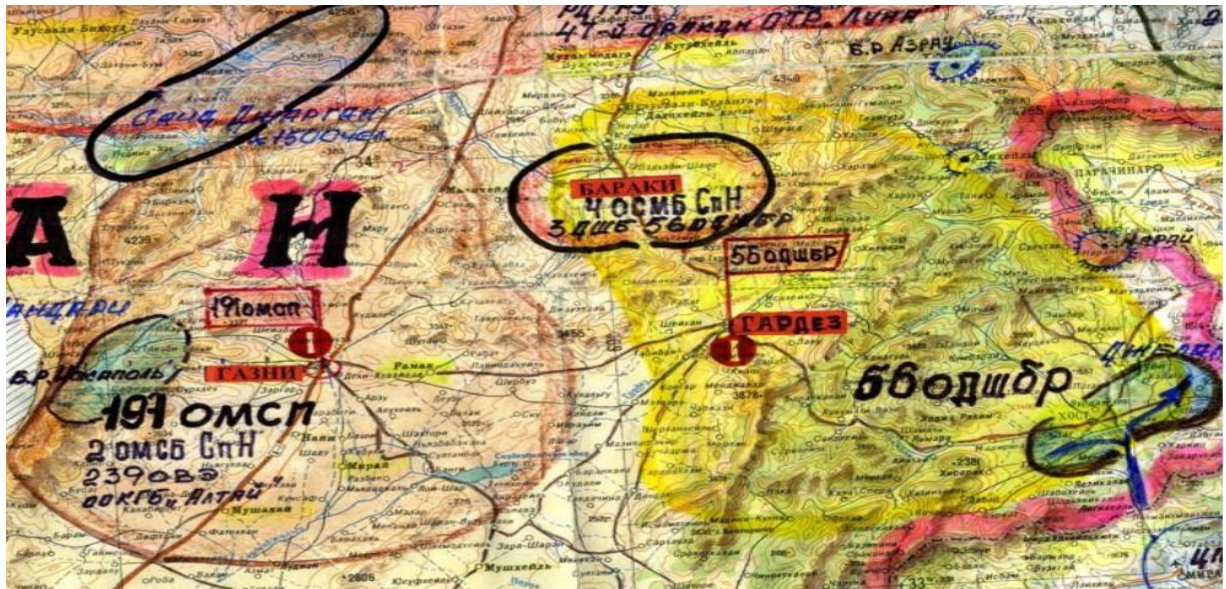


Рис. 1. Мапа розташування батальйону на місцевості

До особливостей виконання службових обов'язків можливо віднести те, що загін розташовувався спільно з 3 десантно-штурмовим батальйоном (дшб) 54 десантно-штурмової бригади (м. Гардез) на трасі Кабул-Гардез, коло с. Суфла, уїзд Баракі-Барак, провінція Логар, між трьох гір, на висоті 1800 метрів над рівнем моря. За горами, під землею у кряжах знаходився гарнізон близько 1500 озброєних моджахедів, які здійснювали в середньому за місяць 7 – 10 діб артилерійсько-мінометних обстрілів по 20 – 200 пострілів реактивних снарядів і мін щодоби на територію розміщення радянських військ. В зв'язку з тим 95% особового складу загону було розташовано у землянках. Для посилення гарнізону були придані: батарея реактивних мінометів БМ-21 «Град», артилерійська батарея Д-30, танковий взвод, тропосферна радіостанція та за спільними завданнями в інтересах загону працювала 239 окрема вертолітна ескадрилья з м. Газні.

Головним обов'язком керівника з МТЗ являлося здійснення організації та проведення логістичного забезпечення бойових дій підрозділів загону. Це досягалось безперебійним підвезенням

боєприпасів, пального, продовольства і інших матеріальних засобів та організацією безпосереднього забезпечення особового складу харчуванням, лазневе - пральними і побутовими заходами при розташуванні у польових умовах. Для виконання цих завдань використовувалася підлегла рота забезпечення (два автомобільних взводу, ремонтний та господарчий взводи), тому, як правило, керівник з МТЗ очолював автомобільні колони для підвезення з баз та складів Кабула або Гардезу. Також, що тижня по вівторках та четвергах, для здійснення підвозу швидкопсувних продуктів зі складів у м. Кабул, надавалася пара транспортно - бойових вертолетів МИ-8МТ та для прикриття пара бойових МИ-24.

На забезпечення підрозділів продовольством впливав ряд факторів та особливостей. Великі перепади температур, жаркий клімат створювали складні умови для перевезення і зберігання продуктів. Особовому складу, який виконував завдання у відриві від своїх підрозділів, для видачі заготовлювалися добові раціони харчування «Гірський літній», «Гірський зимовий» або «Еталон №5». Ці раціони містили висококалорійні і легко засвоювані продукти (м'ясні та м'ясо-рослинні консерви, супи фруктові з крупою, другі овочеві страви з м'ясом), соки плодові та ягідні, молоко згущене з цукром, карамель вітамінізовану, шоколад та вони забезпечувалися переносними кухнями (КН-10, МК-10) та обладнанням для приготування гарячої їжі, яке складалося з таганка з установкою двох судків для приготування їжі, паяльної лампи і кухонного інвентарю. Все обладнання переносилося як рюкзак. З його допомогою можна було приготувати обід на 10 чоловік за 30-40 хвилин. У більшості випадків особовий склад бойових груп, при підготовці до виходу у засідки по перекриттю караванних шляхів, на термін в основному три доби автономного існування, брав зі собою 3 банки консерви м'ясної, хліб,

4-5 фляги води, спальник, штатне озброєння та боєприпаси.

Особлива увага приділялася забезпеченню підрозділів водою. Вся тара що возиться і носить, заповнювалася водою з розрахунку: одна каністра 20 літрова (л.) і питної бачок 10 л. на кожну одиницю техніки (відділення); термос харчовий 12 л. на взвод; кухонні котли, харчові бачки і резервуари (РДВ-1500) заповнювалися на роту, а автоцистерна

(3000 - 4000 л.) на батальйон. Це становило 1,5-2 добові норми.

При підготовці до виконання бойових завдань у мотострілецьких батальйонах створювалися підвищені запаси матеріальних засобів та постійно поповнювалися підвезенням зі складів старшого начальника. Вони були ешелоновані таким чином, що в бойових машинах постійно перебувало 3-5 добових дач (д/д) сухого пайка та 2-2,5 бойового комплекту (бк) боєприпасів. У транспорті батальйону перевозилося до 7 д/д продовольства, один бк боєприпасів, дві заправки пального, а також запас сухарів або свіжого хліба на 3-5 діб.

Безпосередньо стрілець-автоматник повинен був мати 8 споряджених магазинів і до 1000 патронів розсипом, 4 ручні гранати (дві Ф-1, дві РГ-5), 4 сигнальні ракети, 2 д/д сухого пайка, 2 фляги з водою (2,5 літра) індивідуальну аптечку, 20 таблеток пантоциду для знезараження води, шинель (куртку) і малу саперну лопату. Загальна вага такої екіпіровки досягав 30-35 кг.

Уразливість автотранспорту з боєприпасами, вимагало створення підвищених запасів озброєння (укладання їх в танки, БМД, БМП, БТР). Практика показала, що в БМД (БМП) можна було перевозити для особового складу десанту до 2,5 б/к патронів у цинку і один б/к ручних гранат або один 82-мм міномет з обслугою і двома б/к у лотках. Крім того, значна частина боєприпасів і майна розміщувалася зовні на броні.

Забезпечення військ матеріально-технічними засобами в Афганістані здійснювалось у надзвичайно складних умовах. Приблизно 80% МтЗ перевозилось автомобільним транспортом.

Одним із головних об'єктів нападу загонів озброєної опозиції в Афганістані були автоколони з МтЗ, вразливі як до вогню стрілецькою зброєю, так і до мін, що встановлювались на дорогах. Від безпеки, плановірності і своєчасності руху автоколон залежала вся життєдіяльність радянських і афганських військ. Оскільки через недостатність сил та засобів всі дороги Афганістану взяти під охорону було неможливо, радянські війська зосереджували основні зусилля на важливих магістралях, по яких рухався основний потік вантажів.

У зоні відповідальності 668 озсп одним з основних завдань щодо охорони та супроводження автомобільних колон здійснювала 3 дшб.

Одним з найнебезпечніших маршрутів була дорога Кабул – Гардез. На рисунку 2 наведена ділянка маршруту Кабул – Гардез.



Рис. 2. Дільниця маршруту Кабул – Гардез

До вересня 1983 року доставка МтЗ здійснювалась наступним чином. Автоколону супроводжувала парашутно-десантна рота з рівномірно розподіленими по всій довжині колони 6-7 БТР-70 та саперним відділенням. Найбільш небезпечною була ділянка дороги, що являла собою 12 кілометрів суцільної зеленої зони та покинутих і зруйнованих будинків. Зрозуміло, що саме на ній повстанці влаштовували засідки й мінували дорожнє полотно. Майже протягом усієї небезпечної ділянки у моджахедів були відриті окопи на 10-12 чоловік, до яких вони переміщувались за необхідності.

В зв'язку з тим, що сапери були вимушені практично кожний крок перевіряти щупами і міношукачами та з допомогою службових собак, автоколонам в цій зоні доводилось просуватися із швидкістю 2-3 км/год.

5 вересня 1983 року колона бензовозів у кількості 60 машин та у супроводі парашутно-десантної роти, двічі на цієї ділянці потрапляли у засідку. На рисунку 3 наведені бойові втрати.

У результаті тривалого бою було втрачено 2-х військовослужбовців, а також 12 бензовозів та 2 БТР-70.

Для забезпечення доставки МтЗ до пунктів призначення командуванням було прийнято рішення щодо посилення двома ротами.



Рис. 3. Бойові втрати

Тепер одна рота, як і раніше, вела колону із швидкістю 2-3 км/год по трасі, а інша – в пішому порядку прочісувала місцевість праворуч і ліворуч від дороги. З повітря колону прикривала пара Мі-24. В результаті застосування нової тактики вдалося чотири рази провести колони з матеріально-технічними засобами без втрат.

За короткий проміжок часу повстанці проаналізували зміни в тактиці і вже 14 вересня 1983 року трансформували характер своїх дій. Вони підготували засідку, але під тиском першої роти, яка прочісувала місцевість, відійшли на безпечну для себе відстань і сховались у кяризах. Після того як рота відійшла від місця засідки на 500-600 метрів, моджахеди повернулись на попереднє місце і зробили всього лише один залп з 3-4 РПГ-2 (7) і стрілецької зброї. Після не тривалого бою було знищено 10 КАМАЗів і причепів з боєприпасами та 4 бензовози. На рисунку 4 наведені бойові втрати.

На відпрацювання нової тактики пішов майже тиждень, в результаті чого від керівництва було отримано дозвіл на залучення до супроводу автоколон танкового взводу і ще однієї роти.



Рис. 4. Бойові втрати

Одна рота виходила з диспетчерського пункту за колоною, а потім вела її по маршруту. Дві інші роти із взводом супроводжуючої роти, танковим взводом та саперним відділенням входили до зеленої зони. Сапери перевіряли дорогу, знімали міни і фугаси, а взводи займали позиції для бою в зеленій зоні. Відстань між взводами складала близько 500-600 метрів.

Супровідна рота зупиняла колону в 1-2 кілометрах від входу в зелену зону та чекала розпоряджень командира десантно-штурмового батальйону. Після перевірки саперами дорожнього полотна командир батальйону давав команду і колона із супровідною ротою на максимальній швидкості (50-60 км/год.) проскакувала зелену зону всього за 20-25 хвилин.

Два рази повстанці намагались за старою схемою вийти до дороги, але зіткнувшись з радянськими підрозділами і зазнавши втрат (перший раз – 7 чоловік, гранатометів типу РПГ-2 – 1 од., автоматів типу АК – 4 од., англійські гвинтівки – 2 од., вдруге – 3 чоловіка, автоматів типу АК – 3 од.,) були змушені відійти.

Згодом вони перестали атакувати напролом і почали шукати проміжки між взводами. Тоді взводи почали переміщати за повстанцями,

скорочуючи тим самим проміжки між взводами за необхідності до 100 метрів.

За таких умов повстанці були змушені позбавитись можливостей впритул підходити до дороги для нападу, а колона перебувала в небезпечній зоні не більше ніж 30 хвилин і пересувалась на великій швидкості. Завдяки використанню такого способу вдалося майже на рік забезпечити пересування автоколон з МтЗ без втрат.

А втрати були – за майже чотири роки бойових дій 55 чоловік загону, молодих парубків та зрілих чоловіків не повернулися з війни. Спецпризначенні втрачали своїх товаришів під час бою, у більшості випадків у перебільшеної кількості ворогу, у горілих вертольотах, в безмовних падіннях зі скель, у стрімких гірських течіях, при ураженні на ворожих мінах та при інших умовах у чужій та ворожнечою країні. Вони залишилися назавжди в пам'яті бойових друзів молодими та життєво задовільними, яки виконали свій військовий обов'язок. На рисунку 5 наведено бойовий підрозділ моджахедів.



Рис. 5. Бойовий підрозділ моджахедів

Ці втрати не були марними. Тільки загонами 15 бр СпП під час перебування у Афганістані (з січня 1985 по травень 1988рр.) було знищено 8237 бойовиків, вилучено 78 пересувних зенітних ракетних комплексів, 89 зенітних кулеметів і артилерійських гармат, 81 міномет, 22 нерухомі гармати, 17 пускових пристроїв реактивних снарядів, 50 проти танкових гранатометів, 2189 одиниць стрілецької зброї та декілька тон різноманітного військового майна. Не менш вдало у Афганістані виконували бойові завдання розвідники 22 обр СпН (Кандагарська) и 459 окремих роти СпН (Кабульська). На рисунку 6 наведені бойові трофеї.



Рис. 6. Бойові трофеї

Сучасні армії світу мають в своєму складі розвідувальне - диверсійні сили традиційно іменовані як «спецназ». Частини спеціального призначення ЗС СРСР за своїм призначенням відносилися до органів спеціальної розвідки та оперативно підпорядковувалися Головному розвідувальному управлінню Генерального штабу - ГРУ ГШ. Розвідка є одним з основних видів бойового забезпечення військ, але дії спецназу в Афганістані виходили за рамки забезпечення і мали форму самостійних бойових дій.

До середини 80-х років минулого століття, Радянський спецназ в Афганістані представляв ту грізну силу, з якою рахувалися не тільки польові командири афганських військових формувань, а й їхні радники з провідних країн світу. «Єдиними радянськими військами, які успішно воювали в Афганістані, були сили спеціального призначення, що діють на вертольотах» - писала газета «Вашингтон пост» від 06 липня 1989 року. Не будемо такими категоричними, але тактика дій спецназу була більш ефективна, ніж дії інших підрозділів Обмеженого контингенту Радянських військ у Афганістані.

Аналіз організації логістичного забезпечення під час проведення операцій міжнародних сил сприяння безпеці (ISAF) в Афганістані вказує на подібні проблеми на початку військової компанії. На рисунку 7 наведені бойові втрати міжнародних сил сприяння безпеці.



Рис. 7. Бойові втрати міжнародних сил сприяння безпеці

7 серпня 2011 року за інформацією пакистанського телеканалу Geo TV за вибухом трьох бомб на терміналі в провінції Хайбер-Пахтунхва на північному заході Пакистану з 28 одиниць були знищені 16 бензовозів з

паливом для сил НАТО в Афганістані. У той же день 4 військовослужбовців НАТО загинули в результаті двох зіткнень з талібами.

5 листопада 2011 року після нападу моджахедів згоріли 11 бензовозів командування (ISEF), 2 пасажирські автобуса, 2 легкових, два водія бензовозів загинуло.

19 липня 2012 року ліквідована п'ята за тиждень колонна забезпечення паливом контингенту НАТО в Афганістані. Тільки на півночі країни згоріли 22 автоцистерни сил коаліції.

Через Пакистан доставлялось більше 70% тилового забезпечення для військ міжнародної коаліції, що воює на афганській території. Оскільки в Афганістані немає залізниць, все тилове забезпечення, а також паливо для Матеріально-технічні засоби військ НАТО надходили вантажівками з пакистанських портів на Аравійському морі. Через північний захід Пакистану проходив один з двох основних маршрутів постачання західної коаліції.

На рисунку 8 наведено ланцюг етапу евакуації поранених.



Рис. 8. Ланцюг етапу евакуації поранених

На фоні загальних часткових перемог над військами талібів, постійно існували суттєві проблеми з партизанською війною, з якою військам

США, контингенту НАТО і ISAF повністю проблематично було справитися. Бойові дії поступово поширювалися з півдня на схід Афганістану та північні і північно-західні регіони країни.

З метою недопущення великих втрат та зміни до підходів щодо ЛЗ Командуванням (ISEF) було прийнято рішення, що доставки людей і вантажів та медична евакуація є одними з основних функцій військово-повітряних сил союзників в Афганістані. На рисунку 9 наведено вертолітний майданчик.



Рис. 9. Вертолітний майданчик

Доставка вантажів здійснювалась шляхом скидання вантажу. Скидання проводилось з 3-4 транспортних літаків, на низькій висоті, без вогнів, з використанням парашутів гальмування. Вантаж був захищений від падіння товстим шаром картону але, незважаючи на це, псування вантажу могло становити від 30 до 40 відсотків.

Якщо умови дозволяли, доставка здійснювалась посадковим способом при чому вертоліт міг перебувати на землі під час посадки та зльоту не більше шести-семи хвилин, щоб не дати можливості бойовикам

себе виявити і швидко знищити. В інших випадках, у більш небезпечних умовах, вертольоти скидали в районах розташування військових формувань вантаж з товарних піддонів в спеціальній авіаційній сітці, прикріпленій до фюзеляжу. Пролітаючи над заставою, вертоліт скидав сітку на злітно-посадочний майданчик. Вантаж в основному складався з боєприпасів та продовольства.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Таким чином, наведені в статті приклади практичного супроводження військових колон підрозділами спеціального призначення в районах з горно-пустельною місцевістю, розкривають особливості та надають досвід логістичного забезпечення військ в умовах активної фази бойових дій.

Висвітлені проблеми з організації логістичного забезпечення під час проведення операцій міжнародних сил сприяння безпеці (ISEF) в Афганістані на початку військової компанії та проаналізовані шляхи подолання.

Фахівці армії світових країн повинні досконало вивчати досвід війн останніх десятиріч з метою збереження життя особового складу, військову техніку і матеріально-технічні засоби та досягнення виконання завдань за призначення під час організації логістичного забезпечення у сучасних військових конфліктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Асатрян, Г. Э. (2015). Контртеррористическая политика США в Афганистане. Дестабилизация ситуации (2006—2008 гг.). *Вестник Томского государственного университета*, 2(34), 103-107.
- [2] Асатрян, Г. Э. (2014). Военно-политическая стратегия США в Афганистане (2001—2008 гг.). Антитеррористический аспект. Документы и материалы. *Образование. Наука. Научные кадры*, (4), 259-261
- [3] Васильев, М. В. (2018). Афганистан – семнадцать лет «Демократии». *Электронный научный журнал «Архонт»*, 4(7).
- [4] Гурін О.М., & Старцев В.В. (2021). Удосконалення науково-методичного апарату обґрунтування напрямів підвищення якості доставки матеріально-технічних засобів в системі логістичного забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України. *Сучасний стан проведення наукових досліджень у IT-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері: колективна монографія (1-е вид.)*. Вінниця: Європейська наукова платформа. DOI: <https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-2.05>.
- [5] Адасюк О.И. [и др.]. *История военно-политических конфликтов: пособие для курсантов, проходящих обучение в военных учебных заведениях*. [ред. Зырянов А.В.]. Минск: БНТУ, 261 с.

- [6] Коломійцев, О., Кудряшов, В., Третьяк, В., Кулешов, О., & Клівець, С. (2020). Оцінювання значень умовних ймовірностей ураження нетипової повітряної цілі у різноманітних умовах. *Збірник наукових праць ЛОГОС*, 132-135. DOI: <https://doi.org/10.36074/05.06.2020.v4.46>.
- [7] Ломакин Г. И., Хомуленко Т. Б., Подчасов Е. В., Ягодка А. К., & Быков М. Л. (2018). Локальные войны и вооруженные конфликты XX столетия – участники и события: в исторических справках, интервью и психологических комментариях. [ред. Г. И. Ломакина]. Харьков: Обериг, 616 с.
- [8] Леках, А., Гурін, О., Старцев, В., Бровко, М., Третьяк, В., Сальна, Н., & Просяник, В. (2021). Основні положення та структура методики визначення раціональної транспортної мережі в системі логістичного забезпечення угруповання військ в локальному збройному конфлікті. *Збірник наукових праць ЛОГОС*. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-05.02.2021.v2.34>.
- [9] Мороз, Ю. В. (2018). Проблемы и перспективы взаимодействия в Афганистане заинтересованных в этом государств и их союзников. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*, 5(14), 955–971.

УДК 351.864:001.89(043.2)

Опубликовано 18 жовтня 2021 року

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ОБЛИКА ЗЕНИТНОЙ РАКЕТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА

ЛУКЬЯНЧУК Вадим Владимирович 

доктор технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-исследовательского отдела научного центра Воздушных Сил
Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

НИКОЛАЕВ Иван Михайлович 

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный
сотрудник научно-исследовательского отдела научного центра Воздушных Сил,
Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

УКРАИНА

Аннотация: *Зенитные ракетные системы (ЗРС) создаются для решения задач противовоздушной обороны (ПВО) важных государственных объектов и группировок войск и должны в полной мере удовлетворять высоким требованиям борьбы с существующими и перспективными средствами воздушного нападения (СВН). Стремление к обеспечению превосходства над воздушным противником обуславливает непрерывный процесс создания ЗРС с более высокими боевыми возможностями. В статье рассматривается методологический подход к обоснованию облика зенитной ракетной системы на основе современного технологического базиса.*

ВВЕДЕНИЕ.

Системообразующим элементом группировок ПВО являются ЗРС средней дальности (СД), которые должны обеспечивать поражение основной массы аэродинамических и баллистических целей в своей зоне ответственности в условиях огневого и радиоэлектронного противодействия со стороны воздушного противника [1, 10-18].

Основным фактором развития ЗРС СД является необходимость парирования угроз, исходящих от современных и перспективных СВН, количественному и качественному развитию которых в экономически развитых странах мира уделяется большое внимание. Опыт локальных войн конца XX – начала XXI столетия показал, что в будущем военном

конфликте ЗРС СД предстоит вести борьбу как с самолетами стратегической и тактической авиации, так и с ракетными и авиационными средствами поражения, обеспечивая при этом собственную выживаемость и оборону важнейших объектов государственного и военного управления, экономики и вооруженных сил от ударов с воздуха. По мнению зарубежных военных специалистов, эффективное решение задач ПВО в будущей войне следует искать на пути создания универсальных, многоканальных и мобильных ЗРС СД, способных бороться как с аэродинамическими целями, так и с баллистическими и крылатыми ракетами [10]. Все средства ЗРС СД должны обладать высоким быстродействием, высокой мобильностью и подвижностью, работать на инженерно не подготовленных позициях и осуществлять взаимодействие с другими средствами ПВО с помощью линий радиосвязи, а также иметь возможность автономного ведения боевых действий без централизованного управления от вышестоящих командных пунктов.

Характерной особенностью боевого применения современных ЗРС СД для поражения тактических баллистических ракет (ТБР) является острый дефицит времени на обработку цели, вследствие чего практически все составляющие рабочего цикла должны быть полностью автоматизированы, а зенитные управляемые ракеты (ЗУР) должны быть высокоскоростными для увеличения рубежей перехвата и сокращения времени полета к цели. Кроме того, для поражения баллистических ракет требуется значительное повышение энергетического потенциала радиолокационных средств по сравнению с аэродинамическими целями. Для реализации этих требований в современных ЗРС СД должны быть задействованы самые современные технологии, воплощающие в себе последние достижения научно-технического прогресса в различных областях науки и техники.

Общей закономерностью развития ЗРС СД является непрерывное их усложнение, сопровождающееся существенным увеличением сроков и затрат на их разработку и серийное производство. В связи с этим существенно возрастают требования к доказательности и качеству военно-научных исследований по обоснованию облика перспективной ЗРС СД. Определяющим фактором качества этих исследований является уровень методологии их проведения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА.

Опыт стран, занимающих передовые рубежи в сфере разработки и производства зенитного ракетного вооружения, показывает, что облик ЗРС СД определяется в результате концептуального проектирования, или, другими словами, синтеза, в процессе которого принимается большинство решений по составу, структуре, принципам построения и алгоритмам функционирования системы. Синтез облика ЗРС СД начинается с разработки основных направлений развития зенитного ракетного вооружения, продолжается в ходе военно-технических исследований по обоснованию оперативно-тактических (ОТТ) и тактико-технических требований (ТТТ) к системе в рамках военных научно-исследовательских работ (НИР) и завершается (в концептуальном смысле) в специальной промышленной НИР, направленной на разработку тактико-технического задания (ТТЗ) на опытно-конструкторскую работу (ОКР) по созданию ЗРС СД конкретного целевого назначения. Поскольку эффективность применения ЗРС СД по назначению напрямую зависит от ее технического облика, практически важными являются вопросы оптимизации структуры и параметров системы с учетом ограничений, накладываемых имеющимися в наличии финансовыми ресурсами, технологиями и техническими решениями [7-11].

Практика свидетельствует о недостаточном внимании заказчика и разработчиков к вопросам методологии обоснования облика предлагаемых к разработке образцов зенитного ракетного вооружения. На сегодняшний день процесс формирования облика перспективных систем зенитного ракетного вооружения, как правило, находится в творческой плоскости и базируется на опыте и знаниях разработчиков. Принятие ошибочных, недостаточно продуманных и не обоснованных решений может привести к неоправданным затратам материальных средств и в конечном итоге к неосуществимости решения поставленных задач. В связи с этим актуальной является задача разработки методологического подхода к обоснованию рационального технического облика перспективной ЗРС СД конкретного целевого назначения, что позволит повысить уровень обоснованности тактико-технических требований (ТТТ) и технических предложений по ее созданию при заданных ресурсных и технологических ограничениях.

Анализ предметной области исследования показал, что в имеющейся отечественной и зарубежной научно-технической

литературе практически отсутствуют публикации по обоснованию облика перспективной ЗРС СД. Исключением являются учебное пособие [5], в котором кратко излагается методология обоснования рациональной структуры построения и обоснования тактико-технических характеристик (ТТХ) ЗРК малой дальности. Однако в данной работе отсутствует математическая постановка задачи синтеза рационального технического облика ЗРС СД, как изделия военной техники конкретного целевого назначения.

Методологические аспекты обоснования облика применительно к другим системам и образцам вооружения и военной техники рассмотрены в работах [6-9]. Результаты, полученные в этих работах, могут быть использованы для формализации задачи синтеза облика перспективной ЗРС СД и обоснования рациональных путей ее решения с учетом заданных ограничений.

Информационной основой для формирования облика перспективной ЗРС СД является концепция ее создания, под которой понимается замысел воплощения в конструкции такого сочетания боевых свойств, которое обеспечивает качественное превосходство перспективной ЗРС СД над зарубежными аналогами и эффективное решение боевых задач формированиями ПВО, комплектуемыми данной системой.

Конкретным представлением концепции перспективной ЗРС СД является технический облик, отображающий ее наиболее характерные черты.

Под техническим обликом перспективной ЗРС СД понимают структуру, принципы устройства и функционирования системы, а также совокупность тактико-технических (ТТХ) и эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) ЗРС СД, которые определяют уровень технического совершенства и приспособленность системы к эффективному выполнению возлагаемых на нее боевых задач по обороне объектов и группировок войск от ударов СВН в прогнозируемых условиях ведения боевых действий.

При решении задачи формирования (синтеза) облика ЗРС СД рассматривается как изделие военной техники, представляющее собой совокупность функционально связанных отдельных боевых и технических средств, объединенных единой организацией функционирования и общим управлением для выполнения задач, определенных назначением системы.

Под боевыми средствами перспективной ЗРС СД понимаются средства, реализующие определенные функции и обеспечивающие решение боевых задач по обнаружению, распознаванию, сопровождению и уничтожению заданной номенклатуры типов (классов) СВН в условиях радиоэлектронно-огневого противодействия со стороны воздушного противника.

К боевым средствам, в общем случае, относятся командно-управляющие средства, специализированные РЛС обнаружения целей и наведения ракет, пусковые установки (устройства), а также зенитные управляемые ракеты (ЗУР). На этапе обоснования облика перспективной ЗРС СД в качестве боевых средств могут выступать соответствующие технологии, под которыми понимаются совокупности документированных знаний и фактографических данных, описывающих назначение, основные тактико-технические характеристики (ТТХ) и принципы функционирования этих средств [1-13].

Задача синтеза облика перспективной ЗРС СД, обеспечивающей требуемую эффективность решения боевых задач при наличии ресурсных и технологических ограничений, относится к классу сложных оптимизационных задач, для решения которой предлагается использовать теоретико-множественный подход, суть которого заключается в следующих положениях [11].

Пусть ЗРС СД как сложная система имеет конечное множество $S = \{S_i\}$, $i = 1, \dots, n$ системных (боевых и эксплуатационных) свойств, определяющих ее качество. Примем, что каждое свойство S_i имеет количественную характеристику – системный показатель качества K_i . Тогда качество ЗРС СД $K_{ЗРС}$ в общем виде может быть описано функционалом от показателей качества боевых свойств $K_{ЗРС} = K_f \{K_i\}$. Проведем декомпозицию ЗРС СД на L подсистем ($l = 1, \dots, L$). Такими подсистемами могут быть, например, командно-управляющая, разведывательно-информационная, огневая и подсистема технического обеспечения. Каждая подсистема обладает собственными свойствами $S_l'' = \{S_{lg}\}$ и описывающими их показателями качества, $K_l'' = \{K_{lg}\}$, где $g = 1, \dots, G_l$, G_l – количество свойств i -й подсистемы. В свою очередь, показатели качества подсистем определяются значениями параметров системы $K_{lg} = K_{lg}(P)$, где $P = \{P_j\}$, $j = 1, \dots, m$ – множество параметров системы (характеристик элементов системы).

Процесс взаимодействия подсистем ЗРС СД определяется множеством системных взаимосвязей $Y = \{Y_h\}$, $h = 1, \dots, H$. Поэтому системные показатели качества ЗРС СД определяются не только показателями качества ее подсистем, но и характером системных взаимосвязей:

$$K_i = \Psi_i[\{K_i^n(P)\}, \{Y_h\}]. \quad (1)$$

Тогда с качеством ЗРС СД может быть описано функционалом

$$K_{ЗРС} = K(P, Y). \quad (2)$$

В процессе применения ЗРС СД в ходе ведения боевых действий качество системы реализуется через ее эффективность:

$$K_{ЗРС} = F[K(P, Y), \Phi(t), V(t), U(t), T], \quad (3)$$

где $\Phi(t) = \{\Phi_z(t)\}$ – множество функций (боевых задач), возлагаемых на ЗРС СД, $z = 1, \dots, Z$; $V(t) = \{E, B(t)\}$ – множество условий функционирования (боевого применения) ЗРС СД, включающее E – качество эксплуатации, $B(t)$ – множество внешних факторов, воздействующих на ЗРС СД в процессе ее функционирования (боевого применения); $U(t) = \{D, A, R, I, R_a, \Phi_a(t)\}$ – множество параметров, характеризующих способы применения ЗРС СД: D – режим функционирования системы, A – состав боевых и технических средств, R – состав применяемых задач специального программного обеспечения и информационных технологий, I – состав используемой информации, R_a – распределение задач специального программного обеспечения по автоматизированным рабочим местам боевого расчета ЗРС СД, $\Phi_a(t)$ – последовательность автоматизированного выполнения функций (задач) в ходе ведения противовоздушного боя; T – продолжительность применения ЗРС СД.

Оптимизация параметров структуры перспективной ЗРС СД по критерию «эффективность-стоимость» заключается в решении задачи построения системы с такими параметрами $P^* = \{P_j^*\}$, системными взаимосвязями Y^* и, соответственно, качеством $K^* = (P^*, Y^*)$, которые обеспечивают максимальную эффективность данной системы:

$$\mathcal{E} = \max F[K(P, Y), \Phi(t), V(t), U(t), T] = F[K^*, \Phi(t), V(t), U(t), T] \quad (4)$$

при заданных условиях функционирования $V(t) = V_o(t)$, $T = T_o$, способах применения $U(t) = U_o(t)$ и ограниченной стоимости ЗРС СД:

$$C = F_c(K^*) \leq C_o, \quad (5)$$

где $F_c(K^*)$ – стоимость разработки и эксплуатации ЗРС СД с качеством K ; $C_o = C_p + C_э$ – ограничение на стоимость ЗРС СД: C_p – стоимость разработки, $C_э$ – стоимость эксплуатации ЗРС СД.

Основу научно-методического аппарата решения задачи формирования облика перспективной ЗРС СД должна составлять система имитационно-математических моделей, описывающих процесс боевого функционирования ЗРС СД в составе тактической группы ЗРВ при выполнении совокупности боевых задач в прогнозируемых условиях ведения боевых действий (рис. 1).

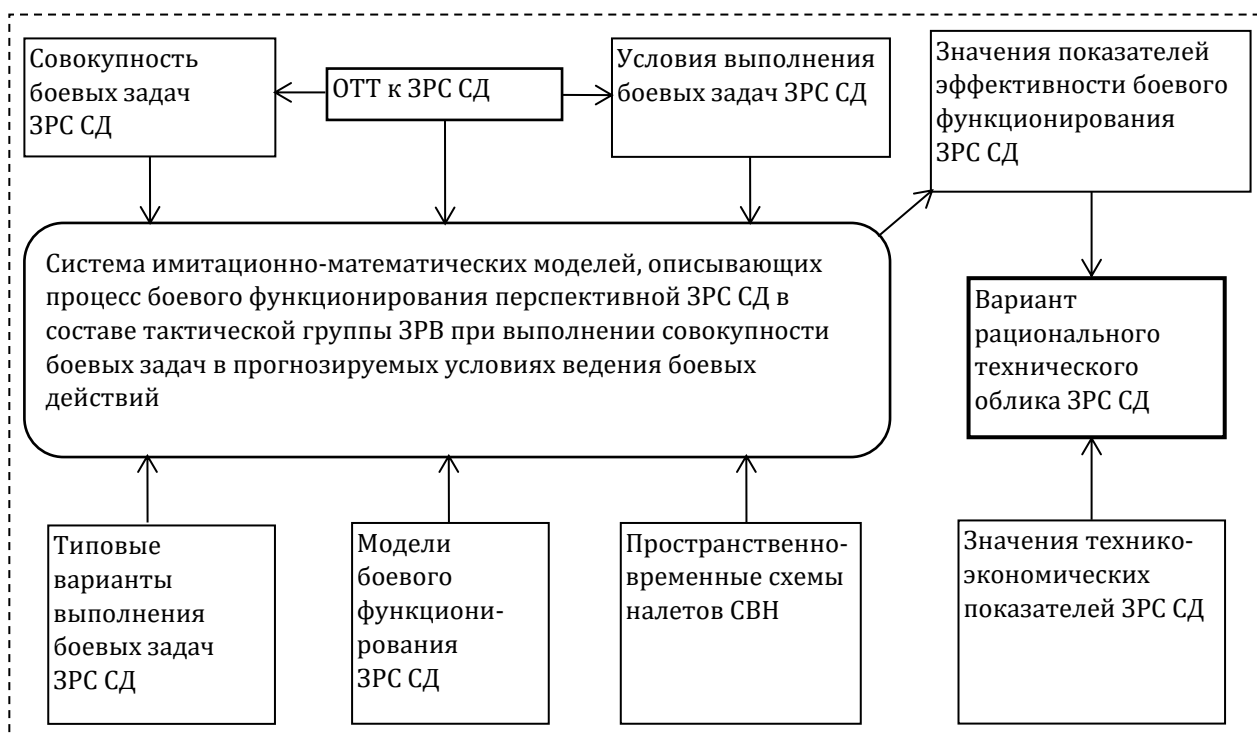


Рис. 1. Схема формирования рационального технического облика перспективной ЗРС СД

В общем случае, задача обоснования облика перспективной ЗРС СД заключается в нахождении отображения боевых задач, возлагаемых на систему, на варианты их решения с использованием того или иного состава боевых и технических средств, обеспечивающего минимальное значение затрат на разработку $C_p \rightarrow \min$ в прогнозируемый период времени $T \leq T_{\text{дон}}$. Каждая задача $z \in Z$ описывается алгоритмом ее решения, который отображает последовательность выполнения функциональных операций обработки информации и принятия решения на обстрел цели. Затем для каждой функциональной операции выбираются возможные средства ее реализации, в качестве которых могут выступать существующие технологии.

Синтез рационального технического облика перспективной ЗРС СД должен осуществляться в процессе выполнения комплекса исследований, упорядоченного в виде итерационной процедуры и направленного на решение следующих задач [11, 14]:

1) выявление дефицита функциональных свойств существующих ЗРС СД, выявление потребности в новых качествах ЗРС СД на основе исследования функционирования системы зенитного ракетного вооружения на операционных моделях;

2) анализ научно-технического задела и формирование возможных технических путей и способов устранения дефицита функциональных свойств существующих ЗРС СД;

3) формирование альтернативных вариантов облика перспективной ЗРС СД, включая формирование ее функционально-параметрической модели, оптимизация облика ЗРС СД для различных вариантов ее технической концепции;

4) определение рационального варианта облика и области целевого применения перспективной ЗРС СД в составе группировок ЗРВ совместно с существующими и планируемыми к разработке другими типами зенитного ракетного вооружения, оценка технической реализуемости, критических технологий и рисков создания, ресурсных и временных характеристик;

5) комплексная оценка эффективности перспективной ЗРС СД в прогнозируемых условиях ведения боевых действий.

На различных этапах этих исследований ЗРС СД рассматривается как изделие военной техники конкретного целевого назначения в составе системы зенитного ракетного вооружения вида (рода) войск, при этом решается ряд взаимосвязанных вопросов, суть которых можно свести к трем научным задачам анализа и синтеза облика данной системы:

1) обоснование основных тактико-технических требований (ОТТТ) к перспективной ЗРС СД;

2) обоснование ТТТ к основным подсистемам (боевым средствам) перспективной ЗРС СД;

3) разработка тактико-технического задания (ТТЗ) на выполнение опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию перспективной ЗРС СД.

В ходе решения этих задач осуществляется:

- оценка вариантов построения перспективной ЗРС СД по совокупности показателей эффективности и качества;

- оптимизация параметров функциональной, технической и информационной структур ЗРС СД по критерию «эффективность-стоимость»;

- оптимизация способов применения перспективной ЗРС СД по критерию эффективности.

Процедура формирования рационального технического облика перспективной ЗРС СД включает три последовательных этапа, на которых данная система рассматривается с позиций выполняемых функций (функциональный синтез), боевых и технических средств, реализующих данные функции (технический синтез) и функциональных систем и конструктивных элементов (конструктивный синтез).

Основной задачей функционального синтеза является обоснование оптимальных состава, структуры и алгоритма функционирования ЗРС СД. Технический синтез проводится в интересах обоснования оптимальных принципов построения подсистем ЗРС СД, а конструктивный - оптимизации номенклатуры и технических характеристик комплектующих изделий каждой из подсистем ЗРС СД.

На этапе функционального синтеза определяются наиболее важные (с точки зрения решаемых задач) характеристики перспективной ЗРС СД и входящих в ее состав подсистем (рис. 2). Первичные результаты технического и конструктивного синтеза заимствуются из банка данных, полученных при решении задач синтеза ЗРС СД предыдущего поколения. На данном этапе осуществляется:

- подготовка исходных данных для исследований и обоснование множества типовых условий боевого применения перспективной ЗРС СД;

- прогнозирование функционально-технического облика средств воздушного нападения (СВН) как объектов поражения;

- определение базовых множеств способов и средств огневого поражения СВН разных типов (классов) в прогнозируемых условиях ведения боевых действий;

- генерация возможных вариантов состава и структуры перспективной ЗРС СД, выбор общего и частных показателей эффективности.

Кроме того, выполняются предварительные исследования по оценке эффективности альтернативных вариантов облика перспективной ЗРС СД. Особое место на данном этапе занимает задача обоснования (прогнозирования) функционально-технического облика СВН как объектов поражения в условиях существенной априорной неопределенности.

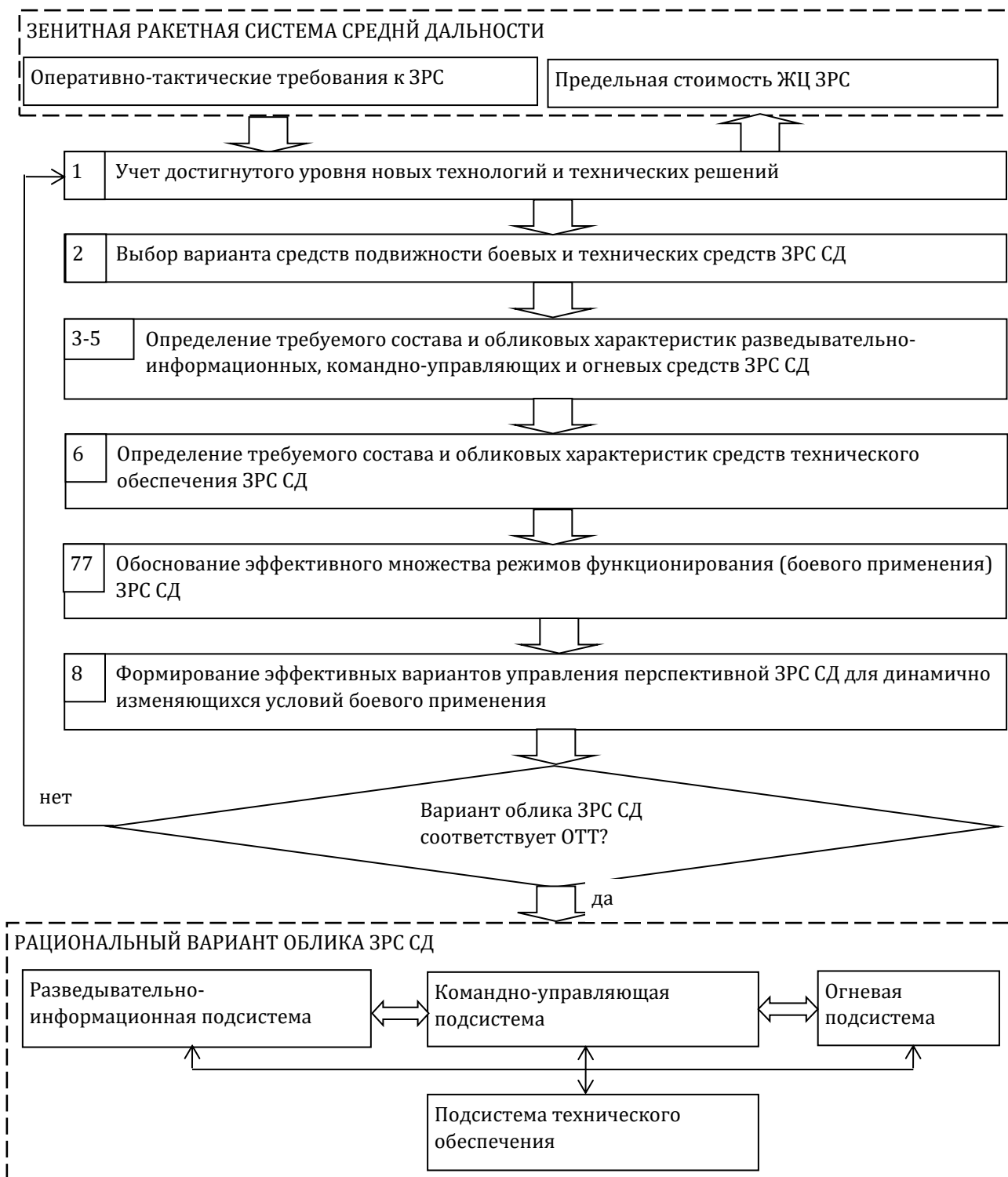


Рис. 2. Алгоритм функционального синтеза облика перспективной ЗРС СД

На втором этапе проводятся функциональный и технический синтезы. При этом первичные результаты конструктивного синтеза заимствуются из соответствующего банка данных. На данном этапе выполняются основные параметрические исследования и получаются

зависимости энергетических и неэнергетических характеристик подсистем (боевых и технических средств) перспективной ЗРС СД от выделяемого ресурса (стоимости, массы, габаритов, энергопотребления) при различных принципах их построения, а также зависимости показателей эффективности ЗРС СД от ее ТТХ в диапазоне возможных ограничений.

На третьем этапе проводятся все виды синтеза перспективной ЗРС СД (функциональный, технический и конструктивный), осуществляется построение целевой функции (основного показателя эффективности как функции характеристик системы) и уточняются оптимальные состав, структура, характеристики и алгоритмы функционирования перспективной ЗРС СД с учетом возможности их реализации на конструктивном уровне. Основное внимание на данном этапе должно уделяться получению зависимостей характеристик подсистем и системы в целом от номенклатуры и технических характеристик ее составных частей (комплектующих изделий) при заданных ограничениях. Полученные в результате оптимизации характеристики перспективной ЗРС СД трансформируются в соответствующие тактико-технические требования (ТТТ), которые является основой для разработки тактико-технического задания (ТТЗ) на выполнение опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию перспективной ЗРС СД.

Особенности задач функционального, технического и конструктивного синтеза перспективной ЗРС СД определяют необходимость использования различных критериев оптимизации и методического аппарата для проведения исследований. В частности, функциональный синтез должен проводиться по критерию максимума показателя боевой эффективности перспективной ЗРС СД с использованием методик (моделей), воспроизводящих динамику конфликта ЗРС с совокупностью СВН разных типов в прогнозируемых условиях их боевого применения [11]. Технический и конструктивный синтезы должны выполняться по критерию минимума стоимости создания подсистем (составных частей) перспективной ЗРС СД с заданными характеристиками. Для проведения технического и конструктивного синтеза должны использоваться методики, позволяющие рассчитывать частные показатели эффективности (характеристики) основных боевых и технических средств

перспективной ЗРС СД в зависимости от характеристик входящих в их состав функциональных систем (комплектующих изделий).

Основным инструментом реализации описанной процедуры формирования облика перспективной ЗРС СД является математическое моделирование, задачей которого является получение оценок эффективности применения существующих и перспективной ЗРС СД в прогнозируемых условиях в составе системы зенитного ракетного вооружения для выявления дефицитов функциональных свойств и формирования вариантов облика перспективной ЗРС СД. Результатом данных исследований является получение описания облика перспективной ЗРС СД в виде совокупности количественно-качественных признаков (параметров), характеризующих данную систему с точки зрения функциональных и экономических характеристик, а также показатели боевой эффективности. К таким показателям относятся [11]:

1) признаки (параметры), определяющие внешнюю конфигурацию и топологию перспективной ЗРС СД: типы, количество и массогабаритные характеристики информационно-управляющих, разведывательно-информационных и огневых средств и средств технического обеспечения; функциональные взаимосвязи между элементами перспективной ЗРС СД при решении задач борьбы с заданными типами СВН: предельные (максимальные или минимальные) расстояния между элементами ЗРС при их размещении на местности, организация и структура системы ПВО, в рамках которой осуществляется (будет осуществляться) функционирование и боевое применение перспективной ЗРС СД;

2) признаки, характеризующие прикрываемые объекты: категория и характеристики (дислокация, размеры, степень важности) объектов, ожидаемый наряд ударных сил на прикрываемые объекты;

3) признаки, характеризующие поражаемые СВН: типы целей с указанием их приоритетности; эффективные поверхности рассеяния, характеристики контрастности и собственного излучения целей в диапазонах волн приемопередающих устройств ЗРС; характеристики уязвимости целей; диапазон скорости полета целей по высотам; максимальная и минимальная высоты боевого применения; типовые варианты боевых действий целей, боевые порядки, виды маневров, перегрузки, углы пикирования;

4) признаки боевой эффективности: требуемая эффективность прикрытия объектов (войск) от ударов СВН; вероятности поражения одиночных целей одной ЗУР для различных типов целей;

5) признаки огневых средств: параметры зоны поражения применительно к каждому типу используемых ЗУР для различных типов целей;

6) признаки огневой производительности: количество целевых и ракетных каналов; рабочее время (время от обнаружения цели до момента схода ракеты); время заряжания (перезаряжания) пусковых (пуско-заряжающих) установок (ПУ, ПЗУ); минимальный интервал между пусками ракет; время непрерывной работы средств ЗРС; степень автоматизации процессов управления и использования ЗРС; возможность ведения ЗРС самостоятельных боевых действий; боекомплект ракет (по типам ЗУР); массогабаритные характеристики ПУ, ПЗУ;

7) признаки условий ведения стрельбы: с заранее подготовленных позиций, с полевых позиций, с коротких остановок, в движении;

8) признаки ЗУР: средние скорости ЗУР при стрельбе на дальнюю границу зоны поражения; ограничения по стартовой массе и габаритным размерам.

Каждый признак облика перспективной ЗРС СД определяется множеством конструктивно-компоновочных решений, а технические решения, в свою очередь, определяются вектором геометрических, конструктивных, а, применительно к ЗУР, и баллистических параметров. Разработка, систематизация и формализованное описание технических решений могут быть проведены на основе анализа состояния и прогнозов развития элементной базы, патентных исследований, опыта проектирования, физических законов, исследований областей применения тех или иных проектных решений.

Таким образом, сущность задачи синтеза рационального технического облика перспективной ЗРС СД состоит в нахождении таких состава, структуры и технических характеристик системы и ее основных составных частей, которые обеспечивают экстремальное значение выбранного показателя боевой эффективности при заданных ресурсных и технологических ограничениях.

Приведенный алгоритм решения задачи синтеза облика перспективной ЗРС СД в методологическом плане позволяет поднять

уровень обоснованности тактико-технических требований и технических предложений по созданию системы, как изделия военной техники конкретного целевого назначения, структурировать этот процесс в виде последовательности взаимоувязанных процедур, что, в свою очередь, позволит перейти к разработке методик и формализации основных этапов функционального и схемотехнического проектирования ЗРС с учетом имеющейся в наличии технологической базы.

Наличие развитой технологической основы обеспечивает возможность формирования облика перспективной ЗРС СД, позволяющей парировать существующие тенденции развития СВН и способов его применения.

Совокупность технологий, используемых для создания современных ЗРС СД, образует так называемый технологический базис, под которым понимают сложноструктурированную область документированных знаний и данных, описывающих ЗРС СД как изделие военной техники конкретного целевого назначения, ее состав, основные характеристики, конструктивные решения и особенности функционирования, а также способы его создания, серийного производства, эксплуатации, ремонта и утилизации [12]. Степень способности государства к самостоятельному производству ЗРС СД на основе современного технологического базиса является одним из важных показателей уровня развития его оборонно-промышленного комплекса (ОПК).

Структурными компонентами технологического базиса ЗРС СД являются технологии построения, функционирования и боевого применения ее составных частей (боевых и технических средств), к которым, в общем случае, относятся технологии [13]: обзорных и стрельбовых РЛС; командно-управляющих средств (пунктов боевого управления); пусковых (пуско-заряжающих) установки (устройств); средств технического обеспечения; базовых шасси; зенитных управляемых ракет (ЗУР).

Составными элементами указанных технологий являются технологии функциональных устройств и систем, к которым относятся технологии антенных, передающих и приемных устройств, устройств индикации и отображения информации, специализированных средств вычислительной техники, связи, электропитания и другие технологии,

необходимые для создания и применения составных частей современных ЗРС СД.

Технологии функциональных устройств и систем, в свою очередь, базируются на технологических достижениях в области микро- и наноэлектроники, оптоэлектроники и лазерной техники, компьютерных и информационных технологий, новых материалов и веществ.

Среди перечисленных технологий особое место занимают базовые (критические) технологии. Эти технологии нацелены на решение принципиально новых военно-технических задач и могут обеспечить существенный прирост тактико-технических характеристик перспективной ЗРС СД ЗРО или значительное снижение затрат на ее эксплуатацию. Состав и приоритетность критических технологий, необходимых для создания современного и перспективного зенитного ракетного вооружения с развитием области военных технологий и смежных областей должен непрерывно уточняться.

Наиболее полно тенденции развития технологического базиса современных ЗРС СД, обеспечивающих решение задач противосамолетной и тактической противоракетной обороны, находят свое отражение в тактико-технических характеристиках и в конструктивных особенностях современных и перспективных ЗРС СД, разработанных или разрабатываемых в развитых странах мира. К ним в настоящее время относятся американские ЗРК семейства «Пэтриот», российские ЗРК семейства С-300ПМУ, ЗРС С-300ВМ «Антей-2500», ЗРК «Витязь», а также ЗРК MEADS, совместную разработку которого осуществляют США, Германия и Италия, и ЗРК SAMP/T, разрабатываемые Францией и Италией.

Важнейшим компонентом технологического базиса перспективных систем ЗРС СД являются радиолокационные технологии, направленные на создание и совершенствование специализированных обзорных и стрельбовых РЛС [9]. Основными функциями этих РЛС являются обнаружение, распознавание, сопровождение, измерение координат и параметров движения большого числа воздушных целей в сложной помеховой обстановке, а также одновременное наведение заданного количества ЗУР на назначенные для обстрела цели. Эффективность выполнения указанных функций зависит как от общей технологической структуры РЛС, так и от качества конструирования составляющих их устройств, узлов и элементов, к которым относятся антенно-фидерные,

приемо-передающие и индикаторные устройства, средства вычислительной техники, автоматического управления и регулирования, различные типы механических узлов и блоков.

В настоящее время в РЛС ЗРС СД для построения сканирующих остронаправленных антенн наибольшее распространение получили технологии фазированных антенных решеток (ФАР), которые позволяют реализовать высокую скорость обзора пространства и увеличить объем информации о распределении источников излучения или отражения электромагнитных волн в окружающем пространстве. Анализ тенденций развития общей технологической структуры РЛС показывает, что принципиально новые характеристики обзорных и стрельбовых РЛС могут быть достигнуты на базе современных технологий вычислительной техники при органическом слиянии антенны с передающим и приемным устройствами и с системой пространственно-временной обработки сигналов. В настоящее время эта технология реализуется в РЛС, создаваемых на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР), представляющих собой сочетание миниатюрных радиолокационных приемо-передающих устройств (активных элементов), которые работают в строго согласованном режиме. При этом АФАР становится, по существу первичным звеном обработки и в значительной мере определяет основные характеристики РЛС. Общими узлами РЛС в этом случае являются синхронизатор, высокочастотное распределительное устройство, вычислитель управления лучом, преобразователи информации и индикаторные устройства.

Научно-теоретической базой развития технологий специализированных РЛС ЗРК СД являются достижения в области радиолокации, которая в настоящее время переходит в новое качество – в радиолокационную системотехнику. Функционирование РЛС в системотехнике рассматривается как алгоритм обработки информации. В связи с интенсивным развитием вычислительной техники важное место в реализации алгоритмов обработки информации в современных РЛС занимают информационные технологии.

Другим важнейшим компонентом технологического базиса перспективных ЗРС СД являются ракетные технологии, поскольку боевые возможности ЗРС СД в значительной мере определяются обликом

и ТТХ используемых зенитных управляемых ракет. Основными тенденциями развития ЗУР, в настоящее время являются [3]:

- модульное построение, высокий уровень унификации, простота эксплуатации и технического обслуживания, способность функционировать в любых погодных условиях;

- уменьшение массы и точности наведения, реализация режима “сверхманевренности” за счет внедрения методов газодинамического управления;

- уменьшение времени реакции и перехвата цели за счет вертикального старта и высоких скоростей полета;

- повышение вероятности поражения вискоскоростных, малоразмерных и малозаметных целей

- расширение диапазона дальностей и высот полета, использование аэробаллистических траекторий, совершенствование систем управления с целью обеспечения поражения СВН в широком диапазоне дальностей (от 10 до 400 км), высот (от 0 до 35 км) и скоростей (от 0,2 до 8 М) полета при ограниченном времени их пребывания в зоне поражения, малой ЭПР и активном противодействии;

- совершенствование боевого снаряжения ракет, повышение эффективности поражения целей боевым снаряжением, использование специальных энергетических средств для корректирования полету ракеты в зоне поражения.

Важное место в технологическом базисе ЗРС СД занимают технологии командно-управляющих средств, которые предназначены для автоматизации управления процессами боевой работы ЗРС СД в режимах протовосамолетной и тактической протиракетной обороны. Необходимость использования и развития этих технологий обусловлена высокими плотностями налета СВН и скоротечностью современного противовоздушного боя. Технологии современных командно-управляющих средств ЗРС СД нацелены на реализацию сетевой структуры построения системы управления, обеспечивающей получение информации от различных источников и своевременную выдачу целеуказания на средства поражения и противодействия в реальном масштабе времени. Составными элементами этих технологий являются:

- технологии создания средств управления в сочетании с развитием средств связи и средств временной синхронизации (единой системы

времени), позволяющие по-новому решать задачи целераспределения и целеуказания.

- технологии создания высокопроизводительных спецвычислителей и вычислительных машин общего назначения, а также эффективных алгоритмов обработки информации, позволяющих решать весь спектр вычислительных задач – от обработки локационных сигналов в реальном времени, распознавания целей и завязки трасс, до решения задач оптимального распределения огневых и информационных ресурсов в динамике боевых действий противоборствующих сторон;

- технологии индикаторных устройств, связи и передачи данных, функционального контроля и документирования результатов боевой работы, тенденции развития которых и определяют в настоящее время основные тенденции развития командно-управляющих средств в целом.

К важным компонентам технологического базиса современных и перспективных систем ЗРС СД относятся технологии пусковых установок (пусковых устройств), которые совместно возможностями РЛС (числом целевых каналов) определяют огневую производительность современных ЗРС СД. Современные технологии пусковых установок (устройств) нацелены на создание изделий, обеспечивающих размещение и транспортировку значительного числа ТПК с ракетами, прицеливание, предстартовую подготовку и пуск ракет из ТПК [1, 2]. Пусковые установки объединяются общим командным пунктом, информационной системой, связью и коммуникациями. В ряде современных ЗРС СД стрельбовый радиолокатор размещается на одном шасси с пусковой установкой, что позволяет сократить время реакции ЗРС.

Задача разработчика при применении данных технологий для оптимизации облика перспективной ЗРС СД заключается в согласовании ТТХ боевых и технических средств данной системы по критерию «стоимость-эффективность». Суть этого согласования заключается в том [10], что обзорная РЛС по размерам зоны действия, пропускной способности, точностным характеристикам должна обеспечивать своевременное обнаружение аэродинамических и баллистических целей различного типа и выдачу по ним информации на стрельбовую РЛС для последующего вывода ракет на дальнюю границу зоны поражения и наведения ракет на цели с необходимой точностью. При этом стрельбовая РЛС должна обеспечивать ЗУР информацией необходимой точности на рубежах, обеспечивающих полную реализацию их летно-

технических характеристик, позволяющих поражать цели на дальней границе и в глубине зоны поражения до нанесения целями ущерба прикрываемым объектам. Величина боекомплекта ЗУР, скоростные характеристики ЗУР и система управления ими, пропускные способности пункта боевого управления, стрельбовых и обзорной РЛС должны быть согласованными и обеспечивать отражение массированных ударов различных типов СВН.

Важным компонентом технологического базиса современных ЗРС СД является технология обеспечения их мобильности, что достигается размещением боевых и технических средств ЗРС СД на самоходных колесных или гусеничных шасси повышенной проходимости. Базовые шасси (средства подвижности или базовые машины) современных ЗРС СД оборудуются встроенными системами автономного электропитания, ориентирования и топопривязки, связи и жизнеобеспечения. Основными тенденциями развития технологий базовых шасси в настоящее время являются сокращение их номенклатуры и унификация узлов, повышение грузоподъемности, проходимости, маневренности и скорости передвижения по разным типам дорог и по бездорожью [13].

ВЫВОДЫ С ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Таким образом, учет достижений современного технологического базиса является одним из основных условий формирования рационального технического облика ЗРС СД в условиях имеющихся финансовых и технологических ограничений. Решение этой задачи в методологическом плане требует разработки системы имитационно-математических моделей, описывающих процесс боевого функционирования перспективной ЗРС СД при выполнении совокупности боевых задач в прогнозируемых условиях ведения боевых действий.

Предложенный подход к решению задачи формирования облика перспективной ЗРС СД, предусматривающий выполнение функционального, технического и конструктивного синтеза по критериям максимума боевого показателя эффективности системы и минимума стоимости создания ее подсистем с требуемыми характеристиками позволяют поднять уровень обоснованности тактико-технических требований и технических предложений по созданию ЗРС СД и структурировать этот процесс в виде

последовательности взаимоувязанных процедур, что, в свою очередь, позволит перейти к разработке методик и формализации основных этапов функционального и схемотехнического проектирования ЗРС нового поколения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

- [1] Ненартович Н.Э. (2001) Современные зенитные ракетные системы ПВО и нестратегической ПРО. Воздушно-космическая оборона. №3
- [2] Коровин В. Н. (2010) Ракетные комплексы ПВО: тенденции развития // Национальная оборона. – №12
- [3] Болотов Е. Г., & Б. Я. Мизрохи (2004) Новое поколение зенитных управляемых ракет средней дальности Вестник ПВО
- [4] Гриб Д. А., Лук'янчук В. В., & Николаев І. М. (2016) Основні проблеми і напрями розвитку зенітного ракетного озброєння на тривалу перспективу Озброєння та військова техніка. № 1 (19)
- [5] Вишнякова Л. В., Карп К. А., & Малышев В. В. Формирование облика ЗРС – М.:МАИ
- [6] Баскаков В. В. (2006) Методологические аспекты обоснования перспективного облика системы вооружения. Вестник Академии военных наук № 2 (15).
- [7] Самохвалов Ю. Я., Наumenко Е. М., & Бурба И.О. Формирование технического облика автоматизированных систем. Реєстрація, зберігання і обробка даних. Т. 13. –№ 3.
- [8] Балыбин В. А., Баринов С. П., & Маевский Ю. Л. (2005) Обоснование тактико-технических требований к технике радиоэлектронной борьбы: методологический аспект. Военная мысль. № 9
- [9] Друзин С.В., & Горевич Б.Н. (2020) Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»
- [10] Друзин С. В., Майоров В. В., & Горевич Б. Н. (2019) Создание перспективной системы вооружения войсковой ПВО нового облика // Вестник «Концерна ВКО «Алмаз – Антей»». № 4.
- [11] Николаев И. М. (2018) Формализация задачи синтеза облика зенитной ракетной системы нового поколения на основе системно-концептуального подхода. Озброєння та військова техніка. № 4
- [12] Ланецький Б. (2013) Структура і тенденції розвитку технологічного базису сучасного зенітного ракетного озброєння середньої та великої дальності. Наука і оборона. № 4
- [13] Лук'янчук В. В., Николаев І. М., Опенько П. В., & Дзюбенко Ю. А. (2019) Шляхи і принципи розвитку технологічного базису зенітного ракетного озброєння. Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence, № 3(36)
- [14] Зубарев В. В., Ланецький Б. М., Лук'янчук В. В., & Николаев І. М. (2021) Методічні аспекти обґрунтування оперативних вимог до системи зенітного ракетного озброєння// Озброєння та військова техніка. №1 (25)
- [15] Савельев, А., Запара, Д., Новіченко, С., Деменко, М., Доска, О., Третьяк, В., & Власов, А. (2021). Структура інформаційно-розрахункової системи підтримки прийняття рішення «АРГУМЕНТ – 2021». *InterConf*, (49), 631-642. <https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.04.2021.069>
- [16] Лук'янчук, В., Николаев, И., Терехуха, И., Фоменко, Д., Запара, Д., Калугин, Д., & Третьяк, В. (2021). Общая постановка задачи управления старением зенитных ракетных систем средней и большой дальности на основе современных информационных технологий. *InterConf*, (42), 1110-1114. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2021.110>
- [17] Лук'янчук, В., Николаев, И., Васильев, В., Запара, Д., Фоменко, Д., Кобзев, В., & Третьяк, В. (2021). Описательная модель задачи обоснования стоимости полного жизненного цикла зенитной ракетной системы с использованием информационных

технологий. *ГРААЛЬ НАУКИ*, (1), 144-153. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.028>

- [18] Коломійцев, О., Кудряшов, В., Третьяк, В., Кулешов, О., & Клівець, С. (2020). Оцінювання значень умовних ймовірностей ураження нетипової повітряної цілі у різноманітних умовах. *Збірник наукових праць ЛОГОС*, 132-135. <https://doi.org/10.36074/05.06.2020.v4.46>

УДК 519.816:65.064

Опубліковано 9 грудня 2021 року

МЕТОД ВИБОРУ СТАЦІОНАРНОГО RFID-ЗЧИТУВАЧІВ БАГАТЬМА КРИТЕРІЯМИ

ФІЛЬ Наталія Юріївна 

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІЛЬГЕ Ігор Генріхович 

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

УКРАЇНА

Анотація: В роботі розглядається проблема автоматизації обліку складу підприємства на основі RFID технологій. Проведено аналіз проблеми вибору RFID зчитувача для складу підприємства. Розроблено метод вибору стаціонарного RFID зчитувача для складу підприємства за багатьма функціональними та вартісними критеріями. Для забезпечення якості рішень обґрунтовані методи багатокритеріальної оцінки й оптимізації, які є більш стійкими в порівнянні з методом аналізу ієрархій, і менш трудомісткими, так як не вимагають визначення кількісних оцінок шуканих параметрів. Наведено приклад вибору стаціонарного RFID зчитувача для складу підприємства.

ВСТУП.

Пандемія COVID-19 змінила багато сфер бізнесу. Складська галузь не стала винятком. За 2020 світовий обсяг електронної комерції під впливом карантину зріс на 25,7% і це одна з причин для швидкого розвитку складської логістики [1]. На складах здійснюється цілий комплекс різноманітних послідовно виконуваних операцій пов'язаних з надходженням, зберіганням і відпуском товарів. Ці операції в сукупності і складають складський технологічний процес. Зміст і обсяг складського технологічного процесу залежать від виду складу, фізико-хімічних властивостей товарів, що зберігаються на ньому, обсягу вантажообігу й інших факторів.

Ефективність складського технологічного процесу забезпечується

не тільки його раціональною побудовою, але чітким обліком наявності товарів на складі підприємства.

Будь-яка система обліку товарів на складі повинна містити не тільки інформацію про наявність, але також інформацію про місце знаходження товарів, про всі відвантаження й одержання товарів. У той же час, багато систем на підприємствах не забезпечують прийняття правильних рішень керування запасами саме через те, що не мається точних даних про наявність товарів [2].

На даний момент найбільш розповсюджена технологія контролю складських процесів це штрих-кодів. Штрих-кодування має ряд істотних недоліків. Сканування кожного товару передбачає необхідність прямої видимості штрих-коду. Зовнішніх впливів середовища можуть істотно впливати на визначення об'єкту. Крім того, існує велика вірогідність підробки штрих-кодів. Штрих-кодування має значну похибку проти RFID рішеннями.

Принцип роботи RFID технології досить простий та надійний. На кожен об'єкт кріпиться пасивна мітка з мікрочипом [3].

RFID технологія найбільш сучасна й ефективна для відстеження ланцюжків постачання та контролю будь-яких товарів. При цьому не заперечує використання штрих-кодування для додаткового контролю, оскільки RFID зчитувачі можуть мати додатковий модуль бар-кодів. Спеціальні зчитувачі генерують електромагнітне поле. За допомогою антени в позначці цим полем заряджається конденсатор і передає інформацію, записану на мікрочипу, назад на зчитувач.

Основні переваги RFID рішень для складського обліку: висока дальність зчитування без необхідності прямої видимості; 100% точність даних (кожна мітка має свій унікальний неповторний номер); висока швидкість зчитування. Ця перевага дозволить приймати невеликі товари партіями/палетами, не розбираючи їх; можливість пошуку конкретного об'єкту; контроль приймання/відвантаження товару (можливість встановлювати зчитувачі як на входах/виходах складу, так і безпосередньо в кузовах перевізників); можливість контролювати наявність/переміщення товарів у реальному часі; можливість розробити функціонал під завдання замовника; неможливість підробити мітку.

Для автоматизації складського обліку необхідно [3]:

– на кожен об'єкт кріпиться спеціальна мітка, яка працює на частоті 866 МГц із стандартом EPC UHF Class 1 Gen2. Також додатково може

наноситися штрих-код. До унікального номера мітки (UID) прив'язується конкретний товар і цей номер вноситься до бази. До нього можна прив'язати будь-яку інформацію (найменування, дата отримання/відвантаження, компанія одержувач тощо);

– на комп'ютер встановлюється спеціальне програмне забезпечення (ПЗ). ПЗ може бути інтегровано до існуючої бази даних. ПЗ може бути як веборієнтованим так і бути окремим додатком. Спеціальне ПЗ може видавати інформацію про процеси на складі та формувати звіти за заданими параметрами;

– у необхідному місці кріпляться стаціонарні RFID зчитувачі та антени. Таке обладнання може бути розміщене по всій території складу, на точках прийому/відвантаження товару або безпосередньо в автомобілях перевізника. RFID зчитувачі можуть збирати інформацію про об'єкти складі реальному часі й у конкретних точках при перенесенні крізь них. Дальність зчитування може сягати 12-15 метрів.

Впровадження RFID технології дозволяє:

- підвищити швидкість та ефективність приймання/відвантаження та інвентаризації товару, отже заощадивши час та людину/години;
- в будь-який момент отримати об'єктивну картину наявності товару;
- мати зрозумілі та точні звіти щодо складських процесів;
- надає можливість здійснювати адресне зберігання;
- надає можливість відстежувати переміщення товару;
- надає можливість швидкого пошуку потрібного об'єкту;
- надає можливість вчасно відвантажувати товари (наприклад, при закінченні терміну придатності, ви про це дізнаєтесь);
- підвищує захищеність товару від крадіжки (завдяки неможливості підробки мітки та контроль за товарами в реальному часі).

Різноманітність товарів, величезна їх кількість та людський фактор на складі змушує використовувати сучасні технології автоматизації обліку товарів.

Проблемі автоматизації у складській діяльності підприємств присвячено багато робіт. У роботі [4] розглянуто технології створення «розумного» складу. Впровадження нових технологій у складську діяльність оптимізують простір складу та дозволяють створити єдину систему обліку матеріалів та готової продукції в організації.

В роботі [3] зазначено, що наповнення сучасного складу залежить перш за все від завдань бізнесу і планів масштабування продукту. А

логістичний бізнес потребує постійного контролю: переміщення товарів, облік, їх зберігання і т.д. Тому на сьогоднішній день сучасний склад необхідно забезпечити системами відеоспостереження, обліку/руху вантажів і кваліфікованим персоналом.

Важливим фактором ефективності логістики є автоматизація та комп'ютеризація складської роботи. При цьому системи автоматизованого складу повинні впроваджуватися тільки після використання більш простих логістичних рішень, інакше належного ефекту не буде.

В роботі [5] Проведено аналіз технічних рішень, що приймаються виробниками RFID міток та розробників відповідних стандартів, дозволив виявити основні особливості пасивних та активних міток з чипом, які повинні лежати в основі рішень при виборі елементної бази систем RFID ідентифікації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА.

Метою дослідження є підвищення ефективності обліку товарів на складі за рахунок розробки методу вибору RFID-зчитувача, що дозволить підвищити швидкість та ефективність приймання/відвантаження та інвентаризації товару.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести аналіз проблеми вибору RFID зчитувача;
- розробити метод вибору RFID зчитувача за багатьма функціональними та вартісними критеріями;
- навести приклади використання розробленого методу вибору RFID зчитувача за багатьма функціональними та вартісними критеріями.

Розглянемо загальну постановку задачі вибору RFID-зчитувачів багатьма критеріями. Постановку задачі вибору RFID-зчитувача.

Відомо: множина RFID-зчитувачів $T = \{T_k\}, k = \overline{1, k'}$.

Кожний RFID-зчитувач, характеризується рядом показників:

- 1) дальність зчитування k -го RFID-зчитувача – D_k ;
- 2) кількість інтерфейсів k -го RFID-зчитувача – S_k ;
- 3) маса k -го RFID-зчитувача – V_k ;
- 4) вартість k -го RFID-зчитувача – C_k

Введемо булеву змінну $x_k = \{0;1\}$, $x_k = 1$ якщо обраний RFID-зчитувача k -го, $x_k = 0$ у протилежному випадку. Необхідно обрати RFID-зчитувач.

Критерії для вибору RFID-зчитувача можуть бути:

– максимальна дальність зчитування RFID-зчитувача:

$$D = \sum_{k=1}^{k'} D_k x_k \rightarrow \max; \quad (1)$$

– максимальна кількість інтерфейсів RFID-зчитувача:

$$S = \sum_{k=1}^{k'} S_k x_k \rightarrow \max; \quad (2)$$

– мінімальна вартість RFID-зчитувача:

$$C = \sum_{k=1}^{k'} C_k x_k \rightarrow \min. \quad (3)$$

Область припустимих рішень при виборі RFID-зчитувача визначається обмеженнями:

– дальність зчитування повинна бути не менше заданої $D_{зад}$:

$$\sum_{k=1}^{k'} D_k x_k \geq D_{зад}; \quad (4)$$

– кількість інтерфейсів не менше заданої $S_{зад}$:

$$\sum_{k=1}^{k'} S_k x_k \geq S_{зад}; \quad (5)$$

– вартість RFID-зчитувача повинна бути не більше заданої $C_{зад}$:

$$\sum_{k=1}^{k'} C_k x_k \leq C_{зад}; \quad (6)$$

– маса RFID-зчитувача повинно бути не більше заданої $V_{зад}$:

$$\sum_{k=1}^{k'} V_k x_k \leq V_{зад}; \quad (7)$$

– з множини RFID-зчитувача може бути обраний тільки один:

$$\sum_{k=1}^{k'} x_k = 1. \quad (8)$$

Розроблена модель (1) – (8) відноситься до задач багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

Для забезпечення якості рішень, що приймаються, при проектуванні різноманітних систем необхідно вибрати і обґрунтувати методи їх

багатокритеріальної оцінки і оптимізації [6-7]. Найбільш поширений підхід до рішення багатокритеріальної задачі – її зведення до однокритеріальної [6-7]. Основою такого підходу є теорія корисності.

Для вирішення задачі використовується функція корисності часткових критеріїв $R_f(k_f)$, $f = \overline{1, F}$, яка є універсальною і відображає особливості конкретних систем, їх цілей і критеріїв [6-7]

$$R_f(k_f) = \frac{k_f - k_f^{HG}}{k_f^{HK} - k_f^{HG}}, f = \overline{1, F}, \quad (9)$$

де k_f, k_f^{HG}, k_f^{HK} – поточне, найгірше (гранично допустиме) і найкраще значення f -го часткового критерію, що відповідають межах області його зміни (наближеній області компромісів).

Функція корисності часткових критеріїв (9) задовольняє наступним умовам: має єдиний інтервал змін $[0,1]$; є безрозмірною, інваріантною до виду екстремуму часткового критерію (*min* и *max*), тобто. найкращому значенню відповідає 1, а найгіршому – 0.

Якщо всі часткові критерії задані в ізоморфній нормалізованій формі, використовуючи функцію корисності (9), то інформація про важливість часткових критеріїв визначається безрозмірними коефіцієнтами, що враховують відносну важливість критеріїв, тобто:

$$\sum_{f=1}^F \lambda_f = 1, \text{ де } \lambda_f \in [0,1] \text{ (} j = \overline{1, F}\text{)}. \quad (10)$$

Велика група схем компромісу заснована на принципі максимальної адитивної корисності часткових критеріїв, тобто на можливості компенсації значень одних часткових критеріїв значеннями інших. Деякі функції корисності часткових критеріїв можуть набувати навіть нульових значень. В цьому випадку при відомих значеннях вагових коефіцієнтів λ_f ($j = \overline{1, F}$) часткових критеріїв і їх функцій корисності $R_f(x)$ оцінка проектних рішень $x \in X$ і вибір найкращого x^0 проводиться за узагальненим критерієм виду [6-7]:

$$W'(x^0) = \max_{x \in X} \sum_{f=1}^F \lambda_f R_f(x) \quad \left| \quad \sum_{f=1}^F \lambda_f = 1. \quad (11)$$

Метод багатокритеріальної оптимізації більш стійкий в порівнянні з методом аналізу ієрархій, і менш трудомісткий, так як не вимагає визначення кількісних оцінок шуканих параметрів [6-8].

Метод багатокритеріальної оптимізації дозволяє враховувати приховану інформацію. Особа, що приймає рішення визначає важливість критеріїв за якими проводиться вибір альтернатив. В цьому випадку особа, що приймає рішення покладається на свій досвід прийняття рішень [8].

Метод багатокритеріальної оптимізації є ефективним при розробці систем підтримки прийняття рішень при розв'язанні слабоформалізованих багатокритеріальних задач [9-10].

Розглянемо приклад вибору стаціонарного RFID-зчитувача для складу.

В якості альтернатив будемо розглянемо стаціонарні RFID-зчитувачі, які представлені на ринку України для роботи на складі.

UHF RFID зчитувачі використовують для передачі, прийому та обробки сигналів від ультрависокочастотних пасивних RFID міток стандарту EPC Class 1 Gen 2, ISO/IEC 18000-6:2010. Найбільш поширений діапазон роботи таких зчитувачів становить від 860 до 960 МГц.

Основними перевагами використання UHF зчитувачів є висока швидкість (до 100 разів/сек) і велика дальність (близько 10 метрів) реєстрації RFID міток. Важливим плюсом є вбудована функція антиколізії, яка дає можливість одночасної реєстрації близько 300 унікальних міток.

Характеристики RFID-зчитувачів представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики RFID-зчитувачів

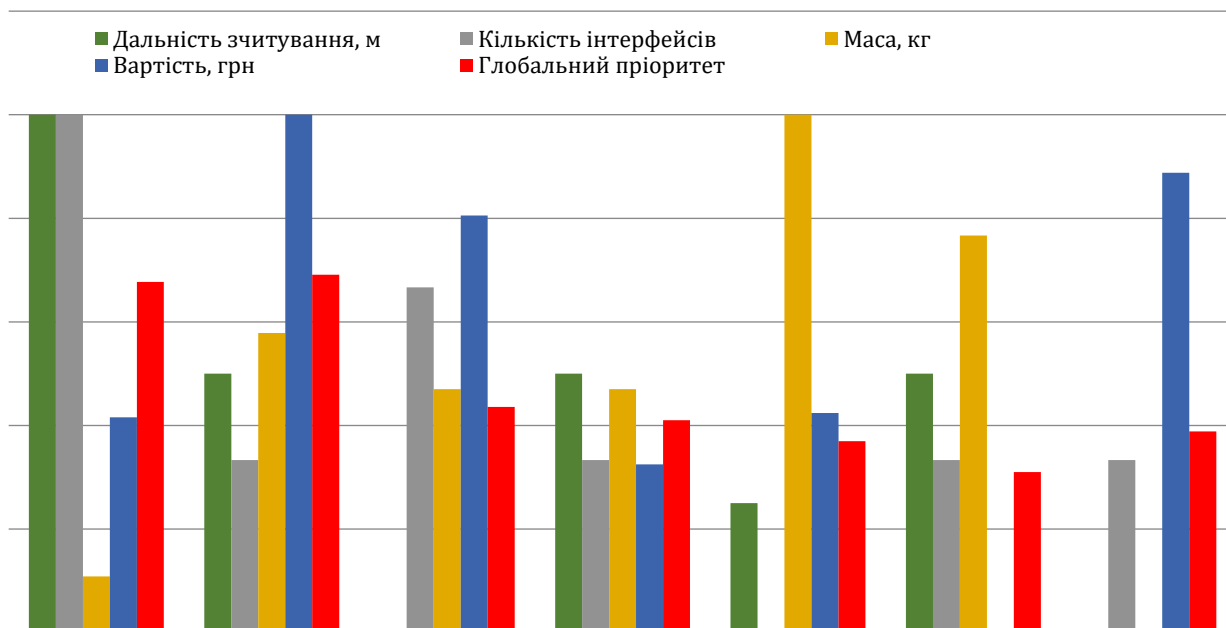
№ п/п	Модель	Дальність зчитування, м	Кількість інтерфейсів	Маса, кг	Вартість, грн
1	Kraid DG TV-6600A	12	4	2.50	21 945,00
2	Kraid DG-TV - 6319B	10	2	1.20	10276.75
3	Fresh FR-920	8	3	1.50	14162.5
4	KRT-2600	10	2	1.50	230760
5	CaenRFID Proton R4320C	9	1	0.035	21780
6	AdvanReader-150TM	10	2	0.68	30250
7	Feig ID MAX.U500i	8	2	2.8	12 512,50

Розрахунок функцій корисності та загальної оцінки RFID-зчитувачів представлено на рис. 1.

№ п/п	Модель	Дальність зчитування, м	Функція корисності	Кількість інтерфейсів	Функція корисності	Маса, кг	Функція корисності	Вартість, грн	Функція корисності	Глобальний пріоритет
1	Kraid DG TV-6600A	12	1	4	1.000	2.50	0.11	21 945.00 грн.	0.416	0.6772
2	Kraid DG-TV - 6319B	10	0.5	2	0.333	1.20	0.58	10 276.75 грн.	1.000	0.6912
3	Fresh FR-920	8	0	3	0.667	1.50	0.47	14 162.50 грн.	0.805	0.4359
4	KRT-2600	10	0.5	2	0.333	1.50	0.47	23 760.00 грн.	0.325	0.4103
5	CaenRFID Proton R4320C	9	0.25	1	0.000	0.035	1.00	21 780.00 грн.	0.424	0.3696
6	AdvanReader-150TM	10	0.5	2	0.333	0.68	0.77	30 250.00 грн.	0.000	0.3100
7	Feig ID MAX.U500i	8	0	2	0.333	2.8	0.00	12 512.50 грн.	0.888	0.3886
	Найгірше		8		1		2.80		30250.000	
	Найкраще		12		4		0.04		10276.750	
	Значущість критерію		0.4		0.1		0.1		0.4	

Рис. 1 Розрахунок функцій корисності

На рис. 2 представлена графічна інтерпретація отриманих результатів. Для розрахунків було використано Microsoft Excel.

Рис 2. Графічна інтерпретація отриманих результатів
[авторська розробка]

За розрахунками обрано RFID-зчитувач з максимальною загальною оцінкою – Kraid DG-TV - 6319B.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Сучасний склад - це складна технічна споруда, яка виконує ряд функцій по перетворенню параметрів матеріальних потоків, а також накопиченню, переробці і розподілу вантажів між споживачами.

Ключовим завданням організації зони зберігання є швидкий доступ до потрібного товару та оперативний облік асортименту вантажів, що зберігаються. Проблема впровадження інноваційних технологій обліку товарів на складі підприємства має велике практичне значення.

В роботі розроблено метод вибору RFID зчитувача за багатьма функціональними та вартісним критеріями. Наведено приклад використання розробленого методу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку програмно-методичних комплексів розв'язання поставлених задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Зростаючий попит з боку e-commerce стимулює відновлення ринку. URL: <https://cbre-expandia.com/zrostayuchij-popit-z-boku-e-commerce-stimulyu%D1%94-vidnovlennya-rinku/>.
- [2] Сучасний склад: яким він повинен бути: URL: <https://ssk.ua/ua/blog/sovremennyj-sklad-kakim-dolzhen-byt-451>.
- [3] RFID-считыватели. веб-сайт. URL: <http://rfidukraine.com.ua/rfid-readers/>.
- [4] Ильинцева, А. А. (2019) Роль «умных» технологий в управлении современным складом. *Вестник Ивановского государственного университета* (1) 68-72.
- [5] Верзун, Н. А., Воробьева, Д. М., Колбанёв, А. М. & Колбанёв М. О. (2018) Обзор технологий и стандартов RFID систем. *Информационные технологии и телекоммуникации*. (6 № 1). 1–11.
- [6] Петров Э.Г. Брынза Н.А., Колесник Л.В., Пискалова О.А. (2014) *Принятие решений в условиях многокритериальности и неопределенности*. Херсон.: Гринь Д.С. ISBN 978-617-7243-15-0.
- [7] Петров, Е. Г., Новожилова, М. В., & Гребенник, І. В. (2004). *Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах*. К.: Техніка.
- [8] Філь Н.Ю., Резвих С.М. Модель вибору систем автоматизації будівель в умовах нечіткої інформації (2017). *Технологія приборостроєння*. (2) 3-5.
- [9] Філь, Н. Ю. Ільге І. Г. Модель вибору мініекскаватора для дорожньо-будівельних робіт за багатьма критеріями (2021) *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр.* (92, т. 1) 114–118. <http://doi:10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.114>.
- [10] Петренко Ю. А. Посукан Р. В. Розробка моделі вибору промислового робота. матеріали науково-практичної конференції «International scientific and practical conference» (23-27). 25–26 September 2020. Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-79-2-2.5>.

МУЛЬТИФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ПОТУЖНОГО ГЕНЕРАТОРА

ХВАЛІН Денис Ігорович 

канд. техн. наук, учений секретар
Інститут проблем безпеки атомних електростанцій

УКРАЇНА

Анотація: Показано переваги побудови математичних моделей у програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Найсуттєвішою перевагою є можливість вирішувати мультифізичні задачі, що дозволяє створювати комплексні (взаємопов'язані) моделі. Представлено алгоритм, математичний опис і розв'язок задачі визначення розподілу електромагнітного поля та температури у торцевій зоні осердя статора потужного турбогенератора у разі застосування чисельного методу. Використано підхід для аналізу теплових процесів у торцевій зоні осердя статора турбогенератора послідовного логічного переходу від простої моделі електромагнітного поля в активній частині машини до більше складних моделей кінцевої зони з використанням попередніх результатів у наступних, що дозволяє отримати рішення для визначення розподілу температури в складних областях. Математична модель відрізняється від тих, що використовуються та відомі на сьогодні, більше повним урахуванням фізико-технічних факторів і достовірністю результатів розрахунку за умов простоти програмної реалізації.

ВСТУП.

Чисельне вирішення системи диференціальних рівнянь, які описують фізичні процеси у кінцевій зоні турбогенератора, можна здійснити у дво- або тривимірній постановці. Двовимірний варіант дозволяє врахувати геометричну структуру конструкції, але тільки в певному перерізі. Варіант тривимірної постановки описує об'ємну структуру конструкції, але з причини надмірної складності розв'язування необхідно спрощувати або навіть ігнорувати низку факторів, які впливають на рішення.

Під час розрахунку магнітних полів електричних машин класичної конструкції (асинхронних, синхронних, постійного струму) тривимірні

розрахунки є занадто трудомісткими, довготривалими й не виправдовують витрат порівняно з двовимірними розрахунками [1]. Рішення такого типу ще рідкі, оскільки, з однієї сторони, вимагають високої кваліфікації дослідників, колосальної підготовчої роботи та тривалих комп'ютерних розрахунків, а з іншої – навіть за умов використання сучасної комп'ютерної техніки ці рішення все одно пов'язані з низкою спрощень і не надають достовірного уточнення результатів. На додаток, досвід досліджень і розробок свідчить: необхідний результат можна отримати за допомогою двовимірних і квазітривимірних польових моделей [2, 3, 4].

Якщо порівнювати зарубіжні та вітчизняні видання, присвячені моделюванню фізичних процесів у торцевій зоні генератора, можна впевнитись в основних перевагах квазітривимірних моделей. Ці моделі є компромісним варіантом, який займає проміжне положення між двовимірним і тривимірним рішеннями. Він ґрунтується на розрахунках магнітного поля в поперечному та поздовжньому перетинах генератора, які взаємопов'язані між собою за допомогою комплексу граничних умов.

Не дивлячись на велику кількість розробок присвячених розрахунку поля у торцевій зоні, вони значно відрізняються одна від одної. Ця відмінність обумовлена різним вибором теоретичних моделей кінцевої зони, математичним описом системи струмів лобових частин обмоток, методами рішення задачі. Складність цієї проблеми є причиною застосування низки припущень під час постановки задачі, придатних в одних випадках і непридатних в інших, у результаті чого одержані рішення часто надто наближено описують закономірності розподілу магнітного поля.

Все це свідчить про необхідність удосконалювання методів розрахунку поля у кінцевій зоні потужної електричної машини з метою підвищення їхньої точності.

ВИБІР ПРОГРАМНОГО ПАКЕТА ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.

Моделювання – це відтворення процесів, які відбуваються у реальному об'єкті або системі шляхом їхньої штучної імітації.

Розрізняють аналітичне та імітаційне моделювання. Під час аналітичного моделювання вивчаються математичні (абстрактні) моделі

реального об'єкта у вигляді алгебраїчних, диференціальних та інших рівнянь, а також тих, що передбачають здійснення однозначної обчислювальної процедури, яка приводить до їхнього точного рішення. Водночас аналітичне моделювання може бути проведене і без комп'ютера, однак, для цього від дослідника вимагається відмінне володіння відповідним математичним апаратом. Під час імітаційного моделювання досліджуються математичні моделі у вигляді алгоритмів комп'ютерних програм, які відтворюють функціонування досліджуваної системи шляхом послідовного виконання великої кількості елементарних операцій. Імітаційне моделювання більше доступне та здебільшого не вимагає такого глибокого знання математики, як аналітичне [5].

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним створенням обчислювальної техніки під час дослідження фізичних процесів природних і технічних систем широкий розвиток отримало саме імітаційне моделювання, яке переважно проводиться із застосуванням методу скінченних елементів, як найбільше перспективному. Здійснюється воно з використанням комп'ютерів, тому називається також комп'ютерним моделюванням.

Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіше та зручніше аналітичних, вони дозволяють проводити так звані обчислювальні експерименти за умов, коли реальні експерименти провести проблематично або взагалі неможливо з причини фінансових і фізичних перешкод, або ж можуть надати непередбачуваний результат (наприклад, вибух). Логічність і формалізованість комп'ютерних моделей дозволяють виявити основні фактори, які визначають властивості об'єкта, що вивчається, зокрема, дослідити відгук фізичної системи на зміну її параметрів, початкових умов або впливів на цю систему. Надалі такі моделі можуть використовуватися для прогнозування ситуацій, які не зустрічалися раніше [6].

На сьогодні створені усі умови для застосування методу скінченних елементів у практиці розрахунків і проектування електричних машин. Зокрема, розроблено зручні програмно-обчислювальні комплекси з метою його комп'ютерної реалізації. Серед найбільше відомих розробок, які отримали міжнародне визнання, необхідно особливо відзначити комплекси FEMLAB, ANSYS, MAXWEL, COMSOL.

COMSOL Multiphysics [7] – це потужне інтерактивне середовище для моделювання та розрахунків методом скінченних елементів більшості

наукових та інженерних задач на основі диференціальних рівнянь. Цей програмний пакет дозволяє розширювати стандартні моделі, які використовують одне диференціальне рівняння (прикладний режим), і мультифізичні моделі для розрахунку зв'язаних між собою фізичних явищ. Розрахунок у цьому середовищі не потребує глибокого знання математичної фізики та методу скінченних елементів. Це можливо завдяки вбудованим фізичним режимам, де коефіцієнти диференціального рівняння у частинних похідних задаються у вигляді величин зрозумілих фізичних властивостей і умов, таких як теплопровідність, теплоємність, густина та інших, залежно від обраного фізичного розділу. Перетворення цих величин у коефіцієнти математичних рівнянь відбувається автоматично.

Блок Multiphysics вміщує настроювальні шаблони, за допомогою яких можна моделювати майже будь-яку комбінацію взаємозв'язаних фізичних явищ, які відбуваються одночасно у складних технічних пристроях.

Крім цього, значною перевагою COMSOL Multiphysics є наявність спеціального модуля для обертових електричних машин, а також потужна візуалізація та можливість проводити нестандартне моделювання різноманітних фізичних процесів.

Тому побудова математичної моделі здійснюється у програмному пакеті COMSOL Multiphysics з використанням електромагнітного та теплового модулів, що надає можливість комплексно розглядати досліджуваний об'єкт.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Як об'єкт дослідження розглянутий серійний турбогенератор типу ТГВ-500 потужністю 500 МВт (Державне підприємство завод «Електроважмаш» міста Харків). Цей вибір обумовлено такими факторами: система охолодження генератора (обмотки статора та ротора охолоджуються водою, сталь статора – воднем) є ефективною і перспективною, сьогодні на електричних станціях України працюють турбогенератори з водяним охолодженням обмотки статора, загальна потужність яких складає більше 60 % від установленної електричної потужності всіх електричних станцій; наявність експериментальних даних, що, з однієї сторони, дозволяє перевірити достовірність електромагнітного та теплового розрахунків, а з іншої – спростити тепловий розрахунок завдяки відомим коефіцієнтам тепловіддачі [8, 9,

10]; наявність фізичної масштабної моделі кінцевої зони турбогенератора аналогічного типу та потужності.

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.

Урахування взаємного зв'язку електромагнітних і теплових процесів є актуальним не тільки для достовірного розрахунку параметрів електричної машини, але й під час удосконалення елементів її конструкції. Тому у низці важливих випадків необхідний сумісний аналіз електромагнітного та теплового полів машини з урахуванням їхнього взаємного впливу [3].

Алгоритм побудови математичної моделі показано на прикладі розрахунку електромагнітного поля та температури у торцевій зоні серійного турбогенератора типу ТГВ-500 за умов номінального навантаження.

На рис. 1 наведена конструкція цього генератора.

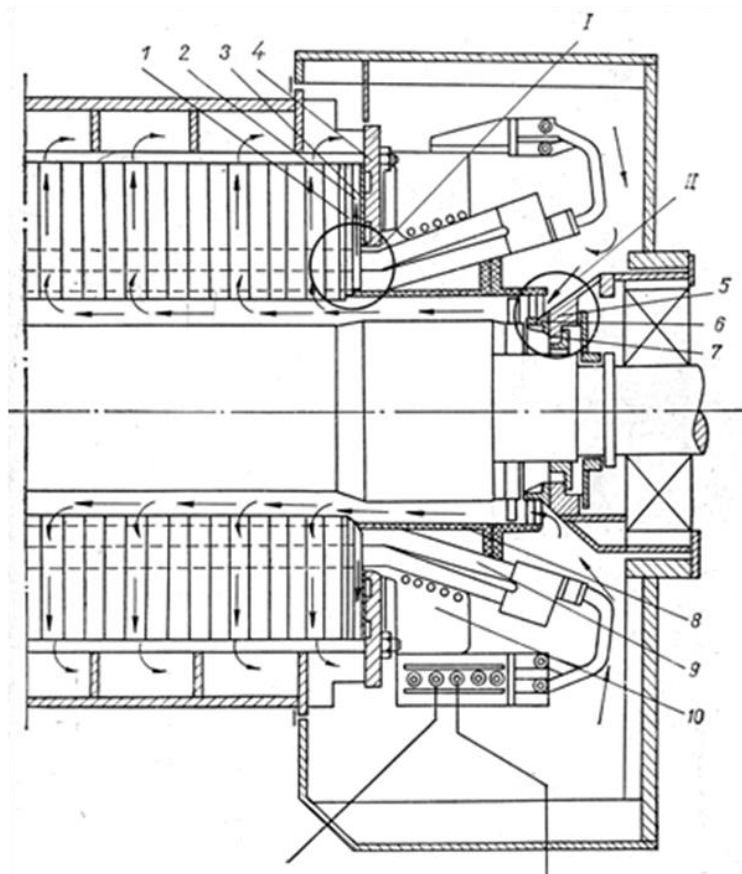


Рис. 1. Конструкція торцевої зони турбогенератора типу ТГВ-500

1 – крайній пакет осердя статора; 2 – натискний палець; 3 – мідний екран;

4 – натискна плита; 5 – корпус підшипника; 6 – газонапрямний апарат;

7 – масло-ущільнююче кільце; 8 – газорозподільний циліндр; 9 – обмотка статора;

10 – кронштейн для кріплення цієї обмотки

Обмотки статора та ротора охолоджуються дистиллятом, осердя статора – воднем. У торцевій зоні осердя статора з метою захисту спинки крайнього пакета й посилення екранування між натискною плитою та натискними пальцями встановлене плоске мідне кільце товщиною 10 мм. Немагнітна стальна натискна плита має геометрію плоского кільця з двома кільцевими каналами для охолодження водою.

В аксіальному (осьовому) напрямку турбогенератор складається з трьох частин – центральної та двох кінцевих. Осердя статора вміщує 138 шихтованих пакетів, набраних із листів високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі марки Е330 товщиною 0,5 мм. Два крайніх пакети, кожен товщиною 20 мм, розділені радіальними вентиляційними каналами, кожен з яких має товщину 5 мм. Пакети, починаючи з третього, мають товщину 40 мм. Зубці двох крайніх пакетів виконані вкороченими. На першому ступені вкорочення зубців складає 24 мм, на другому – пакет виконаний у вигляді двох сходинок: перша – на 16 мм, друга – на 8 мм. Тобто зубцева зона на торці має три сходинки. У 48 пазах статора розміщена трифазна двошарова стержнева обмотка.

Основні параметри генератора наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри турбогенератора типу ТГВ-500

Найменування параметра	Значення
Номинальний режим навантаження:	
- активна потужність P_n , МВт	500
- струм статора I_{SH} , кА	17
- напруга обмотки статора U_{SH} , кВ	20
- струм збудження i_{fn} , А	5120
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,85
Частота f , Гц	50
Число пар полюсів	1
Діаметр розточки статора D_1 , м	1,32
Діаметр ротора D_2 , м	1,12
Довжина осердя статора l_s , м	6,2
Повітряний проміжок між статором та ротором, мм	100
Кількість паралельних гілок обмотки:	
- статора a_s	2
- ротора a_r	1
Число послідовних витків обмотки:	
- статора w_1	8
- ротора w_2	48

Продовження табл. 1

Найменування параметра	Значення
Число активних провідників в пазу: - статора S_{n1} - ротора S_{n2}	2 5/3*
Значення опорів, в.о.: - активний обмотки статора r_1 - головний індуктивний x_d - розсіювання обмотки статора $x_{\sigma\sigma}$	0,001364 1,91 0,218

Примітка. * – н'ять витків у пазах, окрім чотирьох пазів з трьома витками (ці пази прилягають до великих зубців).

За допомогою редактора програмно-обчислювального комплексу COMSOL Multiphysics 3.5a шляхом виконання довгої та складної послідовності геометричних операцій побудовано розрахункову область математичної моделі, яка відповідає реальним розмірам турбогенератора у цілому, а також його окремих вузлів. Розрахункова область охоплює всю торцеву зону (позначення 1–4, 9, рис. 1), включаючи крайні й основні пакети осердя статора. Найбільша увага приділяється зоні I, а зона II під час розрахунків ігнорується, оскільки не має вирішального впливу на нагрів зони I. Враховуються реальна геометрія елементів ротора й статора, а також анізотропія та насичення осердя статора. Для кожного вузла задані фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. Для феромагнетиків побудовані відповідні криві намагнічування [11].

Надалі наведені результати розрахунку для кінцевої частини генератора зі сторони турбіни при номінальній швидкості обертання ротора (3000 об/хв). Цей вибір обумовлений відсутністю спотворення електромагнітного поля під впливом струмів з'єднувальних шин і виводів (як це спостерігається на стороні контактних кілець) [8].

Під час електромагнітного розрахунку польовими методами приймаються такі характерні для конструкцій електричних машин припущення [3]:

– відсутні струми діелектричного зміщення $\partial \vec{D} / \partial t = 0$;

– відсутні складові струмів перенесення $\rho v_p = 0$ і струмів,

обумовлених рухом поляризованого діелектрика $rot(\vec{D} \times \vec{v}) = 0$; струми такої фізичної природи в електричних машинах не виникають;

– в активних елементах електричної машини індукційного типу не

виникають концентрації нерухомих у просторі та незмінних у часі вільних електричних зарядів.

Під час відповідного вибору активізуються модуль Rotating Machinery, підрозділ Rotating Perpendicular Currents.

Модель враховує рух ротора відносно статора. Обертання моделюється за допомогою техніки Moving mesh (ale) (сітки, що рухається), яка дозволяє задавати переміщення кінцевоелементних сіток під час моделювання повороту (обертання) ротора. У цій моделі об'єднано нерухому та рухому системи в один прикладний режим. Центральна частина поперечного перерізу моделі (ротор і частина повітряного проміжку) обертається відносно нерухомого статора. Ротор розглядається у обертовій системі координат нерухомій відносно ротора, а статор у нерухомій глобальній системі координат. Обертання ротора відносно статора враховується через граничні умови в зазорі, тобто проміжок між ротором і статором є внутрішньою перехідною зоною. Інтерполяційні рівняння зв'язку на межі моделей забезпечують неперервність рішення у глобальній системі координат, яка зв'язана зі статором. Обертання сітки задається рівнянням трансформації:

$$\begin{cases} dx = \cos(2\pi nt) \cdot X - \sin(2\pi nt) \cdot Y - X \\ dy = \sin(2\pi nt) \cdot X + \cos(2\pi nt) \cdot Y - Y \end{cases} \quad (1)$$

де dx , dy – переміщення згідно з координатами x і y , відповідно; X , Y – координати початкових точок.

Таким чином, вираз у дужках є певним кутом (у радіанах), а час t – параметром, за допомогою якого таке настроювання дозволяє виконувати логічний поворот ротора на кут $(2\pi nt)$ відносно початкового положення. Для цього необхідно виконати статичний розрахунок, тобто розглядається одне фіксоване положення ротора та фіксовані значення струмів в обмотках (при $t=0$), і результати якого надалі застосовані як початкові умови з метою імітації динамічного ефекту (або, точніше, проведення параметричного розрахунку).

У рішенні задачі встановлюються слабкі обмеження, що дозволяє виконати умову передачі потоку через межу між ротором і статором.

Спочатку розглядається двовимірна польова модель електромагнітного поля поперечного перерізу центральної (активної) зони турбогенератора. Рівняння для двовимірного магнітного поля

відносно аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z в розрахунковій області (рис. 2) у загальному випадку має такий вигляд:

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times A) = J_{z\text{стор}}^e e_z, \quad A = A_z e_z, \quad (2)$$

де ω – кутова частота; σ – питома електропровідність; ∇ – оператор Гамільтона; μ_0 – проникність вакууму; μ_r – відносна магнітна проникність; $J_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та збудження; e_z – орт.

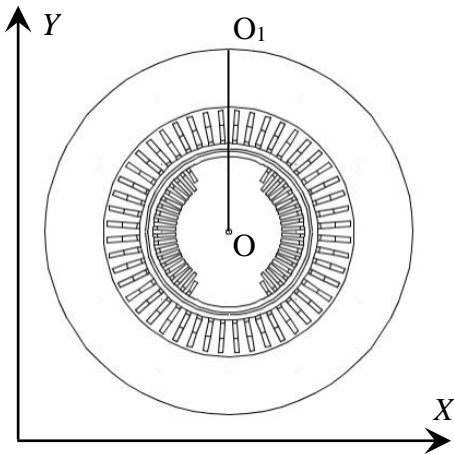


Рис. 2. Розрахункова область центральної зони турбогенератора

Однією з основних задач побудови моделі є вибір системи координат, в якій розглядаються електромагнітні процеси. Однак, вибір тієї чи іншої системи координатних осей, зрозуміло, не впливає на реальні фізичні процеси, які відбуваються у машині, а є тільки способом їхнього описання.

Найбільша ефективність від використання векторного магнітного потенціалу досягається під час розв'язання двовимірних польових задач з такою орієнтацією системи координат, у разі якої струми обмоток напрямлені уздовж однієї з її осей [3].

До таких задач відноситься, наприклад, клас задач щодо аналізу поля у поперечному перетині активної зони електричної машини. Осі X і Y декартової системи координат під час розв'язання таких задач розміщують у поперечному перетині активної зони машини, а вісь Z напрямляють уздовж її поздовжньої осі. За такої орієнтації системи координат струми обмоток протікають тільки уздовж осі Z , а векторний магнітний потенціал також має одну просторову (осьову) складову.

Не зважаючи на те, що для опису електромагнітного поля в цьому випадку потрібна тільки одна проекція векторного магнітного потенціалу, проте таке поле є двовимірним, оскільки для опису вектора магнітної індукції у поперечному перетині необхідно мати дві його проекції. Складові вектора магнітної індукції у декартовій системі координат визначаються через векторний магнітний потенціал за такими співвідношеннями:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (3)$$

Далі розраховується модуль вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (4)$$

який використовується під час знаходження проникності за відомою залежністю для сталі марки E330 [11].

Через магнітну індукцію (3) і (4) можуть бути визначені складові та модуль напруженості магнітного поля:

$$H_x = \frac{B_x}{\mu}, H_y = \frac{B_y}{\mu}, H = \frac{B}{\mu}. \quad (5)$$

Оскільки осердя статора набране (шихтоване) з листів (сегментів) високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, то вихровими струмами від радіально спрямованого потоку можна знехтувати. Крім цього, розрахунок додаткових втрат у крайніх пакетах статора генератора з прийнятною для практики точністю можна виконувати тільки від осової складової магнітної індукції [12, 13]. Отже, магнітне поле центральної частини турбогенератора у декартовій системі координат задовольняє рівнянню Пуассона й, у цьому випадку, розглядається відома модель електромагнітного поля центральної (активної) зони машини [3, 14, 15]:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{стоп}}. \quad (6)$$

Такий підхід дозволяє істотно заощадити обчислювальні витрати під час розв'язання задачі.

Рівняння (6) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду (Magnetic Insulation), що відображає затухання поля за межами розрахункової області на лінії зовнішньої поверхні ярма статора (рис. 2):

$$A_z|_G = 0 \quad (7)$$

та умовою неперервності (Continuity) магнітного потоку на внутрішніх границях.

Фаза обмотки статора складається з двох груп стержнів у відповідних фазних зонах, напрямки струму в яких протилежні. Під час розподілу обмотки у пазах враховуються полюсне ділення, число пазів на полюс і фазу, крок обмотки та коефіцієнт вкорочення.

В обмотці статора прийнято симетричну систему фазних струмів [16]:

$$\begin{cases} i_A = I_m \cos(\omega t + \beta) \\ i_B = I_m \cos(\omega t + \beta - 120^\circ), \\ i_C = I_m \cos(\omega t + \beta + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

де $I_m = \sqrt{2}I_{sas}$ – їхня амплітуда; $I_{sas} = I_s/a_s$ – діюче значення струму стержня та фазного струму; β – кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторушійна сила трифазної обмотки статора відповідно до поздовжньої осі ротора d .

Густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та збудження, знаходиться таким чином

$$\begin{cases} J_{Aзстоп} = i_A s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_{Bзстоп} = i_B s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_{Cзстоп} = i_C s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_f = i_f s_{n2} / S_{\Pi 2} a_r \end{cases} \quad (9)$$

де $S_{\Pi 1}$, $S_{\Pi 2}$ – площа перетину паза статора та ротора, відповідно.

Для отримання сильних магнітних полів у великих об'ємах застосовують багатовиткові котушки. Магнітні системи, які конструюються на їхній основі, як правило, є повільними, оскільки час протікання струму в них обчислюється десятками мілісекунд. Розміри перерізу обмоткового проводу за таких умов складають кілька міліметрів. Тому під час аналізу таких котушок можна нехтувати поверхневим ефектом в обмотці, приймаючи густина струму рівномірно розподіленою вздовж перерізу проводу. Це дозволяє під час розрахунку магнітного поля використовувати стаціонарне рівняння для векторного магнітного потенціалу, а відносно повільно змінний в обмотці струм також дозволяє спростити підхід до розрахунку. Отже, густина струму за виразом (9) має усереднене значення, яке відрізняється від реальної густини струму в провідниках обмотки на величину коефіцієнта заповнення міддю. Також не враховуються особливості розподілу провідників обмотки у пазу, наявність пазової та виткової ізоляції витків і вентиляційних каналів. Як показали численні дослідження [3], врахування цих особливостей під час розрахунків майже не впливає на точність результатів, але істотно ускладнює сітку скінченних елементів.

На рис. 3 показано просторову діаграму магніторушійних сил турбогенератора. Оскільки максимуми цих сил зсунуті відносно максимумів густини струмів обмоток на кут 90° , то ця ж діаграма правдива для лінійної густини струмів обмоток. З діаграми випливає, що комплексний вектор магніторушійної сили збудження \dot{F}_f зміщений у просторі відносно комплексного вектора результуючої магніторушійної сили генератора за умов навантаження F_l на кут θ , а відносно комплексного вектора магніторушійної сили реакції якоря F_s – на кут β . Тому з останнього, якщо в певний момент часу максимум лінійної густини струму ротора знаходиться в точці D , то максимум лінійної густини струму статора буде в точці E . Кут β визначається за формулою

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (10)$$

де θ – кут навантаження машини; φ – фазовий зсув між напругою та струмом статора.

Кут навантаження θ можна визначити з виразу [8]

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (11)$$

де I_s , U_s – фазні струм і напруга статора, відповідно; x_d – головний індуктивний опір; знак «плюс» відповідає режиму перезбудження генератора, «мінус» – недозбудження.

Величини струмів в обмотках статора та ротора й кута β задаються відповідно до режиму роботи турбогенератора – холостий хід, коротке замикання, навантаження тощо [16].

Вихідні дані, розраховані згідно з (8)–(11) для позиції ротора на рис. 2 в момент часу $t=0$, наведено у табл. 2 та 3 (у табл. 3 позначення J_{fml} відповідає густині струму збудження у пазах, які прилягають до великих зубців).

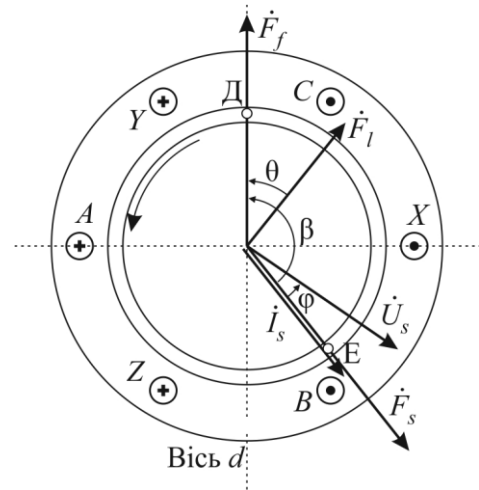


Рис. 3. Просторова діаграма магніторушійних сил турбогенератора

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку турбогенератора типу ТГВ-500

Статор							Ротор
$I_{\text{сп}}, \text{кА}$	$P, \text{МВт}$	$Q, \text{МВар}$	$S, \text{МВА}$	$\cos \varphi$	$\theta, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$i_f, \text{А}$
17	500	310	588	0,85	36,7	158,5	5090

Таблиця 3

Вихідні дані для розрахунку турбогенератора типу ТГВ-500

Статор						Ротор	
$i_A,$	$i_B,$	$i_C,$	$J_{A\text{статор}},$	$J_{B\text{статор}},$	$J_{C\text{статор}},$	$J_{\text{final}},$	$J_f,$
А	А	А	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²
-11184	9407,6	1776,8	-2,8	2,35	0,44	7,6	8,5

Задаються властивості матеріалів для кожної розрахункової підобласті та джерел поля. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Після задання властивостей і граничних умов формується сітка скінченних елементів. Для дрібних елементів сітки система автоматично виконає згущення, але якщо необхідно у будь-якій частині системи ще більше згустити сітку, можна натиснути кнопку Refine selection і вказати необхідну область. У двовимірному стаціонарному режимі можна будувати найдрібнішу сітку – швидкість обчислення на сучасних комп'ютерах все одно буде прийнятною. Водночас необхідно пам'ятати, що розмір кінцевого елемента повинен бути у декілька разів меншим товщини пограничного шару, інакше рішення може бути нестабільним. Тому рекомендується будувати сітку такої густоти, щоби між будь-якими двома границями було не менше десяти кінцевих елементів [17].

У цій задачі побудована сітка вміщує 62280 граничних елементів, що покривають межі розрахункової області.

Після настройки параметрів зон розрахункової області у прикладному режимі розрахунку розподілу векторного магнітного потенціалу у нерухомій і неоднорідно-рухомій системі статор-ротор, а також внесення необхідних змінень для додаткових складових моделі натискається кнопка Solve або пункт меню Solve-Solve Problem, що

запускає розв'язувальний пристрій з поточними налаштуваннями.

Після розрахунку налагоджуються параметри діалогового вікна Subdomain Settings прикладного режиму Moving mesh (ale). У зонах статора вмикається режим No displacement, а в зонах ротора вмикається режим Prescribed displacement. У рядок редагування dx записується $X*\cos(\text{ugol})-Y*\sin(\text{ugol})-X$; у рядок редагування dy записується $X*\sin(\text{ugol})+Y*\cos(\text{ugol})-Y$. Таке налаштування дозволяє виконувати логічний поворот ротора на кут ugol (у радіанах) відносно початкового положення ротора. Кнопка Restart або пункт меню Solve-Restart перезапускає розв'язувальний пристрій, використовуючи поточні значення як початкові.

За таких умов саме рівняння Пуассона не залежить від часу, його розв'язок визначається миттєвими значеннями джерел поля – струмами в обмотках і геометрією розрахункової області, яка змінюється внаслідок зміни координат ротора.

У результаті математичного моделювання отримані такі дані.

На рис. 4 показаний миттєвий розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу (ізолінії) в активній зоні турбогенератора (у цьому випадку $t = 0,02$ с, що відповідає одному повному оберту ротора, крок часового інтервалу дорівнює 1^{-4} с, тобто за один крок ротор повертається на $1,8^\circ$). Відтінками сірого кольору показані рівні магнітної індукції відповідно до приведеної шкали. На рис. 5 наведений розподіл магнітної проникності статора та ротора генератора, максимальне значення складає 8542 і спостерігається в ярмі статора.

З рис. 6 можна отримати, що максимальне значення магнітної індукції в осерді статора за умов номінального навантаження спостерігається у коронках зубців і складає 3,4 Тл, розподіл електромагнітного поля симетричний вздовж лінії результуючої магніторушійної сили (рис. 4). На рис. 7 наведений розподіл магнітної індукції у натискних пальцях. Він також є симетричним, однак, під дією електромагнітного поля статора напрямок результуючої відхиляється. Величини магнітної індукції у натискних пальцях нижчі, оскільки вони виготовлені з немагнітної сталі, та максимальне значення індукції складає 0,53 Тл.

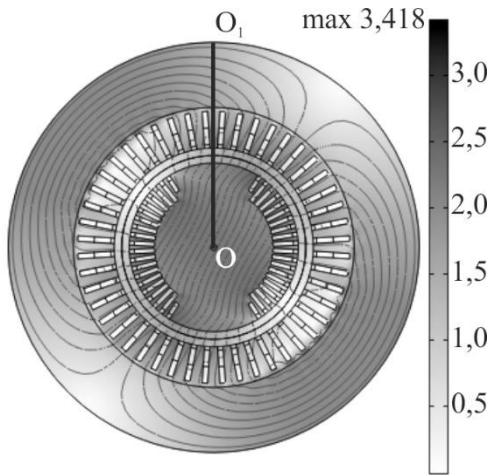


Рис. 4. Розподіл електромагнітного поля в центральній зоні статора та ротора турбогенератора за умов номінального навантаження

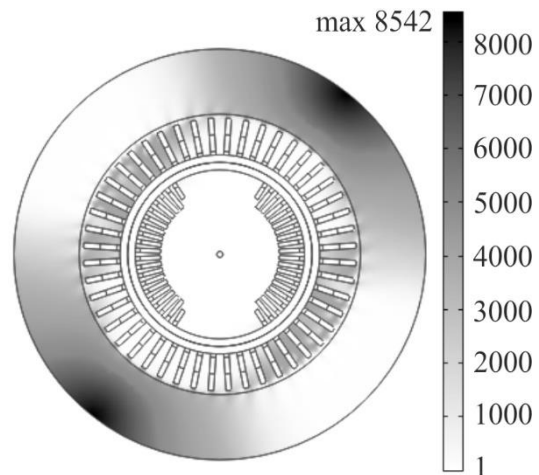


Рис. 5. Розподіл магнітної проникності в центральній зоні статора та ротора турбогенератора за умов номінального навантаження

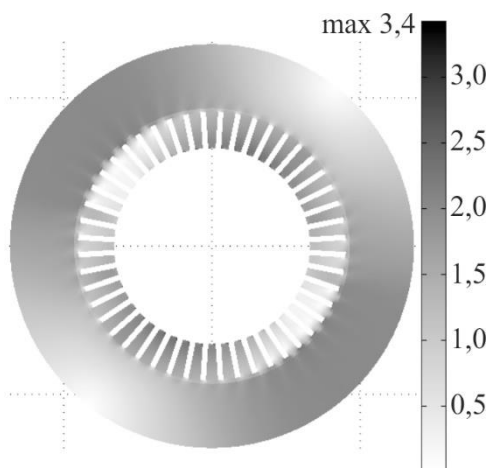


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції в осерді статора турбогенератора за умов номінального навантаження

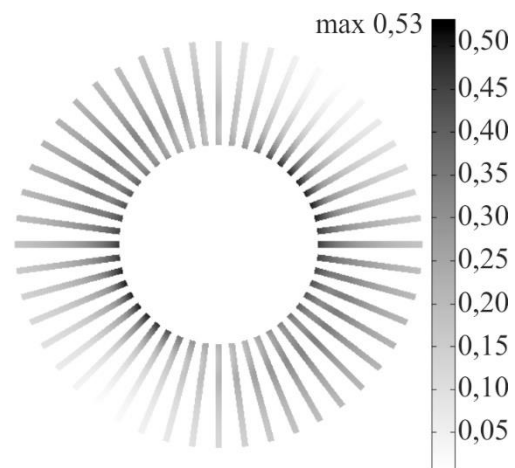


Рис. 7. Розподіл магнітної індукції у натискних пальцях за умов номінального навантаження

Натискна плита та мідний екран також є немагнітними, плита встановлена перед екраном, тому розподіл електромагнітного поля в них співпадає. Максимальні значення магнітної індукції складають 0,36 Тл і 0,33 Тл, відповідно (рис. 8 і 9).

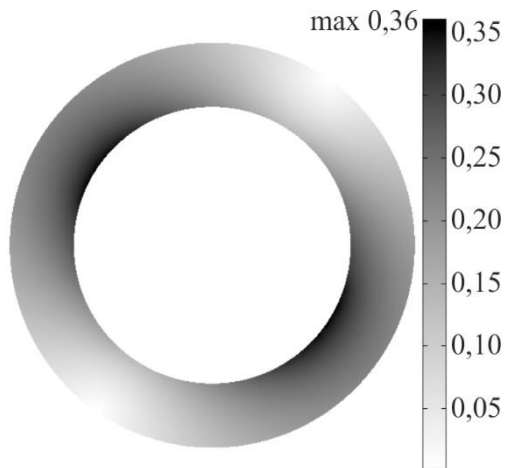


Рис. 8. Розподіл магнітної індукції у натискній плиті за умов номінального навантаження

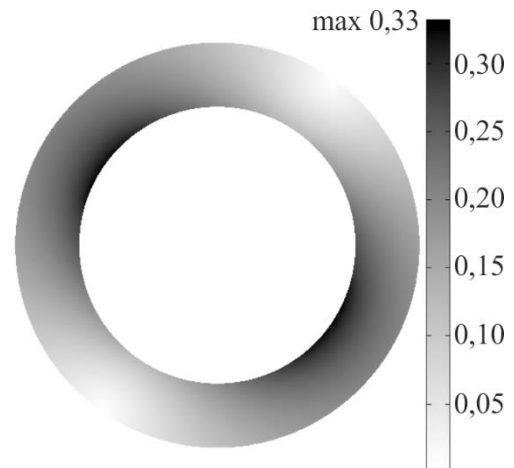


Рис. 9. Розподіл магнітної індукції у мідному екрані за умов номінального навантаження

Оскільки натискна плита, натискні пальці та мідний екран є масивними, вони є областями протікання вихрових струмів від радіального потоку. Розв'язується задача розподілу вихрових струмів у кожному елементі (*Time-harmonic analysis*). Для прикладу, на рис. 10 і 11 показаний розподіл густини наведеного струму від основного радіально спрямованого поля у натискних пальцях і мідному екрані. З причини високої провідності міді значення густини вихрового струму в екрані на порядок більше, ніж у немагнітних пальцях.

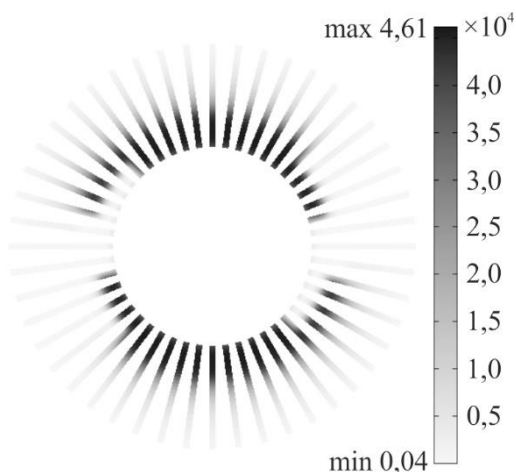


Рис. 10. Розподіл вихрового струму у натискних пальцях за умов номінального навантаження

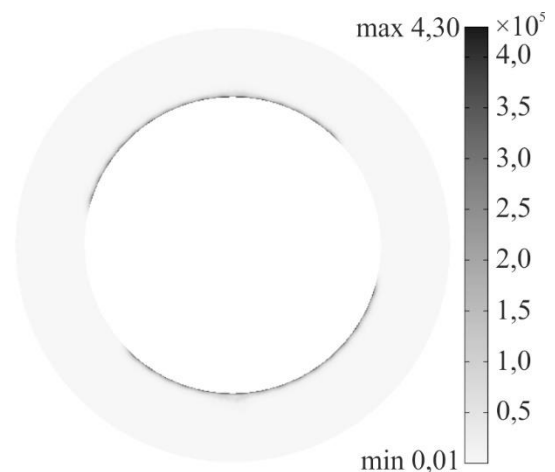


Рис. 11. Розподіл вихрового струму у мідному екрані за умов номінального навантаження

Надалі активізуються модуль AC/DC Module, підрозділ Quasi-Static Magnetic, модель Perpendicular Induction Currents, Vector Potential.

Маючи розподіл поля у центральній частині, можна перейти до моделювання магнітного поля у поздовжньому перетині турбогенератора (рис. 12). З урахуванням симетрії вздовж осьового та радіального напрямків розрахункова область торцевої зони обрана у вигляді перерізу ротора вздовж його осі та перетину одного зубця осердя статора у тангенціальному напрямку [18, 19]. Цей перетин співпадає з прямокутною координатною площиною XU і є площиною симетрії ротора (на рис. 4 вона проходить вздовж радіуса OO_1).

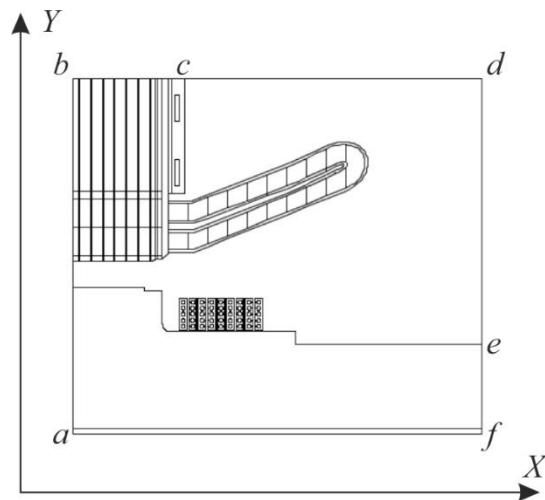


Рис. 12. Розрахункова область торцевої зони турбогенератора

Рівняння для двовимірного поля відносно складової векторного магнітного потенціалу A_z , яка є тангенціальною складовою у розрахунковій області, має вигляд (2).

Необхідна структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу граничних умов для векторного магнітного потенціалу та напруженості поля, які встановлюються для зовнішніх меж області $abcdef$ (рис. 12).

На лінії bc можливі два варіанти граничних умов: або умова, що відображає затухання поля:

$$A_z|_{bc} = 0, \quad (12)$$

або значення напруженості магнітного поля в точці O_1 (рис. 4):

$$H|_{bc} = H|_{O_1}. \quad (13)$$

Гранична умова (12) не може бути застосована у тому випадку, якщо геометрія математичної моделі не передбачає наявності повітряних проміжків між пакетами осердя статора, як це має місце у деяких моделях, наприклад [20], що може бути виправдано для проведення електромагнітного розрахунку без подальшого моделювання теплових процесів. Приймаючи варіант граничної умови (13) більше загальним, така умова встановлюється на лінії bc , у цьому випадку $H|_{bc} = 300$ А/м.

На лінії af встановлюється умова симетрії магнітного поля відносно осі ротора (Electric Insulation), що означає рівність нулю дотичної до границі складової напруженості магнітного поля:

$$n \times H|_{af} = 0. \quad (14)$$

Вздовж межі ab задається розподіл напруженості магнітного поля, аналогічний розподілу вздовж тієї ж лінії у поперечному перетині (лінії OO_1 , рис. 13):

$$H|_{ab} = H(r)|_{OO_1}. \quad (15)$$

Приймається, що за достатньо віддалені границі cd , de та ef магнітне поле не розповсюджується, тому на лінії $cdef$ встановлюється однорідна гранична умова першого роду:

$$A_z|_{cdef} = 0. \quad (16)$$

Одночасно задається розподіл магнітної проникності вздовж радіуса OO_1 – $\mu(r)|_{OO_1}$, який змінюється внаслідок різного насичення відрізків магнітопроводу основним магнітним потоком (рис. 14).

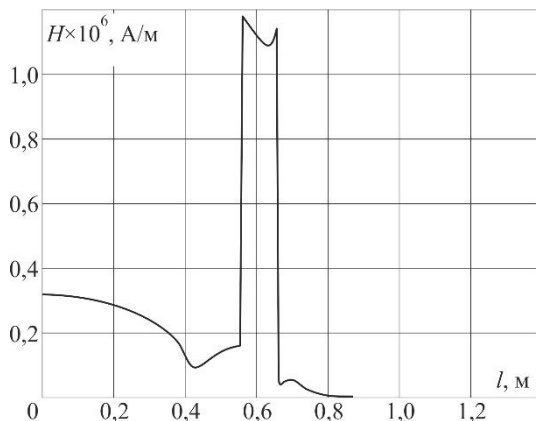


Рис. 13. Розподіл напруженості поля вздовж радіуса OO_1

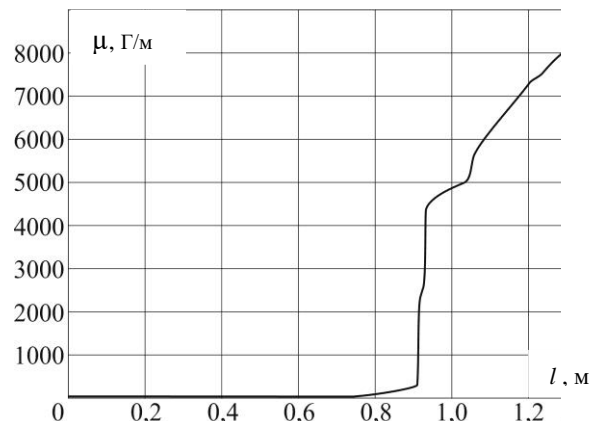


Рис. 14. Розподіл магнітної проникності вздовж радіуса OO_1

Таким чином, установлюється взаємозв'язок електромагнітних полів у центральній і торцевій зонах турбогенератора.

Вплив режиму навантаження враховується заданням величин струмів в обмотках статора та ротора, кута β і граничних умов.

Важливим етапом на шляху розрахунку магнітного поля в торцевій зоні є задання струмів у лобових частинах обмоток. Це питання найбільше проблематичне та вирішується окремими дослідниками різними способами.

Пропонується модель торцевої зони турбогенератора, яка порівняно з тими, що використовуються та відомі на сьогодні, дозволяє математично точно описати струми лобової частини обмотки статора із строгим урахуванням геометричної форми всіх відрізків лобових з'єднань та, що найсуттєвіше, режиму роботи. На рис. 15 показано напрямок миттєвих фазних струмів i_A , i_B , i_C лобової частини обмотки статора за умов навантаження та частину схеми цієї обмотки, вздовж якої проходить переріз OO_1 , причому для більшої наочності фази показано різними лініями.

Струми лобової частини обмотки статора (рис. 15) менші за прийняті струми системи (8) у $\sqrt{2}$ рази, оскільки лобові частини відігнуті у середньому на 45° . Тобто вони мають величину діючого значення фазних струмів з відповідним кутом β .

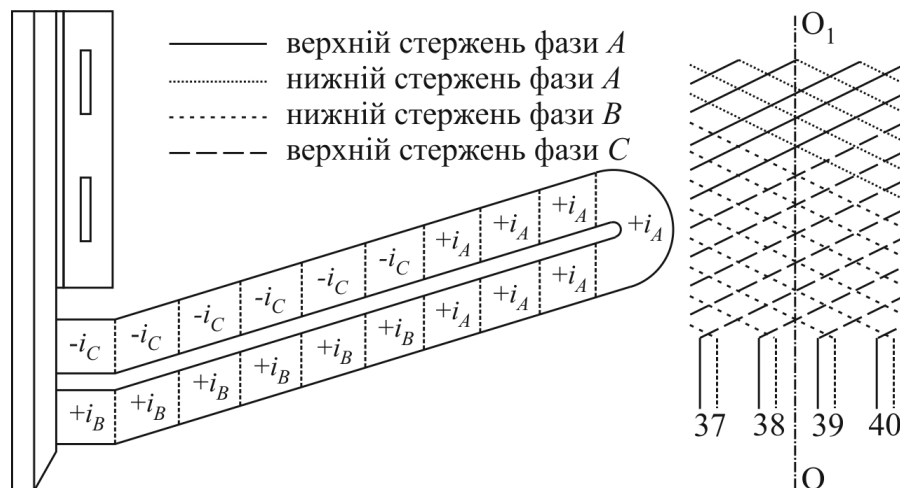


Рис. 15. Напрямок фазних струмів лобової частини обмотки статора

Оскільки поздовжній перетин турбогенератора проведено вздовж поздовжньої осі ротора d (рис. 4), то значення густини струму лобової частини обмотки ротора відповідає заданому струму збудження (табл. 3).

Електромагнітний розрахунок виконується у всій розрахунковій області.

Задаються властивості матеріалів для кожної розрахункової підобласті та джерел поля. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Після задання властивостей і граничних умов формується сітка скінченних елементів. Водночас необхідно контролювати розмір елементів у підобластях провідного перерізу, який повинен бути у

декілька разів меншим глибини проникнення поля у матеріал $\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu\gamma)}$. Мінімальний розмір елемента сітки в області скін-шару повинен бути у 3–4 рази меншим глибини проникнення поля. Для того щоби автоматично задовольнити цій умові необхідно у режимі задання граничних умов виділити лінії, які утворюють зовнішні межі перерізів. Після цього у вікні Mesh, Free mesh parameters, Boundary задати максимальне значення кінцевого елемента (maximum element size) виходячи з розрахунку $(0,2-0,3)\Delta$. Після чого можна проводити побудову сітки командою Mesh.

Побудована сітка вміщує 157868 граничних елементів, які покривають межі розрахункової області.

Після розрахунку отримуємо розподіл магнітного поля у кінцевій частині турбогенератора типу ТГВ-500 за умов номінального навантаження (рис. 16).

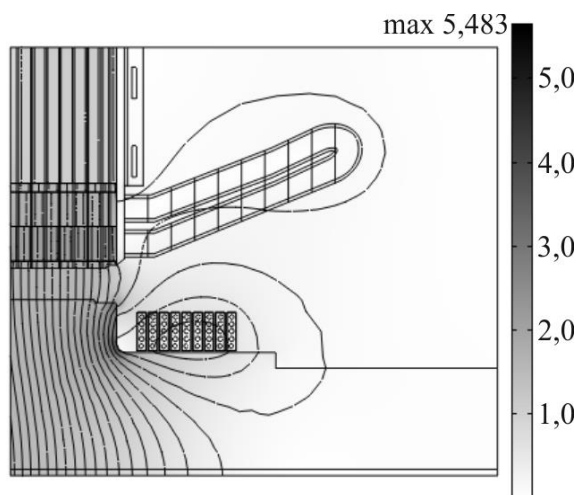


Рис. 16. Розподіл електромагнітного поля в торцевій зоні турбогенератора за умов номінального навантаження

Окремо розв'язується задача розподілу вихрових струмів (Time-harmonic analysis). Оскільки ротор обертається синхронно з полем, відмінна від нуля електропровідність задається в пакетах осердя статора, натискному пальці, електропровідному екрані та натискній плиті. Це дозволяє врахувати вихрові струми, наведені від аксіальних магнітних потоків лобових частин обмоток. На рис. 17, а, б показаний розподіл густини вихрового струму в зазначених елементах, причому рис. 17, б для наочності представлений у збільшеному масштабі.

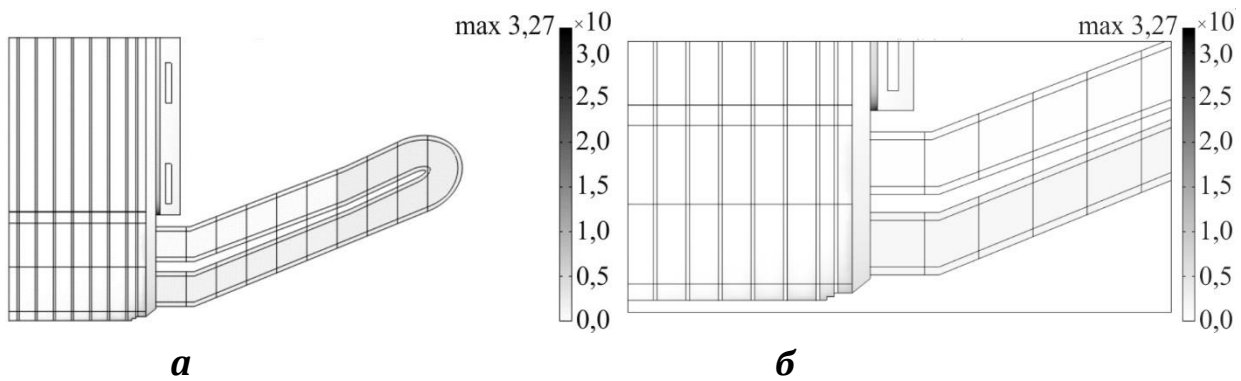


Рис. 17. Розподіл густини вихрового струму в торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження

Під час розрахунку струмів у пакетах заліза той факт, що осердя генератора набране з окремих листів, враховується введенням еквівалентних магнітного проникнення [20, 21, 22] й електричної провідності ($\sigma = K_{Fe} \sigma$) з урахуванням коефіцієнта заповнення сталлю.

«Інформація поперечного перетину» щодо фактичної геометрії зубця, натискного пальця, екрана та плити закладена у функціях перенесення магнітного поля через граничні умови (15), тільки для останніх трьох за допомогою розподілу векторного магнітного потенціалу в кожному елементі (з рішення задачі на рис. 7–9), який встановлюються на відповідних лініях розрахункової області торцевої зони (рис. 12).

Таким чином, за допомогою розробленої моделі можна отримати розподіл й параметри магнітного поля для окремих елементів і вузлів торцевої зони за умов різних режимів навантаження турбогенератора.

До електромагнітної моделі додається тепловий модуль розрахунку. Для цього необхідно натиснути на панелі інструментів COMSOL кнопку Multiphysics, Model Navigator. У Application Mode навігатора моделей обрати модуль Heat Transfer Module, підрозділ General Heat Transfer та натиснути кнопку Add. У списку Ruling application mode навігатора моделей установити General Heat Transfer. Натиснути ОК.

Турбогенератор типу ТГВ-500 призначений для експлуатації у тривалих режимах з навантаженням, близьким до номінального. Перенавантаження зазвичай відбуваються під час порушень і різноманітних відхилень у режимах роботи енергосистеми. Як правило, від генератора вимагається короточасна робота у разі таких перенавантажень. Тому основний тепловий розрахунок виконується для

сталого стану, коли вся кількість тепла, яка виділяється у машині, відводиться охолодним середовищем. Несталі теплові режими перевіряються з метою визначення допустимих короточасних перенавантажень турбогенератора [11, 23].

Виконується спрощений (оцінний) тепловий розрахунок, який, з однієї сторони, не потребує великого об'єму роботи, а з іншої – може надати правильну оцінку теплового стану окремих частин машини. Застосування наближених методів розрахунку допустимо для типових конструкцій і схем охолодження. За таких умов загальноприйнятий розділений розгляд теплового стану статора та ротора, оскільки їхній вплив один на одного в цьому аспекті невеликий [11, 23, 24].

Під час математичного опису стаціонарного температурного поля осердя статора у зв'язку зі складністю постановки задачі прийнято такі припущення, основані на аналізі дослідів і розрахунків [8, 10, 11, 23, 25, 26]:

- розрахункові й експериментальні дослідження нагрівання торцевої зони показали, що за умов наявності примусової вентиляції в каналах між натискною плитою та крайнім пакетом взаємним тепловим впливом натискної плити і крайнього пакета можна нехтувати та розглядати їхнє нагрівання незалежно;

- на основі виконаних досліджень нагрівання пакетів осердя статора розглядається незалежно від нагрівання обмотки статора; за умов безпосереднього охолодження обмоток тепловий розрахунок може бути значно спрощений у припущенні, що вода, яка циркулює в обмотці статора, відводить втрати, що виділяються тільки в міді; втрати ж у зубцях і спинці осердя відводяться воднем, який циркулює у радіальних вентиляційних каналах осердя, тобто теплообмін між обмоткою та іншими елементами машини відсутній і також відсутній рух тепла вздовж самої обмотки; такі спрощення дозволяють достатньо наочно оцінити температуру обмотки статора;

- для потужних генераторів з радіальною системою вентиляції кожен з крайніх пакетів осердя статора має майже автономну систему охолодження; підігрівання охолоджувального газу в умовах звичайно прийнятої у цій зоні великій витраті помітно не впливає на температуру пакетів; зокрема у [10] показано, що за умов існуючої інтенсивності охолодження торцевої зони осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 вплив підігрівання газу як на середній нагрів, так і максимальну

температуру пакета незначний, і не перевищує 2 %, а під час врахування підігрівання газу розрахункова максимальна температура відрізняється не більше ніж на 0,2 %; для опосередкованого впливу підігрівання охолоджувального газу, оскільки у вентиляційних каналах між крайніми пакетами осердя статора газ рухається тільки у радіальному напрямку із повітряного проміжку, у цьому ж напрямку штучно збільшується і його температура;

– під час розрахунків стаціонарного температурного поля приймається припущення щодо відсутності кондуктивного теплообміну між крайніми пакетами та деталями кріплення й пристроями екранування торцевої зони статора; нагрів системи тіл – крайнього пакета, натискних елементів і пристроїв екранування – розглядається незалежно від основної частини осердя й обмотки статора;

– в пакетах осердя статора, натискних елементах і пристроях екранування розглядається тільки радіальне температурне поле;

– температура газу в проміжку між статором і ротором збільшується з наближенням до середини турбогенератора;

– розподіл витрати газу в паралельних каналах відповідає втратам, які відводяться через ці канали, тому підігрівання газу в усіх паралельних каналах відрізняється несуттєво.

Всі ці припущення дозволили значно спростити метод розрахунку.

Приймаючи отримані результати моделювання електромагнітного поля як джерело теплових втрат, виконується розрахунок теплообмінних процесів у торцевій зоні турбогенератора. Рівняння для двовимірного стаціонарного температурного поля має вигляд:

$$\nabla(-k\nabla T) = Q, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності; T – температура; Q – питомі об'ємні теплові втрати.

Автоматично в системі, яка описує передачу тепла, встановлена загальна форма системи рівнянь, яка дозволяє враховувати нелінійності. Одночасно, ця задача використовує лінійні відношення між величинами. Лінійна постановка задачі надає можливість використовувати коефіцієнтну форму системи рівнянь і зробити процес обчислення простіше.

Як зазначалося, турбогенератор, що розглядається, має радіальну систему вентиляції. Холодний водень, температура якого відповідно до

Інструкції з експлуатації прийнята 40 °С, подається у радіальні канали між пакетами осердя та проміжки між натискними пальцями, екраном і плитою зі сторони зазору з подальшим рухом у сторону спинки осердя.

Розрахунок температурного поля виконується тільки для торцевої зони осердя статора.

Геометричні розміри й електромагнітні параметри (за винятком питомої електричної провідності) ті самі, що і в електромагнітній задачі.

Необхідно врахувати, температура нагріву в інтенсивному магнітному полі може досягати критичних значень, що зумовлює підвищення питомого опору в областях з високою густиною струму, а це у свою чергу – до іншого розподілу густини струму. Це явище враховано залежністю питомої електричної провідності від температури за таким законом:

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_0}{(1 + k_\sigma \cdot (T - T_0))}, \quad (18)$$

де σ_0 – електропровідність у разі початкової температури T_0 ; k_σ – коефіцієнт, який враховує вплив температури на електропровідність.

Для врахування в моделі залежності (18) необхідно за допомогою команди Multiphysics, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential повернутися до електромагнітної частини задачі та задати залежність провідності у вікні редагування фізичних властивостей для усіх підобластей провідного перерізу.

Надалі задаються теплофізичні властивості матеріалів. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load. З метою врахування омичних втрат з електромагнітної задачі, у тому числі й від вихрових струмів (наведених аксіальними магнітними потоками лобових частин обмоток), у вікно вводу потужності об'ємного джерела тепла Heat Source в кожній розрахунковій підобласті прописується ім'я змінної Q_{etqa} , для врахування втрат від наведеного основним радіально спрямованим полем вихрового струму в кожному масивному елементі (натискний палець, мідний екран, натискна плита) з результатів розрахунку в поперечному перерізі генератора задається середнє значення цього струму у відповідних елементах розрахункової області поздовжнього перерізу в електромагнітній задачі й також прописується ім'я змінної Q_{etqa} у тепловій. Інші втрати в магнітопроводі статора розраховуються окремо за традиційними

залежностями, наприклад [8, 11, 23], які прописуються безпосередньо у відповідних підобластях у вікно вводу потужності об'ємного джерела тепла Heat Source та підсумовуються зі змінною Q_{emqa} .

Для однозначного математичного опису теплового процесу необхідно задати граничні умови, що характеризують взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем. Модуль теплопередачі системи COMSOL Multiphysics використовує таке узагальнене рівняння:

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 + h(T_{inf} - T). \quad (19)$$

Доданок $h(T_{inf} - T)$ моделює конвективний тепловий обмін з оточуючим середовищем, де h – коефіцієнт тепловіддачі, T_{inf} – температура середовища, яке оточує об'єкт.

У такому формулюванні можна задавати тепловий потік у явному вигляді величиною q_0 , а також коефіцієнтом h відносно опорної температури.

Принципово існує дві можливості моделювання цих процесів:

- використання коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні, яка омивається у разі конвекції;
- розширення моделі для описання потоків теплопередачі у флюїді.

Перший спосіб є дуже потужним і ефективним. На додаток, режим General Heat Transfer надає користувачу вбудовані функції задля використання коефіцієнтів, які описують теплопередачу. Для більшості інженерних задач використання цих коефіцієнтів є точним і чисельно ефективним модельним наближенням.

Друге наближення, яке передбачає урахування течії флюїду та перенос тепла в моделі, може бути корисним у певних випадках, коли, наприклад, з причини особливості геометрії коефіцієнти значною мірою змінюються залежно від місця на поверхні, або ж якщо необхідно знайти значення температури флюїду. У таких випадках граничні умови на поверхні розділення неперервні та не мають розриву. Однак складність моделі істотно підвищується, якщо необхідно розрахувати поле течії флюїду або його температурне поле. На додаток, істотно підвищуються вимоги до об'єму оперативної пам'яті комп'ютера, а час розрахунку значно зростає.

Надалі зосередимо увагу на першому з описаних вище двох способів, який для моделювання конвективної теплопередачі використовує коефіцієнти.

Головна складність у використанні коефіцієнтів тепловіддачі – це розрахунок або задання значень коефіцієнта h . Цей коефіцієнт залежить від самого флюїду, його властивостей, закономірності руху, температури, стану та фізичних параметрів поверхні, а також у випадку примусової конвекції – від швидкості руху флюїду [27, 28]. Крім того, на величину коефіцієнта впливає геометрична конфігурація. У цьому випадку задача вибору коефіцієнта h не розв'язується, оскільки коефіцієнти тепловіддачі теплообмінних поверхонь елементів конструкції та вентиляційних каналів для турбогенератора типу ТГВ-500 відомі з результатів попередніх досліджень [8, 9, 10].

Задання температури на поверхні об'єкта можна інтерпретувати як задання температури навколишнього середовища у разі нескінченно великої величини коефіцієнта тепловіддачі $h = \infty$. У цьому випадку різниця температури поверхні та середовища дорівнює нулю:

$$(T_{\text{inf}} - T_0) = 0. \quad (20)$$

Коефіцієнт теплопровідності k характеризує відношення між вектором густини теплового потоку q і температурним градієнтом температури в законі Фур'є:

$$\vec{q} = -k\nabla T. \quad (21)$$

У розрахунок ця величина вводиться як потужність, поділена на одиниці довжини та температури.

Умова теплоізоляції або симетрії має вигляд:

$$\vec{n} \cdot (k\nabla T) = 0. \quad (22)$$

Ця умова визначає, в яких місцях область гарно ізольована, або скорочує розмір моделі за рахунок використання переваг симетрії. Температура на одній стороні границі повинна бути рівною температурі на іншій стороні границі. Оскільки не існує відмінності температури на границі, тепло не повинно пересікати її.

Для зручності задання відомих коефіцієнтів тепловіддачі розрахункова область осердя статора (рис. 12) заздалегідь розподілена на такі зони: зубця (яка у свою чергу розподілена на зони коронки зубця, його кореня, а також зубця напроти верхнього стрижня та напроти нижнього стрижня обмотки) й ярма.

Необхідно ще раз підкреслити, що найбільша увага приділяється зоні I (рис. 1), а саме області «крайній пакет - натискний палець - мідний екран - натискна плита».

Основна теплопередача у навколишнє середовище теплової енергії, що виділилася в елементах, здійснюється шляхом конвективного теплообміну між нагрітою поверхнею та потоком охолоджуючого водню (19).

Коефіцієнти тепловіддачі ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$) для турбогенератора типу ТГВ-500 мають такі значення [8, 9, 10], рис. 18:

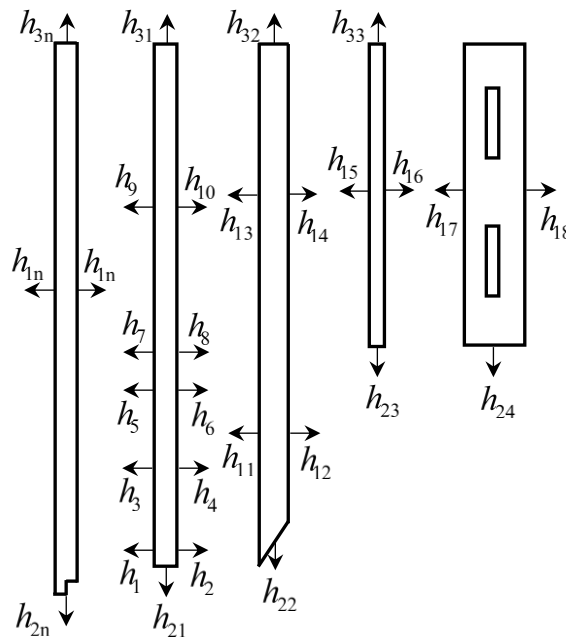


Рис. 18. Коефіцієнти тепловіддачі для турбогенератора типу ТГВ-500

– для крайнього пакета:

$$h_1 = 474; \quad h_2 = 332; \quad h_3 = h_5 = h_7 = 354; \quad h_4 = h_6 = 248; \quad h_8 = 225; \quad h_9 = 221; \\ h_{10} = 209; \quad h_{21} = 1330; \quad h_{31} = 205;$$

– для натискного пальця:

$$h_{11} = h_{12} = 280; \quad h_{13} = h_{14} = 243; \quad h_{22} = 1280; \quad h_{32} = 243;$$

– для мідного екрана:

$$h_{15} = h_{16} = h_{23} = 280; \quad h_{33} = 243;$$

– для натискної плити:

$$h_{17} = 280; \quad h_{18} = 200; \quad h_{24} = 384;$$

– усереднене значення для інших пакетів:

$$h_{1n} = 241; \quad h_{2n} = 1000; \quad h_{3n} = 200.$$

Встановлюємо граничну умову (20) в таких зонах розрахункової області:

- температура води, що циркулює в охолоджувальних каналах натискної плити та лобових частинах обмотки статора: $T_{\text{inf}} = T_0 = 60$ °C.

На границі, яка проходить посередині останнього дев'ятого пакета розрахункової області, встановлюється гранична умова (22).

Задаються властивості матеріалів кожної розрахункової підобласті. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Сітка скінченних елементів є однаковою як для електромагнітної, так і теплової задачі.

Не торкаючись всього різноманіття варіантів візуалізації результатів розрахунку, на рис. 19 наведено розподіл температури у торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження.

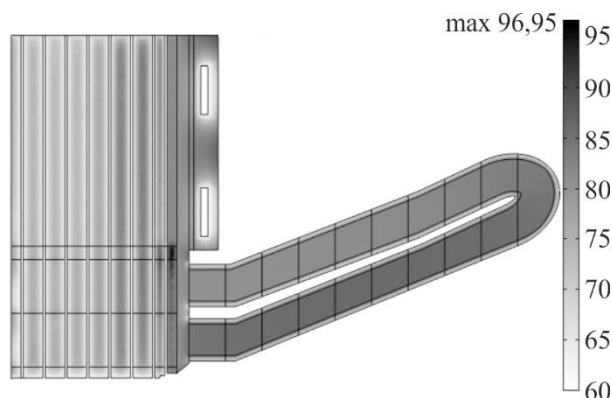


Рис. 19. Розподіл температури у торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження

Таким чином, сформульовано замкнуту математичну модель кінцевої зони осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 у вигляді сукупності зв'язаних рівнянь, граничних умов і співвідношень (2)–(22). Рівняння (2)–(16) описують стаціонарне квазітривимірне електромагнітне поле у статорі та роторі, причому окремо аналізуються поля у поперечному та поздовжньому перетинах генератора, а їхня зв'язність забезпечується виконанням умови (15) і розподілом магнітної проникності вздовж перерізу $00_1 - \mu(r)|_{00_1}$. Рівняння (17) описує стаціонарний нагрів торцевої зони осердя статора з урахуванням

температурної залежності електропровідності матеріалів, причому знайдені відповідно до цієї залежності електропровідності використовуються у рівнянні (2) під час розрахунків електромагнітного поля.

Отже, розроблена математична модель є сукупністю трьох моделей, які взаємопов'язані між собою. Тобто використано підхід для аналізу теплових процесів у торцевій зоні осердя статора турбогенератора послідовного логічного переходу від рішення простої моделі розрахунку електромагнітного поля в активній частині машини до більше складних моделей розрахунків у кінцевій зоні з використанням попередніх результатів у наступних, що дозволяє отримати рішення для визначення розподілу температури в складних областях.

ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ.

Необхідно підкреслити, що конструктивною особливістю крайніх пакетів осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 на відміну від пакетів активної зони, є наявність шліців (поздовжніх розрізів) у зубцях, які виконуються для зменшення втрат від вихрових струмів, створених у листах під час проникнення в них осьового потоку. Хоча математична модель не передбачає врахування шліців у зубцях крайніх пакетів осердя статора турбогенератора, але з метою перевірки достовірності розробленого алгоритму розрахунку температурного поля було виконано оцінний розрахунок і співставлення отриманих значень нагріву торцевої зони турбогенератора типу ТГВ-500 у номінальному режимі роботи та режимі короткого замикання при $I_s = 0,6I_n$, для яких є експериментальні дані з температурного поля крайнього пакета осердя статора та коефіцієнтам тепловіддачі [8, 9, 10]. Експериментальні дані відповідають сталому нагріву крайнього пакета осердя статора турбогенератора зі сторони турбіни в перетині $1/8$ ширини пакета від торця вздовж осі машини. Врахування впливу шліців у зубцях крайніх пакетів за допомогою польових методів докладно описано у працях [2, 29] й у даному контексті наводити ці алгоритми буде зайвим. З причини суттєвого розходження результатів між цими методиками (більше 30 %) та складності врахування реальної глибини проникнення (затухання) аксіальної складової магнітної індукції в осьовому напрямку крайнього

пакета за умов двовимірної постановки задачі поперечного перерізу останнього, яка «змушує» дослідника або нехтувати вказаним затуханням і обумовлює завищені результати [29], або зовсім не розглядати це питання акцентуючи увагу на розподілі вихрових струмів на поверхні одного листа (сегмента) [2], це питання потребує додаткового дослідження. Оскільки це дослідження виходить за рамки цієї роботи, вплив розсічення у зубцях крайніх пакетів на величину втрат у них враховано за допомогою аналітичного (класичного) підходу [8], коли складова втрат у зубцях від радіального поля не змінюється, а складова втрат від аксіального потоку зменшується в 4 рази. У даному випадку це можна інтерпретувати як штучне зменшення вихрового струму в зубці у два рази. За таких умов сумарні втрати у зубці зменшуються на 33 %, що добре узгоджується з існуючими класичними уявленнями щодо впливу розрізів у зубцях на величину втрат [8, 12].

Необхідно зазначити, отримані розбіжності розрахункових значень з експериментальними даними температурного поля не перевищили 7 % (табл. 4), що свідчить про високу достовірність застосованих підходів і припущень, а також можливість використання запропонованої моделі для інженерних цілей.

Таблиця 4

Результати розрахунку та експериментальні дані сталого нагріву крайнього пакета осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500

Джерело інформації	Температура, °C			
	Зубець			Ярмо
	Коронка	Середина	Основа	Середина
Номинальний режим ($P = 495$ МВт, $\cos \varphi = 0,848$)				
Розрахунок	50,9	51,25	72,37	56,63
Дослід	-	54,90	76,20	53,70
Розбіжність, %	-	6,65	5,03	5,46
Режим короткого замикання ($I_s = 0,6I_n$)				
Розрахунок	49,15	44,7	52,97	48,17
Дослід	46,30	47,70	57,00	45,60
Розбіжність, %	6,16	6,29	7	5,64

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Кожен дослідник у своїх розрахунках приймає певні припущення, які

мають одночасно переваги та недоліки. Розроблена математична модель відрізняється від тих, які використовуються та відомі на сьогодні, підходом до врахування руху ротора, перерізом взаємозв'язку активної частини генератора з його кінцевою зоною, математичним апаратом, комплексом граничних умов, методикою визначення кута β , математично точним урахуванням струмів і геометрії лобових частин обмотки статора та, що найсуттєвіше, режиму навантаження турбогенератора. Водночас розроблена модель дозволяє дослідити взаємопов'язані електромагнітні та теплові процеси за умов простоти програмної реалізації.

На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки врахувати усі фактори під час моделювання електромагнітних і теплових полів у торцевій зоні турбогенератора неможливо. Ті фактори, які враховані у запропонованій моделі, обов'язково враховувати саме так, як це вказано. Їх можна враховувати будь-яким способом за умови, що цей спосіб забезпечує коректність урахування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Мильх, В. И. & Полякова, Н. В. (2014). Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, 1081 (38), 3-18.
- [2] Васьковський, Ю. М. & Титко, О. І. (2013). Математичне моделювання вихрових струмів і втрат в крайніх пакетах статора турбогенератора. *Технічна електродинаміка*, (3), 50-56.
- [3] Васьковський, Ю. М. (2007). *Польовий аналіз електричних машин*. Київ: НТУУ «КПІ».
- [4] Кенцицький, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2017). Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (48), 59-64.
- [5] Вознесенский, А. С. (2011). *Компьютерные методы в научных исследованиях. Часть 2. Компьютерное моделирование физических объектов и процессов горного производства*. Москва: МГГУ.
- [6] Хвалин, Д. И., Кенцицкий, О. Г. & Кобзарь, К. А. (2021). Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 64 (2), 130-142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>
- [7] *COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software*. (2016). Retrieved from: <http://www.comsol.com/>
- [8] Постников, И. М., Станиславский, Л. Я. & Счастливый, Г. Г. (1971). *Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов*. Киев: Наук. думка.
- [9] Счастливый, Г. Г., Федоренко, Г. М. & Выговский, В. И. (1978). Прибор для измерения теплоотдачи в электрических машинах и аппаратах. *Электротехническая промышленность. Серия: Электрические машины*, (7), 10-13.
- [10] Счастливый, Г. Г., Федоренко, Г. М. & Выговский, В. И. (1985). *Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки*. Киев: Наук. думка.
- [11] Титов, В. В., Хуторецкий, Г. М., Загородная, Г. А. и др. (1967). *Турбогенераторы. Расчет и конструкция*. Ленинград: Энергия.

- [12] Смородин, В. И. (1991). *Экспериментальные исследования и анализ особенностей электромагнитных процессов в торцевых зонах статоров мощных турбогенераторов* (препр. № 709). Институт электродинамики АН УССР. Киев, Украина.
- [13] Кенсичський, О. Г., Хвалін, Д. І. & Кобзар, К. О. (2018). Математична модель спільного розрахунку електромагнітного та температурного полів торцевої зони потужного турбогенератора. *Гідроенергетика України*, (1-2), 32-35.
- [14] Штогрін, О. В. (2016). *Науково-технічні заходи по зменшенню пошкоджуваності статорів потужних турбогенераторів, спричинених вібрацією в торцевих зонах* (автореф. дис. ... канд. техн. наук). Одеський національний політехнічний університет. Одеса, Україна.
- [15] Кенсичський, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2018). Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження. *Технічна електродинаміка*, (1), 62-68.
- [16] Кенсичський, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2018). Розподіл електромагнітного поля в торцевій зоні турбогенератора при номінальному навантаженні. *Технічні вісті*, 47 (1), 48 (2), 11-14.
- [17] Потапов, Л. А. & Бутарев, И. Ю. (2011). *COMSOL Multiphysics: моделирование электромеханических устройств*. Брянск: БГТУ.
- [18] Fujita, M., Ueda, T., Tokumasu, T., Nagakura, K., Kakiuchi, M. & Otaka, T. (2009). Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators. *International Conference on Electrical Machines and Systems* (1-6), Nov., 2009, Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382938>
- [19] Li, W., Guang, C. & Zheng, P. (2010). Calculation of a Complex 3-D Model of a Turbogenerator With End Region Regarding Electrical Losses, Cooling, and Heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (26) 4, 1073-1080.
- [20] Милых, В. И. & Высочин, А. И. (2010). Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы. *Электротехника и электромеханика*, (3), 19-24.
- [21] Милых, В. И. & Дубинина, О. Н. (2002). Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчёте магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчётных моделей. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*, (5), 10-15.
- [22] Милых, В. И. & Полякова, Н. В. (2015). Численные расчеты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, (5), 3-11.
- [23] Хуторецкий, Г. М., Токов, М. И. & Толвинская, Е. В. (1987). *Проектирование турбогенераторов*. Ленинград: Энергоатомиздат.
- [24] Vlasenko, T. S., Hvalin, D. I. & Mystetskyi, V. A. (2019). Complex mathematical simulation of physical processes in powerful generator. *East European Scientific Journal*, 44 (4), 22-30.
- [25] Кенсичський, О. Г., Хвалін, Д. І., & Кобзар, К. А. (2019). Математическая модель совместного расчёта электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 62 (1), 37-46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>
- [26] Кенсичський, О. Г., Крамарський, В. А., Кобзар, К. О. & Хвалін Д. І. (2018). Дослідження розподілу електромагнітного поля та температури в торцевій зоні осердя статора турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (51), 47-53.
- [27] Исаченко, В. П., Осипова, В. А. & Сукомел, А. С. (1975). *Теплопередача*. Москва: Энергия.
- [28] Михеев, М. А. & Михеева, И. М. (1977). *Основы теплопередачи*. Москва: Энергия.
- [29] Данько, В. Г., Мілих, В. І. & Поляков, І. В. (2000). Деякі проблеми турбогенераторів з повітряним охолодженням. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, (84), 73-76.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

КОЛЕКТИВНА МОНОГРАФІЯ

**«СУЧАСНИЙ СТАН ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ У ІТ-ТЕХНОЛОГІЯХ, ГАЛУЗЯХ
ЕЛЕКТРОНІКИ, ІНЖЕНЕРІЇ, НАНОТЕХНОЛОГІЯХ
ТА ТРАНСПОРТНІЙ СФЕРІ»**

ВИДАННЯ 2

Українською та російською мовами

*За точність викладеного матеріалу відповідальність несуть автори.
Редакція не завжди поділяє позицію авторів.*

Опубліковано (PDF) 19.05.2021. Підписано до друку 31.08.2022.

Папір офсетний. Цифровий друк.

Формат 60×84/16. Гарнітура Cambria.

Умовно-друк. арк. 7,79. Замовлення № 330.

Тираж: 100 екземплярів. Віддруковано з готового оригінал-макету.

Видавець:

21037, Україна, м. Вінниця, вул. Зодчих, 18, офіс 81

ГО «Європейська наукова платформа»

Телефони: +38 098 1948380; +38 098 1956755

E-mail: info@ukrlogos.in.ua | URL: www.ukrlogos.in.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 7172 від 21.10.2020.