

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИСТУПІВ СПОРТСМЕНІВ ТА КОМАНД У СПОРТИВНИХ ЗМАГАННЯХ**

Розглянуто основні особливості вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань. Проаналізовано основні методи вирішення цієї задачі, встановлено їхні переваги та недоліки. Розроблено метод вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях, який поєднує переваги методів байєсівської лінійної регресії та байєсівського оцінювання. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів під час вирішення задачі прогнозування результатів участі спортсменів Федерації підводного спорту та підводної діяльності України у спортивних змаганнях на Кубок світу.

**1. Вступ**

Сучасний спорт є однією з важливих галузей бізнес-діяльності. Однією із задач, яка вирішується для забезпечення якісного управління діяльністю в усіх спортивних напрямках, є задача прогнозування результатів діяльності спортивних клубів, командних та особистих змагань спортсменів. Вирішення задач прогнозування стає необхідністю для управління найрізноманітнішими аспектами цієї галузі (спортивний менеджмент, ставки на спорт, аналіз командних та індивідуальних виступів тощо) [1]. У сучасному спортивному світі, де конкуренція є надзвичайно високою, прогнозування результатів змагань стає ключовою складовою для розвитку та популяризації різних видів спорту. Визначення успішності спортсменів/команд вимагає не лише аналізу історичних даних, а й використання сучасних методів прогнозування, щоб отримати об'єктивні та надійні результати [2].

Прогноз у сфері спорту – це науково обґрунтоване судження про можливий стан спортсмена або певного об'єкта спортивної дійсності у майбутньому, а також про найімовірніші шляхи досягнення бажаного стану [3]. На теперішній час прогнозування в спорті відбувається за основними часовими обмеженнями [4]:

- короткострокове прогнозування;
- середньострокове прогнозування;
- довгострокове прогнозування;
- наддовгострокове прогнозування.

Основну увагу даного дослідження зосереджено на довгостроковому прогнозуванні.

Довгострокове прогнозування спрямоване на оптимізацію процесу відбору, підготовки та участі спортсменів в змаганнях протягом відносно тривалого часу (від 1-2 років до 3-4 років).

Довгостроковий прогноз в спортивній сфері має велике значення при вирішенні таких задач [5]:

- відбір спортсменів/команд, які здатні досягти високих показників в різних видах спорту;
- орієнтація спортсменів на досягнення високих результатів в тій чи іншій дисципліні конкретного вигляду, вибір ігрового амплуа (в іграх), вибір перспективної техніко-тактичної моделі змагання, що спирається на максимальне використання індивідуальних можливостей спортсменів;

- визначення оптимальної структури тренувального процесу, динаміки навантажень, найвірогіднішого розвитку підготовленості, формування різних компонентів спортивної майстерності;

- вибір найефективніших техніко-тактичних рішень (складнокоординаційні види, єдиноборство, ігри), здатних виявитися несподіваними для суперників, найефективнішими з позиції досягнення кінцевого результату змагальної діяльності;

- виявлення складу основних суперників, їхньої технічної й тактичної оснащеності, фізичної та психічної підготовленості, особливостей діяльності змагання;

- вивчення умов майбутніх змагань, включаючи режим проведення змагань, кліматичні умови, особливості суддівства, інвентарю, устаткування;

- визначення спортивного результату, який може виявитися достатнім для перемоги, характеристик підготовленості, які дозволять забезпечити досягнення заданого результату.

Занадто низька точність таких прогнозів обумовлюється зараз великою кількістю чинників, які складно враховуються, але впливають на перемогу в змаганнях і темпи зростання спортивних результатів. На кінцевий результат прогнозу може мати вирішальний вплив кожний з чинників.

Тому існує постійна необхідність проведення досліджень існуючих та розробки нових і вдосконалених моделей і методів довгострокового прогнозу для підвищення ефективності управління спортивними клубами та результативності участі спортсменів у змаганнях різного рівня у різних видах спорту.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження**

### **2.1. Аналіз існуючих методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань**

Аналіз існуючих методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань запропоновано проводити з урахуванням вимоги приділення головної уваги тим методам прогнозування, які впливають на точність та об'єктивність визначення рейтингів спортсменів/команд у різних видах спорту. При цьому акцент слід робити на новітніх тенденціях та підходах, що дозволяють покращити якість прогнозування та враховувати різні аспекти спортивної діяльності [6].

Виходячи з цієї вимоги, було виділено групу математичних методів, які використовуються для прогнозування результатів спортивних змагань, а саме:

- методи машинного навчання (ML) [7];
- статистичні методи [8];
- байєсівські методи [9];
- методи оптимізації [10];
- методи теорії ігор [11];
- методи експертного оцінювання [12];
- методи побудови динамічних моделей [13].

Кожна з зазначених груп методів має власні ролі у розвитку спорту в цілому. Так методи ML в аспекті аналізу діяльності спортсменів використовують статистичні дані для визначення сильних та слабких сторін. Вони також використовуються для прогнозування травм, визначення оптимального часу відновлення та рекомендацій щодо тренувального процесу. У сфері тренування методи ML можуть адаптувати програми тренувань до індивідуальних потреб кожного спортсмена на основі його фізичного стану та показників втоми. В аспекті

стратегічного аналізу результатів змагань методи ML можуть використовуватися для прогнозування дій суперників, аналізу даних щодо спортсменів/команд та визначення оптимальних тактик. Використання методів ML у спорті загалом сприяє підвищенню ефективності тренувань, покращенню стратегій змагань та зниженню ризику травм [14].

Статистичні методи використовуються, наприклад, у ігрових видах спорту, для обробки та аналізу великої кількості даних про гравців, таких, як результати гри, ведення статистики щодо голів, часу гри, кількості травм тощо. Це дозволяє тренерам та аналітикам здійснювати об'єктивний аналіз і визначати ключові аспекти виступу гравців. За допомогою цих методів можна визначати ефективність тренувань та адаптувати їх до потреб індивідуальних гравців. Аналіз статистичних даних щодо фізичного стану, втоми та відновлення дозволяє максимізувати результативність тренувань. Такі методи стають важливим інструментом у спортивній аналітиці, допомагаючи приймати обґрунтовані рішення та оптимізувати різні аспекти спортивного процесу [15].

Основні аспекти використання байєсівських методів у спорті включають оцінювання ймовірностей успіху, оптимізацію стратегій та прогнозування травм. Зокрема, байєсівські методи в спортивній аналітиці використовують теорію ймовірностей для моделювання та аналізу невизначеностей, прийняття рішень та оцінювання ймовірностей подій [9]. Ці методи можуть адаптуватися в реальному часі, враховуючи попередні знання та нові докази (дані). Вони також застосовуються для аналізу стратегій суперників та оцінювання впливу різних факторів на спортсменів [16].

Методи оптимізації в спортивному контексті широко використовуються для підвищення ефективності та результативності. Вони включають в себе розробку оптимальних тренувальних програм, визначення оптимальних стратегій гри та максимізацію використання ресурсів. Ці методи дозволяють аналізувати та вдосконалювати процеси тренувань, адаптувати підходи до індивідуальних потреб спортсменів, а також знаходити оптимальні рішення в умовах обмежень. Використання методів оптимізації допомагає спортивним командам досягати кращих результатів, мінімізувати травми та ефективно використовувати ресурси для досягнення найвищого потенціалу [9].

Теорія ігор в спортивному контексті є важливим інструментом для аналізу стратегічної взаємодії між різними учасниками. Вона дозволяє розглядати спортивні події як ігрові сценарії, де гравці приймають стратегічні рішення, впливаючи один на одного. Теорія ігор застосовується також для розуміння оптимальних стратегій, визначення слабких та сильних сторін гравців, а також прогнозування можливих варіантів розвитку подій. Ця теорія може бути використана для планування тактичних кроків, враховуючи можливі дії суперників, та для оптимізації стратегій гри з метою досягнення перемоги [5].

Експертні оцінки в світі спорту є невід'ємним ресурсом, що дає важливий внесок в розуміння різних аспектів гри та тренувань. Тренери, фахівці з фізіології та аналітики завдяки своїм глибоким знанням можуть доповнити статистичні дані, розкриваючи інтуїцію гравців, їхні лідерські якості та інші важливі аспекти. Вони допомагають у виокремленні аспектів виступу гравців, тому що такі аспекти не завжди відображаються у статистичних даних. Експертні думки стають основою для розробки оптимальних стратегій гри та спортивних тренувань [17].

Динамічні методи й моделі застосовуються для прогнозування різних аспектів у спортивному середовищі. Наприклад, такі моделі можуть використовуватися для аналізу

фізичного стану спортсменів, прогнозувати їхню витривалість та форму перед матчами та змаганнями. Вони можуть також використовуватися для прогнозування динаміки гри, враховуючи тактичні зміни та стратегії суперників. Завдяки динамічним моделям тренери та аналітики можуть краще розуміти та оптимізувати тренувальні процеси та приймати обґрунтовані рішення під час змагань [18].

Для обраних груп методів були визначені їхні переваги та недоліки, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Переваги та недоліки сучасних математичних методів прогнозування, які можна використовувати в спортивній діяльності

Метод	Характеристики	Переваги	Недоліки
Методи машинного навчання	Використовують алгоритми для вивчення шаблонів у даних	Здатність робити прогнози на основі великої кількості даних	Потребують великої кількості даних для ефективної роботи
Статистичні методи	Засновані на статистичних моделях та методах	Здатність розраховувати ймовірність та довірчі інтервали	Можуть бути чутливими до викидів та аномалій у даних
Байєсівські методи	Використовують теорему Байєса для оцінки ймовірностей	Добре працюють при обмежених вхідних даних	Вимагають апріорних ймовірностей, які можуть бути суб'єктивними
Методи оптимізації	Максимізують або мінімізують обрану функцію відносно параметрів	Ефективні для оптимізації конкретних функцій	Як остаточні рішення можуть пропонуватися локальні екстремуми
Методи теорії ігор	Вивчають стратегії взаємодії між учасниками	Допомагають у розумінні стратегічних аспектів змагань	Складно моделюються ускладнені взаємодії та стратегії
Методи експертного оцінювання	Використовують експертні знання та думки для прогнозування	Можуть бути ефективними в випадках обмежених даних	Залежать від якості та об'єктивності експертних рішень
Методи побудови динамічних моделей	Створюють моделі, які враховують зміну в часі	Допомагають у прогнозуванні тенденцій та динаміки	Вимагають точних даних для побудови й оновлення даних

Результати порівняльного аналізу обраних груп методів наведено у табл. 2.

У табл. 2 прийнято такі скорочення: 1 – методи машинного навчання; 2 – статистичні методи; 3 – байєсівські методи; 4 – методи оптимізації; 5 – методи теорії ігор; 6 – методи експертного оцінювання; 7 – методи побудови динамічних моделей.

За результатами проведеного аналізу було обрано для подальшого поглибленого дослідження три групи методів:

- методи машинного навчання;
- байєсівські методи;
- статистичні методи.

Результати порівняльного аналізу цих груп методів за додатковими критеріями наведено

у табл. 3.

Таблиця 2

Результати порівняльного аналізу обраних груп методів

Критерії якісного прогнозу	Сучасні методи прогнозування						
	1	2	3	4	5	6	7
Обробка обмежених даних	-	-	+	+	-	+	+/-
Ефективність при використанні великої кількості даних	+	+/-	+	+/-	-	+/-	+
Чутливість до викидів та аномалій	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	-
Залежність від суб'єктивних оцінок	-	-	+	-	-	-	-
Обчислювальні витрати	-	+/-	-	+/-	+/-	+/-	-
Здатність моделювати стратегії	-	-	-	-	+	-	-
Залежність від точності даних	+	+	-	+/-	+/-	+/-	+

Таблиця 3

Результати порівняльного аналізу методів прогнозування за додатковими критеріями

Додаткові критерії	Методи машинного навчання	Байєсівські методи	Статистичні методи
Точність	Висока	Середня	Низька
Чутливість	Висока	Середня	Низька
Врахування взаємодії факторів	Висока	Середня	Низька
Специфічність	Висока	Середня	Низька
Час виконання	Так	Так	Ні
Відповідність задачі	Так	Так	Так
Врахування природи даних	Так	Ні	Так
Масштабованість	Так	Так	Ні
Здатність до оновлення	Так	Так	Ні
Ймовірнісний підхід	Ні	Так	Ні
Можливість роботи з малою кількістю даних	Ні	Так	Ні
Фактори спорту	Так	Ні	Так
Форма спортсмена	Так	Ні	Так
Умови змагань	Так	Ні	Так
Тривалість тренувань	Так	Ні	Так

Аналіз сучасних методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань показав, що більшість з них не використовується для прогнозування спортивних рейтингів, а лише допомагають у аналізі спортивних результатів, виходячи з показаного часу чи результату спортсменів. Аналіз методів, які можна використати для прогнозування результатів змагань, показав, що методи ML і методи, які використовують байєсівські моделі, є найбільш підходящими для прогнозування рейтингу за медальним заліком (далі – успіх) у видах спорту та для визначення стабільності та пріоритетності спортсменів.

Важливою частиною прогнозування результатів спортивних змагань є прогнозування результатів виступів окремих спортсменів/команд (далі – прогнозування результатів

виступів). Методи подібного прогнозування є одними з найменш досліджених методів спортивного прогнозування. Тому проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючих та розробку нових методів прогнозування результатів виступів, є одним з найважливіших напрямів проведення досліджень в цій галузі.

### 3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є підвищення точності прогнозування результатів виступів. Досягнення цієї мети дозволить обґрунтовано приймати рішення щодо визначення стабільності та пріоритетності участі спортсменів у майбутніх змаганнях.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі задачі:

- адаптація моделі байєсівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів;
- розробка вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів;
- експериментальна перевірка розробленого вдосконаленого методу під час вирішення задачі прогнозування результатів виступів у спортивних змаганнях Федерації підводного спорту та підводної діяльності України.

### 4. Опис методу дослідження

Об'єктом дослідження є задача прогнозування результатів виступів.

Проведений аналіз застосування методів прогнозування в спортивній діяльності показав, що для вирішення цієї задачі найбільше підходять дві групи методів. Це методи ML та методи, основою яких є байєсівські моделі. ML дозволяє виявляти складні зв'язки у великих даних, а байєсівські моделі ефективно оцінюють ймовірності та адаптуються до нових даних, що робить їх ефективними для спортивного прогнозування.

Тому предметом дослідження є вдосконалений метод прогнозування результатів виступів, який, на відміну від існуючих, поєднує переваги методів ML та методів, в основі яких знаходяться байєсівські моделі.

Дослідження при вирішенні задачі прогнозування результатів виступів з використанням методу ML починається з отримання детальної вхідної інформації про таке:

- завойовані місця та отримані медалі;
- кількість отриманих рейтингових очок (РО) спортсменів чи спортивних клубів після кожних вагомих змагань;
- статистику з попередніх змагань.

Як вихідний метод вирішення задачі прогнозування результатів виступів запропоновано використати метод байєсівської лінійної регресії. Цей метод включає оцінку параметрів регресійної моделі шляхом використання апіорних і апостеріорних розподілів [19]. Він також дозволяє враховувати невизначеність у моделі та адаптуватися до нових даних, що робить його особливо корисним в умовах з обмеженими або змінними даними.

Результатом застосування методу байєсівської лінійної регресії є модель прогнозування загальної кількості РО спортсменів на основі середньої кількості їхніх РО у змаганнях та стабільності отриманих результатів. Ця модель може бути представлена у вигляді:

$$P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані}) \propto P(\beta_0, \beta_1) \times P(\text{дані} | \beta_0, \beta_1), \quad (1)$$

де  $P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані})$  – умовна ймовірність параметрів моделі  $\beta_0$  та  $\beta_1$  при заданих даних;  $\beta_0$  – параметр регресії (точка перетину);  $\beta_1$  – параметр регресії (коефіцієнт нахилу);  $P(\beta_0, \beta_1)$  –

апріорна ймовірність параметрів моделі  $\beta_0$  та  $\beta_1$ , тобто ймовірність їхніх значень до отримання даних;  $P(\text{дані} / \beta_0, \beta_1)$  – ймовірність отримання даних при заданих значеннях параметрів  $\beta_0$  та  $\beta_1$ , тобто ймовірність даних при певній моделі.

Параметри регресії  $\beta_0$  та  $\beta_1$  визначаються при використанні формули простої лінійної регресії

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $y$  – залежна змінна;  $\beta_0$  – параметр регресії (точка перетину);  $\beta_1$  – параметр регресії (коефіцієнт нахилу);  $x$  – незалежна змінна;  $\varepsilon$  – випадкова похибка, яка враховує неможливість ідеального прогнозування.

Аналіз проводиться з використанням нормального закону для апріорного та апостеріорного розподілу. Тоді модель (1) набуває вигляду:

$$P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані}) = \exp \left( \left( -\frac{1}{2} \right) \left[ \frac{(\beta_0 - \mu_{\beta_0})^2}{\sigma_{\beta_0}^2} + \frac{(\beta_1 - \mu_{\beta_1})^2}{\sigma_{\beta_1}^2} \right] \right) \times \prod_{i=1}^N P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i), \quad (3)$$

де  $P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані})$  – апостеріорна ймовірність параметрів моделі  $\beta_0$  та  $\beta_1$  при заданих даних;  $\beta_0$  – параметр регресії (точка перетину);  $\beta_1$  – параметр регресії (коефіцієнт нахилу);  $\mu_{\beta_0}$ ,  $\mu_{\beta_1}$ ,  $\sigma_{\beta_0}^2$ ,  $\sigma_{\beta_1}^2$  – параметри апріорного розподілу для  $\beta_0$  та  $\beta_1$ ;  $N$  – кількість точок (вимірювань) даних;  $P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i)$  – функція правдоподібності для даних;  $y_i$  – спостереження;  $x_i$  – вхідні дані;  $\prod_{i=1}^N P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i)$  – добуток ймовірностей спостережень  $y_i$  при відомих параметрах  $\beta_0$  і  $\beta_1$  та відповідних значеннях  $x_i$ .

Для тренування моделі використовуються зібрані дані про виступи спортсменів. Натренована модель застосовується для прогнозування результатів майбутнього виступу спортсменів на змаганнях.

Головна проблема використання методу байєсівської лінійної регресії для вирішення задачі прогнозування результатів виступів полягає у тому, що цей метод базується на використанні історичної інформації про результати тих змагань, які вже завершилися. Ця історична інформація у спорті найчастіше має вигляд даних щодо рейтингу окремих команд та спортсменів за результатами виступів у різних змаганнях. Визначення аналогічних за структурою та змістом даних для майбутніх змагань є достатньо складною задачею, а в багатьох випадках – такою, що не може бути вирішеною.

Розглянута вище модель байєсівської лінійної регресії не враховує особливості вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд. Тому необхідно адаптувати її до цих особливостей.

## 5. Вирішення задачі підвищення точності прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях.

### 5.1. Адаптація моделі байссівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд

Головною особливістю регресійних методів є можливість їх застосування для обробки виключно числових даних. Тому треба спочатку визначити можливість створення за результатами спортивних змагань масивів даних, які давали б змогу враховувати як загальні результати змагання, так і участь у цих змаганнях окремих спортсменів/команд.

Як основу для створення подібних масивів даних пропонується використовувати системи рейтингів спортсменів/команд та змагань. Формування подібних рейтингів змагань та подальше прогнозування результатів змагань для визначення пріоритетності виду спорту є важливою задачею для Міністерства молоді та спорту України.

Оскільки існує багато факторів, які впливають на прогнозування та формування рейтингів у подальшому, при формуванні рейтингів робляться такі припущення:

- спортсмен, який бере участь у змаганнях, може обирати лише обмежену кількість варіантів участі у цих змаганнях;
- спортсмен може завоювати лише одну медаль в одному варіанті змагання;
- спортсмен для участі у змаганнях повинен бути зареєстрованим офіційно у спортивному клубі, за який він буде брати участь у змаганнях;
- підрахування очок для спортивних клубів визначається за загальною кількістю очок спортсменів цього клубу;
- підрахування кількості очок, завойованих спортсменом, визначається до 16 місця;
- результати щодо змагань повинні бути підкріплені документами, які надаються на вимоги офіційних органів.

На основі рейтингів можливо визначити загальну кількість РО спортсменів/команд як сукупну кількість РО, які спортсмен/команда набрали за свої виступи у різних змаганнях. При цьому кожне змагання може мати свою систему нарахування очок.

Множину  $R_A$  усіх можливих результатів конкретного змагання для формування рейтингу спортсменів/команд можна визначити як декартів добуток за формулою:

$$R_A = A \times D \times R \times P, \quad (4)$$

де  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_m\}$  – множина спортсменів/команд, які беруть участь у змаганні;  
 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_h\}$  – множина варіантів участі у змаганні (наприклад, множина дистанцій), за якими отримано спортивний результат;  $R = \left\{ r_{1,1}, r_{1,2}, \dots, r_{j,d_k}, \dots, r_{u,d_h} \right\}$  – множина номерів місць, які посідають спортсмени/команди у конкретних варіантах змагання;  
 $P = \left\{ p_{r_{1,1}}, p_{r_{1,2}}, \dots, p_{r_{j,d_k}}, \dots, p_{r_{u,d_h}} \right\}$  – множина кількості РО, нарахованих за місце, яке посіли спортсмени/команди на змаганнях.

При формуванні рейтингу конкретних спортсменів/команд на конкретному змаганні, результати їхніх виступів можуть бути представлені у вигляді:

$$R_{a_s} = \left\{ \left( a_s, d_k, r_{j,d_k}, p_{r_{j,d_k}} \right) / a_s \in A; d_k \in D; r_{j,d_k} \in R; p_{r_{j,d_k}} \in P \right\}, \quad (5)$$

де  $R_{a_s} \subset R_A$  – підмножина результатів участі конкретного спортсмена/команди у конкретному змаганні;  $a_s$  – ліцензійний номер спортсмена/команди;  $d_k$  – варіант участі у змаганні, за яким отримано результат;  $r_{j,d_k}$  – номер місця, яке посів спортсмен/команда  $a_s$  на конкретному змаганні в конкретному варіанті змагання;  $p_{r_{j,d_k}}$  – кількість РО, нарахованих за місце, яке посів спортсмен/команда  $a_s$  в конкретному варіанті змагання.

Тоді загальна кількість РО  $P_{total\_a_s}$ , яку отримав спортсмен/команда на усіх змаганнях, розраховується для подальшого формування рейтингу спортсменів/команд за формулою:

$$P_{total\_a_s} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{l=1}^q \left( p_{r_{j,d_k}} \right)_l \right)_i, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість змагань, проведених за визначений період;  $q$  – кількість варіантів участі конкретного спортсмена/команди у конкретному змаганні;  $r_{j,d_k}$  – номер місця, яке посів спортсмен/команда  $a_s$  на конкретному змаганні в конкретному варіанті змагання;  $\left( p_{r_{j,d_k}} \right)_l$  – кількість РО, нарахованих спортсмену/команді  $a_s$  за місце з номером  $r_{j,d_k}$  в  $l$ -му варіанті змагання.

Для визначення стабільності спортсмена/команди  $a_s$  у  $n$  змаганнях пропонується розрахувати середню кількість РО, які отримав спортсмен/команда за формулою:

$$P_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{q} \sum_{l=1}^q \left( p_{r_{j,d_k}} \right)_l \right)_i. \quad (7)$$

Для оцінки послідовності результатів спортсмена/команди у  $n$  змаганнях пропонується використовувати обчислення стабільності як одного з суттєвих показників підвищення рейтингу спортсменів, яке базується на стандартному відхиленні. У контексті спортивних результатів стандартне відхилення дозволяє оцінити, наскільки результати спортсмена/команди відрізняються від змагання до змагання. Низьке стандартне відхилення вказує на те, що результати спортсмена/команди порівняно стабільні та передбачувані, тобто він показує приблизно однакові результати протягом усіх змагань. Високе стандартне відхилення, навпаки, свідчить про великий розкид результатів, що може вказувати на нестабільність форми, різницю рівня складності змагань або інші фактори, що впливають на продуктивність спортсмена/команди.

Обчислення стандартного відхилення  $\sigma_{a_s}$  результатів спортсмена/команди проводиться

за формулою:

$$\sigma_{a_s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \left( \sum_{l=1}^q (r_{j,d_k})_l \right)_i - \mu \right)^2}, \quad (8)$$

де  $\mu$  – середнє значення результатів, які отримав спортсмен/команда  $a_s$  на змаганнях, що обчислюється за формулою:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \sum_{l=1}^q (r_{j,d_k})_l \right)_i. \quad (9)$$

## 5.2. Розробка вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів

Для подолання визначеної вище проблеми використання методу байєсівської лінійної регресії для вирішення задачі прогнозування результатів виступів необхідно брати до уваги не тільки історичну інформацію про участь команд або спортсменів у спортивних змаганнях, а й інформацію щодо особливостей того змагання, для якого розраховується прогноз. Тому для вирішення цієї задачі розроблено вдосконалений метод байєсівського прогнозування. Суть вдосконаленого методу полягає в об'єднанні попередніх знань про спортсмена/команду з новими даними, щоб отримати оновлену та точнішу оцінку їхніх можливостей. З цією метою введемо поняття байєсівської ймовірності успіху як оцінки ймовірності настання події (успіху спортсмена), що заснована на принципах байєсівської статистики. Початкова ймовірність (апріорна ймовірність) є початковою оцінкою ймовірності успіху спортсмена до врахування нових даних. Ця оцінка може базуватися на попередніх результатах спортсмена, рейтингу чи інших відомих факторах. Оновлення ймовірності (байєсівське оновлення) використовується, коли з'являються нові дані (результати нових змагань). Це оновлення засноване на правилі Байєса, що дозволяє перерахувати ймовірність, враховуючи нову інформацію. Правило Байєса має вигляд:

$$P(A/B) = \frac{P(B/A) * P(A)}{P(B)}, \quad (10)$$

де  $P(A/B)$  – оновлення ймовірності події  $A$  після отримання даних  $B$ ;  $P(B/A)$  – ймовірність отримання даних  $B$  за умови події  $A$ ;  $P(A)$  – початкова ймовірність події  $A$ ;  $P(B)$  – початкова ймовірність даних  $B$ .

Якщо спортсмен виграє (посідає призове місце), ймовірність його успіху у майбутньому підвищується. Цю ймовірність запропоновано розраховувати за формулою:

$$P(H/E) = \frac{P(E/H) * P(H)}{P(E/H) * P(H) + P(E/-H) * P(-H)}, \quad (11)$$

де  $P(H/E)$  – оновлена (апостеріорна) ймовірність гіпотези  $H$  (прогнозований успіх

спортсмена/команди на майбутньому змаганні) після врахування події  $E$  (успіх);  $P(E/H)$  – ймовірність події  $E$  (успіх), якщо гіпотеза  $H$  вірна;  $P(H)$  – апіорна ймовірність того, що гіпотеза  $H$  вірна (ймовірність успіху до врахування події);  $P(E/\neg H)$  – ймовірність події  $E$  (успіх), якщо гіпотеза  $H$  невірна;  $P(\neg H)$  – апіорна ймовірність того, що гіпотеза  $H$  невірна (ймовірність неуспіху до врахування події).

Якщо спортсмен не досягає успіху, ймовірність його успіху в майбутньому знижується. Цю ймовірність запропоновано розраховувати за формулою:

$$P(H/E) = \frac{P(\neg E/H) * P(H)}{P(\neg E/H) * P(H) + P(\neg E/\neg H) * P(\neg H)}, \quad (12)$$

де  $P(\neg E/H)$  – ймовірність події  $(\neg E)$  (неуспіху), якщо гіпотеза  $H$  вірна;  $P(\neg E/\neg H)$  – ймовірність події  $(\neg E)$  (неуспіх), якщо гіпотеза  $H$  невірна.

Тоді вдосконалений метод байєсівського прогнозування пропонується представити як послідовність таких етапів і кроків.

Етап 1. Попередня обробка даних щодо виступів спортсмена/команди на змаганнях.

Крок 1. Формування вибірки історичних даних про участь спортсменів/команд у попередніх змаганнях.

Крок 2. Визначення різновиду змагань, для яких потрібно вирішити задачу прогнозування.

Крок 3. Перевірка можливості участі спортсмена/команди в змаганнях, для яких потрібно вирішити задачу прогнозування.

Етап 2. Оновлення оцінок ймовірності успіху спортсмена/команди на змаганні з використанням нових даних про зміни в спортивному середовищі.

Крок 1. Розрахунок загальної кількості РО за змагання за формулами (4) та (5).

Крок 2. Розрахунок середньої кількості РО за змагання за формулою (6).

Крок 3. Розрахунок початкової ймовірності успіху за формулами (10)-(12).

Крок 4. Визначення ймовірності успіху спортсмена/команди з врахуванням успіху (розрахунок за формулою (11)) або неуспіху (розрахунок за формулою (12)) у попередньому змаганні.

Крок 5. Якщо відомі нові або додаткові дані щодо змагання, за якими потрібно вирішити задачу прогнозування, – розрахунок байєсівського оновлення даних за формулою (10).

Етап 3. Розрахунок кінцевої оцінки ймовірності успіху виступу спортсмена/команди на змаганні.

Крок 1. Тренування і розрахунок байєсівської лінійної регресії за формулами (1)-(3).

Крок 2. Розрахунок стабільності спортсмена за формулою (8) і отримання ймовірностей успіху (високих, середніх чи низьких).

Крок 3. Формування та публікація таблиці з результатами прогнозування. Завершення використання методу.

### **5.3. Експериментальна перевірка розробленого вдосконаленого методу.**

Для експериментальної перевірки розробленого вдосконаленого методу було запропоновано вирішити задачу прогнозування результатів виступів спортсменів у змаганнях на Кубок світу для Федерації підводного спорту та підводної діяльності України з метою підвищення ефективності

та визначення пріоритетності спортсменів у наступних змаганнях подібного типу.

Опис початкових даних для вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів на Кубок світу наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Початкові дані для вирішення задачі прогнозування результатів виступів

Спортсмен	Стать	РН	ЧС – міся	КС 1 – міся	КС 2 – міся	Тренер
Уварова Вікторія	Ж	2001	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 2 4x100 – 1	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 1 4x100 – 1	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 1 4x100 – 1	Шляховська А.А.
Шляховська Ольга	Ж	1989	200 im – 3 400 sf – 2 1500 sf – 3 400 im – 1	200 im – 2 400 sf – 2 1500 sf – 1 400 im – 3	200 im – 4 400 sf – 5 1500 sf – 2 400 im – 1	Шляховська А.А.
Березна Вірсавія	Ж	2002	200 sf – 4 400 sf – 3 4x100 – 1 800 sf – 5	50 bf – 2 100 bf – 5 4x100 – 1 200 bf – 3	50 bf – 1 100 bf – 5 4x100 – 2 200 bf – 4	Альошков О.В.
Гречко Софія	Ж	2005	--	200 sf – 1 400 sf – 2 4x100 – 1 800 sf – 3	200 sf – 1 400 sf – 1 4x100 – 2 800 sf – 4	Яковлев Є.О.
Макаренко Анастасія	Ж	2006	50 ap – 4 100 sf – 3 200 sf – 1 4x100 – 5	50 ap – 1 100 sf – 2 200 sf – 2 4x100 – 3	50 ap – 1 100 sf – 5 200 sf – 2 4x100 – 4	Годована М.О.
Антоняк Анастасія	Ж	1996	800 sf – 5 1500 sf – 6 400 im – 3 100 im – 5	800 sf – 4 1500 sf – 3 400 im – 2 100 im – 1	800 sf – 6 1500 sf – 2 400 im – 2 100 im – 7	Альошков О.В.
Ячник Валерія	Ж	2007		100 imj – 9 200 imj – 5 50 sfj – 5 50 apj – 2	100 imj – 7 200 imj – 3 50 sfj – 7 50 apj – 2	Шляховська А.А.
Резник Валентина	Ж	2001	100 im – 10 200 im – 9 50 bf – 11	100 imj – 1 200 imj – 6 50 bfj – 4 100 bfj – 2	100 imj – 2 200 imj – 4 50 bfj – 4 100 bfj – 2	Золотов О.Ю
Вакарева Єлизавета	Ж	2001	100 bf – 3 200 bf – 5 400 bf – 2 4x100 – 8	100 bf – 3 200 bf – 4 400 bf – 2 4x100 – 8	100 bf – 5 200 bf – 1 400 bf – 8 4x100 – 2	Красногор Т.С.
Краснокутська Вікторія	Ж	2005	200 imj – 13 400 imj – 8 200 bfj – 12 4x100 – 3	200 imj – 5 400 imj – 2 200 bfj – 4 4x100 – 2	200 imj – 8 400 imj – 2 200 bfj – 4 4x100 – 2	Краснокутський В.О.

Кінець таблиці 4

Спортсмен	Стать	РН	ЧС – місця	КС 1 – місця	КС 2 – місця	Тренер
Воробйова Вероніка	Ж	2008	200 sfj – 4 400 sfj – 3 800 sfj – 3 400 bfj – 9	200 sfj – 2 400 sfj – 1 800 sfj – 5 400 bfj – 2	200 sfj – 6 400 sfj – 2 800 sfj – 3 400 bfj – 3	Шляховська А.А.
Сміщенко Сергій	М	2000	50 sf – 12 100 sf – 4 100 im – 9 200 im – 15 50 ap – 4	50 sf – 3 100 sf – 3 50 ap – 1 100 im – 8	50 sf – 12 100 sf – 1 50 ap – 3 100 im – 7	Годована М.О.
Захаров Олексій	М	2001	200 sf – 1 400 sf – 1 800 sf – 6 1500 sf – 2	200 sf – 1 400 sf – 2 800 sf – 4 1500 sf – 7	200 sf – 1 400 sf – 1 800 sf – 1 1500 sf – 1	Шляховська А.А.

У табл. 4 прийняті такі скорочення: РН – рік народження; ЧС – Чемпіонат світу; КС – Кубок світу. У табл. 4 також наведені варіанти участі у змаганнях (скорочені позначення дисциплін – sf, ap, im, bf тощо – та дистанції – 50, 100 тощо).

Оцінки результатів спортсменів при успіху у змаганнях розраховуються за таблицею єдиного рейтингу спортсменів згідно з наказом № 530 Міністерства молоді та спорту України [20]. В цій таблиці відображений також поділ на вікові категорії спортсменів (дорослі, молодь та юнаки).

Згідно з таблицею єдиного рейтингу спортсменів, Олімпійські ігри та Всесвітні ігри приносять найбільшу кількість РО за завойовані місця і є найпріоритетнішими для майбутньої участі спортсменів.

Максимальна кількість РО, яку можна отримати за змагання на Кубок світу, – 8000. Це визначено тим, що спортсмен має змогу брати участь тільки у трьох індивідуальних дистанціях та одній естафетній дистанції.

Результати використання розробленого вдосконаленого методу наведено на рис. 1 і у табл. 5 (у табл. 5 РМ – рейтингове місце).

#### **6. Обговорення результатів дослідження**

Розроблений вдосконалений метод, на відміну від існуючих в Україні практик вирішення задачі прогнозування, дозволяє враховувати не тільки історичну інформацію про змагання, які відбулися раніше, а й інформацію про майбутні різновиди змагання. Це дозволяє підвищити точність оцінювання за рахунок об'єднання попередніх знань про спортсмена/команду зі знаннями, здобутими з аналізу даних про нове змагання. Використання розробленого вдосконаленого методу дає змогу керівництву спортивних федерацій та клубів України приймати обгрунтованіші рішення щодо участі окремих команд та спортсменів у найперспективніших змаганнях, результати виступів у яких можуть укріпити позиції українського спорту та поліпшити спортивний імідж України в світі.

Головним обмеженням запропонованого методу є використання для прогнозування рейтингових показників, які необхідно формувати за заздалегідь встановленими правилами. Слід зазначити, що різні спортивні федерації можуть використовувати різні рейтингові системи, особливості яких можуть вплинути на розроблений метод як позитивно, так і негативно.

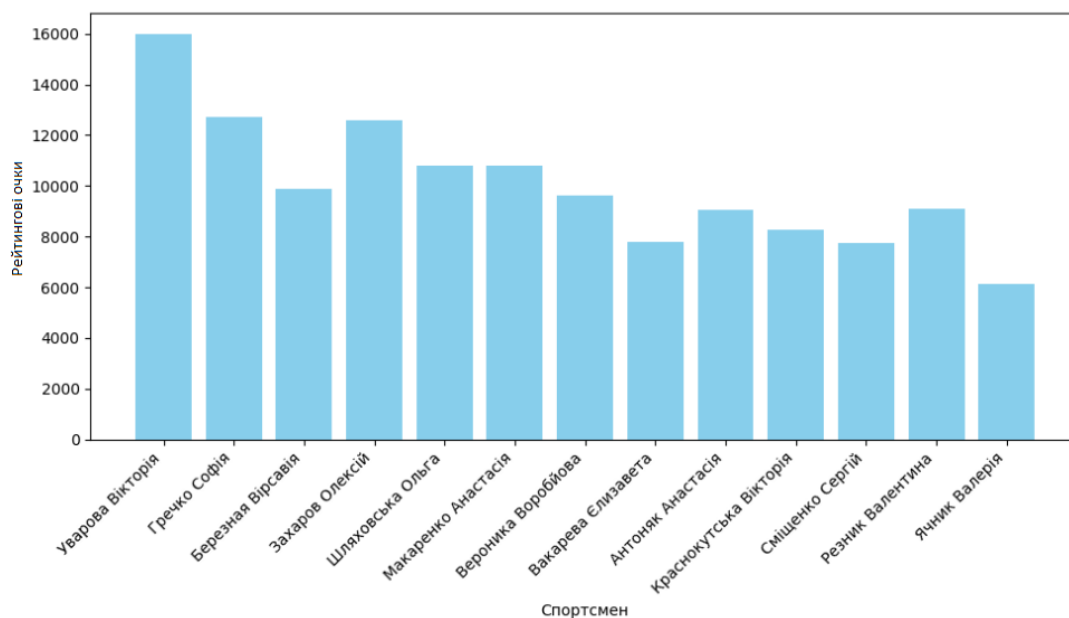


Рис. 1. Діаграма результатів прогнозування результатів виступу спортсменів на наступних змаганнях

Головним недоліком розробленого методу слід вважати відсутність можливості врахування під час вирішення задачі прогнозування даних щодо фізичного стану спортсмена або спортсменів команди. Ці дані та динамка їх зміни з часом можуть серйозно вплинути на результати вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях.

Виходячи з визначених обмежень та недоліків, пропонується розглядати такі напрями подальших досліджень із вдосконалення розробленого методу:

- дослідження впливу параметрів фізичного стану спортсмена на ймовірність успіху у змаганні, для якого розраховується прогноз;
- дослідження впливу різних систем рейтингування спортсменів/команд на результати вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях;
- дослідження можливості перетворення ймовірнісних оцінок на оцінки шансів спортсменів/команд на успіх, що дозволило б розширити предметну галузь застосування розробленого методу (наприклад, для використання у діяльності букмекерських контор з метою подальшої популяризації окремих видів спорту).

## 7. Висновки

В результаті даного дослідження було запропоновано адаптувати модель байесівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях. Цю адаптацію виконано шляхом розробки кількісних оцінок результатів та характеристик участі спортсмена/команди (4)-(9) у змаганнях на основі рейтингу.

Таблиця 5

## Результати експериментальної перевірки розробленого методу

РМ	Спортсмен	Загальна кількість РО	Кубок світу 1	Кубок світу 2	Загальна кількість РО за Кубки світу	Середня кількість РО за Кубки світу	Стабільність спортсмена	Байєсівська ймовірність успіху	Прогноз	Опис прогнозу (шанси на успіх)
1	Уварова Вікторія	39000	8000	8000	16000	2000.0	0.0	1.0	16000	Високі
2	Гречко Софія	35700	6500	6200	12700	1585.5	1.05	0.76	<12000	Високі
3	Березна Вірсавія	30900	5100	4800	9900	1237.5	1.54	0.09	<9000	Середні
4	Захаров Олексій	30575	4575	8000	12575	1571.88	2.05	0.76	>13000	Високі
5	Шляховська Ольга	27300	6000	4800	10800	1350.0	1.32	0.03	<10000	Високі
6	Макаренко Анастасія	23550	6000	4800	10800	1350.0	1.32	0.03	<9000	Середні
7	Воробйова Вероніка	19500	5600	4000	9600	1200.0	1.58	0.0	<9000	Середні
8	Вакарева Єлизавета	18550	3450	4350	7800	975.0	2.52	0.0	>8000	Середні
10	Краснокутська Вікторія	13200	4300	3950	8250	1031.25	2.0	0.0	<8000	Середні
11	Сміщенко Сергій	11500	4250	3500	7750	968.75	3.63	0.0	<7000	Низькі
12	Резник Валентина	10150	4700	4400	9100	1137.5	1.54	0.0	<9000	Середні
13	Ячник Валерія	6150	2900	3250	6150	768.0	2.4	0.0	>7000	Низькі

Результати цієї адаптації було покладено в основу розробки вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях. Цей метод, на відміну від існуючих, дозволяє оновлювати оцінки ймовірності (байєсівське оновлення) успіху у майбутньому змаганні з врахуванням успіху (11) або неуспіху (12) спортсмена/команди у попередньому змаганні такого ж різновиду.

Для здійснення експериментальної перевірки розробленого вдосконаленого методу було запропоновано застосувати його для прогнозування ймовірності успіху українських спортсменів з Федерації підводного спорту та підводної діяльності України у змаганнях на Кубок світу. Результати прогнозування дозволяють визначити найперспективніший склад української збірної для участі у змаганнях Кубка світу з підводного плавання.

#### Перелік посилань:

1. Неолімпійський спорт: навч. посіб. / С. В. Імас та ін. Київ: НУФВСУ, Олімп. л-ра, 2015. 184 с.
2. Павленко В. О., Насонкіна Е.Ю., Павленко Є. Є. Сучасні технології підготовки в обраному виді спорту: підручник. Харків, 2020. 550 с.
3. Прогнозування в спорті. URL: [https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/3733/1/Прогнозування в спорті.pdf](https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/3733/1/Прогнозування%20в%20спорті.pdf) (дата звернення: 21.11.2023).
4. Запорожанов В. А., Платонов В. Н. Прогнозування та моделювання у спорті. *Теорія спорту* / под. ред. В. Н. Платонова. Київ: Вища школа, 1987. Ч. 3. С. 350-371.
5. Теорія і методика підготовки спортсменів: управління, контроль, відбір, моделювання та прогнозування в олімпійському спорті: навч. посіб. / О. А. Шинкарук. К., 2013. 136 с.
6. Костюкевич В. М. Теорія і методика спортивної підготовки (на прикладі командних ігрових видів спорту): навч. посіб. Вінниця: Планер, 2014. 616 с.
7. Rao С., Govindaraju V. Handbook of Statistics: Machine Learning: Theory and Applications. 2013. 552 с.
8. Особливості прогнозування результативності спортсменів як фактора підвищення ефективності навчально-тренувального процесу. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/6740/1/Яворська1110uatp.pdf> (дата звернення: 24.11.2023).
9. Байєсівський аналіз даних: монографія / П. І. Бідюк, І. О. Калініна, О. П. Гожий. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2021. 208 с.
10. Методи оптимізації та комп'ютерні технології: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / В.І. Захарчук. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 144 с.
11. Aumann R.J. Lectures on Game Theory. San Francisco: Westview Press, 1989. 120 с.
12. Експертні методи прогнозування URL: [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload\\_Електронний посібник ФІНАНСОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ/page11.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload_Електронний%20посібник%20ФІНАНСОВЕ%20ПРОГНОЗУВАННЯ/page11.html) (дата звернення: 01.12.2023).
13. Коршевнюк Л.О., Терентьев О.М., Бідюк П.І. Методика побудови математичних моделей динамічних процесів. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19603/1/Terentiev\\_CAIT\\_2013.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19603/1/Terentiev_CAIT_2013.pdf) (дата звернення: 01.12.2023).
14. Келлер В. С. Теоретико-методичні основи підготовки спортсменів / Келлер В. С., Платонов В. М. Львів: Українська Спортивна Асоціація, 1992. 269 с.
15. Інноваційні та інформаційні технології у фізичній культурі, спорті, фізичній терапії та ерготерапії: *Матеріали I Всеукраїнської електронної науково-практичної конференції з міжнародною участю (Київ, 19 квітня 2018 р.)* / під заг. ред. О.А. Шинкарук. К.: НУФВСУ, 2018. 131 с.
16. Платонов В. М. Фізична підготовка спортсмена / Платонов В. М., Булатова М. М. К.: Олімпійська література, 1995. 320 с.
17. Катренко А. В., Пасічник В. В. Прийняття рішень: теорія та практика : підручник. Львів : Новий Світ – 2000, 2020. 447 с.
18. Костюкевич В.М. Теорія і методика тренування спортсменів високої кваліфікації: Навчальний посібник. Вінниця: «Планер», 2007. 273 с.
19. Основні поняття теорії ймовірностей. *LibreTexts - Ukrayinska*. URL: [https://ukrayinska.libretexts.org/фізики/Термодинаміка\\_та\\_статистична\\_механіка/Книга%3A\\_Термодинаміка\\_та\\_статистична\\_механіка\\_\(Arovas\)/01%3A\\_Основи\\_ймовірності/1.02%3A\\_Основні\\_поняття\\_теорії\\_ймовірностей](https://ukrayinska.libretexts.org/фізики/Термодинаміка_та_статистична_механіка/Книга%3A_Термодинаміка_та_статистична_механіка_(Arovas)/01%3A_Основи_ймовірності/1.02%3A_Основні_поняття_теорії_ймовірностей) (дата звернення: 10.12.2023).
20. Про затвердження Положення про рейтинг з олімпійських та неолімпійських видів спорту в Україні: наказ Міністерства молоді та спорту України від 09.07.2020 № 530. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0785->

**Євланов Максим Вікторович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: maksym.ievlanov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-5166>.

**Васильцова Наталія Володимирівна**, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: nataliia.vasytsova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4043-487X> (науковий керівник здобувачки вищої освіти Уварової Вікторії Олександрівни).

**Уварова Вікторія Олександрівна**, здобувач вищої освіти, група ІУСТМ-22-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: viktoriia.uvarova@nure.ua.

---

УДК 681.513.1

DOI: 10.30837/0135-1710.2024.180.088

*С.Г. УДОВЕНКО, В.А. ЗАТХЕЙ, О.В. ТЕСЛЕНКО*

## **МОДУЛЬНА СИСТЕМА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЗА НАЯВНОСТІ СТРУКТУРНИХ ЗБУРЕНЬ**

---

Розглянуто завдання побудови модульної структури системи децентралізованого керування багатозв'язними процесами за наявності структурних збурень (MULTICON). Запропоновано алгоритм декомпозиції багатозв'язної системи на відносно ізольовані підсистеми. Досліджено питання підвищення робастності систем децентралізованого керування до структурних збурень, пов'язаних з послабленням взаємодії окремих підсистем. Вирішення задачі керування запропоновано здійснювати за допомогою аналізу впливу цих взаємодій на загальний оптимум. Розглянуто функції та особливості реалізації модулів, що входять до складу запропонованої системи керування. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

### **1. Вступ**

До найважливіших проблем, що виникають при побудові систем керування багатозв'язними процесами, відноситься проблема вибору їхньої структури.

У разі локального керування багатозв'язним процесом, опис якого не вимагає багатостадійного представлення його окремих етапів, природним є застосування централізованого багатовимірного регулятора [1]. Очевидно, що складність регулятора такого типу багато в чому залежить від характеру та розмірності перехресних зв'язків моделі об'єкта. При цьому може бути суттєво ускладнена можливість реалізації розглянутої схеми управління, що послідовно реалізує процедури фільтрації даних, прогнозування виходу, оцінювання параметрів та визначення керуючих впливів. Тісний взаємозв'язок цих процедур погіршує умови роботи системи керування і призводить до таких небажаних наслідків, як неідентифікованість та низька швидкість збіжності процесу параметричної ідентифікації. Крім того, через такий взаємозв'язок загальний час обробки інформації на кожному такті роботи регулятора визначається сумарною тривалістю виконання всіх процедур, що обмежує можливість ефективного управління швидкоплинними процесами. Ці обставини стимулювали застосування в багатовимірних системах методів, мета яких полягає в декомпозиції загального завдання на локальні підзавдання ідентифікації та керування з паралельною їх координацією [2, 3]. Децентралізація завдань може бути здійснена з використанням модульної структури