

УДК 519.816

**Н.К. ТИМОФІЄВА**  
Міжнародний науково-навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН України

## **ТЕОРИЯ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТА ЗАДАЧИ ШТУЧНОГО ИНТЕЛЕКТУ**

*Багато задач штучного інтелекту моделюються з використанням теорії комбінаторної оптимізації. Це пов'язано з тим, що переважна їхня частина при знаходженні оптимального розв'язку потребує перебору варіантів. Перебірним же задачам властива комбінаторна природа. Для задач розпізнавання та сегментації мовленнєвого сигналу, клінічної діагностики наведено математичні моделі, які побудовані в рамках теорії комбінаторної оптимізації. Показано, що в задачах цього класу комбінаторні конфігурації можуть бути як аргументом цільової функції, так і входними даними.*

*Ключові слова: штучний інтелект, комбінаторна конфігурація, комбінаторна оптимізація, цільова функція, розпізнавання та синтез мовленнєвих сигналів, клінічна діагностика.*

**Н.К. ТИМОФЕЕВА**  
Международный научно-учебный центр  
информационных технологий и систем НАН и МОН Украины

## **ТЕОРИЯ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ЗАДАЧИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

*Многие задачи искусственного интеллекта моделируются с использованием теории комбинаторной оптимизации. Это связано с тем, что подавляющая их часть при нахождении оптимального решения требует перебора вариантов. Переборным же задачам свойственна комбинаторная природа. Для задач распознавания и сегментации речевого сигнала, клинической диагностики приведены математические модели, построенные в рамках теории комбинаторной оптимизации. Показано, что в задачах этого класса комбинаторные конфигурации могут быть как аргументом целевой функции, так и входными данными.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект, комбинаторная конфигурация, комбинаторная оптимизация, целевая функция, распознавание и синтез речевых сигналов, клиническая диагностика.*

**N.K. TIMOFEEVA**  
International Scientific Training Centre  
for Information Technologies and Systems

## **COMBINATORIAL OPTIMIZATION THEORY AND PROBLEM OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

*The problems of artificial intelligence are complex in nature and not always subject to formalization. But many of the applications of this class are reduced to combinatorial optimization problems. This is due to the fact that their predominant part in finding an optimal solution requires the parsing of options. The parsing problems is characteristic of combinatorial nature. This property can be investigated by simulating the specified problems*

*in the framework of the theory of combinatorial optimization. For their modeling it is necessary to determine the type of these problems (static or dynamic), to determine the argument of the objective function (combinatorial configuration), to modeling the objective function. As the system analysis shows, combinatorial configurations in problems of this class can be both an argument of the objective function and input data. Also, the development of intelligent systems requires the formalization of human natural intelligence, that is, it is necessary to describe the processes of natural thinking and answer the question: can it be simulated. The article gives a classification of natural intelligence, which is developed taking into account the situation of uncertainty. To this end, certain types of uncertainties that arise in solving applied problems of artificial intelligence are considered.*

*The construction of mathematical models of problems of artificial intelligence using the theory of combinatorial optimization is shown on the example of recognition and segmentation of speech signals and clinical diagnostics. It is stated that they are divided into subproblems, which are solved by independent algorithms in the iterative mode. Such a computational scheme is characteristic of hybrid algorithms. By the argument of the objective function the problems of speech recognition and clinical diagnosis – similar to each other.*

*The use of combinatorial optimization theory for modeling the problems of artificial intelligence allows us to establish their combinatorial nature, to formulate the objective function explicitly, to identify the characteristic features that determine the similarity of these problems. The conducted researches allow to reveal the reason of uncertainty of various kinds that arises in the process of their solution, and to explain the nature of the fuzziness of the input data.*

*Keywords: artificial intelligence, combinatorial configuration, combinatorial optimization, objective function, recognition and synthesis of speech signals, clinical diagnostics.*

### **Постановка проблеми**

Задачі штучного інтелекту складні за своєю природою та не завжди піддаються формалізації. Моделювання задач різних класів як з комбінаторної оптимізації так і штучного інтелекту полягає в побудові такої моделі, яка адекватно описує поставлену задачу, виявляє характерні її властивості та допомагає розробляти для їхнього розв'язання ефективні методи та алгоритми.

Як показують дослідження прикладних задач із штучного інтелекту переважна їхня частина при знаходженні оптимального розв'язку потребує перебору варіантів. Перебірним же задачам властива комбінаторна природа. Тому задачі цього класу зводяться до задач комбінаторної оптимізації.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій за темою**

До штучного інтелекту, як правило, відносять задачі, пов'язані з розпізнаванням образів [1], звукових (мовленнєвих) сигналів [2], медициною тощо [3, 4]. Для моделювання задач цього класу використовують стохастичні, логіко-лінгвістичні методи, моделі Маркова, лінійне цілочислове програмування, теорію розпізнавання образів. Швидкий метод розповсюдження обмежень досить інтенсивно використовується при розв'язанні оговорених задач [5]. Але відомі методи моделювання не завжди пояснюють природу цих задач, не дозволяють сформулювати цільову функцію в явному вигляді. В задачах штучного інтелекту при прийнятті оптимального рішення досить часто використовуються методи, які класифікують як евристичні [6]. Під евристичними алгоритмами, як правило, розуміють способи прийняття рішень подібні до того, як це робить людина, та побудовані на інтуїтивних міркуваннях, що спираються на попередній досвід. До них відносять підходи, які складно формалізувати та неможливо довести їхню точність. Використання

евристичних алгоритмів дуже поширене в задачах розпізнавання різної природи. Для багатьох практичних проблем ці алгоритми чи не єдино можливий шлях для отримання задовільного рішення в реальному часі. Іноді такий алгоритм може бути точним, тобто він знаходить дійсно найкраще рішення, але його називають евристичним із-за неможливості довести їхню точність. Ці методи ефективні за швидкістю, але досить часто результат, одержаний за їхньою допомогою, далекий від оптимального.

Відомі методи моделювання не завжди пояснюють перебірну природу задач штучного інтелекту. При моделюванні цільової функції за її аргумент, як правило, приймають вхідні дані. Детальний аналіз задач цього класу показує, що аргументом цільової функції в них є комбінаторні конфігурації різних типів. Як показує системний аналіз, в оговорених задачах комбінаторні конфігурації можуть бути як аргументом цільової функції так і вхідними даними. Використання теорії комбінаторної оптимізації дозволяє встановити їхню комбінаторну природу, сформулювати цільову функцію в явному вигляді, виявити характерні ознаки, за якими встановлюється подібність задач як комбінаторної оптимізації так і штучного інтелекту.

#### **Мета дослідження**

Для розв'язання поставленої задачі проводиться аналіз прикладної задачі із штучного інтелекту та її моделювання з використанням теорії комбінаторної оптимізації. З цією метою необхідно визначити її вид (статична чи динамічна), визначити аргумент цільової функції (комбінаторну конфігурацію), змодельовати цільову функцію. На основі побудованої математичної моделі визначаються підходи для розв'язання цієї задачі, тобто використовуються відомі методи або розробляються нові алгоритми.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

##### **Невизначеність у штучному інтелекті**

Прийняття рішень у прикладних задачах, зокрема і в штучному інтелекті, проводиться в умовах невизначеності різного виду. Тобто, розв'язання задач з її врахуванням є загальним випадком, а прийняття рішень без її врахування – частковим випадком. Як і в задачах комбінаторної оптимізації так і в задачах штучного інтелекту невизначеність пов'язана [7]:

I) з неоднозначністю результату, одержаного за змодельованою цільовою функцією або вибраною мірою подібності у разі нечіткої вхідної інформації, який не задовольняє меті дослідження;

II) з вибором способу оцінки точності роботи певного алгоритму;

III) з особливою структурою множини комбінаторних конфігурацій, що є аргументом цільової функції;

IV) з неповною вхідною та поточною інформацією;

V) з нечітко розробленими правилами обробки та оцінки інформації;

VI) з неоднозначністю при виборі оптимального розв'язку за кількома критеріями в багатокритеріальній оптимізації.

Таким чином, однією із задач штучному інтелекту є вирішення ситуації невизначеності. При розв'язанні значної частини задач різних класів основна увага приділяється невизначеності, що пов'язана з неповною вхідною та поточною інформацією, а також з нечіткими вхідними даними. В даному разі вирішення цієї проблеми проводять шляхом аналізу поведінки системи за певний проміжок часу. На основі отриманого аналізу встановлюється закономірність, яка враховується при прогнозуванні майбутніх результатів на поточному відліку часу. Якщо вхідну інформацію можна задати часовими послідовностями і для неї визначити фрактальну розмірність, то використовують фрактальний аналіз зокрема метод нормованого розмаху (метод R/S) [8]. Також одним із способів вирішення цієї ситуації є розроблення

самоналагоджувальних алгоритмів генерування параметрів, які необхідно задавати як вхідні дані для розв'язання чергової задачі і які неможливо задати на початку обчислювального процесу [9]. Це дозволяє в процесі розв'язання певної задачі автоматично генерувати додаткову поточну інформацію з урахуванням прогнозу майбутніх результатів.

### Класифікація природного інтелекту.

Для розроблення інтелектуальних систем необхідно визначити, що таке природний інтелект людини, тобто описати процеси природного мислення та відповісти на запитання: чи можна його змоделювати? Як відомо, під інтелектом розуміють здатність пізнавати навколишній світ та вирішувати різноманітні проблеми. Як синонім користуємося поняттям розум, яке виражає здатність мислити: аналізувати й робити висновки.

В залежності від виду невизначеності наведемо класифікацію природного інтелекту. Вважатимемо, що з поняттям інтелекту пов'язані такі операції як обробка та оцінка інформації. Виходячи з цього, інтелект людини умовно розділимо на такі рівні [10]:

*I рівень.* Людина виконує правила, які чітко сформульовано і описано в книгах та підручниках або передаються від учителів без аналізу на їхню точність. Назвемо їх *правилами навчання*. На сьогоднішній день існує багато програм та пристроїв-роботів, які працюють за чітко розробленими правилами. Якщо не враховувати емоції, що характерні для вищих живих організмів, то інтелект I-го рівня на сучасному рівні частково реалізовано.

*II рівень.* В процесі життєдіяльності індивідуум аналізує інформацію на точність та розробляє свої правила поведінки за різних умов, які ґрунтуються на попередньому власному досвіді. Ці правила можуть бути і неточними. Назвемо їх *правилами самонавчання*. Інтелект II рівня завдяки самоналагоджувальним алгоритмам частково можна реалізувати.

*III рівень.* Здатність до незалежного від існуючих правил аналізу, обробки та оцінки інформації на точність, розроблення нових точних правил поведінки в умовах невизначеності, які максимально ураховують прогноз майбутніх результатів. Прийняття рішення в умовах невизначеності на рівні інтуїції за правилами, які складно формалізувати. Вважаємо, що інтуїція – точні правила мислення, які на сьогоднішній день неформалізовані та які закладено на генетичному рівні. Таким особливим мисленням володіє обмежена категорія людей. Назвемо ці правила правилами інтуїції.

Інтелект III рівня реалізувати досить складно, хоча вважають, що цей рівень є справжнім інтелектом.

### Загальна математична постановка задачі комбінаторної оптимізації.

Сформулюємо загальну математичну постановку задачі комбінаторної оптимізації [11]. Задачі цього класу, як правило, задаються однією або кількома множинами, наприклад  $A$  та  $B$ , елементи яких мають будь-яку природу. Назвемо ці множини *базовими*. Наявні два типи задач. В *першому* типі кожну з цих множин подамо у вигляді графа, вершинами якого є її елементи, а кожному ребру поставлено у відповідність число  $c_{it} \in R$ , яке називають вагою ребра ( $R$  – множина дійсних чисел);  $l \in \{1, \dots, n\}$ ,  $t \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$ ,  $n$  – кількість елементів множини  $A$ ,  $\tilde{n}$  – кількість елементів множини  $B$ . Покладемо, що  $n = \tilde{n}$ . Між елементами цих множин існують зв'язки, числове значення яких назвемо вагами. Величини  $c_{it}$  назвемо *вхідними* даними та задамо їх матрицями. В *другому* типі задач між елементами заданої множини зв'язків не існує, а вагами є числа  $v_j \in R$ ,  $j \in \{1, \dots, n\}$ , яким у відповідність поставлено деякі властивості цих елементів, числові значення яких задаються скінченними

послідовностями, що також є вхідними даними. Ці величини визначають значення цільової функції.

Для обох типів задач із елементів однієї або кількох із заданих множин, наприклад  $a_l \in A$ ,  $l \in \{1, \dots, n\}$ , утворюється комбінаторна множина  $W$  – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, вибірки різних типів, розбиття тощо). На елементах  $w$  комбінаторної множини  $W$  уводиться цільова функція  $F(w)$ . Необхідно знайти елемент  $w^*$  множини  $W$ , для якого  $F(w)$  набуває екстремального значення при виконанні заданих обмежень, тобто функціонал  $F(w^*) = \underset{w \in W^0 \subset W}{glob \ extr} F(w)$ , де  $\extr = \{\min, \max\}$ ,  $W^0$  – підмножина, яка визначається обмеженнями задачі.

Змоделюємо вхідні дані задачі комбінаторної оптимізації першого типу скінченними послідовностями. Подамо елементи  $h$  наддіагоналей симетричної комбінаторної матриці  $Q(w^k)$  комбінаторною функцією  $\beta(f(j), w^k)|_1^m = (\beta_1(f(1), w^k), \dots, \beta_m(f(m), w^k))$ , а елементи  $h$  наддіагоналей симетричної матриці  $C$  – функцією натурального аргументу  $\varphi(j)|_1^m = (\varphi(1), \dots, \varphi(m))$ , де  $m = \frac{n(n-1)}{2}$  – кількість елементів  $h$  наддіагоналей матриць  $C$  та  $Q(w^k)$ ,  $h = \overline{1, n-1}$ . Верхній індекс  $k$  ( $k \in \{1, \dots, q\}$ ) в  $w^k$  – порядковий номер  $w^k$  в  $W$ ,  $q$  – кількість  $w^k$  у  $W$ . Якщо матриці  $Q(w^k)$  та  $C$  – несиметричні, то  $\beta(f(j), w^k)|_1^m$  та  $\varphi(j)|_1^m$  містять усі їхні елементи, а  $m=n^2$  (або  $m = n \tilde{n}$ ). Функція цілі  $F(w^k)$  набуде вигляду

$$F(w^k) = \sum_{j=1}^m \beta_j(f(j), w^k) \varphi(j). \quad (1)$$

Вираз (1) дозволяє на множині перестановок та підмножині ізоморфних комбінаторних конфігурацій знаходити розв'язок задачі в явному вигляді.

### Комбінаторні конфігурації

Комбінаторною конфігурацією назовемо будь-яку сукупність елементів, яка утворюється з усіх або з деяких елементів заданої множини  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  [11]. Позначимо її упорядкованою множиною  $w^k = (w_1^k, \dots, w_{\eta^k}^k)$ . Множину  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  назовемо базовою. Під символом  $w_l^k \in A$  розуміємо як окремі елементи, так і підмножини (блоки),  $\eta^k \in \{1, \dots, n\}$  – кількість елементів у  $w^k \in W$ . Залежно від умови задачі  $\eta$  позначатимемо без індексу або з верхнім індексом  $\eta^k$ . Дві нетотожні комбінаторні конфігурації  $w^k$  та  $w^i$  назовемо ізоморфними, якщо  $\eta^k = \eta^i$ .

В прикладних задачах штучного інтелекту аргументом цільової функції виступають різні типи вибірок. З поняттям вибірки пов'язують як саму операцію виділення підмножин заданої множини, так і її результат: вибрану підмножину. В подальшому маємо на увазі друге поняття.

Нехай задано базову множину  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ . З неї одержимо  $\eta$ -вибірку. Число  $\eta$  називають об'ємом вибірки. В  $\eta$ -вибірках в залежності від умови задачі або ураховується порядок розташування в них елементів (тоді їх називають  $\eta$ -

перестановками або  $\eta$ -розміщеннями) або не ураховують. У цьому випадку вони називаються  $\eta$ -сполученнями.

Отже існують такі типи вибірок: упорядковані та неупорядковані. Неупорядковані це – сполучення без повторень і сполучення з повтореннями. Упорядковані це – розміщення з повтореннями і розміщення без повторень. Множина будь-якого типу вибірок складається з підмножин ізоморфних вибірок. Нижче показано, що в задачах розпізнавання та синтезу мовленнєвих сигналів, клінічній діагностиці аргументом цільової функції є сполучення без повторень та розміщення з повтореннями.

Закономірність зміни значень цільової функції в задачах комбінаторної оптимізації залежить від упорядкування комбінаторних конфігурацій (аргументу)  $w \in W$ . Розглянемо структуру їхньої множини  $W$ . Підмножину  $W_\eta \subset W$  назовемо підмножиною ізоморфних комбінаторних конфігурацій, якщо її елементи – ізоморфні комбінаторні конфігурації. Множина  $W$  складається з підмножин ізоморфних комбінаторних конфігурацій  $W_\eta$ . На підмножині  $W_\eta$  цільова функція змінюється так, як і на множині перестановок. Можна довести, що на множині перестановок і на підмножині ізоморфних комбінаторних конфігурацій при використанні цільової функції (1) ситуація невизначеності зводиться до мінімуму. Але на множині  $W$ , яка складається з підмножин  $W_\eta \subset W$ , для певного їхнього впорядкування закономірність зміни значень функції (1) однакова незалежно від вхідних даних, а результат розв'язку задачі – неоднозначний. Тобто, в цьому разі виникає ситуація невизначеності, пов'язана із структурою аргументу цільової функції. Оскільки в задачах штучного інтелекту множина комбінаторних конфігурацій упорядковується підмножинами  $W_\eta \subset W$ , то знаходження для них оптимального розв'язку за виразом (1) проводиться в умовах невизначеності, пов'язаною із структурою аргументу.

Прикладні задачі штучного інтелекту, в яких цільова функція залежить від кількох змінних, за цією ознакою розділяються на незалежні підзадачі, які належать різним класам. Для їхнього розв'язання розробляються алгоритми, які поєднують два чи більше методів та ґрунтуються на організації покрокових обчислень – ітераційного процесу, що породжує послідовність розв'язків у відповідності із вбудованими процедурами. Якщо вбудовані процедури – незалежні алгоритми, орієнтовані на розв'язання задач певних класів, то вони називаються гібридними. Розв'язок задачі визначається на множинах комбінаторних конфігурацій різних типів. В цьому разі суть гібридного алгоритму полягає у поєднанні таких методів для знаходження оптимального розв'язку, який був би дійсний для кожної із заданих комбінаторних множин.

В таких задачах штучного інтелекту як розпізнавання мовленнєвих сигналів та задача клінічної діагностики цільова функція залежить від кількох змінних, якими є різні типи комбінаторних конфігурацій. Тому для свого розв'язання вони потребують розроблення гібридних алгоритмів. До того ж за цією ознакою встановлюється подібність цих задач.

### **Розпізнавання мовленнєвих сигналів**

Задача розпізнавання мовленнєвих сигналів полягає у знаходженні для вхідного сигналу найбільш правдоподібного еталонного з усіх можливих еталонних сигналів [2]. Для розв'язання цієї задачі необхідно провести пошук певного еталону в бібліотеці та порівняти його із вхідним сигналом. При моделюванні цієї задачі аргументом цільової функції вважають вхідний сигнал [2]. Моделювання задачі розпізнавання мовленнєвих

сигналів показує, що аргумент цільової функції в ній є комбінаторні конфігурації різних типів.

Розглянемо задачу порівняння еталонного та вхідного сигналів. Уведемо дві базові множини  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  та  $B^i = \{b_1^i, \dots, b_{\tilde{n}}^i\}$ , де  $a_s \in A$  – значення сигналу у відліку  $s$ ,  $s = \overline{1, n}$ , а  $b_l^i \in B^i$  відповідає відліку еталонного сигналу,  $l \in \{1, \dots, \tilde{n}\}$ ,  $i \in \{1, \dots, \tilde{q}\}$ ,  $\tilde{q}$  – кількість еталонних сигналів. Вхідні дані, якими є ваги між елементами  $a_s \in A$  та  $b_l^i \in B^i$ , задамо несиметричною матрицею  $C = \|c_{sl}\|_{n \times \tilde{n}}$ , номери стовпців якої збігаються з нумерацією елементів  $a_s \in A$ , а номери рядків – з нумерацією елементів  $b_l^i \in B^i$ . Оскільки з кожної базової множини  $A$  та  $B^i$  вибираються по одному елементу в строгому порядку, то отримана комбінаторна конфігурація є розміщення без повторення. Позначимо її  $\mu^k \in M$ , де  $M$  – їхня всіляка множина. Для визначення елементів  $a_s \in A$  та  $b_l^i \in B^i$ , що вибираються з базових множин на  $k$ -му варіанті розв'язку задачі, уведемо комбінаторну (0,1)-матрицю  $Q(\mu^k) = \|g_{sl}(\mu^k)\|_{n \times \tilde{n}}$ . Якщо  $g_{sl}(\mu^k) = 1$ , то з множин  $A$  та  $B^i$  вибрана пара  $(a_s, b_l^i)$ , в іншому разі значення  $g_{sl}(\mu^k) = 0$ . Для запису цільової функції в явному вигляді змодельємо вхідні дані функціями натурального аргументу. Елементи матриці  $C$  подамо числовою функцією  $\varphi(j) |_{\tilde{n}}$ , а матриці  $Q(\mu^k)$  – комбінаторною  $\beta(f(j), \mu^k) |_{\tilde{n}}$ , де  $m = n \tilde{n}$ .

Задача порівняння еталонного та вхідного мовленнєвих сигналів полягає в знаходженні такого розміщення без повторень  $\mu^{k*}$ , для якого  $F(\mu^{k*}) = \max_{\mu^k \in M} \sum_{j=1}^m \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k)$ , де  $\sum_{j=1}^m \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k)$  – інтегральна міра подібності, а  $\varphi(j) = u_j(a_s, b_l^i)$  – елементарна міра подібності, яка визначає подібність між елементами еталонного та вхідного сигналів.

Розглянемо задачу пошуку в бібліотеці еталонного сигналу.

В цій підзадачі як ваги між еталонним та вхідним сигналами виступають величини інтегральних мір подібності  $F(\mu^{k*})$ , числове значення яких подамо матрицею  $C'$ . Номери стовпців цієї матриці збігаються з номерами еталонних сигналів, розміщених у бібліотеці. Рядок у ній один і відповідає номеру один вхідного сигналу  $A$ . Оскільки при порівнянні вхідного та еталонного сигналів із множин  $A$  та  $B$  вибираються два елементи, то утворена комбінаторна конфігурація є сполучення без повторення, яке позначимо як  $\mu'^k \in M'$ , де  $M'$  – їхня всіляка множина,  $B = (B_1^i, \dots, B_q^i)$  – множина еталонних сигналів. Уведемо комбінаторну (0,1)-матрицю  $Q(\mu'^k) = \|g_{il}(\mu'^k)\|_{1 \times q}$ . Якщо  $g_{il}(\mu'^k) = 1$ , то з множин  $A$  та  $B$  вибрана пара  $(A, B_l^i)$ , в іншому разі значення  $g_{il}(\mu'^k) = 0$ . Елементи матриці  $C'$  подамо числовою функцією  $\varphi'(j) |_{\tilde{n}-1}$ , а матриці  $Q(\mu'^k)$  – комбінаторною  $\beta'(f'(j), \mu'^k) |_{\tilde{n}-1}$ .

Задача пошуку еталонного сигналу, який відповідає вхідному, полягає у знаходженні такого сполучення без повторення  $\mu'^{k*}$ , для якого

$$F(\mu'^{k*}) = \max_{\mu'^k \in M'} \sum_{j=1}^{\tilde{n}-1} \varphi'(j) \beta'_j(f'(j), \mu'^k), \text{ де } \varphi'(j) = \sum_{j=1}^m \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k).$$

### Задача сегментації мовленнєвого сигналу

Для розв'язання задачі сегментації мовленнєвого сигналу розроблено багато методів та алгоритмів, що гуртуються на кореляційних підходах з використанням динамічного програмування, наприклад [2]. Але в багатьох підходах вона розв'язується і шляхом розпізнавання конфігурації вхідного сигналу. Проведемо сегментацію мовленнєвого сигналу на квазіперіодичні та неперіодичні ділянки, в якому розпізнається його конфігурація. Ця задача полягає у виділенні на заданому відрізку вхідного сигналу майже періодичних і неперіодичних ділянок, а в майже періодичних визначаються довжини поточного майже періоду. Для формулювання математичної постановки цієї задачі використаємо теорію комбінаторної оптимізації.

Відрізок сигналу, що досліджується, розіб'ємо на ділянки довжиною  $L \in \{L_{\min}, L_{\min} + \Delta, L_{\min} + 2\Delta, \dots, L_{\max}\}$  з наступним визначенням майже періодичності сусідніх ділянок;  $L_{\min}$  – мінімально можлива довжина майже періоду,  $L_{\max}$  – максимально можлива довжина майже періоду,  $\Delta$  – значення приросту майже періоду (визначається експериментально). Інтегральна міра подібності, яку використано для визначення майже періодичності двох сусідніх ділянок, сформулюється з урахуванням кількох критеріїв.

Нехай задано відрізок мовленнєвого сигналу  $L$ , який подамо у вигляді числової функції  $f(j) \Big|_1^m$ ,  $m$  – кількість її значень. Вважатимемо, що сусідні ділянки функції

$$f(j) \Big|_1^m \text{ майже періодичні, якщо міри подібності } p_l = \frac{\min(a_t - a_{t-1}, a_{t-1} - a_{t-2})}{\max(a_t - a_{t-1}, a_{t-1} - a_{t-2})} > \varepsilon,$$

$$d_l = \frac{\min(b_t - b_{t-1}, b_{t-1} - b_{t-2})}{\max(b_t - b_{t-1}, b_{t-1} - b_{t-2})} > \varepsilon, \quad \pi_l = |p_l - d_l| < \varepsilon', \quad \text{де } t \in \{3, \dots, m(\mu^k) + 1\}, \quad l \in \{1, \dots, m(\mu^k)\},$$

$p_l, d_l$  – елементарні міри подібності, які дозволяють визначати майже періодичність  $t$ -ї та  $(t+1)$ -ї ділянок;  $a_t$  – відлік, для якого значення функції  $f(a_t)$  на ділянці довжиною

$$\tilde{L} \text{ найбільше або } \|f(a_t) - f(x^*)\| < \varepsilon, \text{ якщо } \frac{\min(a_t - a_{t-1}, \tilde{L})}{\max(a_t - a_{t-1}, \tilde{L})} > \varepsilon, \quad x^* \text{ – відлік, для якого}$$

значення функції  $f(j)$  найбільше;  $b_t$  – відлік, для якого значення функції  $f(b_t)$  на цій же ділянці найменше або  $\|f(b_t) - f(b^*)\| < \varepsilon$ , якщо  $\frac{\min(b_t - b_{t-1}, \tilde{L})}{\max(b_t - b_{t-1}, \tilde{L})} > \varepsilon$ ,  $b^*$  – відлік, для

якого значення  $f(b^*)$  – найменше;  $\varepsilon, \varepsilon', \varepsilon''$  – коефіцієнти міри подібності, що визначаються експериментально;  $m(\mu^k)$  – кількість ділянок довжиною  $\tilde{L}$ , на які

розбивається функція  $f(j) \Big|_1^m$  на  $k$ -й ітерації. В процесі розв'язання задачі формується комбінаторна конфігурація  $\mu^k = (\mu_1^k, \dots, \mu_{\eta^k}^k)$  (аргумент цільової функції), яка відноситься

до розміщення без повторень, в якій урахується порядок елементів, причому  $\mu_\sigma^k < \mu_{\sigma+1}^k$ ,  $\eta^k \in \{1, \dots, m(\mu^k)\}$  – кількість елементів у  $\mu^k$ . Елемент  $\mu_\sigma^k \in \{1, \dots, m\}$  – відлік сигналу, що вказує на кінець  $\sigma$ -го або на початок  $(\sigma+1)$ -го майже періоду  $\sigma \in \{1, \dots, \eta^k - 1\}$ .

Задача сегментації мовленнєвого сигналу полягає у знаходженні такого аргументу цільової функції  $\mu^k$ , для якого змодельована цільова функція досягає оптимального значення при виконанні заданих умов. Оцінка та вибір оптимального варіанту розв'язку задачі з усіх можливих  $\mu^k$  проводиться за цільовою функцією, що ураховує кілька критеріїв.



### Задача синтезу мовленнєвих сигналів

Задача синтезу мовленнєвих сигналів полягає у їх відтворенні за заданим текстом. Як правило, для розв'язання цієї задачі створюється бібліотека фрагментів, утворених із природних мовленнєвих сигналів, або такі фрагменти створюються штучно [2]. Ця задача розв'язується об'єднанням майже періодів або ділянок сигналу, вибраних із бібліотеки, у фонему, що відповідають певним звукам (відповідно буквам заданого тексту) з використанням певних правил. Аргумент цільової функції в цій задачі відноситься до вибірок (розміщення з повтореннями). Множину бібліотечних елементів (фрагментів) позначимо  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , де  $a_j$  – елемент, що відповідає майже періоду або ділянці мовленнєвого сигналу. Подамо штучний сигнал заданого слова (речення) розміщенням з повтореннями  $\mu^k = (\mu_1^k, \dots, \mu_{\zeta^k}^k)$ , де  $\mu_t^k = (a_{j_1}, \dots, a_{j_{\zeta_t^k}})$  – фонема, а  $a_{j_l} \in A$  –  $j$ -й бібліотечний елемент фонему. Природний мовленнєвий сигнал заданого слова (речення) позначимо розміщенням з повтореннями  $\mu^* = (\mu_1^*, \dots, \mu_{\zeta^*}^*)$ , де  $\mu_s^* = (\mu_{s_1}^*, \dots, \mu_{s_{\zeta_s^*}}^*)$  – фонема, а  $\mu_{si}^*$  – її елемент.

Задача синтезу мовленнєвих сигналів полягає у знаходженні такого розміщення з повтореннями  $\mu^{k*} = (\mu_1^{k*}, \dots, \mu_{\eta}^{k*})$ , для якого одержаний штучний мовленнєвий сигнал відповідав би природному його звучанню, тобто цільова функція  $F(\mu^{k*}) = \max_{\mu^k \in M} \sum_{s=1}^{\eta^*} \sum_{j=1}^{\eta} \varphi(j) \beta_j(f(j), \mu^k)$ , де  $\varphi(j) = \sum_{i=1}^{q''} g_j(a_{ji}, \mu_{si}^*)$  – інтегральна міра подібності, а  $g_j(a_{ji}, \mu_{si}^*)$  – елементарна міра подібності, яка визначає подібність між штучними фонемами  $\mu_t^k = (a_{j_1}, \dots, a_{j_{\zeta_t^k}})$ , утвореними з елементів  $a_j \in A$ , та природними  $\mu_s^* = (\mu_{s_1}^*, \dots, \mu_{s_{\zeta_s^*}}^*)$  заданого природного сигналу,  $q'' = \min(\zeta_t, \zeta_s^*)$ . Значення  $\beta_j(f(j), \mu^k) = 1$ , якщо фонема  $\mu_t^k$  утворена з елемента  $a_j \in A$ , та  $\beta_j(f(j), \mu^k) = 0$  в іншому випадку.

Грамаітичні правила у синтезі мовленнєвих сигналів можна розглядати як міри подібності. Оскільки вони розроблені ґрунтовно, то при відсутності умови відтворення індивідуальності голосу ця задача є розв'язною. Жіночий, чоловічий або дитячий голос залежить від частоти основного тону, амплітуди сигналу, тому ця задача є також розв'язною. Відтворення індивідуального мовлення залежить від набагато складніших чинників: від мовленнєвого тракту індивідууму, від його емоційного стану, від особливості його психіки тощо. Оскільки ці параметри змодельовати досить складно, то поставлена задача не є розв'язною. Існуючі синтезатори характеризуються досить високою натуральністю звучання, але не відтворюють особливості мовлення індивідууму. Ряд експериментів, проведених за допомогою розробленого комплексу програм синтезу мовленнєвих сигналів із фрагментів природної мови показав, що індивідуальність мовлення зберігається у майже періоді, що відповідає періоду основного тону  $f_t$ , та дифонах  $\tilde{f}_k$ , виділених з природного сигналу. Але, якщо згенерувати сигнал із природних майже періодів так, що значення їхніх амплітуд  $A_i$  та довжин  $D_i$  (в дискретах) – однакові для усіх майже періодів, то голос звучить одноманітно, з металевим відтінком без будь-яких емоцій. Для природного звучання із збереженням індивідуальності мовлення та емоційності необхідно, крім наявності природних майже періодів та дифонів, точно відтворити характерні параметри індивідууму: значення амплітуди сигналу, довжину майже періоду (на початку, посередині, в кінці сигналу, під наголосом), мінімальну кількість майже періодів  $K$ ,

при яких відтворюється певна фонема тощо. Експеримент показав, що навіть при виконанні оговорених вище умов, згенерований штучний мовленнєвий сигнал набуває індивідуального звучання. Отже, відтворення індивідуального мовлення характеризується такими параметрами:  $\Psi = \langle A_t, D_t, K, f_t, \tilde{f}_k \rangle$ .

### **Задача клінічної діагностики**

Побудуємо математичну модель задачі клінічної діагностики як задачу комбінаторної оптимізації [12]. Позначимо  $\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_{n^*}\}$  множини захворювань, описання яких знаходиться в бібліотеці (множина еталонів), де елемент  $\tilde{a}_s \in \tilde{A}$ ,  $s \in \{1, \dots, n^*\}$ , відповідає певному захворюванню, якому поставлено у відповідність характерні ознаки  $V^{(t)} = (v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_{q_t}^{(t)})$ ,  $q_t$  – кількість ознак  $t$ -го захворювання. Вхідною інформацією в задачі клінічної діагностики є множина ознак  $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{\tilde{q}})$ , що описує одне або кілька захворювань. Позначимо їх  $\tilde{B} = \{\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_{n^{**}}\}$ , де  $\tilde{b}_d \in \tilde{B}$  – захворювання, яке потрібно визначити,  $n^{**}$  – кількість можливих захворювань, а  $q_t \neq \tilde{q}$  або  $q_t = \tilde{q}$ . Ознаки  $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$  вхідної інформації мають той же зміст, що і описані в еталоні ознаки  $v_l^{(t)} \in V^{(t)}$ ,  $r \in \{1, \dots, \tilde{q}\}$ ,  $l \in \{1, \dots, q_t\}$ .

Задача полягає у знаходженні для  $\tilde{B}$  із множиною ознак  $\tilde{V}$  найбільш правдоподібного одного або кількох еталонів із множини  $\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_{n^*}\}$ , тобто за вхідними ознаками встановлюється одне або кілька захворювань  $\tilde{b}_d \in \tilde{B}$ . Ознаки в цій задачі відіграють роль критеріїв, за якими оцінюється її розв'язок.

Як і в розпізнаванні мовленнєвих сигналів, для розв'язання цієї задачі необхідно провести пошук певного еталону в бібліотеці і порівняти його із вхідними ознаками. Аргумент цільової функції в обох задачах є різні типи вибірок. За цією ознакою встановлюється їхня подібність.

### **Висновки**

Моделювання задач із штучного інтелекту в рамках теорії комбінаторної оптимізації дозволяє виявити їхню комбінаторну природу, визначити аргумент цільової функції, яким є комбінаторні конфігурації різних типів. Ці дослідження виявляють причину невизначеності різних видів, яка виникає в процесі їхнього розв'язання, та пояснити природу нечіткості вхідних даних. Показано, що в задачах цього класу комбінаторні конфігурації можуть бути як аргументом цільової функції так і вхідними даними. За аргументом цільової функції вони розділяються на підзадачі, для розв'язання яких необхідно розробляти гібридні алгоритми. На прикладі задачі розпізнавання мовленнєвих сигналів та задачі клінічної діагностики описано спосіб визначення певних ознак, за якими встановлюється подібність задач з обчислювального інтелекту.

### **Список використаної літератури**

1. Шлезингер М. И., Главач В. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию. Киев: Наукова думка, 2004. 546 с.
2. Винцюк Т. К. Анализ, распознавание и интерпретация речевых сигналов. Киев: Наукова думка, 1987. 262 с.
3. Петрухін В. О. Математичні моделі, алгоритми і системи збору, обробки та інтерпретації медичної інформації: автореф. дис ... д-ра техн. наук. Киев, 2005. 36 с.

4. Файнзильберг Л. С. Математические методы оценки полезности диагностических признаков. Киев: Освіта України, 2010. 152 с.
5. Кветний Р. Н., Бісікало О. В., Назаров І. О. Визначення сенсу текстової інформації на основі моделі розповсюдження обмежень. *Інформаційно-вимірjuвальні та обчислювальні системи і комплекси в технологічних процесах*. 2012. №1. С. 93-96.
6. Ивахненко А. Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Киев: Техніка, 1971. 392 с.
7. Тимофієва Н. К. Про розв'язання задач комбінаторної оптимізації в умовах невизначеності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 6. С. 157-162.
8. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: приложение теории хаоса в инвестициях и экономике. Москва: Интернет-трейдинг, 2004. 304 с.
9. Тимофієва Н. К. Самоналагоджувальні алгоритми знаходження невизначених параметрів у задачах комбінаторної оптимізації. *УСiМ*. 2009. № 4. С. 43-50.
10. Тимофієва Н. К. Один спосіб моделювання інтелекту людини з використанням комбінаторного аналізу. *Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту. Присвячена пам'яті професора Рогальського Ф.Б. (ISDMCI'2014): матеріали X Міжнародної наукової конференції (Залізний Порт, 1923 травня 2014 р.)*. Херсон, 2014. С. 180-182.
11. Тимофієва Н. К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації: автореф. дис... д-ра. техн. наук. Київ, 2007. 32 с.
12. Тимофієва Н. К. Моделювання цільової функції в задачі клінічної діагностики на основі теорії комбінаторної оптимізації. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2009): матеріали V Міжнародної наукової конференції (Євпаторія, 18-22 травня 2009 р.)*. Т.1. Херсон, 2009. С. 219-223.

#### **References**

1. Shlezinger, M.I., & Glavach V. (2004) Desyat leksiyy po statisticheskomu i strukturnomu raspoznavaniyu. Kiev: Nauk. dumka.
2. Vintsyuk, T.K. (1987) Analiz, raspoznavanie i interpretatsiya rechevyih signalov. Kiev: Nauk. dumka.
3. Petruhin V.O. (2005) Matematychni modeli, alhorytmy i systemy zboru, obrobky ta interpretatsii medychnoi informatsii (Extended abstract of Doctor's thesis), Kyiv: In-t kibernetiky im. V.M. Hlushkova NAN Ukrainy.
4. Faiynzilberg, L.S. (2010) Matematicheskie metody otsenki poleznosti diagnosticheskikh priznakov. Kiev: Osvita Ukrainyi.
5. Kvietnyi, R.N., Bisikalo, O.V., & Nazarov, I.O. (2012) Vyznachennia sensu tekstovoi informatsii na osnovi modeli rozpovsiudzhennia obmezhen. *Informatsiino-vymiriuvalni ta obchysliuvalni systemy i komplekxy v tekhnolohichnykh protsesakh*. **1**, 93-96.
6. Ivahnenko, A.G. (1971) Sistemyi evristicheskoy samoorganizatsii v tehnicheskoy kibernetike. Kiev: Tehnika.
7. Tymofiieva, N.K. (2012) Pro rozv'iazannia zadach kombinatornoii optymizatsii v umovakh nevyznachenosti. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. **6**, 157-162.
8. Peters, E. (2004) Fraktalnyiy analiz finansovyih ryinkov: prilozhenie teorii haosa v investitsiyah i eknomike. M.: Internet-treyding.
9. Tymofiieva, N.K. (2009) Samonalahodzhivalni alhorytmy znakhodzhennia nevyznachenykh parametriv u zadachakh kombinatornoii optymizatsii. *Control Systems and Computers*. **4**, 43-50.

10. Tymofiieva, N. K. (2014) Odyn sposib modeliuvannia intelektu liudyny z vykorystanniam kombinatornoho analiz. Proceedings of the *Intelektualni systemy pryiniattia rishen ta problemy obchysliuvalnoho intelektu. Prysviachena pamiaty profesora Rohalskoho F.B. (ISDMCF 2014)*. (Ukraine, Zaliznyi Port, May 28-31, 2014), Kherson, pp. 180-182
11. Tymofiieva, N. K. (2007) Teoretyko-chyslovi metody rozviazannia zadach kombinatornoi optymizatsii. (Extended abstract of Doctor's thesis), Kyiv: In-t kibernetiky im. V.M. Hlushkova NAN Ukrainy.
12. Tymofiieva, N. K. (2009) Modeliuvannia tsilovoi funktsii v zadachi klinichnoi diahnozyky na osnovi teorii kombinatornoi optymizatsii. Proceedings of the *Intelektualni systemy pryiniattia rishen ta problemy obchysliuvalnoho intelektu. (ISDMCF 2009)*. (Ukraine, Yevpatoia, May 18-22, 2009), Kherson, pp. 219-223.