

УДК 519.68: 159.955; 519.8; 510.5

КАРДИНАЛЬНЕ ЗМЕНШЕННЯ ПЕРЕБОРУ В ЗАДАЧІ ВИБОРУ

Ю.Л. Шередеко

*Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, Київ, пр-т Академіка Глушкова, 40
semant@i.ua*

Описана гранично невизначена задача дослідницького проектування нових систем та запропоновано алгоритм індуктивного моделювання для її вирішення, що кардинально спрощує складність пошуку.

Ключові слова: складність перебору альтернатив, невизначеність вибору, дослідницьке проектування, оптимізаційна задача.

The extremely uncertain problem of research design of new systems is described and the algorithm of inductive modeling for its decision is proposed that cardinally simplifies complexity of search.

Keywords: the complexity of the search for alternatives, uncertainty of choice, research design, the optimization problem.

Описана предельно неопределенная задача исследовательского проектирования новых систем и предложен алгоритм индуктивного моделирования её решения, что кардинально упрощает сложность поиска.

Ключевые слова: сложность перебора альтернатив, неопределенность выбора, исследовательское проектирование, оптимизационная задача.

Вступ

З розвитком обчислювальної техніки перебірні методи вирішення задач ставали все більш популярними. До перебору навіть почали ставитись як до найбільш універсального алгоритму. І дійсно, - серед результатів повного перебору завжди можна знайти глобальний екстремум за котримсь із критеріїв, або прийнятний компроміс у багатокритеріальній задачі. Очевидно, що повний перебір не завжди можливий, оскільки невелике збільшення складності переборної задачі (приміром, врахування одного додаткового параметру) суттєво (на порядок) збільшує об'єм обчислень та, відповідно, затрати часу та/або обчислювальних потужностей. Тому на практиці часто штучно спрощують цю задачу або використовують методи часткового перебору, які завжди певною мірою евристичні і не дають гарантій знаходження бажаного результату. Сучасні дослідники покладають великі надії на те, що прихід ери квантових обчислень значно розширить горизонти допустимої складності задач перебору. Але основна проблема в іншому: навіть отриманий результат повного

Індуктивне моделювання складних систем, випуск 11, 2019

перебору знімає далеко не всю невизначеність вибору. Далі буде показано як сама постановка задачі вибору може значно спростити складність перебору та як засоби індуктивного моделювання можуть допомагати робити обґрунтований вибір навіть у гранично невизначених задачах дослідницького проектування нових систем.

1. Вибір і перебір

Для ясного сприйняття викладеного далі матеріалу необхідно чітко розуміння чим відрізняються перебір і вибір. Попри те, що зазвичай ці процеси дуже близькі, або навіть неподільні, самі поняття не є тотожними. Задачі вибору і перебору мають різні *умови* (необхідну вхідну інформацію – те, що має бути відомо до початку), різну *мету* (яка невизначеність усувається в результаті рішення відповідної задачі та в якому вигляді має бути поданий цей результат) і, зрештою, різні *методи* їх вирішення (послідовність інформаційних операцій та правила процедури їх проведення).

1.1. Задача *перебору* є *формально визначеною задачею*, тому до початку перебору в її умовах має бути задана:

1) множина R з n альтернативних варіантів $r_i \in R$, де $n \geq 1$ (ця множина може бути задана або в явному вигляді, наприклад, простим перерахунком її елементів (списком, масивом), або неявно, - алгоритмом послідовної *генерації* елементів цієї множини);

2) інструменти оцінювання (алгоритми прямих чи опосередкованих вимірювань, або хоча би шкали) альтернативних варіантів за встановленою множиною параметрів - *інтерпретація*;

3) правила віднесення оцінених варіантів до підмножин (≥ 2) за результатами їх інтерпретації – *сортування*.

Слід зауважити, що кількість підмножин (*алфавіт класів*, на які сортуються n альтернативних варіантів з множини R) може бути набагато більше, ніж елементів множини альтернатив. Визначається алфавіт класів встановленою множиною параметрів та вибраними шкалами вимірювання кожного з них, кількість класів в алфавіті дорівнює добутку кількості неподільних інтервалів діапазону вимірювання кожної зі шкал.

Загалом процес перебору виглядає так (див. Рисунок 1):

Процедура перебору завжди полягає в послідовному індивідуальному вимірюванні-оцінюванні-інтерпретації альтернативних варіантів початкової множини R за *кожним* з параметрів, а у випадку повного перебору - *кожного* з n її елементів (r_i -х). Найбільш поширеною формалізацією перебірних задач є зведення їх до однієї з відомих однокритеріальних задач комбінаторної (дискретної) оптимізації як пошуку шляхів (розміток) на графі.



Рисунок 1. Узагальнений алгоритм перебору

У загальному випадку кількість альтернативних варіантів у подібних задачах легко може досягати астрономічних значень бо пропорційна добутку кількості дуг при вершинах. Багато досліджень присвячено пошуку можливостей скорочення перебору в цих задачах, зокрема, шляхом знаходження особливих випадків, у яких ці задачі можуть вирішуватись аналітично. Однак, задачі перебору не вичерпуються дискретною оптимізацією за одним критерієм, адже багатокритеріальні задачі прийняття рішень теж можуть вирішуватись перебором варіантів. Оскільки шуканим рішенням будь-якої задачі перебору є рознесення елементів початкової множини альтернативних варіантів (r_i -х) за результатами їх оцінювання-інтерпретації по встановленим правилам до різних підмножин, яких завжди не менше двох і може бути значно більше n , то перебір є класифікаційною (вимірально-сортувальною) задачею.

1.2. На відміну від перебору, вибір має сенс лише при наявності певної невизначеності, наприклад, має бути хоча б дві альтернативи, хоча би два критерії їх оцінки та ситуація неоднозначності в оцінках альтернатив. Зазначимо, що у виборі альтернатив завжди строго більше однієї (навіть при неявній множині альтернатив), інакше вибір вироджений (без варіантів); критерій може бути і один, але невизначеність має бути присутня в оцінках різних експертів чи перевагах різних суб'єктів у груповому виборі, або в тому, що в різних умовах певні варіанти рішень мають свої переваги над іншими, а які будуть умови наперед не відомо. Невизначеність вибору існує ще і в площині цінності альтернатив, а зняти її може лише суб'єкт (особа чи колектив, що приймає рішення) та лише стосовно конкретної ситуації.

Якщо суб'єкту вдалось прийняти рішення щодо невизначеності цінності альтернатив та/або формально подати свою систему переваг у даній задачі вибору, то подальший вибір зводиться до формальних алгоритмів, зокрема, можливо, і до перебору. Часто перебір використовується суб'єктом і для того,

щоб визначитися з перевагами, але при цьому, окрім власне перебору, суб'єкт ще і порівнює цінність різних значень параметрів альтернатив, тобто і в даному разі перебір теж виступає лише допоміжним інструментом вибору. Отже, в загальному випадку перебір і вибір можуть не тільки співпадати, але й може бути як перебір без вибору, так і вибір без перебору. Якщо відбувається суто формальне сортування і не усувається невизначеність, то це перебір без вибору, а якщо в задачі усувається невизначеність без використання сортування, - то це вибір без перебору. Прикладом першого може бути впорядкування елементів відомої множини за алфавітом, чи за величиною котрогось із параметрів, а прикладом другого є випадковий вибір будь-якого елемента з абсолютно невизначеної множини при невизначених критеріях.

Можливими відповідями в задачі вибору можуть бути наступні:

- множина Парето (недомінованих);
- множина допустимих за обмеженнями;
- глобальний екстремум за згорткою критеріїв;
- ранжована множина за згорткою критеріїв;
- *множина варіантів з найвищої поверхні байдужості (рівноцінних);*
- *ранжована множина екстремумів.*

Перші чотири з названих можливих відповідей часто зустрічаються в літературі з прийняття рішень, а дві останні не зустрічаються, хоча й не є комбінаціями попередніх та мають перед ними дуже суттєві переваги у багатьох практичних задачах вибору (наприклад, необхідність знаходження останнього варіанту можливої відповіді обґрунтована в [1]).

Зазначимо, що *перебір* теж може застосовуватись для отримання кожної з перерахованих відповідей, але *специфіка задачі вибору* в жодному зі вказаних випадків не вичерпується суто сортувальною задачею, бо вимагає визначитися з умовами і процедурами застосування перебору. В розгорнутому вигляді вибір означає цикл прийняття рішень, який містить в собі послідовність етапів, на кожному з яких долається певна невизначеність.

1.3. *Процес прийняття рішень* (зазвичай він відображується у матриці прийняття рішень – див. таблицю 1) обов'язково містить в собі послідовність актів *вибору*: вибір мети, вибір та/або конструювання множини альтернатив R , вибір множини критеріїв (та/або експертів, умов) K , вибір ваг k_j -х критеріїв (та/або довіри до експертів, ймовірності умов), вибір шкал оцінювання та методу нормування оцінок за кожним k_j -м критерієм, вибір алгоритму оцінювання r_i -х альтернатив, вибір оцінок r_i -х альтернатив по кожному з k_j -х критеріїв, вибір оціночної функції (тобто алгоритму отримання результуючої оцінки кожної альтернативи $f(q_i)$ та правила $F(f(q_i))$ порівняння цих оцінок) і, зрештою, виду бажаної відповіді. Варто звернути увагу, що процес прийняття рішень *може не містити перебору на жодній зі своїх стадій* [2].

Таблиця 1. Матриця прийняття рішень

Варіанти рішень $r_i \in R$	Оцінки q_i по $k_j \in K$						Функція вибору $F(f(q_i))$
	$k_1 * v_{k1}$	$k_2 * v_{k2}$...	$k_j * v_{kj}$...	$k_m * v_{km}$	
r_1	q_{11}	q_{12}	...	q_{1j}	...	q_{1m}	$f(q_1)$
r_2	q_{21}	q_{22}	...	q_{2j}	...	q_{2m}	$f(q_2)$
...
r_i	q_{i1}	q_{i2}	...	q_{ij}	...	q_{im}	$f(q_i)$
...
r_n	q_{n1}	q_{n2}	...	q_{nj}	...	q_{nm}	$f(q_n)$

де k_j – критерії/експерти/умови,

а v_{kj} – вага/довіра/ймовірність (відповідно)

1.4. В [3] було вказано на визначальну роль суб'єкта в подоланні трьох аспектів *невизначеності вибору*: ефекторний (альтернативи методів впливу), ціннісно-критеріальний (доцільність), причинно-наслідковий (модель процесу). В даному контексті можемо їх конкретизувати, це:

- 1) те, що існує чи може існувати (альтернативи),
- 2) уявний образ бажаного результату (мета, виражена через критерії) та
- 3) зв'язок між ними (моделі та оцінки). Звернемо увагу, що постановки перебірних задач можуть виступати в якості певних компенсаторів вказаних невизначеностей, що нерідко зустрічається на практиці.

Далі розглянемо, як знімаються ці невизначеності на прикладі етапу *дослідницького проектування процесу пошуку нових технічних рішень* (ПНТР) (визначення ТР теж в [3, с. 135]).

2. Задача дослідницького проектування

Проектування є найбільш поширеним видом інтелектуальної діяльності людини бо будь-яка діяльність починається саме з *проектування*, яке навіть вважають видовою відмінністю Людини в інтелектуальному аспекті. Починається проектування з того, з визначення уявлення про бажаний результат, - образ шуканого, що і є предметом дослідницького проектування.

2.1. Етап дослідницького проектування ПНТР, що охоплює цілепокладання та постановку задачі (див. рисунок 2), полягає в розробці та затвердженні технічного завдання на створення нової технічної системи (ТС). Цей документ містить бажані інтервали (області допустимих значень) всіх зовнішніх (споживчих) параметрів нової системи. Сукупність значень зовнішніх параметрів має бути вибрана таким чином, щоб, по-перше, систему можна було реалізувати (з прийнятним рівнем затрат, в заданий час, ...); по-друге, щоб були забезпечені достатні конкурентні переваги в порівнянні з прогнозованим рівнем цих параметрів у аналогів-конкурентів з вибраного споживацького сегменту.

Очевидно, що пошук оптимального співвідношення значень зовнішніх параметрів (вимог до нової ТС) є задачею знаходження компромісу між ними при встановлених обмеженнях. Вже сам по собі пошук цього компромісу на примарній грані між конкурентністю та реалізуемістю є досить складною задачею прийняття рішень, але основна складність проектування систем полягає в тому, що безпосередньо вибираються не значення зовнішніх (споживчих) параметрів, а значення внутрішніх (конструктивних, технологічних, тощо), які пов'язані з зовнішніми та між собою складними суперечливими залежностями. Навіть якщо ці залежності добре досліджені та верифіковані, це не надто спрощує задачу пошуку компромісу, а у випадку проектування систем нового (не відомого раніше) класу ці залежності ще й, як правило, не можуть бути відомими до створення та дослідження достатньої кількості різноманітних систем цього класу. Крім того, для систем нового класу досяжність встановленого компромісу значень споживчих параметрів є невизначеною через відсутність близьких орієнтирів.

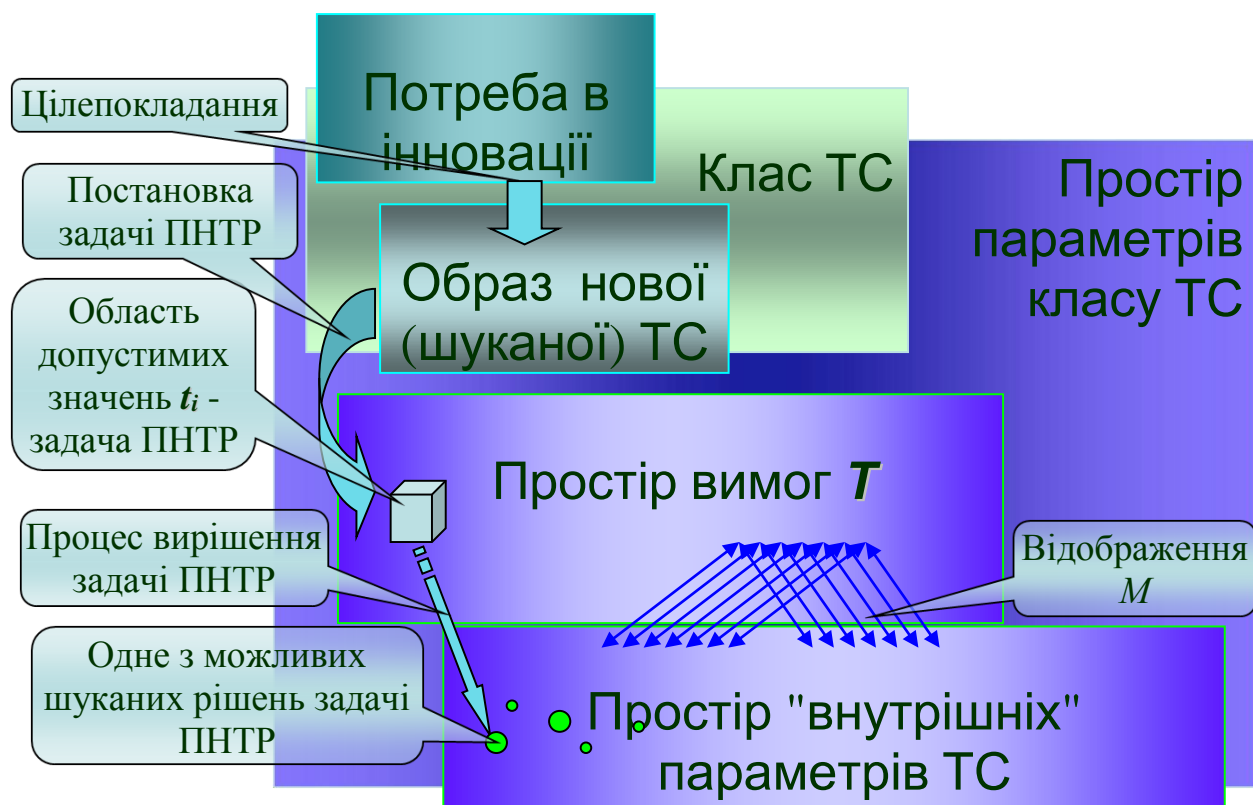


Рисунок 2. Процес пошуку нового технічного рішення,

де: M – сукупність моделей, які описують залежності зовнішніх параметрів від внутрішніх; T – множина зовнішніх (споживчих) параметрів ТС; t_i - діапазон допустимих значень i -го зовнішнього параметра.

2.2. Зазвичай при проектуванні систем добре відомих класів задача пошуку компромісу між значеннями зовнішніх параметрів вирішується без жодних натяків на пошук якогось оптимуму і навіть без розуміння що саме він міг би

Індуктивне моделювання складних систем, випуск 11, 2019

означати, а простим «підбором» потрібних значень цих параметрів «методом» *спроб та помилок* (найбільш поширеним методом перебору). Це «зондування» множини рішень відбувається наступним чином:

1) виходячи з мети проектування у технічному завданні *декларативно встановлюють бажані діапазони значень споживчих параметрів* (вимог до нової ТС, які виступають в ролі *критеріїв* придатності шуканих варіантів) на рівні прогнозованої конкурентності, орієнтуючись, наприклад, на параметри близьких аналогів, маркетингові дослідження, або на інтуїцію;

2) проводять науково-дослідні та/або дослідно-контрукторські роботи з метою досягти встановлених в технічному завданні значень споживчих параметрів, або уточнити їх.

Пошук досяжних варіантів компромісу значень параметрів для систем *нових класів* завжди є «зондуванням *наосліп*» множини можливих рішень.

2.3. Такий звичний (*прямий*) порядок проектування зафіксований у стандартах на проектування та багатьох програмних продуктах реалізує, по суті, стратегію *спроб (перебору) до успіху*, яка жодним чином *не може вести до знаходження оптимальних рішень*. Необхідність перебору в прямій задачі проектування обумовлена наступними видами невизначеності:

1) *невідома досяжність бажаного* – тобто чи можливо взагалі реалізувати систему, яка відповідає встановленим у технічному завданні значенням споживчих параметрів (вимогам до нової ТС);

2) для суттєво нових систем моделі (залежності зовнішніх та внутрішніх параметрів) завжди неповні: відсутні та/або зовсім не достатньо досліджені та верифіковані, тому їх сукупність непридатна для точного розрахунку;

3) навіть при повній визначеності моделей (у випадку добре досліджених систем) існує принципова невизначеність досяжності встановлених, бо внутрішніх параметрів (невідомих) набагато більше ніж моделей (наприклад, недоозначена система рівнянь);

4) з однієї спроби зондування (перебору сполучень значень внутрішніх параметрів для знаходження варіантів, що задовольняють встановленим критеріям - компромісу споживчих параметрів) принципово неможливо бути впевненим, що досягнута межа можливої досконалості (зокрема, в досягненні конкурентної переваги), тобто, навіть в разі зняття невизначеностей перших трьох типів неможливо бути впевненим у придатності отриманих варіантів без постановки і вирішення оптимізаційної задачі.

3. Оптимізаційні підходи до прямої задачі дослідницького проектування

Загалом оптимізаційні постановки задач в проектуванні є більше правилом, ніж виключенням, в практиці широко розповсюджені постановки задачі пошуку екстремумів окремих показників, в перебірних постановках задач часто використовують різні варіації еволюційних, генетичних та селекційних алгоритмів. Однак пряма задача дослідницького проектування ТС в цілому

ніколи не ставиться як оптимізаційна бо завжди видається неймовірно складною. Розглянемо таку постановку в загальному вигляді.

3.1. В кожній спробі встановлення суб'єктом компромісу значень зовнішніх параметрів у прямій задачі повинна бути знайдена множина відповідних рішень у просторі внутрішніх параметрів ТС. Оскільки значення параметрів задаються інтервалами, а варіанти – як сполучення значень внутрішніх параметрів, то це *зондування* є багатокритеріальною перебірною задачею комбінаторної (дискретної) оптимізації навіть при наявності цілком визначених аналітичних залежностей. Якщо ця задача вирішується *повним перебором* сполучень значень внутрішніх параметрів, то в результаті може бути отримана як порожня множина варіантів (означає недосяжність встановлених у цій спробі значень зовнішніх параметрів, неможливість втілити бажане в реальній ТС), так і занадто велика множина варіантів (крім її незорості, недоступності для аналізу, це означає, що встановлені у даній спробі значення зовнішніх параметрів є гарантовано не конкурентними). В обох випадках суб'єкт вимушений робити наступну спробу встановити бажані значення зовнішніх параметрів: у випадку отримання порожньої множини варіантів треба знизити планку деяких вимог, а при отриманні занадто великої множини варіантів реалізації, – зробити котрісь із вимог більш жорсткими. Цей пошук нового компромісу між значеннями зовнішніх параметрів не може бути здійснений без суб'єкта (особи чи колективу), який приймає рішення. Для кожної нової спроби зондування знову запускається процес повного перебору варіантів сполучень значень внутрішніх параметрів і знаходження множини відповідних рішень. Перебір варіантів кожної нової такої спроби може знову закінчитися так само невдало, тому процес ітерацій зондування і уточнення вимог до ТС має тривати до того моменту, коли в результаті перебору буде отримана така множина варіантів, кожен з варіантів якої суб'єкт здатен проінтерпретувати, оцінити, порівняти та прийняти на основі аналізу всіх її варіантів рішення, який з них (або які з них) буде реалізовано (прийнято в якості технічного завдання на проектування).

3.2. Як бачимо, оптимізація у прямій задачі дослідницького проектування може бути реалізована лише як *багаторазовий ітеративний повний перебір* «методом» послідовних інтуїтивних *спроб та помилок*. Варто наголосити, що будь-які методи скороченого часткового перебору сполучень значень внутрішніх параметрів в цій задачі не є придатними бо, по-перше, маскують інформацію про потенційну конкурентність рішень, а по-друге, забирають у суб'єкта орієнтири, щодо того, які з вимог треба змінювати в наступній спробі (далі це буде показано на більш конкретному прикладі). З іншого боку про повний перебір сполучень значень *зовнішніх* параметрів не йдеться не тільки тому, що то була би астрономічна кількість циклів повного перебору сполучень значень внутрішніх параметрів, але й тому, що не має чіткої уяви про те, що саме треба було би шукати перебором зовнішніх параметрів. Досить очевидно,

що не всі сполучення значень *зовнішніх* параметрів потрібно перебирати, так кожен з зовнішніх параметрів може набувати таких значень, які роблять систему непридатною для цільового використання при будь-яких значеннях інших параметрів, тому досить просто визначитися з нижніми границями діапазонів придатності зовнішніх параметрів. Зазвичай є інформація і про верхні границі діапазонів зовнішніх параметрів, які досягнуті в рекордних екстремальних системах, щоправда, рекордні значення одного зовнішнього параметру досягаються за рахунок зниження значень інших параметрів, а це катастрофічно звужує простір ефективного використання екстремальних систем і, відповідно, кількість їх споживачів. Отже шуканим рішенням цієї задачі мав би бути «найкращий компроміс» значень *зовнішніх* параметрів на межі досяжності з огляду на можливі варіанти сполучень значень внутрішніх параметрів. Описаний вище процес *зондування* не може дати уявлення про всю верхню грань простору можливих реалізацій (найвищу з досяжних поверхню рівноцінних варіантів), та і сам цей процес зондування у переважній більшості практичних задач за складністю виглядає лише теоретичною абстракцією.

3.3. Зазначимо, що вказані перебірні задачі зондування добре піддаються розпаралелюванню обчислень, що може суттєво пришвидшити пошук. Це розпаралелювання можливе як «функціональне», - по рівням алгоритму перебору (див. рис. 1), так і на кожному рівні зокрема. Наприклад, варіанти з блоку генерації подаються на блок оцінювання, де є окремі блоки для вирахування значень кожного зовнішнього параметра та сортування окремо по кожному з них на підходящі чи ні за умовами даної спроби зондування, а далі окремий блок шукає перетин множин підходящих варіантів за всіма параметрами. Однак навіть використання сучасних суперкомп'ютерів у задачі повного перебору не знімає обмежень «прокляття розмірності», тим паче в задачі знаходження всієї верхньої грані простору можливих реалізацій.

4. Автоматизація перебору в гранично невизначеній задачі проектування

На початку історії розвитку кожного класу систем є такий період, в якому всі три типи невизначеності, які були вказані вище, максимально проявлені, відповідно, інформації кожного з трьох типів гранично мало. Спробуємо уявити якою має бути мінімальна інформація, достатня для постановки і вирішення задачі дослідницького проектування, тобто для визначення простору зовнішніх параметрів (споживчих вимог), простору внутрішніх (конструктивних) параметрів, зв'язків між ними (моделей, які відображують об'єкти одного простору в інший), та знайти такий досяжний компроміс між значеннями вимог, який би забезпечив проектованій системі максимальний рівень (запас) конкурентності.

4.1. Новий клас систем можна визначити, наприклад, відносно існуючих систем інших класів, які в частині зовнішніх параметрів є віддаленими аналогами бажаного нового класу. Так кожен з цих віддалених аналогів має

Індуктивне моделювання складних систем, випуск 11, 2019

значення частини своїх зовнішніх параметрів на рівні не гірше бажаних для систем нового класу, а всі разом вони окреслюють простір вимог до нового класу ТС. Звернемо увагу, що:

1) множина цих віддалених аналогів нового (раніше невідомого) класу не містить жодного варіанту аналогу, який би відповідав бажаному за всіма вимогами, інакше шуканий клас систем не був би новим, а задача пошуку вже мала би відоме готове рішення;

2) бажаний рівень кожної з вимог до нової системи вже є досягнутим у частини аналогів, тобто мова йде не про екстремальну задачу, в якій потрібно досягти рекордних значень певних параметрів¹, а саме про знаходження досяжного компромісу вимог в задачі дослідницького проектування;

3) встановлення для нової системи у якості бажаних значень кожної з вимог максимально досягнутого у різних існуючих аналогів рівня їх значень є апріорі неможливим, інакше важко уявити чому ж ця чудова система з таким високим рівнем конкурентних переваг досі ще не була реалізована.

4.2. Автоматизація перебору у цій задачі можлива, якщо виконуються наступні умови:

1) множину аналогів за кожною з вимог можна розділити на дві навчальні вибірки (аналоги, які відповідають бажаному рівню вимоги, й ті, які йому не відповідають), та

2) для кожної з вимог на їх навчальних вибірках можна провести навчання одного з багатьох відомих алгоритмів розпізнавання образів, який з необхідною надійністю та точністю визначатиме відповідають чи не відповідають нові варіанти бажаному рівню кожної вимоги.

Зазначимо, що дана задача цілком належить до царини індуктивного моделювання, адже метод її вирішення базується на використанні алгоритмів навчання розпізнаванню образів, а роздільні правила, які ділять множину аналогів за кожною з вимог на задовільну й незадовільну, є *моделями* (нехай і дуже недосконалими через обмаль вхідної інформації), що *узагальнюють* певні властивості множини аналогів. Оскільки для всіх реалізованих аналогів відомі значення як зовнішніх, так і внутрішніх параметрів, а алгоритм навчання розпізнаванню образів фіксує від значень яких внутрішніх параметрів залежить виконання кожної з вимог, то не *викликає сумніву можливість постановки задачі перебору*, часткового (за допомогою еволюційних, генетичних та селекційних алгоритмів) чи повного.

4.3. Пошук *одного* варіанта нового технічного рішення, яке б відповідало встановленому компромісу значень зовнішніх параметрів, можна провести,

¹ Екстремальні задачі створення систем з рекордними значеннями завжди є новими і важкими, завжди вимагають нових технічних рішень, але зазвичай ставляться та вирішуються в тих предметних областях, де існують добре вивчені залежності параметрів (моделі), на яких вирішується задача екстраполяції. Хоча такі екстремальні системи можуть зовсім не мати жодної споживчої привабливості, вони дають уявлення про досягнутий рівень можливого, зокрема в розглядуваній нами задачі, можуть слугувати орієнтиром-репером.

наприклад, в рамках генетичного підходу за допомогою алгоритму ітеративної селекції. В такому алгоритмі початкову «популяцію» складатиме множина віддалених аналогів, для «схрещування» спершу відбираються ті з них, які сукупно задовольняють найбільшій кількості вимог. Ті «нащадки», які задовольняють більшій кількості вимог, ніж кожен з їх «батьків» окремо, вибираються для подальшого «схрещування». Проведення «схрещування» спрощується тією обставиною, що після навчання алгоритму розпізнавання образів за кожною вимогою стає відомо (у відповідних роздільних правилах) які «гени» (значення внутрішніх параметрів та/або їх співвідношення) як впливають на досяжність кожної вимоги. Кращим «нащадкам», що пройшли «селекцію», для подальшого «схрещування» знову підбираються ті варіанти, з якими вони сукупно задовольняють найбільшій кількості вимог, цикл «схрещування»-«селекції» повторюється доти, поки не будуть знайдені «нащадки», які відповідають всім вимогам.

Як бачимо, в гранично невизначеній прямій задачі дослідницького проектування використання селекційного алгоритму може досить швидко приводити до знаходження шуканого рішення. Знайдений варіант означає лише підтвердження досяжності встановленого для нової ТС компромісу вимог, однак зовсім нічого не може сказати про рівень конкурентності.

4.4. Вище було показано, що отримання оптимальної за конкурентністю множини досяжних рішень можливе лише в результаті *ітеративного процесу багаторазового повного перебору* (п.п. 2.3 та 3.2). Крім того, результати повного перебору використовуються суб'єктом для уточнення вимог, адже дані про те за якою вимогою скільки варіантів були відсіяні є дуже інформативними та чіткими орієнтирами. В цілому ж алгоритм ітеративного зондування досяжності і конкурентності компромісу вимог багаторазовим повним перебором множини можливих рішень схожий з описаним в п. 3.1 алгоритмом зондування в більш визначеній задачі з відомими залежностями між значеннями внутрішніх та зовнішніх параметрів. Відмінність цього гранично невизначеного випадку лише в тому, що знань про ці залежності нема, тому на кожній наступній ітерації для кожної з уточнених вимог потрібно по новому розділити множину аналогів на навчальні вибірки та провести навчання розпізнаванню образів на них, щоб отримати роздільні правила, які є хоч і край недосконаліми, але все ж *індуктивними моделями*.

4.5. Слід зазначити, що роздільні правила для кожного нового рівня встановлених вимог можуть суттєво і мало прогнозовано відрізнятись. Так, наприклад, не складно зрозуміти, що загалом на нижній грані (мінімальному рівні) вимоги при навчанні розпізнаванню образів продукуються більш прості роздільні правила, з меншою кількістю внутрішніх параметрів та залежностей між ними, адже більшість аналогів віднесена до підмножини з бажаним рівнем вимоги, тому для вибірки знаходяться простіші правила. Таке спрощення роздільних правил може суттєво полегшити перебір, але в тій же мірі робить

менш надійними висновки про досяжність сполучень внутрішніх параметрів, а головне – малоімовірною конкурентність варіантів. При наближенні до верхньої грані вимог в процесі навчання розпізнаванню образів продукуються складніші моделі (враховується більша кількість внутрішніх параметрів та їх залежностей), загострюється антагонізм вимог. Це значно ускладнює вибір, особливо в частині встановлення компромісу значень вимог, адже зміна значення хоча би однієї вимоги не прогнозовано змінює залежності від інших вимог (в новому роздільному правилі можуть з'явитись внутрішні параметри, які є в роздільних правилах інших вимог).

5. Обернена задача дослідницького проектування

Прообразом оберненої задачі дослідницького проектування можна вважати роботи Ю.Р.Валькмана по застосуванню модельно-параметричних просторів у задачах дослідницького проектування [4-6]. Інтеграція всіх існуючих різнорідних залежностей різноманітних зовнішніх та внутрішніх параметрів у єдиний модельно-параметричний простір дозволяє гнучко узгоджувати значення параметрів складних систем на всіх стадіях їх проектування навіть без постановки перебірної задачі. Однак наявність великої кількості таких залежностей означає, що проектовані системи належать до добре дослідженого класу і не є суттєво новими.

5.1. Ідея оберненої задачі дослідницького проектування полягає в тому, що навіть у тій же гранично невизначеній задачі проектування, яка описана вище, можна автоматизувати процес вибору, спростити його складність на багато порядків та позбутись участі суб'єкта в процесі ітеративних спроб перебору. На відміну від описаної вище (п.п. 2.3, 3.2 та 4.4) прямої задачі, в оберненій множині досяжних конкурентних рішень є не основним продуктом роботи алгоритму, а побічним, основний же продукт – *оптимальний компроміс значень вимог* (тобто саме те, що у прямій задачі суб'єкт намагається вгадати перед кожною спробою перебору). Якщо в прямій задачі суб'єкт здійснює *послідовність сліпих спроб зондування* множини можливих рішень встановлюючи бажаний *компроміс значень вимог* на вході в алгоритм перебору лише для оцінки можливості реалізації та конкурентності цих спроб, то в оберненій задачі алгоритм сам знаходить *оптимальний компроміс* без необхідності *зондування*. Обернена постановка задачі дозволяє 1) вилучити суб'єкт з процесу роботи обчислювального алгоритму, вирішувати задачу за один прохід і 2) значно (на багато порядків) спростити обчислення, що відповідно розширює перспективи застосування цього підходу. Щоб передати встановлення значень компромісу вимог до ТС алгоритму необхідно попередньо (до початку роботи обчислювального алгоритму) виразити знання про систему переваг суб'єкта в даній задачі за допомогою методів теорії прийняття рішень [7].

5.2. В гранично невизначеній задачі до початку роботи алгоритму суб'єкт не має інформації ні про взаємний вплив параметрів (залежності їх значень), ні про співвідношення цінності (важливості) значень споживчих параметрів. В умовах цієї задачі є лише інформація про досягнуті у аналогів діапазони значень кожного зі споживчих параметрів, але немає жодної інформації про можливу досяжність інших варіантів сполучення їх значень. Та навіть у цьому гранично невизначеному випадку суб'єкт може визначити *свою систему переваг* на досягнутих у аналогів діапазонах значень споживчих параметрів, перевівши їх значення в *оцінки за відповідними критеріями*. Це формальне вираження уявлення про шукане рішення дозволяє в оберненій задачі вилучити суб'єкта з процесу спроб ітерацій перебору, забезпечити контроль та збалансованість наближення до максимального досяжного рівня конкурентності значень параметрів створюваних систем, автоматизувати процес пошуку *оптимального компромісу значень вимог*, та дуже суттєво зменшити складність обчислень.

5.3. Підготовчий-етап постановки оберненої задачі полягає у представленні знань про переваги суб'єкта шляхом переведення діапазонів значень зовнішніх параметрів у стандартні шкали їх оцінок, що дає змогу використовувати зовнішні параметри як *співрозмірні критерії вибору*. Таке нормування загалом не є лінійним і часто має вигляд сигмоїди (S-кривої, зокрема, логісти) в звичайному (рисунок 3 а) або розверненому вигляді (рисунок 3 б), їх сполучення (рисунок 3 в) чи частин (рисунок 3 г, д). В окремих випадках можливе й лінійне нормування, але на практиці зазвичай є непридатний рівень значень зовнішніх параметрів, нижче якого вже байдуже яка відмінність у їх значеннях, бо будь-яке з них уже незадовільне, а серед найкращих також можуть бути однакові оцінки (або навіть їх зниження) для тих значень зовнішніх параметрів, які значно перевищують достатній рівень. Про співвідношення цінності кожного критерію гранично невизначена задача на даному етапі зазвичай ще не може дати чіткого уявлення. Щоб скласти враження про це суб'єкту необхідно проаналізувати множину досяжних рішень, яка є одним з побічних результатів роботи алгоритму, тому ці оцінки можуть проводитись лише потім на етапі уточнення досягнутого компромісу.

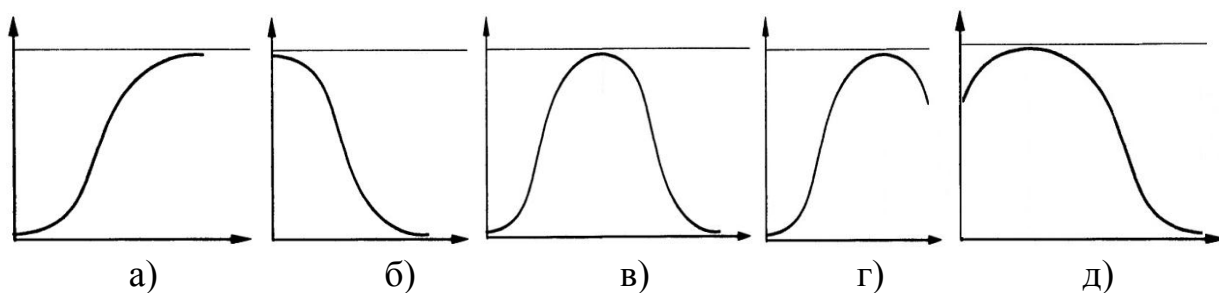


Рисунок 3. Приклади нормування оцінок зовнішніх параметрів сигмовидними функціями, їх сполученнями та частинами.

5.4. Як і в прямій гранично невизначеній задачі, алгоритм вирішення оберненої задачі теж містить етапи:

- 1) встановлення бажаного рівня значень вимог,
- 2) формування навчальних вибірок для кожного зовнішнього параметра розділенням множини аналогів за відповідним встановленим його значенням,
- 3) навчання алгоритму розпізнавання образів на цих вибірках розрізненню того досягнутий чи ні встановлений рівень вимог за сполученням значень внутрішніх параметрів аналогів (отримання роздільних правил),
- 4) отримання інформації про кількість придатних варіантів за кожним з зовнішніх параметрів та за всіма разом,
- 5) прийняття рішення про завершення пошуку, чи перехід на новий його цикл (наступна ітерація з п.1).

5.4.1. Основна відмінність першого етапу в тому, що бажаний рівень вимог у кожному циклі встановлюється не суб'єктом окремо для кожного зовнішнього параметру, а автоматично шляхом поділу досліджуваного діапазону оцінок в пропорції золотого перетину *для всіх критеріїв одночасно на одному рівні*. Наприклад, якщо діапазони значень зовнішніх параметрів нормовані у стобальній шкалі, то рівень вимог встановлюється на оцінці 62. Ця оцінка за кожним критерієм має бути переведена в значення вимог відповідного параметру за графіком його нормування (рисунок 3).

5.4.2. Формування навчальних вибірок виконується відповідно до умов п.4.2. і нічим не відрізняється від алгоритму перебору в прямій гранично невизначеній задачі чи алгоритму ітеративної селекції (п.4.3.), - просто за кожною вимогою множина існуючих аналогів сортується на дві підмножини: ті, які відповідають даній вимозі, і ті, які не відповідають.

5.4.3. Множини з попереднього етапу використовуються як навчальні вибірки для отримання роздільних правил для кожної з вимог, встановлених на етапі 1 (п.5.4.1.). Алгоритм навчання розпізнаванню образів має *в явному виді* побудувати роздільні правила, які з необхідною надійністю та точністю зможуть *сортувати нові варіанти* на придатні та непридатні за кожною з вимог.

5.4.4. На відміну від прямої задачі, де інформація про кількість придатних та відсіяних варіантів за кожною вимогою потрібна суб'єкту, щоб орієнтуватись які значення вимог за кожним з зовнішніх параметрів встановлювати на наступну ітерацію циклу повного перебору, в оберненій задачі алгоритму необхідна інформація тільки про загальну кількість варіантів, які досягають встановленого рівня вимог. Це відкриває шлях для *кардинального зменшення складності обчислень*, адже в отриманих роздільних правилах відомо які інтервали значень внутрішніх параметрів та/або їх співвідношення означають досяжність кожної вимоги, отже є *можливість порохувати*

кількість придатних варіантів як число сполучень цих значень внутрішніх параметрів, навіть зовсім не вдаючись до перебору варіантів (їх генерації та сортування).

5.4.5. Правило зупинки алгоритму - кількість варіантів у результуючій множині, - задається виходячи з можливостей їх інтерпретації, аналізу та співставлення суб'єктом, наприклад, інтервалом $(10 \div 20)m$ (де m – кількість зовнішніх параметрів). При досягненні такої кількості варіантів, яка потрапляє в заданий інтервал, фіксується той *компроміс значень вимог*, при якому це сталося, в якості *оптимальної шуканої відповіді*. Якщо правило зупинки алгоритму не виконане, тобто кількість варіантів, які досягають встановленого рівня вимог, більша чи менша встановленого інтервалу, то, відповідно, треба підняти або знизити рівень вимог, для цього верхню або нижню частину діапазону оцінок (ту, в якій знаходиться шукане рішення) приврівнюють до 100 балів і повторюють цикл алгоритму з першого етапу.

5.5. Як бачимо з аналізу цього алгоритму в гранично невизначеній оберненій задачі дослідницького проектування *складність обчислень зменшується кардинально*, можна навіть і зовсім обійтись без перебору. Складність різних постановок задачі дослідницького проектування варто розглянути окремо. Тут звернемо увагу на кілька корисних особливостей описаного алгоритму.

Множина досяжних конкурентних рішень є не основним продуктом роботи алгоритму, а побічним. Важливо, що кожен варіант такого рішення має чіткий опис у просторі внутрішніх параметрів. Ця множина варіантів з однаковим рівнем оцінок за всіма зовнішніми параметрами є предметом детального дослідження на подальших стадіях проектування, а її аналіз дозволяє більш детально зорієнтуватись і уточнити бажані рівні значень цих параметрів виходячи з уявлень про те, як *співвідноситься їх важливість* (одним з шляхів вирішення цієї задачі є створений автором метод [8, 9]).

Ще одним дуже цінним для подальшого проектування побічним результатом є отримувана в ході ітерацій послідовність роздільних правил для кожного з зовнішніх параметрів. Хоча кожне з цих роздільних правил є доволі примітивною *індуктивною моделлю*, та з їх послідовності можна скласти уявлення про залежності значень зовнішніх параметрів від значень внутрішніх, причому ці залежності можна використовувати як для інтерполяції, так і для екстраполяції.

6. Порівняння складності задач дослідницького проектування

В дослідницькому проектуванні саме складність визначає яким чином буде ставитись і вирішуватись задача пошуку компромісу між значеннями зовнішніх параметрів та чи міститиме вона хоч якісь натяки на оптимізацію. Цікавою особливістю цієї задачі є те, що при наявності докладної інформації про

відомий клас систем (зокрема, добре досліджених залежностей значень зовнішніх параметрів від значень внутрішніх) оптимізація виявляється більш складним і трудомістким процесом ніж у гранично невизначеному випадку систем абсолютно нового класу. Звісно, конкуренція в відомих класах систем апіорі значно вища, ніж серед систем, які є першими представниками нового класу, також значно менш надійними є висновки про можливість реалізації шуканих варіантів, тобто про досяжність бажаного компромісу між значеннями споживчих параметрів. Але головне в тому, що у гранично невизначеній задачі сходиться нанівець зв'язність графа рішень, що значно спрощує перебір, або навіть дозволяє обійтись без нього.

6.1. Структуру залежностей значень зовнішніх (споживчих) параметрів від значень внутрішніх (конструктивних) параметрів можна наочно подати у вигляді дводольного графа. Оскільки значення зовнішніх параметрів залежить від сукупності значень внутрішніх, то внутрішні параметри можна вважати вхідними або «управліннями», а зовнішні – вихідними або «фазовими координатами» [10]. Відповідно граф є направленим: вибираючи значення тих «управлінь», які впливають на «фазові координати», визначають і їх значення або обмежують свободу вибору. *Зв'язність графа* означає, що «фазові координати» (вихідні параметри) пов'язані між собою через «управління», тобто значення кожного з зовнішніх параметрів залежать від значень кількох внутрішніх параметрів, від яких залежать і значення інших зовнішніх параметрів. Оскільки внутрішніх параметрів в рази (чи, навіть, на порядки) більше, ніж зовнішніх, та відомих залежностей, то виникає невизначеність, яка зазвичай долається постановкою перебірної задачі.

6.2. В попередніх розділах були розглянуті різні варіанти постановки задачі дослідницького проектування, їх складність та можливі підходи до зменшення трудомісткості їх розв'язання. На перший погляд, видається неймовірним описане вище кардинальне зменшення перебору і можливість навіть повної відмови від нього залежно від постановки задачі, тому розглянемо докладніше які підходи і за рахунок чого зменшують перебір.

Оскільки перебір відбувається на описаному вище дводольному графі, то чим менша його зв'язність, - тим простіший перебір. Так в сильно зв'язаному графі загальна кількість варіантів для перебору (повний опис за всіма внутрішніми параметрами оцінюється за кожним з зовнішніх) *пропорційна степеневій функції* від кількості «управлінь» (внутрішніх параметрів), а в незв'язаному графі переглядається тільки *сумарна кількість значень «управлінь»* і то лише з точки зору їх впливу на досяжність бажаного значення окремо лише для тієї «фазової координати», на яку впливає кожне «управління». Очевидно, що для цієї задачі найбільш ефективним підходом скорочення перебору видається заснований на описаному в [10] методі розділення внутрішніх параметрів на незалежні підмножини, що знижує складність перебору на багато порядків, і що найважливіше – результати такого

перебору не будуть відрізнятися від результатів повного перебору. Звісно, ідеал простоти перебору, у якому дводольний граф є незв'язаною послідовністю окремих графів для кожної «фазової координати» не може бути досяжним навіть у гранично невизначеній задачі, адже задача дослідницького проектування саме і полягає у знайденні досяжного та конкурентного компромісу «фазових координат» (споживчих параметрів).

6.3. Складність задачі дослідницького проектування можна вимірювати *невизначеністю вибору*, яка є функцією кількості актів порівняння (і вибору), необхідних для її вирішення перебором. Зменшення цієї невизначеності, тобто скорочення перебору на вказаному дводольному графі може відбуватись одним з трьох шляхів.

1. Виявлення незалежних «управлінь» (тих внутрішніх параметрів, які впливають на значення лише одного зовнішнього («фазової координати»), тобто мають лиш одну вихідну дугу, тому їх значення можуть бути вибрані незалежно від значень інших «управлінь»). При незалежному виборі найкращих їх значень перебір спрощується на порядок, точніше - кількість неподільних інтервалів діапазону значень кожного з незалежних «управлінь» переходить з *множника* числа варіантів для оцінювання за *всіма* зовнішніми параметрами у *доданок* оцінювання за *одним*.

2. У тих «управлінь», які не є незалежними бо впливають на значення більш ніж одного зовнішнього параметру («фазової координати»), вибір одного значення, як правило, не очевидний, адже задача вимагає пошуку компромісу, тому знайти єдине найкраще зразу для всіх пов'язаних «фазових координат» значення управління дуже проблематично. Однак абсолютно очевидними можуть бути ті значення «управління», які призводять до непридатних значень «фазових координат», або до домінованих іншими. Якщо відсіяти такі непридатні значення, то перебір спроститься пропорційно скороченню числа значень «управління».

3. Найбільш кардинального скорочення перебору можна було б досягти, якби вдалось розділити дводольний граф на окремі незалежні зв'язні підграфи, на яких перебір можна проводити окремо (в ідеалі простоти вибору – окремо для кожної «фазової координати»). Питання лише в тому чи можна і як саме це зробити, маючи зв'язний граф. Розглянемо найбільш простий випадок: припустимо, що дві «фазові координати» у зв'язному графі сполучені дугами лише з одним «управлінням». Якщо провести перебір на кожній частині графа окремо, то отримаємо кардинальне його скорочення. Наприклад, для зв'язного графа з n «управлінням» по k можливих значень у кожному повний перебір складатиметься з оцінювання k^n варіантів за *всіма* «фазовими координатами», а якщо, приміром, вдалося розділити цей граф на два окремі незалежні зв'язні підграфи рівно посередині (з однаковою кількістю управлінь), - то в переборі будуть оцінюватись $2k^{(n+1)/2}$ варіантів за *половиною* «фазових координат».

6.4. Варто акцентувати увагу на тому, що у гранично невизначеній оберненій задачі дослідницького проектування *можна обійтись без перебору як такого, замінивши його підрахунком кількості можливих варіантів за роздільними правилами* (див. п. 5.5.4), що в порівнянні з необхідністю багаторазового повного перебору в прямій задачі дослідницького проектування виглядає абсолютно дивовижно. Це неймовірне спрощення досягається завдяки сполученню кількох факторів:

1) граничної невизначеності, тобто відсутності моделей, які би пов'язували значення внутрішніх параметрів проєктованих систем зі значеннями зовнішніх (споживчих),

2) обернена постановка задачі, в якій традиційних прямий підбір підходящих сполучень значень зовнішніх параметрів «методом» спроб та помилок не просто автоматизується, а замінюється цілеспрямованим пошуком таких сполучень їх значень, які дають потрібну (обмежену уявою про достатній рівень конкурентності) кількість реалізуємих варіантів,

3) переведення діапазонів значень зовнішніх параметрів у стандартні шкали їх оцінок, тобто нелінійне нормування, яке, забезпечуючи співмірність впливів різних параметрів, робить можливим автоматичні ітерації пошуку пропорційно підвищуючи чи знижуючи оцінки всіх критеріїв одночасно на одному рівні без участі суб'єкта.

Саме це вилучення суб'єкта з процесу ітерацій перебору (вибору) шляхом зняття оціночно-ціннісної невизначеності дозволяє на багато порядків зменшити складність задачі.

6.5. Коротке порівняння різних задач дано в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння складності задач

Задача	Формально визначена (відомі залежності)	Гранично невизначена
Пряма	Багаторазові "сліпі" спроби автоматичного повного перебору з оцінюванням <i>кожного</i> варіанту <i>за всіма</i> зовнішніми параметрами. Можливе розпаралелювання обчислень, та попередня фільтрація недосяжних сполучень значень внутрішніх параметрів.	Через брак повної інформації про залежності можлива повна фільтрація за кожною вимогою окремо та пошук задовільних варіантів у перетині знайдених множин. Послідовна фільтрація обмежує здатність орієнтації для корекції вимог у наступних спробах.
Обернена	Прообраз – використання модельно-параметричного простору для узгодження багатьма проєктантами вимог до ТС. Можливі постановки задач знаходження ранжованого списку всіх локальних екстремумів [1] та найвищої поверхні рівноцінних варіантів.	Знаходження збалансованого компромісу значень споживчих параметрів, який дає множину конкурентних досяжних варіантів <i>за один прохід, автоматично послідовною фільтрацією</i> , або навіть <i>зовсім без перебору за допомогою підрахунку кількості можливих комбінацій за роздільними правилами.</i>

Пряма задача дослідницького проектування при відомих залежностях параметрів вимагає багаторазових спроб повного перебору (п.п. 3.1, 3.2)

Обернена задача дозволяє замінити повний перебір з оцінюванням кожного варіанта за всіма зовнішніми параметрами на послідовну фільтрацію за кожним зовнішнім параметром лише відібраної за попередніми частини (ієрархічний вибір).

Висновок

Отже, в цій статті показано, як засоби індуктивного моделювання дозволяють автоматизувати вирішення гранично невизначеної задачі дослідницького проектування, а в оберненій постановці цієї задачі навіть обійтися без перебору, що відкриває широкі перспективи практичного застосування запропонованого алгоритму. Зокрема розглянуті такі питання:

1) акцентовано увагу на відмінностях задач вибору і перебору: показано, що перебір – це вимірювально-сортувальна задача, а вибір завжди має справу з невизначеностями кількох типів і не існує без суб'єкта;

2) описана пряма задача дослідницького проектування та аргументована необхідність багаторазового повного перебору для її коректного вирішення, розглянуто труднощі та обмеження оптимізаційного зондування в ній, навіть з урахуванням можливостей розпаралелювання обчислень;

3) виявлена та поставлена гранично невизначена задача дослідницького проектування, як задача індуктивного моделювання, показана можливість її вирішення з використанням алгоритмів навчання розпізнаванню образів та обмеження через складність багаторазового повного перебору з участю суб'єкта;

4) сформульована обернена задача дослідницького проектування, приведено та проаналізовано алгоритм її вирішення, який знімає обмеження складності прямої задачі бо вилучає суб'єкт з процесу ітерацій та кардинально спрощує перебір, або навіть зовсім обходиться без нього;

5) окремо розглянуті шляхи скорочення перебору та проведено порівняння різних постановок задач дослідницького проектування з точки зору їх складності.

Література

1. Шередеко Ю.Л. Процесс поиска новых технических решений как многостадийный процесс принятия решений. // Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. Зб. доп. наук.-практ. конф. з міжнар. участю. – Київ; ІПММС НАНУ, 2007, С. 169-172. (http://conf.atsukr.org.ua/files/conf_dir_6/sheredeko_sppr07.pdf)
2. Шередеко Ю.Л. Морфологический инструментарий творчества в системах поддержки принятия решений. // Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. Зб. доп. наук.-практ. конф. з міжнар. участю. – Київ: ІПММС НАНУ, 2006. - С. 173-176.

(http://conf.atsukr.org.ua/files/conf_dir_4/sheredeko_sppr06.pdf).

3. Шередко Ю.Л., Ієрархія задач і моделей управління та проблема інтелектуалізації кібернетичних систем // Індуктивне моделювання складних систем. Зб. наук. пр. К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2018, Вип. 10. С. 128-137.
4. Валькман Ю.Р. Принципы построения исчисления моделей в исследовательском проектировании сложных объектов. // Научн. тр. Рижского технического университета: Методы и системы принятия решения. Автоматизация и интеллектуализация процессов проектирования и управления. — Рига, 1993. — С. 81-89.
5. Валькман Ю.Р. Модельно-параметрическое пространство в исследовательском проектировании: цели построения, определения, структура и свойства// Вопросы когнитивно-информационной поддержки постановки и решения новых научных проблем. К.: Институт кибернетики НАН Украины, 1995. - с. 103-115.
6. Валькман Ю.Р. Интеллектуальные технологии исследовательского проектирования: формальные системы и семиотические модели. Киев: Port-Royal, 1998. - 250 с.
7. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: Предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
8. Шередко Ю.Л. Метод определения значимости параметров технических систем. // УСиМ. - 1999, N2, с. 3-11.
9. Шередко Ю.Л., Диденко А.С. Автоматизация экспертного определения значимости параметров технических систем. // Управляющие системы и машины, - 2000.-№4, С.3-9.
10. Одрин В.М., Шередко Ю.Л. Морфологические методы решения проблемных задач как раздел технологии научного и технического творчества. IV. Получение структурированного набора классификационных признаков. // УСиМ, 1999, № 1 - С. 65-78.