

Биченков Василь Васильович*Національний університет оборони України, Київ*

ORCID 0000-0002-6080-6976

Заїка Віктор Федорович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0000-0002-2394-4317

Заїка Людмила Анатоліївна*Національний університет оборони України, Київ*

ORCID 0000-0003-4386-4004

Власов Олександр Миколайович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0009-0002-7980-2737

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ НОВОГО АЛГОРИТМУ СЕЛЕКЦІЇ КРИТЕРІЇВ

Анотація. На основі аналізу дедуктивних та індуктивних методів побудови моделей складних систем визначено можливість прогнозування поведінки моделі при керуючих впливах на неї з боку підсистеми управління. Висунуто вимоги, яким має відповідати математична модель складної системи. Визначено можливість формування ефективних моделей складних систем із використанням запропонованих математичних виразів. Наведено критерії селекції формульних виразів, які забезпечують реалізацію вимог до моделей складних систем. З метою підвищення точності відображення математичною моделлю процесів, які відбуваються в системі, що моделюється, запропоновано алгоритм побудови моделі функціонування складної інерційної системи з використанням нового критерію – критерію унікальності аргументів у складі формульного виразу. Виходячи з недоцільності використання у формульному виразі рівнянь, які не мають у своєму складі унікальних аргументів, запропоновано новий комбінаторний алгоритм функціонування критеріїв селекції під час побудови моделі складної системи. Відповідно до запропонованого алгоритму здійснюється попередня перевірка формульних виразів з використанням спеціалізованого критерію, критерію мінімального усунення та критерію регулярності. Надалі відбувається формування загального формульного виразу з використанням критерію унікальності аргументів, що дозволяє уникнути зайвого ускладнення математичної моделі, але виключає втрату важливих для дослідження параметрів. Таким чином забезпечується можливість побудови моделей, які з певною точністю враховуватимуть обґрунтованість прийнятих управлінських рішень.

В статті висунуті вимоги до моделі складної телекомунікаційної системи та наведені критерії селекції формульних виразів, які забезпечать реалізацію висунутих вимог. Запропонована методика побудови моделей складних інерційних систем з урахуванням критерію унікальності аргументів у складі формульного виразу та нового алгоритму функціонування критеріїв селекції для побудови моделі складної системи.

Ключові слова: моделювання складних систем, індуктивні методи математичного моделювання, критерії селекції формульних виразів, алгоритм функціонування критеріїв селекції.

Bychenkov Vasyl*National Defense University of Ukraine, Kyiv*

ORCID 0000-0002-6080-6976

Zaika Victor*State university of information and communication technologies, Kyiv*

ORCID 0000-0002-2394-4317

Zaika Lyudmila*National Defense University of Ukraine, Kyiv*

ORCID 0000-0003-4386-4004

Vlasov Oleksandr*State university of information and communication technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0002-7980-2737

© Биченков В.В., Заїка В.Ф., Заїка Л.А., Власов О.М.

2025

ENHANCING THE METHODOLOGY FOR MODELING COMPLEX SYSTEMS USING A NEW ALGORITHM FOR CRITERIA SELECTION

Abstract. Based on the analysis of deductive and inductive methods for constructing models of complex systems, the possibility of predicting model behavior under control actions from the management subsystem has been determined. The requirements that a mathematical model of a complex system must satisfy are formulated. The feasibility of developing effective models of complex systems using the proposed mathematical expressions has been demonstrated. Criteria for selecting formulaic expressions that ensure the fulfillment of requirements for complex system models are presented. To improve the accuracy of the model's representation of processes occurring within the simulated system, an algorithm for constructing a model of a complex inertial system is proposed, incorporating a new criterion — the criterion of argument uniqueness within a formulaic expression. Considering the impracticality of using equations in formulaic expressions that do not contain unique arguments, a new combinatorial algorithm for the functioning of selection criteria during model construction is introduced. According to the proposed algorithm, a preliminary verification of formulaic expressions is performed using a specialized criterion, the minimal elimination criterion, and the regularity criterion. Subsequently, a general formulaic expression is formed using the criterion of argument uniqueness, which avoids unnecessary model complexity while preventing the loss of essential parameters. Thus, the approach enables the construction of models that can, with a certain degree of accuracy, account for the validity of management decisions.

The paper defines the requirements for a model of a complex telecommunication system and presents the selection criteria for formulaic expressions that ensure the fulfillment of these requirements. A methodology for constructing models of complex inertial systems is proposed, taking into account the criterion of argument uniqueness within formulaic expressions and the new algorithm for operating the selection criteria in the model-building process.

Keywords: modeling of complex systems, inductive methods of mathematical modeling, selection criteria of formulaic expressions, algorithm for functioning of selection criteria.

1. Постановка проблеми

Дослідження питань функціонування складних телекомунікаційних систем зазвичай вимагає попереднього моделювання або самих систем, або процесів, які при цьому відбуваються. Водночас, чим складнішою виявляється досліджувана система, тим важче вдається формалізувати процеси, що в ній протікають, та врахувати усі фактори, які впливають на її функціонування. Тому при дослідженні ефективності функціонування телекомунікаційних систем, в більшості випадків, не розглядаються питання впливу на них обслуговуючого персоналу та обґрунтованості управлінських рішень, які при цьому приймаються. Разом з тим ще у третій чверті минулого сторіччя видатний вчений в області кібернетики та створення штучного інтелекту О.Г. Івахненко зазначив: «При вирішенні простих завдань немає нагальної потреби виключати людину. Але при моделюванні все більш складних об'єктів рано чи пізно настає такий ступінь складності, коли людина стає головним джерелом помилок рішень» [1].

Таким чином важливість та великий обсяг завдань, які вирішуються стосовно прогнозування поведінки складних систем робить надзвичайно актуальним завдання винайдення методики побудови моделей складних систем з урахуванням впливу «людського фактору» та можливих помилок при прийнятті управлінських рішень.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час опис складних систем здійснюється за допомогою відомих математичних методів, які можливо поділити на два класи: дедуктивні та індуктивні [2, 3].

Особливістю дедуктивних математичних методів є те, що дослідник, знаючи природу процесів, які протікають в досліджуваних системах, з використанням аналітичних залежностей (підклас аналітичних математичних методів), з використанням датчиків випадкових чисел (підклас імітаційних математичних методів) розробляє модель системи. В подальшому на основі розробленої моделі системи проводиться дослідження її поведінки і виробляються рекомендації стосовно раціонального управління системою.

Але при відсутності можливості чіткої формалізації процесів, які протікають в складних системах, найчастіше використовуються індуктивні математичні методи, за якими побудова моделі складної системи здійснюється регресійним методом на основі таблиць даних, що містять знання про поведінку системи в минулому. В подальшому модель складної системи використовується для дослідження можливої поведінки складної системи в майбутньому.

Водночас, для підвищення ефективності вирішення завдання управління складною системою, необхідно максимально зменшити вагу людського фактору в ході прийняття важливих рішень. Тобто, на перший план виходять завдання розробки систем підтримки прийняття рішень (СППР), які були б здатні прогнозувати наслідки рішень, що приймаються керівництвом, та надавати рекомендації щодо ефективного курсу розвитку складних систем.

Але ядром подібних СППР має бути модель складної системи, яка дозволить прогнозувати (моделювати) реакцію системи на варіанти впливу на неї, як зовнішніх факторів, так і керівних дій з боку підсистеми управління [4, 5].

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є визначення можливого удосконалення методики побудови складних інерційних систем без їх надлишкового ускладнення.

4. Результати дослідження

Для вирішення поставленого завдання дослідження реакції системи на вплив управлінських рішень пропонується, в свою чергу, використовувати наступну модель прогнозування поведінки складної інерційної системи, алгоритм функціонування якої представлений на рисунку 1.

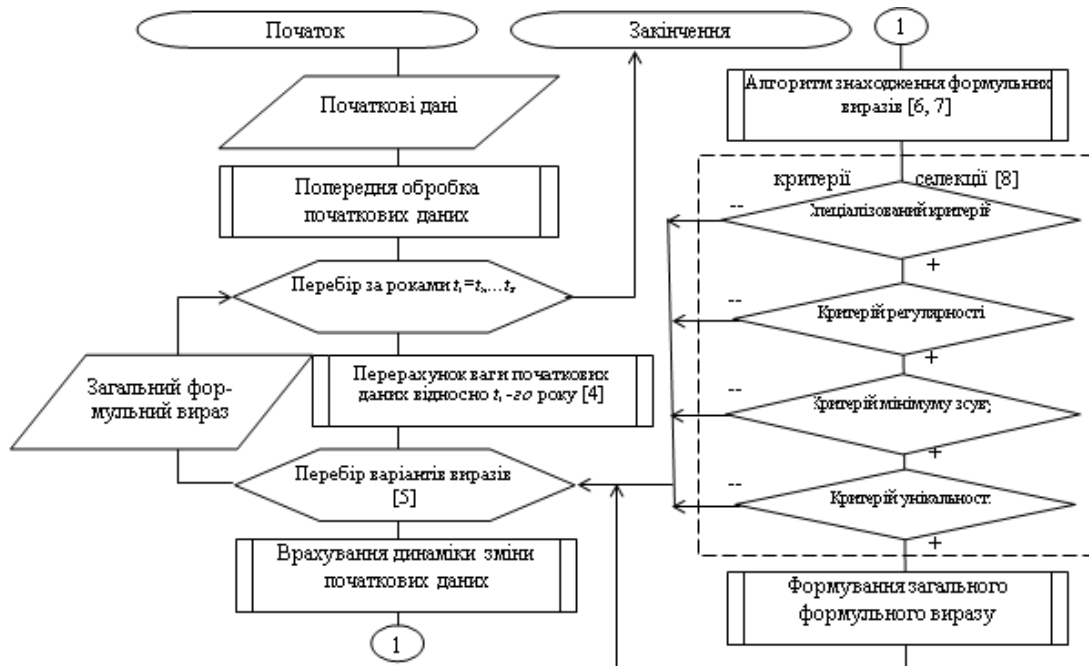


Рис.1. Алгоритм побудови моделей функціонування складної інерційної системи

Складовими алгоритму моделі є:

алгоритм обробки початкових даних, в якому проводиться перерахунок значень показників з урахуванням фактору інерційності, проводиться процес переведення значень показників у безрозмірні величини [4];

алгоритм скорочення перебору варіантів формульних виразів [5], який приводить до значного зменшення розрахунку кількості формульних виразів без втрати точності розрахунків;

алгоритми пошуку формульних виразів n -го ступеня залежності цільової функції від визначеної кількості аргументів [6, 7], що дозволяє будувати систему формульних виразів, які здійснюють опис поведінки складної інерційної системи;

система критеріїв селекції формульних виразів, яка є вирішальним правилом під час побудови системи формульних виразів складної інерційної системи [8].

Для оцінювання ефективності функціонування моделі прогнозування поведінки складної телекомунікаційної системи, необхідно перевірити здатність математичного апарату формувати ефективну модель складної системи. Для цього пропонується обрати рівняння, яке умовно описує поведінку складної системи і на основі результатів деяких прорахунків з використанням заданого формульного виразу відновити закон функціонування складної системи (рівняння 1).

$$y = x_1^3 + x_2^2 + x_3 + 2x_4 + 2x_5^2 \quad (1)$$

Особливістю індуктивних математичних методів є те, що модель складної системи будується регресійним методом на основі таблиць даних, які містять знання про поведінку системи в минулому. В подальшому модель складної системи використовується для дослідження можливої поведінки складної системи в майбутньому.

Нехай необхідно встановити зазначений формульний вираз за даними з наступної таблиці початкових даних.

Таблиця початкових даних

№ з/п	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
1	66	1	2	3	4	5
2	33	2	3	4	5	1
3	58	3	4	5	1	2
4	112	4	5	1	2	3
5	166	5	1	2	3	4
6	26	1	1	2	2	3
7	33	2	2	1	1	3
8	27	1	2	2	1	3

При цьому набір початкових даних повинен бути розділений на навчальну та перевіірочну послідовності. Але з теорії множинності моделей відомо, що за експериментальними даними принципово неможливо відшукати єдину модель. Тобто, для кожної системи за набором відомих даних можливо скласти не єдину, а нескінченну множину моделей. Тому одним з важливих принципів теорії індуктивних методів математичного моделювання є принцип зовнішнього доповнення.

Зовнішнє доповнення - це вимога, що пред'являється однією частиною неоднорідної системи іншій її частині. При цьому відбір моделей проводиться за так званими «зовнішніми критеріями». Критерій називається зовнішнім, якщо його визначення базується на новій інформації (нових даних), які попередньо не використовувалися при синтезі моделі. Але модель повинна бути регулярною, тобто на нових точках вимірювання помилка повинна бути мінімальною. Тому за критерій відбору формульного виразу, який має відновити закон розподілу даних, доцільно обрати наступний критерій регулярності (2).

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (y_i - y_{i\text{табл}})^2}{\sum_{i=1}^{N_B} y_i^2} * 100 \rightarrow \min \quad (2)$$

де: $\Delta^2(B)$ - відносна помилка на безлічі точок N_B ;

y_i - значення вихідної величини в i -ій ($i = 1, 2, \dots, N_B$) точці моделі;

$y_{i\text{табл}}$ - дійсне значення вихідної величини за таблицею досвідних даних.

Величина критерію регулярності обчислюється за даними окремої перевіірочної послідовності. Перевіірочна послідовність використовується для вибору складу, числа членів і ступеня рівняння регресії. Це дозволяє отримати найрегулярніше рішення (оптимальної складності), яке дає невелику помилку на нових точках, що не брали участь в синтезі моделі. Тобто, для отримання найрегулярнішого математичного опису (моделі) в якості критерію селекції пропонується використовувати величину середньоквадратичної помилки, що вимірюється на точках перевіірочної послідовності даних N_B . Чим меншою виявлятиметься помилка, тим більш регулярною визначатиметься модель.

Розділення початкової вибірки на дві послідовності - навчальну та перевіірочну - виконується за допомогою різноманітних прийомів.

Найефективнішим розділенням початкової вибірки даних визнається таке розділення, за яким мінімум критерію більше, ніж при інших розділеннях (мінімаксний і максимінний критерії регулярності). Глибина мінімуму критерію регулярності буде найбільшою, якщо опорна функція обрана оптимальним чином. Оптимальна модель знаходиться за допомогою перебору опорних функцій. Та опорна функція є кращою, яка забезпечує отримання більш глибокого мінімуму критерію селекції.

Водночас, згідно теореми Відроу, оптимальним є розділення таблиці на дві рівні частини. Отже, перебору (по глибині мінімуму або безпосередньо точності прогнозу) підлягають тільки варіанти складу двох рівних множин.

Виходячи з зазначеного, дані таблиці 1 доцільно розподілити наступним чином: перша група - дані за номерами: 1, 3, 5, 7; друга група - дані за номерами: 2, 4, 6, 8.

Саме у визначених діапазонах даних необхідно буде визначити рівняння (1) з урахуванням тактики поступового ускладнення моделі.

Тому розрахунки розпочинаються з формування рівнянь першого ступеня. Характер залежності обирається поліноміальний. В результаті обрахунків одними з найкращих рівнянь, які винайдені моделлю прогнозування поведінки складної інерційної системи, будуть наступні:

$$y_1 = 2.89 + 28.31 * x_1, \quad (3)$$

$$y_{13} = 12 + 28.22 * x_1 - 3.22 * x_3. \quad (4)$$

Результати розрахунків, які отримані з використанням означених рівнянь на перевіірочній та навчальній послідовностях можуть бути зведені до таблиці 2. При цьому відносна помилка на безлічі точок $\Delta^2(B)$ розрахована за допомогою формули (2) з використанням перевіірочної послідовності аргументів виділена в таблиці 2 сірим фоном.

Таблиця 1

Таблиця початкових даних

№ з/п	Рівн. (1)	Рівн. (3)	Рівн. (4)	Рівн. (5)	Рівн. (6)
1	66	31,2	30,56	62,63	58,73
2	33	59,514	55,56	51,41	55,82
3	58	87,828	80,56	63,35	69,42
4	112	116,14	121,7	102,5	87,12
5	166	144,4	146,6	145,6	126,18
6	26	31,2	33,78	33,14	56,71
7	33	59,51	65,22	51,35	68,65
8	27	31,2	33,78	26,91	51,62
$\Delta^2(B)$		0,04	0,035	0,032	0,16

Але для вирішення поставленого завдання пріоритетним є відновлення закону з усіма аргументами, які містяться в рівнянні (1).

Тому загальний формульний вираз, який сформований з використанням побудованих оптимальних формульних виразів, що задовольняють вимогам до точності (формульні вирази, які мають бути застосовані при формуванні загального формульного виразу визначені такими, для яких справедливе обмеження: $tochn \leq 1$) може бути приведений у наступному вигляді (5):

$$y_{\Sigma} = -30.46 + 24.31 * x_1 - 0.92 * x_2 - 0.13 * x_3 + 5.32 * x_4 + 9.95 * x_5 \quad (5)$$

Зазначений формульний вираз за критерієм регулярності на перевіірочній послідовності дає оцінку $\Delta^2_{\Sigma}(B) = 0,032$.

З іншого боку є можливість перевірити функціональність скороченого алгоритму формування загального формульного рівняння, який використовує для формування загального рівняння тільки найбільш точні унікальні рівняння (6), що дозволяє скоротити час формування загального рівняння і скорочує необхідний об'єм пам'яті для запам'ятовування повного набору оптимальних рівнянь:

$$y_{\Sigma y} = 35.35 + 16.43 * x_1 - 4.87 * x_2 - 0.6 * x_3 + 0.22 * x_4 + 3.52 * x_5 \quad (6)$$

Результати розрахунків, які наведені в таблиці 2, свідчать про відповідне значення критерію регулярності на перевіірочній послідовності $\Delta^2_{\Sigma y}(B) = 0,16$.

Але, не зважаючи на високу чутливість даної моделі до «обов'язкових параметрів», особливістю зазначених алгоритмів структур генерації формульних виразів є те, що оптимальне рівняння відкидає велику кількість аргументів, які можуть бути надані в таблицях даних для розрахунків. Причому кількість використаних в оптимальному рівнянні аргументів тим менша, чим більшими є завади, що впливають на вихідний сигнал при проведенні спостережень.

Досвід свідчить, що з підвищенням рівня завад більш імовірними з точки зору критеріїв селекції стають моделі меншого ступеня складності [9]. Але виявлений факт є незадовільним з точки зору визначення оптимальності розроблення складної системи. Факт відкидання відомими методами важливих, з точки зору керівника, аргументів не надає можливості визначення впливу аргументів на цільову функцію і тим самим призводить до хибного уявлення про «неважливість» (а інколи, навіть про «непотрібність») деяких функцій та властивостей складної телекомунікаційної системи.

Таким чином, відомі структури генерації формульних виразів не вирішують проблеми побудови моделі складної системи з врахуванням всіх важливих аргументів, що можуть бути використані при синтезі реальних телекомунікаційних систем. Найчастіше це відбувається внаслідок того, що при побудові моделей складних телекомунікаційних систем відомими індуктивними методами математичного моделювання, як правило, використовуються екстремальні критерії оцінювання якості формульних виразів. Тобто, в результаті підсумкової селекції найкращим формульним виразом вважається такий, що показав найліпший результат за обраним з невеликої кількості параметрів критерієм селекції.

Разом з тим можливість формування моделей складних телекомунікаційних систем з максимальною кількістю аргументів в своєму складі з врахуванням обмеження за граничними критеріями селекції було доведено в попередній публікації [8].

Опис самої методики побудови таких моделей та селекції формульних виразів відносно критеріїв селекції наведено нижче.

Для отримання великої кількості формульних виразів, які б задовольняли вимогам за критеріями селекції, пропонується новий індуктивний метод математичного моделювання - комбінаторний алгоритм з обмеженою базою аргументів, який відрізняється від відомого комбінаторного алгоритму з зануленням коефіцієнтів тим, що в новому методі база аргументів комбінаторного алгоритму обирається не максимальна (включення всіх аргументів), а попередньо обмежується визначеною кількістю аргументів у формульному виразі.

Після формування формульних виразів за визначеними правилами і перевірки кожного розробленого формульного виразу на порогові критерії селекції, пропонується вирази, які задовольнили обраним критеріям, об'єднати з урахуванням точності прогнозування поведінки складної системи єдиним запропонованим формульним виразом.

В результаті групування всіх формульних виразів в один загальний формульний вираз вирішується питання підвищення чутливості моделі складної інерційної системи (є можливість прогнозування поведінки системи при умові більшої кількості факторів, що впливають на систему, врахування більшої кількості важелів управління системою, ієрархічної системи управлінських рішень, що надходять, тощо). Дійсно, в такому випадку разом з підвищенням чутливості моделі очікується падіння точності відображення моделлю загального стану складної системи, яке відбуватиметься через те, що в якості результуючого формульного виразу буде обиратися не найкращий формульний вираз за обраним критерієм селекції, а набір формульних виразів з різноманітними оцінками своїх можливостей за визначеними критеріями селекції (формульні вирази, що задовольнили всім запропонованим граничним значенням відібраних критеріїв селекції).

Проте, після формування формульних виразів за визначеними правилами і перевірки кожного розробленого формульного виразу на граничний критерій селекції, пропонується вирази, які задовольнили критеріям, об'єднати з урахуванням точності, яку кожен формульний вираз показав на перевіірочній послідовності. Узагальнення може проводитись через сумування нормалізованих оцінок формульних виразів. В свою чергу, нормалізація оцінок може здійснюватися з урахуванням оцінок формульних виразів за критеріями селекції аргументів

$$y_i(t)_\Sigma = \sum_k^K C_k y_i(t) \quad (7)$$

де: $y_i(t)$ - оцінка стану системи за i -м формульним виразом; $k = 1..K$ - кількість рівнянь, що обрані за критеріями відбору; C_k - вага рівняння серед обраних рівнянь:

$$C_k = \frac{\sum_{k=1}^K \frac{1 - \Delta_k}{\Delta_\Sigma}}{\Delta_\Sigma} \quad \Delta_\Sigma = \sum_{k=1}^K (1 - \Delta_k)$$

Δ_k - оцінка точності розрахунків, проведених рівнянням на перевіірочній послідовності.

З метою підвищення точності відображення математичною моделлю складної інерційної системи на основі розробленого алгоритму побудови моделі складної системи з використанням комбінаторного методу з обмеженою базою аргументів пропонується ввести додатковий критерій селекції - *критерій унікальності аргументів у складі формульного виразу*. Справа в тому, що, формулюючи загальне рівняння за правилом, запропонованим виразом (7), з кожним менш точним формульним виразом, який залучається до формування загального формульного виразу, падає точність розрахунків загального формульного виразу. Виходячи з цього немає необхідності включати в загальний формульний вираз рівняння, які є менш точними за попередні, або такі, що не мають унікальних аргументів в своєму складі.

Таким чином, алгоритм селекції формульних виразів відносно критеріїв селекції функціонуватиме в два етапи (рис.2). Спочатку кожен варіант формульного виразу перевіряється на відповідність стосовно перших трьох критеріїв селекції (спеціалізованого, критерія мінімального зсуву та критерія регулярності).

На основі критеріїв селекції відібрані формульні вирази ранжуються за критерієм регулярності. На другому етапі виконується формування загального формульного виразу за формулою (7). Особливістю формування загального формульного виразу є те, що відібрані формульні вирази, які ранжовані за критерієм регулярності, послідовно приймають участь в формуванні моделі складної системи. Але якщо наступний за точністю відібраний формульний вираз не має унікальних аргументів, він не застосовується при формуванні загального формульного виразу.

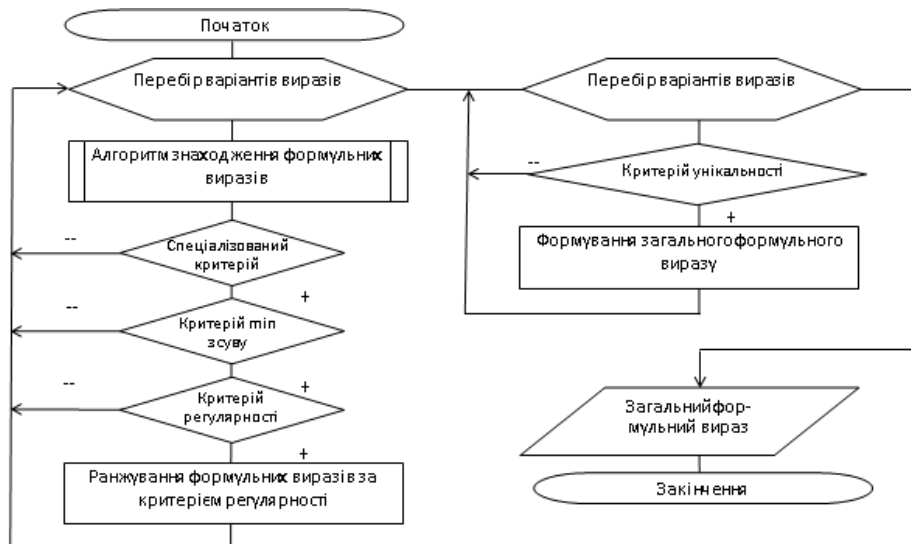


Рис.2. Алгоритм функціонування критеріїв селекції для побудови моделі складної системи

Таким чином, запропонована методика створення моделі складної системи спроможна забезпечити достатню точність (за умови визначення межі точності відповідно завдань дослідження, що проводиться) при умові збереження обов'язкових параметрів, з якої має складатися майбутня модель.

5. Висновки

Запропонована методика побудови моделі складної телекомунікаційної системи за рахунок використання нового алгоритму функціонування критеріїв селекції та критерію унікальності аргументів у складі формульного виразу дозволить уникнути найбільш вагомого недоліку існуючих індуктивних методів математичного моделювання, який полягає в тому, що намагаючись винайти найбільш точну модель функціонування складної системи, відомі методи втрачають параметри, які є важливими для подальших досліджень.

Таким чином, створюється можливість дослідження ефективності функціонування складних телекомунікаційних систем з урахуванням впливу змінного в часі «людського фактору» та обґрунтованості управлінських рішень, що приймаються, без надлишкового ускладнення розроблених моделей.

Список використаної літератури

1. Богданович В. Ю. Спосіб формалізації стратегічного планування у сфері державного управління забезпеченням національної безпеки держави / В. Ю.Богданович, А. І. Семенченко // Стратегічна панорама. – 2006 – №3 – С. 42-53.
2. Букур-Марку Г., Флурі Ф., Тагарєв Т. Оборонний менеджмент: Ознайомлення. – Женева-Київ: ProCon LTD, 2010. – 214 с
3. Биченков В.В. Розроблення системи критеріїв селекції формульних виразів для алгоритму побудови моделі складної системи з використанням комбінаторного методу з обмеженою базою аргументів / В.В. Биченков, В.Ф. Заїка // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, ПолтНТУ, 2014. – №3(31). – С.44-49.
4. Биченков В.В. Алгоритм оптимального перебору формульних виразів комбінаторних алгоритмів з визначеною базою аргументів / Биченков В.В. // Труді університету № 126. – К., 2014. – С. 100 – 107.
5. Anakhov, P., Zhebka, V., Popereshnyak, S., Skladannyi, P., Sokolov, V. Protecting Objects of Critical Information Infrastructure from Wartime Cyber Attacks by Decentralizing the Telecommunications Network / Ceur Workshop Proceedings Open source preview, 2023, 3550, p. 240–245
6. Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. on Automatic Control, 19(6), 716–723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
7. Stepashko, V. S. (2008). Method of Critical Variances as Analytical Tool of Theory of Inductive Modeling. Journal of Automation and Information Sciences, 40(2), 4–22. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v40.i3.20.
8. Brunton, S. L., Proctor, J. L., Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems (SINDy). PNAS, 113(15), 3932–3937. DOI: 10.1073/pnas.1517384113.
9. Linardatos, P., Papastefanopoulos, V., Kotsiantis, S. (2021). Explainable AI: A Review of Machine Learning Interpretability Methods. Entropy, 23(1), 18. DOI: 10.3390/e23010018.