

АЛГОРИТМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТА ПОБУДОВИ ВИСОКОНАДІЙНИХ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

© Бобало Ю. Я., Кіселичник М. Д., Мелень М. В., 2020

Сформульована задача вибору оптимального варіанта комплексної системи контролю високонадійних систем безпроводового зв'язку має два обмеження у вигляді нерівності та є задачею цілочислового програмування. Для її розв'язання запропоновано алгоритм, оснований на ідеях методу гілок і меж, котрий з погляду машинної реалізації є одним із найпростіших.

Цей алгоритм має низку переваг над відомим, найближчим, по суті, алгоритмом, а саме: зміна оцінки затрат на реалізацію КСК дає змогу одразу відсікти неперспективні гілки (гілки, в яких завідомо не виконуються обмеження щодо затрат), що сприяє прискоренню досягнення оптимального рішення, а використання стратегії пошуку “в глибину” дає змогу знайти рішення (якщо воно існує) і за обмежень, що накладаються на час його пошуку і потрібну ємність пам'яті ЕОМ.

Ключові слова: високонадійний; резервування; самовідновлення; комплексна система контролю.

Yu. Ya. Bobalo, M. D. Kiselychnyk, M. V. Melen
Lviv Polytechnic National University

ALGORITHM OF OPTIMAL SETTING SELECTION FOR HIGHLY RELIABLE WIRELESS COMMUNICATION COMPLEX CONTROL SYSTEMS

© Bobalo Yu. Ya., Kiselychnyk M. D., Melen M. V., 2020

The problem of choosing the optimal variant of the complex control system of highly-reliable wireless communication systems has two limitations in the form of inequalities and is a task for integer programming, for the solution of which an algorithm based on the ideas of the method of branches and limits is proposed, which also, in terms of machine realization, is one of the simplest.

This algorithm has a number of advantages over the most closely related known algorithm, namely: the cost estimation change of the implementation of KSK allows to immediately cut off non-promising branches (branches in which the cost-limitation is deliberately not implemented, which helps to accelerate the optimal solution, and the use of the search strategy "In depth" allows to find a solution (if it exists) and with restrictions imposed on the time of its search and the required amount of memory of the computer.

Key words: highly reliable; reservation; self-healing; complex control system.

Вступ

У межах надійнісного проектування високонадійних системи безпроводового зв'язку важливими є обмеження як частоти повторення її відмов, так і відносної тривалості простоїв, які пов'язані із виявленням несправностей, їх локалізацією і відновленням нормального функціонування систе-

ми. В зв'язку із цим оптимізаційну задачу проектування відмовостійкої системи розділяють на дві підзадачі. Перша із них полягає у виборі оптимального рівня резервування цієї системи, а друга, складніша, – у виборі оптимального варіанта комплексної системи контролю (КСК) правильності її функціонування, тобто оптимального поєднання апаратних і програмних методів контролю. Згідно з цим і з показником надійності таких систем [1], мета першої підзадачі – досягнення потрібного рівня безвідмовного функціонування цих систем, а другої – необхідного рівня імовірності перебування їх у працездатному стані. Причому потрібний рівень вказаних імовірностей повинен бути досягнутий із дотриманням обмежень, які накладають на габарити і продуктивність (інформативність) систем.

Зазначимо, що одними із основних труднощів під час проектування високонадійних телекомунікаційних систем є проектування КСК, що являє собою послідовний вибір із множини альтернативних варіантів контролю найприйнятнішого, котрий відповідає наперед поставленим вимогам за мінімальних додаткових затрат.

Аналіз інформаційних джерел з цієї тематики показав, що якщо для розв'язання першої задачі розроблені та продовжують розроблятися достатньо конструктивні різноманітні аналітичні й обчислювальні методи із подальшим застосуванням різних дискретних процедур спрямованого перебору, то про розроблення методів розв'язання другої задачі цього сказати не можна.

Постановка задачі

Один із можливих підходів до побудови КСК передбачає розподіл контрольованої системи на контрольовані модулі й вибір із деякої множини методів контролю кожного модуля по одному. Сукупність вибраних методів повинна якнайкраще відповідати завданню, поставленому перед КСК.

Нехай формальний опис сукупності контрольованих модулів системи бездротового зв'язку і зв'язків між ними задано спрямованим графом без петель і кратних дуг, в якому множина вершин $X = \{x_i, i = \overline{1, k}\}$ відповідає множині контрольованих модулів системи, а дуга u_{ij} відповідає зв'язку виходу i -го модуля із входом j -го.

Для кожної вершини x_i можна задати множину можливих методів контролю цього модуля, які відрізняються один від одного значеннями показника якості контролю (ймовірностями виявлення відмов і збоїв контрольованого модуля) і затратами на їх реалізацію. З урахуванням цього можливі варіанти КСК контрольованого модуля описують матрицею

$$A = \|a_{ij}\|_{k \times q},$$

де i – індекс модуля у надійнісній схемі системи; j – індекс методу контролю правильності функціонування цього модуля; q – кількість методів контролю, які аналізують.

Не завадивши спільності постановки задачі, можна припустити, що кількість можливих методів контролю правильності функціонування i -го модуля однакова для всіх контрольованих модулів системи бездротового зв'язку і дорівнює q , що є найбільшим із кількості розглядуваних методів контролю ($q = \sup(q_i)$).

Показники ефективності засобів контролю і затрати на їх реалізацію задамо матрицями

$$R = \|R_{ij}\|_{k \times q},$$

$$Z_a = \|Z_{aij}\|_{k \times q},$$

$$Z_t = \|Z_{tij}\|_{k \times q},$$

де R_{ij} – показник ефективності контролю i -го модуля j -м методом, Z_{aij} , Z_{tij} – затрати відповідно апаратних засобів і часу (продуктивності) на реалізацію j -го методу контролю правильності функціонування i -го модуля.

Якщо для i -го модуля аналізують q_i методів контролю ($q_i < q$), то $R_{ij} = 0$, а $Z_{aij} = Z_{tij} = \infty$ (або достатньо велике число, наприклад, $Z_{aij} = Z_{a0}$) для всіх методів контролю, що не існують.

Введемо матрицю $Y = \|y_{ij}\|_{k \times q}$, елементи якої набувають значення 1, якщо вибрано j -й метод контролю правильності функціонування i -го модуля. Тоді, враховуючи введені позначення, задачу вибору оптимального варіанта КСК системи безпроводового зв'язку можна сформулювати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} & \text{Знайти } \max \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q R_{ij} y_{ij} \\ & \text{при умовах: } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q Z_{aij} y_{ij} \leq Z_{a0}, \\ & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q Z_{tij} y_{ij} \leq Z_{t0}, \\ & \sum_{j=1}^q y_{ij} = 1, \quad y_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \end{aligned} \quad (1)$$

Отже, задачу вибору оптимального варіанта КСК можна сформулювати так: потрібно із множини методів контролю окремих модулів контрольованої системи вибрати такі методи контролю кожного модуля, для яких досягається заданий рівень показника ефективності КСК за умови виконання заданих обмежень.

Сформульована в такому вигляді задача – це задача цілочислового програмування, для розв'язання якої розроблено алгоритм, оснований на ідеях методу гілок і меж, який з погляду машинної реалізації є одним із найпростіших.

Опис алгоритму

Відомо [2], що у разі використання методу гілок і меж основною є задача визначення способу побудови дерева розв'язання і вибору оцінки для кожного рівня галуження. Дерево рішень будуємо так. На першому рівні всю задачу ділимо на q підзадач: $Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_j^1, \dots, Q_q^1$. Кожна підзадача

Q_j^1 відповідає j -му варіанту контролю правильності функціонування першого модуля. Для кожної вершини Q_j^1 визначаємо верхню оцінку показника ефективності КСК системи бездротового зв'язку (ймовірності перебування контрольованого модуля в працездатному стані) і нижню оцінку затрат. Наступне галуження здійснюємо для вершини дерева з максимальною оцінкою показника ефективності КСК цієї системи.

Розподіл на підзадачі Q_j^2 відповідає j -му варіанту контролю правильності функціонування другого модуля. Для наступних рівнів процес аналогічний.

У запропонованому алгоритмі прийнято стратегію пошуку “в глибину”, тобто рух на наступний рівень і галуження здійснюються по перспективному шляху до досягнення допустимого рішення або вичерпання можливості подальшого просування в глибину. Невідсічені й нерозгалужувані вершини залишаються активними і їх галуження може продовжуватися після порівняння їх оцінок із отриманим рішенням.

Відсікання вершин здійснюється, якщо нижні оцінки затрат на реалізацію засобів контролю перевищують допустимі значення, тобто якщо не виконуються умови, сформульовані в задачі (1),

або у випадку, якщо верхня оцінка показника ефективності КСК нижча від його значення в уже знайденому рішенні.

Як верхню оцінку показника ефективності КСК системи безпроводового зв'язку можна прийняти

$$R^{(0)} = \sum_{i=1}^k \max_j (R_{ij}), \quad j = \overline{1, q},$$

а як нижню оцінку затрат

$$Z_a^{(0)} = \sum_{i=1}^k \min_j (Z_{aij}), \quad j = \overline{1, q}$$

і

$$Z_t^{(0)} = \sum_{i=1}^k \min_j (Z_{tij}), \quad j = \overline{1, q}.$$

На d -му рівні галуження відповідні оцінки можна подати у вигляді

$$R^{(d)} = R_1^{(d)} + R_2^{(d)},$$

$$Z_a^{(d)} = Z_{a1}^{(d)} + Z_{a2}^{(d)},$$

$$Z_t^{(d)} = Z_{t1}^{(d)} + Z_{t2}^{(d)},$$

де $R_1^{(d)}$ – показник ефективності зафіксованого варіанта КСК системи до d -го модуля включно; $Z_{a1}^{(d)}$ і $Z_{t1}^{(d)}$ – затрати апаратури і часу на зафіксовану частину цієї системи; $R_2^{(d)}$ – верхня оцінка показника ефективності КСК для незафіксованих методів контролю правильності функціонування модулів системи, які залишилися; $Z_{a2}^{(d)}$ і $Z_{t2}^{(d)}$ – оцінки мінімальних затрат відповідно апаратури і часу на незафіксовану частину КСК контрольованої системи.

Показник $R_1^{(d)}$ і затрати $Z_{a1}^{(d)}$ та $Z_{t1}^{(d)}$ визначають точно за матрицями відповідно R , Z_a і Z_t . Оцінки $R_2^{(d)}$, $Z_{a2}^{(d)}$ і $Z_{t2}^{(d)}$ визначають аналогічно $R^{(0)}$, $Z_a^{(0)}$ і $Z_t^{(0)}$ згідно із такими виразами:

$$R_2^{(d)} = \sum_{i=d+1}^k \max_j (R_{ij}), \quad j = \overline{1, q},$$

$$Z_{a2}^{(d)} = \sum_{i=d+1}^k \min_j (Z_{aij}), \quad j = \overline{1, q},$$

$$Z_{t2}^{(d)} = \sum_{i=d+1}^k \min_j (Z_{tij}), \quad j = \overline{1, q}.$$

Застосування розглянутого алгоритму обмежене, оскільки в ньому не враховано, що різні методи контролю окремих модулів контрольованої системи можуть бути несумісними один із одним або, інакше кажучи, вибір методу контролю одного модуля системи, як правило, обмежує можливості вибору методів контролю інших, зв'язаних із ним модулів.

Несумісність різних методів контролю взаємозв'язаних модулів системи бездротового зв'язку приводить до зменшення кількості можливих варіантів її КСК. Її можна врахувати під час галуження, виконуючи перевірку на сумісність і відсікаючи вершин, в яких ця умова порушується.

Припустимо, що множину B усіх методів контролю, у яких реалізується КСК контрольованої системи, можна розділити на q непересічних класів

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_q\},$$

$$B_i \cap B_j = \emptyset, \bigcup_{i=1}^q B_i = B.$$

Основними ознаками для їх розподілу повинні бути ознаки, зв'язані з умовами сумісності входів і виходів контрольованих модулів.

Класи методів контролю правильності функціонування модулів системи бездротового зв'язку пронумеруємо числами натурального ряду $N = \{1, 2, \dots, f\}$, а умови сумісності методів контролю задамо матрицею

$$D = \|d_{ij}\|,$$

елементи якої дорівнюють 0 або 1 і утворюються за такими правилами:

1. $d_{ij}=1$, якщо вихід модуля, який контролюють методом i -го класу, допустимо з'єднувати з виходом модуля, який контролюється методом j -го класу, і $d_{ij}=0$ – в іншому випадку.
2. $d_{ii}=1$, тобто методи контролю одного класу завжди сумісні.

Подавши функціональну схему системи бездротового зв'язку, як зазначено вище, у вигляді спрямованого графа, можна записати матрицю суміжності

$$\Gamma = \|\gamma_{ij}\|,$$

де $\gamma_{ij}=1$, якщо дуга графа спрямована із вершини i у вершину j , і $\gamma_{ij}=0$ – в іншому випадку. Крім того, $\gamma_{ii}=0$.

Тепер, якщо на d -му кроці оптимізації зроблено спробу реалізувати контроль правильності функціонування модуля M_d методом b_i , який належить до класу B_i , то крім вибору за критерієм ефективності КСК контрольованої системи і перевірки на допустимі затрати, необхідно виконати перевірку можливості введення цього методу контролю у розв'язання за сумісністю із всіма раніше реалізованими методами контролю модулів, з якими M_d має зв'язки по входу або виходу.

Використовуючи введені позначення, умову сумісності можна записати в такому вигляді:

$$(\forall \overline{M_d} \in B_i) (\forall \overline{M_j} \in B_f) ((\gamma_{dj}=1) \rightarrow (d_{if}=1) \& (\gamma_{jd}=1) \rightarrow (d_{fi}=1)). \quad (2)$$

$d=1, k \qquad j=1, d$

Порушення цієї умови означає відсутність гілки на дереві рішень і припинення руху в глибину в цьому напрямку.

Блок-схему запропонованого алгоритму подано на рисунку.

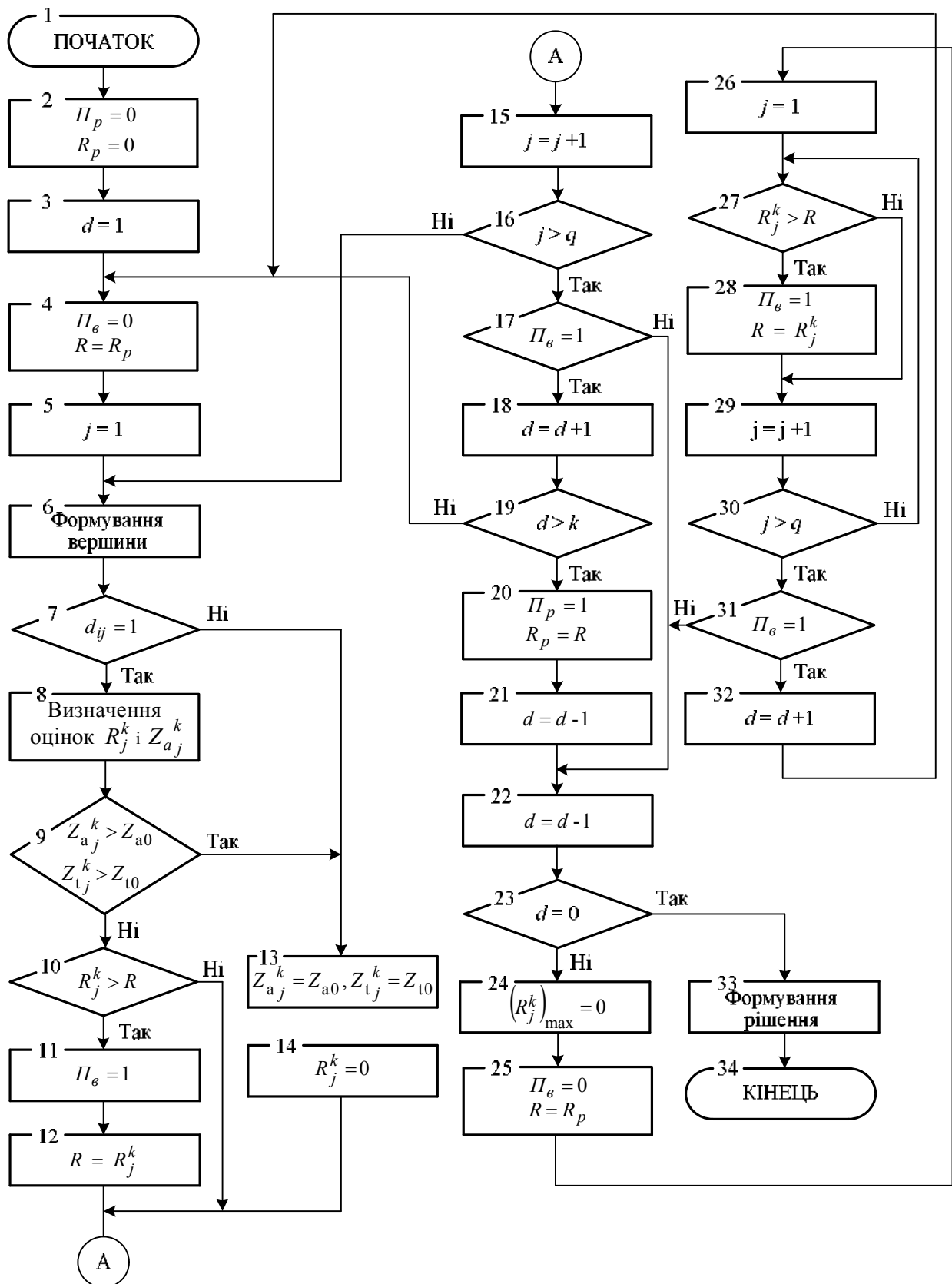
У блоці 1 здійснюють всі підготовчі операції, зв'язані з введенням вхідної інформації та формуванням матриць можливих варіантів КСК системи безпроводового зв'язку (A), показників ефективності методів контролю (R), затрат на їх реалізацію (Z_a і Z_b), сумісності (D) суміжності (Γ).

У блоці 2 встановлюють ознаку наявності рішення і значення цільової функції (показника ефективності КСК системи) таким, що дорівнюють нулю (немає рішення), тобто $Pp=0$ і $Rp=0$ відповідно.

У блоці 3 готують перехід на перший рівень галуження дерева рішень.

У блоці 4 встановлюють ознаку відсутності активної вершини ($Pb=0$) і початкове значення показника ефективності КСК (R) контрольованої системи.

У блоках 5÷14 здійснюються галуження на заданому рівні й вибір перспективного шляху для подальшого галуження. Для цього в блоці 5 встановлюють початковий метод контролю ($j=1$), а в блоці 6 формують вершину дерева на заданому рівні. Потім у блоці 7 перевіряють умову сумісності вибраного методу контролю з уже реалізованою частиною КСК. Якщо умову сумісності порушено, то одразу ж здійснюється перехід до наступного методу контролю. У вершині дерева, яка відповідає неприйнятному методу контролю, встановлюють оцінку ефективності цього методу контролю, що дорівнює нулю, і оцінки затрат, які перевищують допустимі значення (блоки 15 і 16). В іншому випадку для передбачуваного методу контролю визначають оцінки ефективності та затрат (блок 8).



Алгоритм вибору оптимального варіанта комплексної системи контролю високонадійних систем бездротового зв'язку

У блоці 9 перевіряється виконання умов, які зв'язані з допустимими затратами апаратури і часу на реалізацію передбачуваного методу контролю. Аналогічно здійснюється перебір всіх можливих методів контролю d -го рівня.

Якщо в процесі перебору отримано хоча б одне допустиме рішення, то як ознаку $P_{\text{в}}$ наявності активної гілки, із якої можливе продовження рішення, встановлюють одиницю (блок 11).

Описаний процес продовжується аналогічно для кожного модуля (блоки 17, 18) до досягнення рішення або до виникнення тупикової ситуації, у якій подальше галуження неможливе з-за порушення обмежень щодо затрат або умов сумісності (2).

Якщо рішення знайдено, то встановлюють ознаку наявності рішення ($P_r=1$) і фіксують кінцеву вершину на дереві рішень (блоки 20, 21).

У блоках 22÷32 організовано зворотне проходження по дереву рішень з метою пошуку активних нерозгалужуваних вершин і покращення отриманого рішення. Для цього зменшують на одиницю рівень галуження (блок 22) і в цій вершині-попереднику встановлюють оцінку ефективності КСК, яка дорівнює нулю, що запобігає її повторному вибору під час подальшого розгалуження. Найближча знайдена активна вершина розгалужується розглянутим способом, починаючи із блока 4.

Закінчення задачі фіксують за виходом на нульовий рівень, що означає відсутність активних вершин на дереві рішень.

Перелік методів контролю модулів системи, які увійшли в оптимальне рішення, визначається зворотним проходженням від останньої зафіксованої кінцевої вершини до кореня дерева (блок 24). Однак попередньо необхідно перевірити ознаку існування рішення P_r , котра повинна дорівнювати одиниці. Якщо ж вона дорівнює нулю, то це означає, що допустиме рішення не знайдено.

Описаний алгоритм реалізовано мовою S+.

Висновки

У статті запропоновано алгоритм вибору оптимального варіанта КСК системи безпроводового зв'язку, який має низку переваг над відомим, найближчим, по суті, алгоритмом [3]. Зокрема, зміна оцінки затрат на реалізацію КСК дає змогу одразу відсікти неперспективні гілки (гілки, в яких завідомо не виконуються обмеження щодо затрат), що сприяє прискоренню досягнення оптимального рішення, а використання стратегії пошуку “в глибину” дає можливість знайти рішення (якщо воно існує) і за обмежень, що накладаються на час його пошуку і потрібну ємність пам'яті ЕОМ.

Список використаних джерел

1. Мельн М. В., Назарук І. Я. Вибір показника надійності телекомунікаційних високонадійних систем. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей IX Міжнародної наук.-практ. конференції (3–5 жовтня 2018 р., м. Запоріжжя), С. 51–52.
2. Сергиенко І. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. 2-е изд., доп. и перераб. Киев: Наук. думка, 1988, 472 с.
3. Алгоритм выбора оптимального варианта системы контроля ЭВМ / О. Г. Алексеев, В. Ф. Григорьев, В. В. Сафронов, А. И. Субботин. Надёжность и контроль качества, 1980, № 8, С. 31–40.

References

1. Melen M. V., Nazaruk I. Ya. The choice of reliability of telecommunication highly reliable systems. Abstracts of reports of the IX International scientific-practical conference “Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies” (3–5 October 2018, Zaporizhzhya), P. 51–52.
2. Sergienko I. V. Mathematical models and methods for solving discrete optimization problems. 2nd ed., ext. and revised, Kiev: Nauk. dumka, 1988, 472 p.
3. Algorithm for choosing the optimal version of the computer control system / O. G. Alekseev, V. F. Grigoriev, V. V. Safronov, A. I. Subbotin Reliability and quality control, 1980, No. 8, P. 31–40.