

## АЛГОРИТМ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВИСОКО- НАДІЙНИХ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

© Бобало Ю. Я., Кіселичник М. Д., Мелень М. В., 2018

Сформульована задача вибору оптимального варіанта комплексної системи контролю високонадійних систем безпроводового зв'язку має два обмеження у вигляді нерівності. Це задача цілочисельного програмування, для розв'язання якої запропоновано алгоритм, який 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 зразу відсікти неперспективні гілки (гілки, в яких завідомо не виконуються обмеження щодо затрат), що сприяє прискоренню досягнення оптимального розв'язку, а використання стратегії пошуку “в глибину” дає змогу знайти рішення (якщо воно існує) і за обмежень, що накладаються на час його пошуку і потрібний об'єм пам'яті ЕОМ.

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

Yu. Bobalo, M. Kiselychnyk, M. Melen  
Lviv Polytechnic National University

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

© Bobalo Yu., Kiselychnyk M., Melen M., 2018

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 надійнішому проектуванні високонадійних системи безпроводового зв'язку важливим є обмеження як частоти повторення її відмов, так і відносної тривалості простоїв, які пов'язані із виявленням несправностей, їх локалізацією і відновленням нормального функціонування системи.

У зв'язку із цим оптимізаційна задача проектування відмовостійкої системи розпадається 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. Відповідно до цього і згідно з показником надійності таких систем [1] мета першої підзадачі – досягнення потрібного рівня безвідмовного функціонування цих систем, а другої – необхідного рівня імовірності перебування їх в працездатному стані, причому потрібний рівень вказаних імовірностей повинен бути досягнутий з дотриманням обмежень, які накладаються на габарити і продуктивність (інформативність) систем.

Зазначимо, що одним із основних ускладнень у проектуванні високонадійних телекомунікаційних систем є проектування КСК. Це послідовний вибір із множини альтернативних варіантів контролю найприйнятнішого, котрий відповідає наперед встановленим вимогам за мінімальних додаткових затрат.

Аналіз інформаційних джерел з цієї тематики показав, що якщо для розв'язання першої задачі розроблені й продовжують розроблятися достатньо конструктивні різноманітні аналітичні й обчислювальні методи з 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, і сукупність вибраних методів повинна найкраще 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 з входом  $j$ -го.

Для кожної вершини  $x_i$  може бути задана множина можливих методів контролю цього модуля, які відрізняються один від одного значеннями показника якості контролю (ймовірностями виявлення відмов і збоїв контрольованого модуля) і витратами на їх реалізацію. Згідно з цим можливі варіанти КСК контрольованого модуля описують матрицею

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

де  $i$  – індекс модуля в надійнісній схемі системи,  $j$  – індекс методу контролю правильності функціонування цього модуля, а  $q$  – кількість методів контролю, що аналізуються.

Без шкоди для 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 витрати на їх реалізацію задамо матрицями

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

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

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

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 велику кількість, наприклад,  $Z_{aij} = Z_{a0}$ ) для всіх методів контролю, які не існують.

Введемо матрицю  $Y = \left\| y_{ij} \right\|_{k \times q}$ , 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:

$$\text{Знайти } \max \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q R_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

$$\text{за умов: } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q Z_{aij} y_{ij} \leq Z_{a0},$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^q Z_{tij} y_{ij} \leq Z_{t0},$$

$$\sum_{j=1}^q y_{ij} = 1, \quad y_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

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 з виконанням заданих обмежень.

Сформульована в такому вигляді задача – це задача цілочисельного 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 рішення і вибору оцінки для кожного рівня галуження. Дерево рішень будемо так. На першому рівні всю задачу розділяють 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  $Q_j^1$  визначається верхня оцінка показника ефективності КСК системи бездротового зв'язку (ймовірності перебування контрольованого модуля в працездатному стані) й нижня оцінка затрат. Наступне галуження здійснюється для вершини дерева з максимальною оцінкою показника ефективності КСК цієї системи.

Розбиття 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 нероз-

галужувані вершини залишаються активними і їх галуження може продовжуватися після порівняння їх оцінок із отриманим рішенням.

Відсічення вершин здійснюється, якщо нижні оцінки затрат на реалізацію засобів контролю перевищують допустимі значення, тобто якщо не виконуються умови, сформульовані в задачі (1), або 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 для нижньої оцінки 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 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 котрольованої системи.

Показник  $R_1^{(d)}$  і затрати  $Z_{a1}^{(d)}$  та  $Z_{t1}^{(d)}$  визначаються 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 з такими виразами:

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

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

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

Розглянутий алгоритм має обмежене застосування, оскільки в ньому не враховано, що різні методи контролю окремих модулів контрольованої системи можуть бути несумісними один із другим або, інакше кажучи, вибір методу контролю одного модуля системи, як правило, обмежує можливості вибору методів контролю інших зв'язаних з ним модулів.

Несумісність різних методів контролю зв'язаних один з одним модулів системи бездротового зв'язку призводить до зменшення кількості можливих варіантів її КСК і може бути врахована під

час галуження за допомогою перевірки на сумісність і відсікання вершин, в яких ця умова порушується.

Припустимо, що множину  $B$  всіх методів контролю, з яких реалізується КСК контрольованої системи, можна розділити на  $q$  непересічних класів

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

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

Основними ознаками для їх розбиття 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

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

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

1.  $d_{ij} = 1$ , якщо вихід модуля, що контролюється методом  $i$ -го класу, допускається 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 сумісності

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

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

Тепер, якщо на  $d$ -му кроці оптимізації зроблено спробу реалізувати контроль правильності функціонування модуля  $M_d$  методом  $b_i$ , який належить класу  $B_i$ , то, крім вибору за критерієм ефективності КСК контрольованої системи і перевірки на допустимі затрати, необхідно виконувати перевірку можливості введення цього методу контролю в розв'язок 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 у такому вигляді:

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

$d=1, k$                        $j=1, d$

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 здійснюються всі підготовчі операції, які зв'язані із 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  $Z_r$ ), сумісності ( $D$ ) сумісності ( $\Gamma$ ).

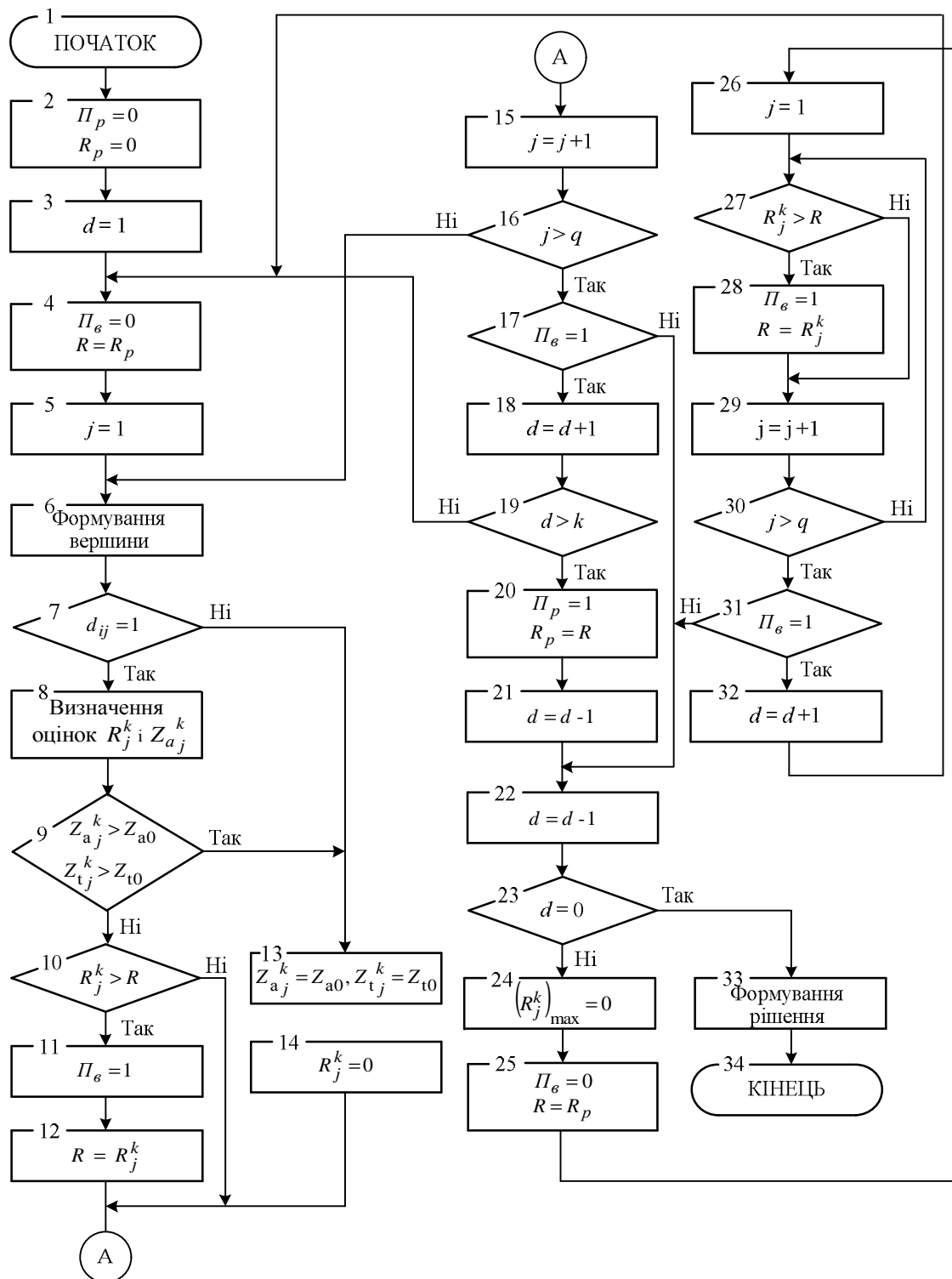
У блоці 2 встановлюють ознаку наявності рішення і значення цільової функції (показника ефективності КСК системи) які дорівнюють нулю (нема рішення), тобто  $Pr = 0$  і  $Rp = 0$  відповідно.

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

У блоці 4 встановлюється ознака відсутності активної вершини ( $Pv = 0$ ) і початкове значення показника ефективності КСК ( $R$ ) контрольованої системи.

В блоках 5 ÷ 14 здійснюється галуження на заданому рівні і вибір перспективного шляху для подальшого галуження. Для цього в блоці 5 встановлюється початковий метод контролю ( $j = 1$ ), а в блоці 6 формується вершина дерева на заданому рівні. Потім в блоці 7 перевіряється умова сумісності вибраного методу контролю з уже реалізованою частиною КСК. Якщо умова сумісності порушується, то одразу ж здійснюється перехід до наступного методу контролю. У вершині дерева, яка відповідає неприйнятному методу контролю, встановлюється оцінка ефективності цього методу

контролю, яка 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 перевіряють виконання умов, пов'язаних із допустимими затратами апаратури і часу на реалізацію передбачуваного методу контролю. Аналогічно здійснюється перебір всіх можливих методів контролю  $d$ -го рівня.

Якщо під час перебору отримано хотя би один допустимий розв'язок, то ознака  $P_e$  наявності активної гілки, із якої можливе продовження розв'язання, встановлюється таким, що дорівнює одиниці (блок 11).

Описаний процес продовжується аналогічно для кожного модуля (блоки 17, 18) до досягнення рішення або до виникнення тупикової ситуації, коли подальше галуження неможливе через порушення обмежень за затратами або умов сумісності (2).

Якщо рішення знайдено, то встановлюється ознака наявності рішення ( $P_r = 1$ ) і фіксується кінцева вершина на дереві рішень (блоки 20, 21).

В блоках 22 ÷ 32 організовано зворотне проходження по дереву рішень з метою пошуку активних нерозгалужуваних вершин і покращення отриманого рішення. Для цього зменшується на одиницю рівень галуження (блок 22) і в цій вершині попереднику встановлюється оцінка ефективності КСК нуль, що запобігає її повторному вибору під час подальшого розгалуження. Найближча знайдена активна вершина розгалужується за розглянутим способом, починаючи з 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 треба 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

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 за затратами), 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 потрібний об'єм пам'яті ЕОМ.

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